CLIMATE CHANGE
22/2025

Endbericht

Angewandte Forschungsfragen zum Ausbau von Windenergie auf See

Potential durch Mehrfachnutzung von Flächen

von:

Merle Heyken, Dorothee Ellerhorst, Anna-Kathrin Wallasch, Dr. Dennis Kruse
Deutsche WindGuard GmbH, Varel

Julika Voß, Dr. Miriam Brandt, Karoline Hots, Dr. Franziska Bils, Ansgar Diederichs
BioConsult SH GmbH & Co. KG, Husum

Franziska Stamme, Victoria Vogt, Johannes Graetschel
IKEM – Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V., Berlin

Prof. Dr. Gary S. Schaal, Dr. Sebastian Dumm
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, Hamburg

Herausgeber:
Umweltbundesamt

Für Mensch & Umwelt

Umwelt Bundesamt

CLIMATE CHANGE 22/2025

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3721 43 501 0

FB001695

Endbericht

Angewandte Forschungsfragen zum Ausbau von Windenergie auf See

Potential durch Mehrfachnutzung von Flächen

von

Merle Heyken, Dorothee Ellerhorst, Anna-Kathrin Wallasch,
Dr. Dennis Kruse
Deutsche WindGuard GmbH, Varel

Julika Voß, Dr. Miriam Brandt, Karoline Hots, Dr. Franziska Bils, Ansgar Diederichs
BioConsult SH GmbH & Co. KG, Husum

Franziska Stamme, Victoria Vogt, Johannes Graetschel
IKEM – Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V., Berlin

Prof. Dr. Gary S. Schaal, Dr. Sebastian Dumm
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, Hamburg

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber
Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:
Deutsche WindGuard GmbH
Oldenburger Straße 65 A
26316 Varel

BioConsult SH GmbH & Co. KG
Schobüller Straße 36
25813 Husum

IKEM – Institut für Energie, Klimaschutz und Mobilität e.V.
Magazinstraße 15 – 16
10179 Berlin

Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
Holstenhofweg 85
22043 Hamburg

Abschlussdatum:
Juni 2024

Redaktion:
Fachgebiet V 1.3 Erneuerbare Energien
Mirjam Müller

DOI:
https://doi.org/10.60810/openumwelt-7660

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, April 2025

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Windenergie auf See – Potential durch Mehrfachnutzung von Flächen

Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens wurde das Potential für die Windenergienutzung auf See in Deutschland auf Basis des Raumordnungsplans 2021 eingeschätzt und Chancen und Herausforderungen einer potentiellen Mehrfachnutzung von Flächen gemeinsam mit anderen Nutzungsformen untersucht. Es erfolgte eine Einschätzung der zusätzlichen Potentiale, die sich hierdurch ergeben könnten, insbesondere im Hinblick auf eine mögliche Mehrfachnutzung mit der Landes- und Bündnisverteidigung, der Fischereiforschung und weiteren erneuerbaren Energien.

Insgesamt schaffen die rechtlichen Grundlagen der Mehrfachnutzung aus dem Raumordnungs- und Fachplanungsrecht keine Anreize für die Mehrfachnutzung von Flächen, ermöglichen sie aber gleichwohl. Nur im Einzelfall wird eine Mehrfachnutzung festgelegt. Die für die Verteidigung festgelegten Flächen bilden das operative Minimum, das notwendig für die Erhaltung der Landes- und Bündnisverteidigung ist. Ein Potential zur Mehrfachnutzung mit der Offshore-Windenergie ist gegenwärtig nicht gegeben. Eine Mehrfachnutzung von Offshore-Windenergie und Fischereiforschung ließe sich durch sorgfältigen Austausch vorab und Planungen bzgl. der Bedarfe umsetzen, geringfügige zusätzliche Potentiale für die Offshore-Windenergie könnten sich ergeben. Durch hybride Energieerzeugungskonzepte könnten die Flächen von Offshore-Windparks um schwimmende PV- oder Wellenenergieanlagen ergänzt und somit das Erzeugungspotential der Fläche erhöht werden. In Bezug auf die Meeresumwelt wurden bei allen drei Mehrfachnutzungsoptionen die jeweiligen möglichen kumulativen Effekte beschrieben. Um die negativen Umweltauswirkungen zu minimieren, könnten nach dem aktuellen Stand der Forschung verschiedene technische Optionen eingesetzt werden.

Abstract: Offshore wind energy - potential through multi-use of areas

This project has assessed the potential for offshore wind energy deployment in Germany on the basis of the 2021 spatial development plan. In addition, the opportunities and challenges as well as the additional potential for offshore wind energy that could result from the multi-use of areas with other uses were to be examined, in particular with national and alliance defence, fisheries research and other renewable energies.

Overall, the legal basis for multi-use under spatial planning and sectoral planning law does not generally encourage multi-use of areas, but nevertheless allows it. Multi-use is only specified in individual cases. The areas specified for defence constitute the operational minimum necessary to maintain national and alliance defence. There is currently no potential for multi-use with offshore wind energy. Multi-use of offshore wind energy and fisheries research could be implemented through careful exchange in advance and planning with regard to requirements; additional potential for offshore wind energy could arise. Hybrid energy generation concepts could be used to supplement the areas of offshore wind farms with floating PV or wave energy systems and thus increase the generation potential of the area. With regard to the marine environment, the respective potential cumulative effects were described for all three multi-use options. According to the current state of research, various technical options could be used to minimise the negative environmental impacts.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis 13
Tabellenverzeichnis 15
Abkürzungsverzeichnis 18
Zusammenfassung 20
Summary 25
1 Einleitung 30
2 Potentiale für Windenergie auf See auf Basis des Raumordnungsplans 2021 31
2.1 Flächenpotential 32
2.2 Gesamtleistung 33
2.3 Ertragspotential 37
2.3.1 Aktueller Forschungsstand zu großräumigen Abschattungseffekten zwischen Offshore-Windparks in der Nordsee 37
2.3.1.1 Windpark-Fernfeld – WIPAFF (2015-2019) 38
2.3.1.2 Agora Energiewende (2018-2020) 38
2.3.1.3 X-Wakes (2019-2023) 39
2.3.1.4 Global Blockage Effect in Offshore Wind OWA (2021-2023) 39
2.3.1.5 IWES-Begleitgutachten i.A. des BSH (2023/2024) im Rahmen der Fortschreibung des Flächenentwicklungsplans 40
2.3.1.6 IWES-Potentialanalysen unter Beachtung von Co-Nutzungspotential i.A. des BWO und BDEW (2022) 40
2.3.1.7 RWE/DNV-Studie zu Auswirkungen weitläufiger Abschattungseffekten durch Windpark-Cluster (2023) 40
2.3.2 Vorgehensweise zur Abschätzung des Ertragspotentials 41
2.3.3 Eingangsparameter und Grundannahmen der modellbasierten Abschätzung des Ertragspotentials 43
2.3.3.1 Leistungsdichte und Gesamtleistung 43
2.3.3.2 Spezifische Flächenleistung 43
2.3.3.3 Overplanting 46
2.3.3.4 Windgeschwindigkeiten 46
2.3.3.5 Überblick Szenarien 47
2.3.4 Ertragspotentialermittlung für die deutsche AWZ der Nordsee 48
2.4 Einschätzung der Ergebnisse der Potentialermittlung auf Basis des Raumordnungsplans 2021 52
2.4.1 Einschätzung des Windenergiepotentials 52
2.4.2 Grenzen der Untersuchung 53

2.4.3 Weiterer Untersuchungsbedarf ... 53

3 Rechtswissenschaftliche Analyse: Rechtliche Grundlagen der Mehrfachnutzung von Windenergie auf See mit anderen maritimen Nutzungen ... 55

3.1 Chancen und Herausforderungen für Mehrfachnutzungen bei planerischen Festlegungen im Raumordnungsrecht ... 56

3.1.1 Mehrfachnutzung als planerische Festlegung ... 57

3.1.2 Festlegung überschneidender Vorbehaltsgebiete (als Grundsätze der Raumordnung) ... 58

3.1.3 Festlegung überschneidender Vorranggebiete (als Ziele der Raumordnung) ... 59

3.1.4 Festlegung überschneidender Vorrang- mit Vorbehaltsgebieten (als Ziele und Grundsätze der Raumordnung) ... 60

3.1.5 Zwischenergebnis ... 61

3.2 Mehrfachnutzung in der Fachplanung des WindSeeG ... 62

3.2.1 Verfügbare Flächen für die Fachplanung zur Ausweisung von Flächen und Gebieten ... 63

3.2.1.1 Zulässigkeit von Gebietsfestlegungen im FEP außerhalb der im ROP 2021 festgelegten Vorbehalts- und Vorranggebiete Windenergie ... 63

3.2.1.2 Zulässigkeit von Gebietsfestlegungen im FEP in Vorbehalts-/Vorranggebieten anderer Nutzung oder Funktion als Windenergie ... 64

3.2.1.3 Zulässigkeit von Gebietsfestlegungen durch Zielabweichungsverfahren im Vorentwurf des FEP vom 1.9.2023 ... 65

3.2.1.4 Zwischenergebnis ... 66

3.2.2 Chancen und Herausforderungen bei der Festlegung von Flächen und Gebieten im FEP nach dem WindSeeG ... 66

3.2.2.1 Erfordernisse der Raumordnung, § 5 Abs. 3 S. 2 Nr. 1 WindSeeG ... 67

3.2.2.2 Gefährdung der Meeresumwelt, § 5 Abs. 3 S. 2 Nr. 2 WindSeeG ... 67

3.2.2.3 Beeinträchtigung der Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs, § 5 Abs. 3 S. 2 Nr. 3 WindSeeG ... 68

3.2.2.4 Beeinträchtigung der Landes- und Bündnisverteidigung, § 5 Abs. 3 S. 2 Nr. 4 WindSeeG ... 68

3.2.2.5 Ausgewiesene Schutzgebiete nach § 57 BNatSchG, § 5 Abs. 3 S. 2 Nr. 5 WindSeeG ... 68

3.2.2.6 Öffentliche und private Belange nach § 5 Abs. 3 S. 1 WindSeeG ... 71

3.2.3 Wirkung auf die nachfolgende Planungsebene ... 72

3.2.4 Mehrfachnutzung im weiteren Planungs- und Zulassungsverfahren für Windenergieanlagen auf See ... 73

3.2.5 Zwischenergebnis ... 73

3.3 Kompensationsmaßnahmen im Kontext von Windenergieanlagen auf See und Mehrfachnutzung ... 74

3.3.1 Grundlagen zur naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung ... 74

3.3.2 Ausgleichs- und Ersatzregime bei der Errichtung und dem Betrieb von Windenergieanlagen auf See ... 76
3.3.3 Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen bei Mehrfachnutzung durch Windenergie auf See und Fischerei ... 78
3.3.4 Naturschutzrechtliches Kompensationsregime im Kontext anderer Nutzungen als Windenergie auf See ... 80
3.3.5 Exkurs: Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie im Kontext naturschutzrechtlicher Vorgaben ... 81
3.3.6 Zwischenergebnis ... 84
3.4 Ergebnis und Bewertung ... 84
4 Überblick Meeresumwelt ... 88
4.1 Überblick über anthropogene Wirkfaktoren (außer OWE) auf die Schutzgüter in der deutschen AWZ ... 88
4.1.1 Biotope am Meeresboden ... 93
4.1.2 Fische ... 93
4.1.3 Marine Säugetiere ... 95
4.1.4 See- und Rastvögel ... 96
4.2 Beschreibung spezifischer Auswirkungen von Bau, Betrieb und Rückbau von OWEAs auf die Meeresumwelt in der deutschen AWZ ... 97
4.2.1 Sandbänke und Riffe ... 103
4.2.2 Fische ... 106
4.2.3 Marine Säugetiere ... 108
4.2.4 See- und Rastvögel ... 110
4.3 Überblick technischer Optionen zur Minderung negativer Umweltwirkungen bei Bau, Betrieb und Rückbau von OWPs ... 113
4.3.1 Technische Optionen, um Schallemissionen während der Bau-, Betriebs- und Rückbauphase zu reduzieren ... 113
4.3.2 Technische Optionen zur Minderung des Kollisionsrisikos von Vögeln ... 122
4.3.3 Technische Optionen, um negative Auswirkungen auf Lebensräume und benthische Gemeinschaften zu reduzieren ... 127
4.4 Beschreibung kumulativer Effekte ... 132
5 Auswahl von Mehrfachnutzungsoptionen ... 134
5.1 Schifffahrt ... 134
5.2 Leitungen ... 137
5.3 Rohstoffgewinnung ... 138
5.4 Fischerei ... 140
5.5 Fischereiforschung ... 142

5.6 Landes- und Bündnisverteidigung 143
5.7 Hybride Energieerzeugung 150
5.8 Beispiel: „Flächenpass“ für niederländische Offshore-Windparks 151
5.9 Übersicht zur Flächennutzung und Auswahl von Mehrfachnutzungsoptionen für die weitere Analyse 153
6 Vertiefte Analyse: Mehrfachnutzung Landes- und Bündnisverteidigung und Offshore-Windenergie 156
6.1 Ausgangsbedingungen im Hinblick auf die potentielle Mehrfachnutzung 157
6.2 Einschätzung der derzeitigen Potentiale 160
6.3 Potentialperspektiven einer Mehrfachnutzung 162
6.3.1 Potentialperspektive 1: Verbesserung des Lagebildes durch Nutzung von Windenergieanlagen (Mehrnutzen für LV/BV durch Mehrfachnutzung) 162
6.3.2 Potentialperspektive 2: Stärkung der interministeriellen und zivil-militärische Kooperation 163
6.3.3 Potentialperspektive 3: Neue Technik, neue Übungsflächen 165
6.4 Rechtliche Einordnung: Schutz maritimer kritischer Infrastruktur und militärische Sensorik 167
6.4.1 Schutz maritimer kritischer Infrastruktur 167
6.4.1.1 Verantwortlichkeit des Anlagenbetreibers 168
6.4.1.2 Verantwortlichkeit der Sicherheitsbehörden 169
6.4.1.3 Maritime Sicherheit auf internationaler Ebene 171
6.4.2 Aktueller Rechtsrahmen für das Anbringen militärischer Sensorik an Windenergieanlagen auf See: Pflichten des Betreibers nach dem WindSeeG und dem FEP 171
6.4.3 Fazit 173
6.5 Analyse Meeresumwelt 174
6.5.1 Potentielle Wirkfaktoren der Nutzungsform „LV/BV“ als Einfachnutzung auf die Meeresumwelt 175
6.5.2 Potentielle kumulative Effekte von OWE und der Nutzungsform „LV/BV“ als Mehrfachnutzung auf die Meeresumwelt 181
6.5.3 Potentielle kumulative Umwelteffekte auf einer Referenzfläche durch die Mehrfachnutzung mit „LV/BV“ 182
6.5.4 Bewertung technischer Optionen zur Minderung negativer Umweltwirkungen durch Mehrfachnutzung mit „LV/BV“ 183
7 Vertiefte Analyse: Mehrfachnutzung Fischereiforschung und Offshore-Windenergie 184
7.1 Ausgangsbedingungen im Hinblick auf die potentielle Mehrfachnutzung 184
7.2 Einschätzung der Potentiale 187

7.2.1 Überprüfung des Einflusses der Bedarfe für die Fischereiforschung auf der Fläche O-2.2 ... 187
7.2.2 Berechnung des zusätzlichen Potentials in der Nordsee ... 190
7.3 Rechtliche Einordnung: Maßnahmen zur Vereinbarkeit von Fischereiforschung im Windgebiet O-2.2 ... 192
7.3.1 Erfordernis eines eigenverantwortlichen Austausches der Nutzungen ... 192
7.3.2 Rechtsschutzmöglichkeiten ... 193
7.3.3 Fazit ... 194
7.4 Analyse Meeresumwelt ... 195
7.4.1 Potentielle Wirkfaktoren der Nutzungsform „Fischereiforschung“ als Einfachnutzung auf die Meeresumwelt ... 195
7.4.2 Potentielle kumulative Effekte von OWE und der Nutzungsform „Fischereiforschung“ als Mehrfachnutzung auf die Meeresumwelt ... 201
7.4.3 Potentielle kumulative Umwelteffekte auf einer Referenzfläche durch die Mehrfachnutzung mit „Fischereiforschung“ ... 208
7.4.4 Bewertung technischer Optionen zur Minderung negativer Umweltwirkungen durch Mehrfachnutzung mit „Fischereiforschung“ ... 209
8 Vertiefte Analyse: Hybride Energieerzeugung ... 210
8.1 Potentielle Energieerzeugungsformen zur Mehrfachnutzung mit Offshore-Windenergie 210
8.1.1 Schwimmende PV-Anlagen ... 210
8.1.1.1 Erhöhte-Plattform-Konzept ... 212
8.1.1.2 Ponton-Konzept ... 213
8.1.1.3 Membran-Konzept ... 213
8.1.2 Wellenenergie ... 214
8.1.2.1 Punktabsorber ... 215
8.1.2.2 Attenuatoren ... 216
8.1.2.3 Oszillierende Wassersäule ... 217
8.1.2.4 Rotierende Masse ... 217
8.1.3 Algenanbau zur Gewinnung von Biokraftstoffen ... 218
8.2 Ausgangsbedingungen im Hinblick auf die potentielle Mehrfachnutzung ... 220
8.3 Einschätzung der Potentiale ... 222
8.3.1 Ertragspotential für Windenergie auf See und Solarenergie ... 228
8.3.2 Ertragspotential für Windenergie auf See und Wellenenergie ... 231
8.4 Rechtliche Einordnung: Regelungsregime und Netzanbindung(skapazität) von Windenergie auf See mit anderen EE-Anlagen (hybride Energieerzeugung) ... 235
8.4.1 Raumordnungs- und Fachplanungsrecht für Mehrfachnutzung von Windenergie und anderen EE-Anlagen ... 236

8.4.2 Mehrfachnutzung unter dem neuen Testfeldbegriff ... 236
8.4.3 Genehmigungsregime für andere EE-Anlagen auf See als Windenergieanlagen ... 237
8.4.3.1 Wellenkraftwerke ... 238
8.4.3.2 Floating-PV-Anlagen ... 240
8.4.3.3 Algenanbau ... 240
8.4.4 Rechtsrahmen der Netzanbindung(skapazitäten) für andere EE-Anlagen als Windenergieanlagen auf See ... 241
8.4.4.1 Das Rechtsregime für die Netzanbindung von EE-Anlagen auf See ... 241
8.4.4.2 Netzanbindungskapazitäten im Anwendungsbereich des WindSeeG ... 242
8.4.5 Fazit ... 243
8.5 Analyse Meeresumwelt ... 245
8.5.1 Schwimmende PV-Anlagen ... 245
8.5.1.1 Potentielle Wirkfaktoren der Nutzungsform „Photovoltaik“ als Einfachnutzung auf die Meeresumwelt ... 245
8.5.1.2 Potentielle kumulative Effekte von OWE und der Nutzungsform „Photovoltaik“ als Mehrfachnutzung auf die Meeresumwelt ... 251
8.5.1.3 Potentielle kumulative Umwelteffekte auf einer Referenzfläche durch die Mehrfachnutzung mit „Photovoltaik“ ... 253
8.5.1.4 Bewertung technischer Optionen zur Minderung negativer Umweltwirkungen durch Mehrfachnutzung mit „Photovoltaik“ ... 255
8.5.2 Wellenenergie ... 255
8.5.2.1 Potentielle Wirkfaktoren der Nutzungsform „Wellenenergie“ als Einfachnutzung auf die Meeresumwelt ... 256
8.5.2.2 Potentielle kumulative Effekte von OWE und der Nutzungsform „Wellenenergie“ als Mehrfachnutzung auf die Meeresumwelt ... 263
8.5.2.3 Potentielle kumulative Umwelteffekte auf einer Referenzfläche durch die Mehrfachnutzung mit „Wellenenergie“ ... 265
8.5.2.4 Bewertung technischer Optionen zur Minderung negativer Umweltwirkungen durch Mehrfachnutzung mit „Wellenenergie“ ... 267
8.5.3 Biokraftstoff aus Algen ... 268
8.5.3.1 Potentielle Wirkfaktoren der Nutzungsform „Biokraftstoff aus Algen“ als Einfachnutzung auf die Meeresumwelt ... 268
8.5.3.2 Potentielle kumulative Effekte von OWE und der Nutzungsform „Biokraftstoff aus Algen“ als Mehrfachnutzung auf die Meeresumwelt ... 274
8.5.3.3 Potentielle kumulative Umwelteffekte auf einer Referenzfläche durch die Mehrfachnutzung mit „Biokraftstoff aus Algen“ ... 277
8.5.3.4 Bewertung technischer Optionen zur Minderung negativer Umweltwirkungen durch Mehrfachnutzung mit „Biokraftstoff aus Algen“ ... 278

9 Fazit: Potentiale durch Mehrfachnutzung 279
10 Quellenverzeichnis 282
A Anhang 315
A.1 Übersicht Definitionen 315
A.2 Interviewleitfaden für die vertiefte Analyse von Mehrfachnutzungsoptionen – Landes- und Bündnisverteidigung 317
A.3 Interviewleitfaden für die vertiefte Analyse von Mehrfachnutzungsoptionen – Fischereiforschung 318
A.4 Interviewleitfaden für die vertiefte Analyse von Mehrfachnutzungsoptionen – Hybride Energieerzeugung 319
A.5 Analyse Meeresumwelt: Beschreibung der Referenzfläche 320
A.5.1 Referenzfläche in der Nordsee 320
A.5.2 Referenzfläche in der Ostsee 322
A.6 Beispielwindparklayout 326
A.7 Standorte für EE-Anlagen in einem Beispielwindparklayout 328

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vorgehen Potentialanalyse ... 32
Abbildung 2: Festlegungen für Windenergie im Raumordnungsplan 2021 ... 33
Abbildung 3: Ausbauziele für Windenergie auf See ... 34
Abbildung 4: Schematische Übersicht der Funktionsweise des KEBA-Modells ... 41
Abbildung 5: Entwicklung von Offshore-Windenergieanlagen ... 45
Abbildung 6: Leistungskennlinien ... 46
Abbildung 7: Energieertrag Nordsee in Abhängigkeit von der Gesamtnennleistung und der Windparkauslegung ... 50
Abbildung 8: Energiedichte und Volllaststunden in Abhängigkeit von Leistungsdichte und Rotordichte ... 51
Abbildung 9: Sensitivitätsanalyse Anlagenparameter ... 52
Abbildung 10: Festlegungen für Schifffahrt im Raumordnungsplan 2021 ... 134
Abbildung 11: Schiffsverkehrsdichte in deutscher Nord- und Ostsee im Jahr 2022 ... 135
Abbildung 12: Festlegungen für Leitungen im Raumordnungsplan 2021 ... 137
Abbildung 13: Festlegungen für Rohstoffgewinnung im Raumordnungsplan 2021 ... 139
Abbildung 14: Festlegungen für Fischerei im Raumordnungsplan 2021 ... 141
Abbildung 15: Festlegungen für Forschung im Raumordnungsplan 2021 ... 143
Abbildung 16: Festlegungen für Landes- und Bündnisverteidigung im Raumordnungsplan 2021 ... 144
Abbildung 17: NATO A2AD Environment ... 147
Abbildung 18: Technologien für erneuerbare Offshore-Energien ... 150
Abbildung 19: „Flächenpass“ mit Mehrfachnutzungsbereichen für das Windenergiegebiet Borssele ... 152
Abbildung 20: Übersicht Festlegungen im Raumordnungsplan 2021 ... 153
Abbildung 21: Festlegungen für Landes- und Bündnisverteidigung und Windenergie im Raumordnungsplan 2021 ... 157
Abbildung 22: Festlegungen für Forschung und Windenergie im Raumordnungsplan 2021 ... 184
Abbildung 23: Darstellung Forschungsaktivitäten im Überlappungsbereich der Windenergie-Fläche O-2.2 mit dem Vorbehaltsgebiet Forschung FoO3 ... 186
Abbildung 24: Exemplarisches Windparklayout O-2.2 mit OWEA 15 MW ... 188
Abbildung 25: Exemplarisches Windparklayout O-2.2 mit OWEA 18 MW ... 189
Abbildung 26: Exemplarisches Windparklayout O-2.2 mit OWEA 22 MW ... 189
Abbildung 27: Zusätzliches Potential durch Mehrfachnutzung auf der Fläche FoN3 (exklusiver Flächenanteil) in der Nordsee ... 191
Abbildung 28: Konzept SolarDuck ... 213
Abbildung 29: Konzept Oceans of Energy ... 213
Abbildung 30: Konzept Ocean Sun ... 214
Abbildung 31: Weltweit installierte Wellenenergiekapazität ... 215

Abbildung 32: Funktionsprinzip eines Punktabsorbers 216
Abbildung 33: Konzept Mocean Energy Blue X im European Marine Energy Centre EMEC 217
Abbildung 34: Technische Zeichnung des Penguin von Holvi Oy 218
Abbildung 35: Globale Produktion von Biomasse aus Makroalgen 219
Abbildung 36: Makroalgen-Produktionsmethoden in Europa (Anteil nach der Anzahl der Unternehmen, die diese Methoden anwenden) 219
Abbildung 37: Leistungsdauerlinien Offshore-Windenergie für Variationen der Leistungsdichte 224
Abbildung 38: Leistungsdauerlinien Offshore-Windenergie für Variationen der spezifischen Flächenleistung 225
Abbildung 39: Szenarien für eine Flächenanalyse für hybride Energieerzeugung auf einer generischen Windparkfläche (100km²) 226
Abbildung 40: Mögliche Standorte für hybride Energieerzeugung in einem generischen Windpark bei unterschiedlicher Flächenausnutzungen (OWEA 18MW) 227
Abbildung 41: Monatliche Einspeisung eines Beispiel-Hybridparks (1.008 MW Windenergie und 191 MW PV-Leistung) und sich ergebende Leistungsdauerlinie im Vergleich zu einem reinen Offshore-Windpark (Bezugsjahr 2006) 230
Abbildung 42: Einspeiseverlauf für einen Beispiel-Hybridpark (1.008 MW Windenergie und 191 MW PV-Leistung) übers Jahr und im Vergleich zur Netzanbindungskapazität sowie detaillierter am Beispiel der Monate Juli und Dezember (Bezugsjahr 2006) 231
Abbildung 43: Tagesmittelwerte der Wellenenergie am Standort FINO 1 im Jahr 2018 233
Abbildung 44: Häufigkeitsverteilung der Wellenhöhen (Hm0) im Jahr 2018 am Standort FINO 1 234
Abbildung 45: Die deutsche AWZ in der Nordsee mit ihren fünf Zonen, sowie OWE (geplant, in Betrieb) 320
Abbildung 46: Die deutsche AWZ in der Ostsee mit den Gebieten für Fischereiforschung, sowie OWE (geplant, genehmigt, im Bau, in Betrieb und im FEP) 323
Abbildung 47: Fläche zur hybriden Energieerzeugung auf einer generischen Windparkfläche (100km²) mit OWEA 15 MW 326
Abbildung 48: Fläche zur hybriden Energieerzeugung auf einer generischen Windparkfläche (100km²) mit OWEA 18 MW 326
Abbildung 49: Fläche zur hybriden Energieerzeugung auf einer generischen Windparkfläche (100km²) mit OWEA 22 MW 327
Abbildung 50: Verteilung von Standorten für hybride Energieerzeugung in einem generischen Windpark mit 15 MW OWEA und maximaler Flächennutzung 328

Abbildung 51: Verteilung von Standorten für hybride Energieerzeugung in einem generischen Windpark mit 15 MW OWEA und mittlerer Flächennutzung 328
Abbildung 52: Verteilung von Standorten für hybride Energieerzeugung in einem generischen Windpark mit 15 MW OWEA und minimaler Flächennutzung 329
Abbildung 53: Verteilung von Standorten für hybride Energieerzeugung in einem generischen Windpark mit 18 MW OWEA und maximaler Flächennutzung 330
Abbildung 54: Verteilung von Standorten für hybride Energieerzeugung in einem generischen Windpark mit 18 MW OWEA und mittlerer Flächennutzung 330
Abbildung 55: Verteilung von Standorten für hybride Energieerzeugung in einem generischen Windpark mit 18 MW OWEA und minimaler Flächennutzung 331
Abbildung 56: Verteilung von Standorten für hybride Energieerzeugung in einem generischen Windpark mit 22 MW OWEA und maximaler Flächennutzung 332
Abbildung 57: Verteilung von Standorten für hybride Energieerzeugung in einem generischen Windpark mit 22 MW OWEA und mittlerer Flächennutzung 332
Abbildung 58: Verteilung von Standorten für hybride Energieerzeugung in einem generischen Windpark mit 22 MW OWEA und minimaler Flächennutzung 333

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Flächenpotential für Windenergie auf Basis des Raumordnungsplans 2021 33
Tabelle 2: Installierbare Gesamtleistung aus Windenergie auf See in der AWZ 36
Tabelle 3: Modellvergleich 42
Tabelle 4: Annahmen KEBA 47
Tabelle 5: Parametervariation Sensitivitätsanalyse 48
Tabelle 6: Ertragspotential für die AWZ der Nordsee (ohne sonstige Verluste) 48
Tabelle 7: Anthropogene Eingriffe auf alle Schutzgüter, die gemäß FFH-Richtlinie in den Schutzgebieten der deutschen Nord- und Ostsee geschützt werden. 89
Tabelle 8: Direkte aktivitätsspezifische Auswirkungen von Bau, Betrieb und Rückbau von Offshore-Windenergieanlagen auf einzelne Schutzgüter, die gemäß FFH-Richtlinie in den Schutzgebieten der deutschen Nord- und Ostsee geschützt werden 98

Tabelle 9: Technische Optionen zur Lärmminderung: Alternative Fundamentarten, alternative Gründungsmethoden, Lärmminderungssysteme, angepasste Betriebs- und Wartungsmethoden. 116
Tabelle 10: Technische Optionen zur Verringerung des Kollisionsrisikos für Vögel: Alternatives OWP-Design, alternatives WEA-Design, Abschaltung und angepasste Lichtemissionen von WEAs..... 124
Tabelle 11: Technische Optionen zur Verringerung der negativen Auswirkungen auf Lebensräume und benthische Gemeinschaften: Angepasster Seekabeltyp, (alternative) Verlegemethoden, Korrosionsschutz und Kolkschutz. 128
Tabelle 12: Bewilligungen für Sand- und Kiesabbau in der AWZ 139
Tabelle 13: Flächenüberschneidungen in der AWZ nach dem Raumordnungsplan 2021 153
Tabelle 14: Nutzungen nach dem Raumordnungsplan 2021 154
Tabelle 15: Nutzungsakteure und –arten in der AWZ nach Raum/Zeit (eigene Darstellung) 159
Tabelle 16: Wirkfaktoren während Bau, Betrieb und Rückbau von Offshore-Windenergieanlagen auf einzelne Schutzgüter, die für die deutsche AWZ große Relevanz besitzen, sowie zusätzliche Wirkfaktoren durch Landes- und Bündnisverteidigung 177
Tabelle 17: Übersicht Szenarien und Annahmen exemplarisches Windparklayout O-2.2 188
Tabelle 18: Übersicht Ergebnisse für exemplarisches Windparklayout O-2.2 189
Tabelle 19: Leistungs- und Ertragspotential für die AWZ der Nordsee inkl. der Exklusivfläche für Fischereiforschung (ohne sonstige Verluste) 191
Tabelle 20: Wirkfaktoren während Bau, Betrieb und Rückbau von Offshore-Windenergieanlagen auf einzelne Schutzgüter, die für die deutsche AWZ große Relevanz besitzen, sowie zusätzliche Wirkfaktoren durch Fischereiforschung 197
Tabelle 21: Forschungsprojekte und Praxisbeispiele der drei identifizierten beispielhaften Nutzungsformen als Mehrfachnutzung kombiniert mit OWE. 204
Tabelle 22: Anzahl möglicher Standorte für zusätzliche EE-Anlagen in einem generischen Windpark 227
Tabelle 23: Fallbeispiele für Hybrid-Erzeugung – Gesamtertrag und Abregelungen (Bezugsjahr 2006) 229
Tabelle 24: Installierbare Gesamtleistung aus Wellenenergie (1 MW) in einem generischen Windpark (100 km^2) 234
Tabelle 25: Wirkfaktoren während Bau, Betrieb und Rückbau von Offshore-Windenergieanlagen auf einzelne Schutzgüter, die für die deutsche AWZ große Relevanz besitzen, sowie zusätzliche

Wirkfaktoren durch hybride Energieerzeugung mit Hilfe von Photovoltaik..... 247
Tabelle 26: Wirkfaktoren während Bau, Betrieb und Rückbau von Offshore-Windenergieanlagen auf einzelne Schutzgüter, die für die deutsche AWZ große Relevanz besitzen, sowie zusätzliche Wirkfaktoren durch hybride Energieerzeugung mit Hilfe von Wellenenergie. 258
Tabelle 27: Wirkfaktoren während Bau, Betrieb und Rückbau von Offshore-Windenergieanlagen auf einzelne Schutzgüter, die für die deutsche AWZ große Relevanz besitzen, sowie zusätzliche Wirkfaktoren durch hybride Energieerzeugung mit Hilfe von Biokraftstoff aus Algen. 270

Abkürzungsverzeichnis

A2/AD	Anti-Access/Area Denial
AIS	Automatic Identification System
AUV	Autonomous Underwater Vehicle
AWZ	Ausschließliche Wirtschaftszone
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BGBl	Bundesgesetzblatt
BITS	Baltic International Trawl Survey
BKompV	Bundeskompensationsverordnung
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
Bt-Drs	Bundestagsdrucksache
BVerwG	Bundesverwaltungsgericht
Bw	Bundeswehr
COSMO-CLM	Consortium for Small-Scale Modeling – Climate Mode
D	Rotordurchmesser
dB	Dezibel (Schalldruckeinheit)
DTU	Technische Universität Dänemark
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
FEP	Flächenentwicklungsplan
FFH-RL	Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie
FINO	Forschungsplattformen in Nord- und Ostsee
GBE	Global Blockage Effect
GSBTS	German Small-Scale Bottom Trawl Survey
GW	Gigawatt
Hz	Hertz (Frequenzeinheit)
IBTS	International Bottom Trawl Survey
ICES	International Council for the Exploration of the Sea
iFMS	interdisziplinärer Forschungsschwerpunkt Maritime Sicherheit
IMMA	Important Marine Mammal Area
IUCN	International Union for Conservation of Nature
IWES	Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme
KEBA	Kinetic Energy Budget of the Atmosphere
KRITIS	Kritische Infrastruktur
kW	Kilowatt
LBEG	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
L_{Peak}	Spitzenschalldruckpegel
LV/BV	Landes- und Bündnisverteidigung
MPI	Max-Planck-Instituts
MSRL	Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie
MTR	Migration Traffic Rate
MW	Megawatt
NATO	Nordatlantische Vertragsorganisation
NSG	Naturschutzgebiet

OFPV	Offshore Floating Photovoltaik
OWA	Offshore Wind Accelerator
OWE	Offshore-Windenergie
OWEA	Offshore-Windenergieanlage
OWP	Offshore-Windpark
ROG	Raumordnungsgesetz
ROP	Raumordnungsplan
SEL	Einzelereignispegel
SRÜ	Seerechtsübereinkommen
StUK 4	Standard Untersuchung der Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt
UBA	Umweltbundesamt
UK	United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland
UNCTAD	United Nations Conference on Trade and Development
USV	Unmanned or Uncrewed Surface Vehicle
WEA	Windenergieanlage
WindSeeG	Gesetz zur Entwicklung und Förderung der Windenergie auf See (Windenergie-auf-See-Gesetz)
WRF	Weather and Research and Forecast

Zusammenfassung

Gegenstand des Vorhabens ist die Einschätzung von Mehrfachnutzungspotentialen zwischen der Offshore-Windenergie und mindestens einer weiteren Nutzung oder Funktion. Es wurden Mehrfachnutzungsoptionen identifiziert und hinsichtlich ihrer möglichen Ausgestaltung sowie Potentiale und Herausforderungen analysiert. Als Grundlage dieser Untersuchungen wurden sowohl juristische Aspekte als auch der Einfluss der unterschiedlichen Nutzungen und ihrer Kombination auf die Meeresumwelt betrachtet. Abschließend wurden, insofern möglich, Untersuchungen dazu durchgeführt, welche Steigerungen sich in Bezug auf die installierbare Leistung und den Energieertrag durch die potentiellen Mehrfachnutzungsoptionen erwarten lassen.

Grundlagen – Potentiale für die Offshore-Windenergie auf Basis des ROP 2021

Um vorbereitend eine Vergleichsgrundlage zu schaffen, wurden die **Potentiale für die Offshore-Windenergie** auf Grundlage des ROP 2021 analysiert. Der ROP 2021 widmet sich raumbedeutsamen Nutzungen in der AWZ und ist somit die Grundlage für alle Überlegungen in Richtung einer möglichen Mehrfachnutzung von Flächen. Die Ergebnisse der Potentialanalyse sind weniger als eine konkrete Abschätzung der installierbaren Leistung und erzielbaren Erträge auf Offshore-Windenergieflächen zu verstehen, sondern vielmehr als eine vergleichende Auswertung bezüglich des Einflusses unterschiedlicher Auslegungsparameter auf die sich aus einer gegebenen Gesamtfläche erreichbaren Ertragspotentiale.

Das Flächenpotential für die Offshore-Windenergie wurde auf Grundlage des ROP 2021 unterteilt nach (bedingten) Vorrang- und Vorbehaltsgebieten ermittelt und daraufhin unter Berücksichtigung verschiedener Leistungsdichten (8-11 MW/km^2) betrachtet, welche Gesamtleistung sich theoretisch auf diesen Flächen installieren ließe. In den berechneten Beispielfällen wurde jeweils von einer einheitlichen Technologie und Leistungsdichte in der gesamten deutschen AWZ ausgegangen, um den Einfluss von Auslegungsparametern auf das Ertragspotential in den Fokus zu stellen. Grundsätzlich zeigen die Berechnungen den erheblichen Einfluss der gewählten Parameter auf den möglichen Zubau und Ertrag auf den gegebenen Nordsee-Flächen. So steigt beispielsweise der zu erwartende Gesamtertrag bei Verwendung einer Anlagentechnologie mit 367 W/m^2 bei einer durchschnittlichen Leistungsdichte von 9 MW/km^2 um rund 8 % im Vergleich zu einer durchschnittlichen Leistungsdichte von 8 MW/km^2. Eine weitere Stellschraube stellt die verwendete Anlagentechnologie dar, beträgt die durchschnittliche spezifische Flächenleistung beispielsweise 333 W/m^2 anstatt von 367 W/m^2 können die Gesamterträge um rund 2 % gesteigert werden, die gleiche Größenordnung wird erreicht, wenn der Leistungsbeiwert um 10 % gesteigert wird.

Grundlagen – Rechtswissenschaftliche Analyse des gesetzlichen Rahmens für eine Mehrfachnutzung

Die **rechtswissenschaftliche Analyse** der gesetzlichen Grundlagen für eine Mehrfachnutzung von Flächen in der deutschen AWZ durch die Windenergie auf See und andere maritimen Nutzungen kommt zu der Feststellung, dass das Konzept der Mehrfachnutzung im Raumordnungsrecht nicht ausdrücklich gesetzlich geregelt und somit nicht gesetzlich definiert ist. Damit fehlt ein verpflichtender gesetzlicher Anreiz für Entscheidungsträger, potentielle Mehrfachnutzungen von Flächen zu berücksichtigen und zu planen. Eine Aufnahme des Konzepts der Mehrfachnutzung für die AWZ in die gesetzlichen Grundsätze der Raumordnung des § 2 ROG könnte die Mehrfachnutzung fördern, in dem der Plangeber dann verpflichtet wäre, Mehrfachnutzungen in seinen Abwägungsprozess einzustellen, ebenso müssten nachfolgende Behörden Mehrfachnutzungen mit entsprechendem Gewicht in ihren Abwägungsentscheidungen berücksichtigen.

Die Studie kommt darüber hinaus zu dem Ergebnis, dass die verfügbaren Planungsinstrumente auch ohne verpflichtenden Anreiz bereits Mehrfachnutzungen in der AWZ ermöglichen können:

Der ROP der AWZ ist das zentrale Rechtsinstrument für eine erfolgreiche und rechtssichere Weichenstellung für Mehrfachnutzungen. Mittels einer überschneidenden Festlegung von Vorbehalts- und Vorranggebieten der Offshore-Windenergie mit jenen anderer maritimer Nutzungen im ROP wird Mehrfachnutzung raumplanungsrechtlich ermöglicht. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass Gebietsüberschneidungen zwischen Vorbehaltsgebieten, Vorbehalts- und Vorranggebieten und unter engen Voraussetzungen auch zwischen verschiedenen Vorranggebieten zulässig sind. Durch die konkrete Auswahl und Kombination der unterschiedlichen Gebietstypen kann der Plangeber Standorte und Bedingungen für Mehrfachnutzungen steuern, da sich die Rechtsfolgen je nach Wahl des Gebietstyps als Vorrang- oder Vorbehaltsgebiet unterscheiden.

Darüber hinaus kann der Plangeber durch textliche Festlegungen im ROP Vorgaben machen, über das „wie" des Zusammenspiels der Nutzungen, die von nachfolgenden Behörden in ihre Abwägungsentscheidungen mit entsprechendem Gewicht berücksichtigt werden müssen, sofern sie als Grundsätze der Raumordnung im ROP festgelegt werden. Der ROP 2021 weist grundsätzlich einige überschneidende Gebiete für die AWZ aus. Bei den Gebieten der Windenergie wird von dieser Möglichkeit bisher wenig Gebrauch gemacht, obwohl die rechtlichen Möglichkeiten vorhanden sind.

Auf der zweiten Planungsstufe für Windenergie, im Fachplanungsrecht, erfolgen Festlegungen für Standorte der Windenergie im Flächenentwicklungsplan. Die Studie hat zum Ergebnis, dass diesen Festlegungen eine Schlüsselfunktion bei der Ermöglichung von Mehrfachnutzung zukommt, da nur in den dort festgelegten Flächen Windenergieanlagen errichtet werden können. Festlegungen im FEP erfolgen in der Regel innerhalb der Vorbehalts- und Vorranggebiete Wind des ROP. Um weitere Flächen für eine Mehrfachnutzung zwischen Windenergie und anderen Nutzungsformen zu gewinnen, ist es nicht zwingend notwendig, den ROP zu ändern. Dabei kommt es aber auf den jeweiligen Einzelfall an, sodass gegebenenfalls Zielabweichungsverfahren durchzuführen wären. Daher ist die rechtssicherste und stringenteste Planung für Mehrfachnutzung auf Raumordnungsebene anzusiedeln.

Bei der Festlegung von Gebieten und Flächen für Windenergie im FEP sind die Kriterien des § 5 Abs. 3 WindSeeG (und § 69 Abs. 3 WindSeeG) zu beachten. Sie bestimmen, dass Festlegungen im FEP unzulässig sind, wenn sie bestimmte andere Belange beeinträchtigen oder gefährden. Diese Kriterien beschränken Mehrfachnutzungsoptionen abwägungsfest. Mit der Einstellung der Errichtung von Windenergieanlagen auf See in das überragende öffentliche Interesse kommt dem Ausbau der Windenergie ein besonderes Durchsetzungsvermögen zu, das zwar keinen rechtlichen „Automatismus" für eine grundsätzliche überwiegende Gewichtung der Windenergie schafft, aber die besondere Bedeutung betont. Im Einzelfall kann der Errichtung von Windenergieanlagen daher gegenüber anderen Nutzungen im Rahmen von Zulassungsentscheidungen oder im Konfliktfall der Vorrang gebühren.

Es wurde zudem betrachtet, welchen Einfluss Mehrfachnutzungen auf Kompensationsmaßnahmen hätten. Die Errichtung und der Betrieb von Windenergieanlagen auf See stellt einen naturschutzrechtlichen Eingriff dar, der zu Kompensationsmaßnahmen verpflichtet. Auch andere Nutzungen müssen nach den naturschutzrechtlichen Vorgaben kompensiert werden, sofern sie eine erhebliche Beeinträchtigung des Meeresbodens auslösen (so beispielsweise im Meeresboden verankerte schwimmende PV-Anlagen). Der Erwerb von Ökopunkten aus Ökokonten und darüber hinaus Ersatzzahlungen werden als am praxisrelevantesten für die Kompensation von Windenergieanlagen in der AWZ eingestuft. Diese erlauben die zeitliche und auch räumliche Flexibilisierung von Eingriff und Kompensation.

Grundlagen – Auswirkungen verschiedener Nutzungen auf die Meeresumwelt und technische Minderungsoptionen

In den Schutzgebieten der deutschen Nord- und Ostsee werden gemäß FFH-Richtlinie die Schutzgüter Biotope am Meeresboden, Fische, Marine Säugetiere, sowie See- und Küstenvögel geschützt. Diese Schutzgüter werden durch unterschiedliche anthropogene Eingriffe wie beispielsweise Fischerei, Schiffsverkehr und Klimawandel beeinträchtigt. Zusätzlich können beim Bau, Betrieb und Rückbau von Offshore-Windparks Auswirkungen auf die Meeresumwelt entstehen, welche temporäre oder auch dauerhafte Belastungen in unterschiedlicher Intensität hervorrufen (zum Beispiel Kollisionsrisiko von Vögeln mit Offshore-Windenergieanlagen oder Baulärm für Meeressäuger). Um die negativen Umweltauswirkungen bei Bau, Betrieb und Rückbau von Offshore-Windparks zu minimieren, wurden nach dem aktuellen Stand der Forschung verschiedene technische Optionen beschrieben.

Auswahl geeigneter Mehrfachnutzungsoptionen für eine vertiefte Analyse

Darauffolgenden wurden die **einzelnen Mehrfachnutzungsoptionen**, welche sich aus den Flächenfestlegungen des ROP 2021 ergeben, beschrieben. Alle Nutzungsoptionen wurden einzeln im Hinblick auf die Eignung zur Mehrfachnutzung untersucht. Der Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs wird im ROP 2021 eine hohe Bedeutung beigemessen, auch, da die internationale Schifffahrt laut SRÜ Artikel 60, Absatz 7 nicht beeinträchtigt werden darf. Da Windenergieanlagen für Schiffe Hindernisse darstellen, machen sicherheitsrelevante Belange eine Mehrfachnutzung schwierig. Gebiete für Leitungen machen einen kleinen Teil der Flächen der AWZ aus und sind aufgrund ihrer wichtigen Bedeutung als Infrastruktur schutzbedürftig, sodass eine Mehrfachnutzung auch hier schwierig ist. Für die Rohstoffgewinnung stellen sich ähnliche sicherheitsrelevante Herausforderungen wie bei der Schifffahrt, sodass auch hier keine potentielle Mehrfachnutzung ableitbar ist. Für die Fischerei gibt es bereits erste Ansätze der Mehrfachnutzung, allerdings überschneidet sich die hierfür festgelegte Fläche im ROP 2021 größtenteils mit Gebieten für die Schifffahrt, sodass hier eine nähere Betrachtung verworfen wurde. Für die Forschung sieht der ROP 2021 bereits eine Mehrfachnutzug in der Ostsee vor, sodass diese in den folgenden Abschnitten vertieft betrachtet wurde. Im Hinblick auf Vorbehaltsflächen für Verteidigung wurden konkrete Herausforderungen identifiziert, aufgrund des Umfangs an exklusiven Flächen wurde hier der Bedarf für ausführlichere Untersuchungen gesehen, um das Mehrfachnutzungspotential einschätzen zu können. Neben den im ROP 2021 vorgegebenen Flächenfestlegungen wurde zudem die Option der Mehrfachnutzung mit anderen Erneuerbaren Energien als hybride Energieerzeugung betrachtet. Diese wird aktuell auf unterschiedlichen Ebenen diskutiert, im Rahmen der Untersuchung wurden die in der AWZ realisierbaren Technologien näher betrachtet. Auf dieser Basis wurden die drei Mehrfachnutzungsoptionen Landes- und Bündnisverteidigung, Fischereiforschung und hybride Energieerzeugung ausgewählt, um vertiefende Analysen durchzuführen.

Potentielle Mehrfachnutzungsoption Landes- und Bündnisverteidigung

Für den Themenbereich Landes- und Bündnisverteidigung wurden acht Interviews mit Expert*innen aus der Bundeswehr und dem BMVg geführt. Deren Analyse ergab, dass eine Mehrfachnutzung der Vorbehaltsflächen für Verteidigung nur mit Akteuren möglich ist, die die Flächen der AWZ nicht permanent und zeitlich flexibel nutzen können. Die militärische Nutzung, insbesondere von Marine und Luftwaffe, erfordert große, unbebaute Flächen für Übungen, sodass die Einsatzbereitschaft sichergestellt ist. Windenergieanlagen stellen hingegen dauerhafte, stationäre Nutzungen dar, die mit den skizzierten militärischen Anforderungen kollidieren.

Die Analyse kommt auf Basis der Literaturrecherchen sowie der Expert*inneninterviews zu dem Ergebnis, dass zum gegenwärtigen Zeitpunkt die Vorrang- und Vorbehaltsflächen für

Verteidigung, wie sie im ROP 2021 festgeschrieben sind, das operative Minimum abbilden, das für die Erhaltung der LV/BV notwendig ist. Trotz dieser Herausforderungen konnten Potentiale für eine Mehrfachnutzung, insbesondere in Form der Nutzung dieser Anlagen als Träger von ziviler und militärischer Sensorik, identifiziert werden. Die Schaffung geeigneter gesetzlicher Rahmenbedingungen (im Sinne eines Seesicherheitsgesetzes) sowie die Einsetzung zivil-militärischer Kommunikations- und Kooperationsforen sind entscheidend für die Realisierung dieser Potentiale. Die Analyse skizziert drei Potentialperspektiven für zukünftige Mehrfachnutzungen, die von der Verbesserung des Lagebildes durch intensivierte Sensoriknutzung, über die Vertiefung der EU- und NATO-Kooperation bis hin zur Veränderung der Rahmenbedingungen durch neue Technik reichen. Diese Potentialperspektiven unterstreichen die Bedeutung interministerieller und zivil-militärischer Zusammenarbeit zur Hebung der Mehrfachnutzungspotentiale von Vorbehaltsflächen für Verteidigung.

Innerhalb der vertieften rechtlichen Betrachtung der Mehrfachnutzungsoptionen kommt die Studie zu folgendem Ergebnis: Mehrfachnutzung von Windenergie mit der Landes- und Bündnisverteidigung besteht im Hinblick auf die Nutzung der Infrastruktur der Anlagen für bundeswehreigene Sensorik und andere technische Anlagen, hauptsächlich, um vor Kollisionen zu schützen. Eine Nutzung von Windenergieanlagen zur umfassenden Seeraumüberwachung als Unterstützung für die zuständige Sicherheitsbehörde ist im Gegensatz zur Seeraumbeobachtung für Windparkbetreiber nicht verpflichtend. Darüber hinaus wächst die Bedeutung für den Schutz maritimer kritischer Infrastruktur in der AWZ. Das sich im Entwurfsstadium befindende KRITIS-DachG adressiert bereits Sicherheitsanforderungen vor allem an Betreiber. Das Anbringen von Detektionsgeräten ist nach der neuen Entwurfsfassung jedoch nicht mehr vorgesehen. Aufgrund unübersichtlicher Zuständigkeitskompetenzen besteht darüber hinaus die Forderung eines einheitlich, verbindlich geregelten Zuständigkeitsregimes, um die Sicherheit maritimer kritischer Infrastruktur und Anlagen zu gewährleisten.

Hinsichtlich der Auswirkungen auf die Meeresumwelt werden bei einer Mehrfachnutzung aus Windenergie und Landes- und Bündnisverteidigung kumulative Effekte bei Rammarbeiten und militärischem Sonar (in zeitlichem und räumlichem Zusammenhang; d. h. beispielsweise überschneidende Wirkungsbereiche) erwartet.

Potentielle Mehrfachnutzungsoption Fischereiforschung

Für die vertiefte Analyse im Hinblick auf eine Mehrfachnutzung von **Fischereiforschung** und Windenergie wurden die Aufgaben der Fischereiforschung näher erläutert und die Belange untersucht. Hierfür wurde die vorgesehene Mehrfachnutzung auf der Fläche O-2.2 im Hinblick auf potentiellen Anpassungsbedarf eines möglichen Windparklayouts mit 1 GW Gesamtleistung analysiert. In mehreren skizzierten Szenarien war das Platzieren der Windenergieanlagen mit geringfügigen Änderungen im Layout möglich. Die Erkenntnisse wurden übertragen und zusätzliche Potentiale durch die Nutzung der Exklusivfläche für Fischereiforschung im Gebiet FoN3 errechnet. Der zu erwartende Gesamtenergieertrag aus Offshore-Windenergie in der deutschen AWZ könnte, je nach spezifischer Flächenleistung und Leistungsdichte, auf 211 TWh/a im Maximum gesteigert werden.

Hinsichtlich der Auswirkungen auf die Meeresumwelt werden bei einer Mehrfachnutzung aus OWE und Fischereiforschung kumulative Effekte hinsichtlich der Verringerung eines möglichen „Reserve effects“ je nach Intensität der Fischereiforschung erwartet.

Potentielle Mehrfachnutzungsoption hybride Energieerzeugung

Zuletzt wurde die Mehrfachnutzung mit **hybrider Energieerzeugung** vertiefend betrachtet. Die unterschiedlichen Konzepte für schwimmende PV-Anlagen, Wellenkraftwerke und der Algenanbau wurden detailliert beschrieben. Hierbei sind Erkenntnisse aus einer Literaturrecherche und aus Interviews mit Experten*innen der jeweiligen Technologie sowie weiterer Akteure der

Offshore-Windenergie eingeflossen. Für die Optionen der Integration schwimmender PV-Anlagen und Wellenkraftwerke in einen Offshore-Windpark wurden anhand einer fiktiven Beispielwindparkfläche nähere Untersuchungen in Bezug auf die erwartbaren Potentiale durchgeführt. Für beide Technologien wurde die potentiell installierbare Leistung für unterschiedliche Fallkonstellationen bezüglich der bestehenden Flächenauslastung durch die Offshore-Windenergieanlagen ermittelt. Für schwimmende PV-Anlagen wurden zudem die in den einzelnen Fallbeispielen erwartbaren Energieerträge abgeschätzt. Beispielsweise könnten in einem Szenario mit mittlerer Flächenausnutzung und einer Bebauung mit 1.008 MW Windenergie insgesamt 191 MW Solarenergie installiert werden, was zu einer Steigerung des auf der Beispielfläche erzielbaren Gesamtertrags von 5,4 % führen würde. Für die Wellenenergie, deren Technologieentwicklung bezüglich geeigneter Anlagen für die Bedingungen in der deutschen Nordsee noch am Anfang steht, ergeben sich geringere Potentiale, denn die installierbare Leistung auf einer gegebenen Fläche ist hier deutlich kleiner, es könnten lediglich 21 MW in demselben Szenario installierte werden.

Nach derzeitiger Gesetzeslage ist eine hybride Energieerzeugung außerhalb eines Testfeldes nicht möglich. Windenergie auf See ist in den festgelegten Flächen für Windenergie, sonstige Energiegewinnungsanlagen sind in sonstigen Energiegewinnungsbereichen, und – beide unabhängig voneinander sowie gemeinsam – in Testfeldern, zulässig. Eine Genehmigung für andere EE-Anlagen in Gebieten und Flächen für Windenergie widerspricht der gesetzlichen Systematik, EE-Anlagen grundsätzlich nur in denen im FEP festgelegten Flächen zuzulassen. Die sonstigen Energiegewinnungsbereiche sehen einen Netzanschluss nicht vor. Eine Regelung für die Netzanbindungskapazität anderer EE-Anlagen als Windenergieanlagen ist daher auch nicht vorhanden. Hier könnte eine gesetzliche Anpassung, etwa die ausdrückliche Zulässigkeit von sonstigen Energiegewinnungsanlagen in Flächen für Windenergie, neue Chancen für Mehrfachnutzung schaffen.

Hinsichtlich der Auswirkungen auf die Meeresumwelt werden bei einer Mehrfachnutzung aus Windenergie und schwimmenden PV-Anlagen sowie einer Mehrfachnutzung aus Wind- und Wellenenergie kumulative Effekte in Bezug auf den Schiffsverkehr (sofern keine Synergieeffekte möglich sind) und die Vertreibungs-/Anziehungswirkung erwartet. Bei einer Mehrfachnutzung aus Windenergie und Anlagen zur Algenzucht sind kumulative Effekte in Bezug auf den Schiffsverkehr (sofern keine Synergieeffekte möglich sind) und die Vertreibungswirkung zu erwarten. Bei allen drei Optionen sind weitere Informationen zur beispielsweise Vertreibungs-/Anziehungswirkung bei Wind- und Wellenenergie sowie zur Intensität der Algenzucht notwendig, um kumulative Effekte quantifizieren zu können.

Fazit

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung, dass in der deutschen AWZ das Mehrfachnutzungspotential unter der Voraussetzung des Ziels einer Kapazitätssteigerung im Sinne einer Erreichung der gesetzlich festgelegten Gesamtleistung von mindestens 70 GW in Bezug auf die betrachteten Nutzungsformen (Festlegungen zu Schutz und Verbesserung der Meeresumwelt wurden nicht betrachtet) eher gering ist. Mehrfachnutzungskonzepte mit der Offshore-Windenergie mit einer anderen Zielstellung könnten durchaus vielversprechende Potentiale bieten (u. a. Verbesserung des militärischen Lagebilds, erhöhte EE-Stromerzeugung, Algenanbau für die Lebensmittelbranche), die in der Zukunft näher zu untersuchen sind.

Summary

The aim of the project is to assess the potential for multi-use concepts between offshore wind energy and at least one other use or function. Multi-use options were identified and analysed with regard to their possible design, potential and challenges. These analyses were based on legal aspects as well as the impact of the different uses and their combination on the marine environment. Finally, where possible, analyses were carried out to determine what increases can be expected in terms of installed capacity and energy yield from the potential multi-use options.

Fundamentals - potential for offshore wind energy based on the ROP 2021

In order to create a basis for comparison, the potential for offshore wind energy was analysed on the basis of the ROP 2021. The ROP 2021 is dedicated to spatially significant uses in the Exclusive Economic Zone and is therefore the basis for all considerations regarding the possible multi-use of areas. The results of the potential analysis are not so much to be understood as a concrete estimate of the installable capacity and achievable yields on offshore wind energy areas, but rather as a comparative evaluation of the influence of different design parameters on the yield potential that can be achieved from a given total area.

The area potential for offshore wind energy was determined on the basis of the ROP 2021, divided into (conditional) priority and reservation areas, and then, taking into account different capacity densities (8-11 MW/km^2), the total capacity that could theoretically be installed on these areas was analysed. In the calculated example cases, a standardised technology and capacity density was assumed for the entire German Exclusive Economic Zone in order to focus on the influence of design parameters on the yield potential. In principle, the calculations show the considerable influence of the selected parameters on the possible expansion and yield on the given North Sea areas. For example, the expected total yield increases by around 8 % when using a system technology with 367 W/m^2 at an average capacity density of 9 MW/km^2 compared to an average capacity density of 8 MW/km^2. The system technology used represents a further adjusting screw; if, for example, the average specific area output is 333 W/m^2 instead of 367 W/m^2, the total energy yield can be increased by around 2 %; the same order of magnitude is achieved if the coefficient of performance is increased by 10 %.

Fundamentals - Legal analysis of the legal framework for multi-use

The legal analysis of the legal basis for the multi-use of areas in the German Exclusive Economic Zone by offshore wind energy and other maritime uses comes to the conclusion that the concept of multi-use is not expressly regulated in spatial planning law and is therefore not legally defined. This means that there is no binding legal incentive for decision-makers to consider and plan for potential multi-use of areas. Including the concept of multi-use for the Exclusive Economic Zone in the legal principles of spatial planning in Section 2 ROG could promote multi-use by obliging planners to include multi-use in their consideration process, and subsequent authorities would also have to take multi-use into account with corresponding weight in their consideration decisions.

The study also concludes that the available planning instruments can already facilitate multi-use in the Exclusive Economic Zone, even without a mandatory incentive: The ROP of the Exclusive Economic Zone is the central legal instrument for a successful and legally secure course for multi-use. By means of an overlapping definition of reservation and priority areas for offshore wind energy with those of other maritime uses in the ROP, multi-use is made possible under spatial planning law. The study comes to the conclusion that area overlaps between reservation

areas, reservation areas and priority areas and, under strict conditions, also between different priority areas are permissible. Through the specific selection and combination of the different types of areas, the planner can control the locations and conditions for multi-uses, as the legal consequences differ depending on the type of area selected as a priority or reservation area.

In addition, the planner can use textual specifications in the ROP to set out the 'how' of the interaction of uses, which must be taken into account by subsequent authorities in their decisions on how to weigh them up, provided they are defined as spatial planning principles in the ROP. In principle, the ROP 2021 identifies some overlapping areas for the Exclusive Economic Zone. Little use has been made of this option for wind energy areas to date, although the legal options are available.

At the second planning stage for wind energy, in sectoral planning law, wind energy sites are specified in the area development plan (FEP). The study concludes that these specifications play a key role in enabling multi-use, as wind turbines can only be erected in the areas specified there. Designations in the FEP are generally made within the wind reservation and priority areas of the ROP. In order to gain further areas for multi-use between wind energy and other forms of use, it is not absolutely necessary to amend the ROP. However, this depends on the individual case, meaning that deviation procedures would have to be carried out if necessary. Therefore, the most legally secure and stringent planning for multi-use should be at the spatial planning level.

The criteria in Section 5 (3) WindSeeG (and Section 69 (3) WindSeeG) must be observed when designating areas and sites for wind energy in the FEP. They stipulate that designations in the FEP are inadmissible if they impair or jeopardise certain other interests. These criteria restrict multi-use options in a way that is resistant to consideration. Including the construction of offshore wind turbines in the overriding public interest gives the expansion of wind energy a special assertiveness, which does not create a legal 'automatism' for a fundamental overriding weighting of wind energy, but emphasises its special significance. In individual cases, the construction of wind turbines can therefore take precedence over other uses in the context of authorisation decisions or in the event of conflict.

The impact of multi-uses on compensation measures was also analysed. The construction and operation of wind turbines at sea constitutes an encroachment under nature conservation law, which requires compensation measures. Other uses must also be compensated in accordance with nature conservation legislation if they have a significant impact on the seabed (e.g. floating PV systems anchored in the seabed). The acquisition of eco-points from eco-accounts and also compensation payments are considered to be the most relevant in practice for the compensation of wind turbines in the Exclusive Economic Zone. These allow the temporal and spatial flexibilisation of intervention and compensation.

Fundamentals - Impacts of different uses on the marine environment and technical mitigation options

In the protected areas of the German North Sea and Baltic Sea, the Habitats Directive protects seabed biotopes, fish, marine mammals, seabirds and coastal birds. These protected assets are affected by various anthropogenic interventions such as fishing, shipping traffic and climate change. In addition, the construction, operation and decommissioning of offshore wind farms can have an impact on the marine environment, causing temporary or permanent impacts of varying intensity (e.g. collision risk of birds with offshore wind turbines or construction noise

for marine mammals). In order to minimise the negative environmental impacts during the construction, operation and dismantling of offshore wind farms, various technical options have been described according to the current state of research.

Selection of suitable multi-use options for an in-depth analysis

The individual multi-use options resulting from the specifications of the ROP 2021 were then described. All utilisation options considere in ROP 2021 were examined individually with regard to their suitability for multi-use. The ROP 2021 attaches great importance to ensuring the safety and ease of shipping traffic, also because UNCLOS Article 60, paragraph 7 stipulates that international shipping must not be impaired. As wind turbines present obstacles for ships, safety-related concerns make multi-use difficult. Areas for pipelines make up a small part of the Exclusive Economic Zone and require protection due to their importance as infrastructure, making multi-use difficult here too. Raw material extraction faces similar safety-related challenges as shipping, meaning that no potential multi-use can be derived here either. There are already initial approaches to multi-use for fishing, but the area defined for this purpose in the ROP 2021 largely overlaps with areas for shipping, so that closer consideration was rejected here. The ROP 2021 already provides for multi-use in the Baltic Sea for research, so this was analysed in more detail in the following sections. Specific challenges were identified with regard to reservation areas for defence; due to the extent of exclusive areas, the need for more detailed investigations was seen here in order to be able to assess the potential for multi-use. In addition to the area definitions specified in the ROP 2021, the option of multi-use with other renewable energies as hybrid energy generation was also considered. This is currently being discussed at various levels, and the technologies that can be realised in the Exclusive Economic Zone were examined in more detail as part of the study. On this basis, the three multi-use options of national and alliance defence, fisheries research and hybrid energy generation were selected in order to carry out in-depth analyses.

Potential multi-use option national and alliance defence

Eight interviews were conducted with experts from the Bundeswehr and the BMVg in the area of national and alliance defence (LV/BV). Their analysis showed that multi-use of the reservation areas for defence is only possible with actors who cannot use the Exclusive Economic Zone areas permanently and flexibly in terms of time. Military use, particularly by the navy and air force, requires large, undeveloped areas for exercises to ensure operational readiness. Wind turbines, on the other hand, represent permanent, stationary uses that collide with the military requirements outlined above.

Based on the literature research and the expert interviews, the analysis concludes that, at present, the priority and reservation areas for defence, as set out in the ROP 2021, represent the operational minimum required to maintain the LV/BV. Despite these challenges, potential for multi-use could be identified, in particular in the form of the use of these facilities as carriers of civil and military sensor technology. The creation of a suitable legal framework (in the sense of a maritime security law) and the establishment of civil-military communication and cooperation forums are crucial for the realisation of this potential. The analysis outlines three potential perspectives for future multi-uses, ranging from the improvement of the situation picture through intensified use of sensor technology, to the intensification of EU and NATO cooperation, to the change in the framework conditions through new technology. These potential perspectives underline the importance of inter-ministerial and civil-military cooperation to increase the potential for multi-use of reservation areas for defence.

Within the in-depth legal consideration of the multi-use options, the study comes to the following conclusion: Multi-use potential of wind energy with national and alliance defence exists with regard to the use of the infrastructure of the turbines for federal sensors and other technical

equipment, mainly to protect against collisions. In contrast to maritime surveillance, the use of wind turbines for comprehensive maritime surveillance to support the responsible security authority is not mandatory for wind farm operators. Furthermore, the importance of protecting critical maritime infrastructure in the Exclusive Economic Zone is growing. The KRITIS-DachG, which is currently at the draft stage, already addresses security requirements for operators in particular. However, the installation of detection devices is no longer provided for in the new draft version. Due to a lack of clarity regarding competences, there is also a demand for a standardised, bindingly regulated competence regime in order to ensure the security of maritime critical infrastructure and facilities.

With regard to the impact on the marine environment, cumulative effects are expected from pile driving and military sonar (in a temporal and spatial context; i.e. overlapping impact areas, for example) in the event of multi-use of wind energy and national and alliance defence.

Potential multi-use option fisheries research

For the in-depth analysis with regard to the multi-use of fisheries research and wind energy, the tasks of fisheries research were explained in more detail and the issues examined. For this purpose, the planned multi-use of area O-2.2 was analysed with regard to the potential need to adapt a possible wind farm layout with a total capacity of 1 GW. In several outlined scenarios, the placement of the wind turbines was possible with minor changes to the layout. The findings were transferred and additional potential was calculated by utilising the exclusive area for fisheries research in the FoN3 area. The expected total energy yield from offshore wind energy in the German Exclusive Economic Zone could be increased to a maximum of 211 TWh/a, depending on the specific area output and capacity density.

With regard to the impact on the marine environment, cumulative effects are expected in the case of multi-use from OWE and fisheries research with regard to the reduction of a possible 'reserve effect' depending on the intensity of fisheries research.

Potential multi-use option hybrid energy generation

Finally, multi-use with hybrid energy generation was examined in depth. The various concepts for floating PV systems, wave power plants and algae production were described in detail. Findings from a literature review and interviews with experts in the respective technology as well as other stakeholders in offshore wind energy were incorporated. For the options of integrating floating PV systems and wave power plants into an offshore wind farm, the expected potential was analysed in more detail using a fictitious example wind farm area. For both technologies, the potential installable capacity was determined for different case constellations with regard to the existing area utilisation by the offshore wind turbines. The energy yields that can be expected in the individual case studies were also estimated for floating PV systems. For example, in a scenario with medium land utilisation and a development with 1,008 MW of wind energy, a total of 191 MW of solar energy could be installed, which would lead to an increase of 5.4 % in the total yield achievable on the example area. There is less potential for wave energy, whose technological development with regard to suitable systems for the conditions in the German North Sea is still in its infancy, because the installable capacity on a given area is significantly smaller here; only 21 MW could be installed in the same scenario.

According to current legislation, hybrid energy generation is not possible outside a test field. Wind energy at sea is permitted in the designated areas for wind energy, other energy generation plants are permitted in other energy generation areas and - both independently of each other and together - in test fields. Authorisation for other renewable energy installations in areas and sites for wind energy contradicts the statutory system of only permitting renewable energy installations in the areas specified in the FEP. The other energy generation areas do not provide for a grid connection. There is therefore no regulation for the grid connection capacity

of renewable energy installations other than wind turbines. Here, a legal amendment, such as the explicit authorisation of other energy generation plants in areas for wind energy, could create new opportunities for multi-use.

With regard to the effects on the marine environment, cumulative effects are expected in relation to shipping traffic (if no synergy effects are possible) and the displacement/attraction effect in the case of multi-use from wind energy and floating PV systems as well as multi-use from wind and wave energy. In the case of multi-use of wind energy and algae cultivation facilities, cumulative effects are expected with regard to shipping traffic (if no synergy effects are possible) and the displacement/attraction effect. For all three options, further information is required on, for example, the displacement/attraction effect of wind and wave energy and the intensity of algae cultivation in order to be able to quantify cumulative effects.

Conclusion

Overall, the results of this study show that the potential for multi-use in the German Exclusive Economic Zone is rather low, assuming the goal of increasing capacity with regard to the forms of utilisation considered (specifications for protecting and improving the marine environment were not considered). Multi-use concepts with offshore wind energy with a different objective could offer promising potential (e.g. improvement of the military situation, increased renewable electricity generation, algae cultivation for the food industry), which could be investigated in more detail in the future.

1 Einleitung

Ziel dieses Vorhabens war es, das Potential für die Windenergienutzung auf See in Deutschland einzuschätzen. Hierfür sollte zunächst das Flächen-, Gesamtleistungs- und Ertragspotential auf der Basis des aktuellen Raumordnungsplans (ROP) aus 2021 und unter Berücksichtigung der fortschreitenden Anlagenentwicklung bewertet werden. Darüber hinaus sollten zusätzliche Potentiale für die Offshore-Windenergie, die sich durch die Mehrfachnutzung mit unterschiedlichen Nutzungsformen auf weiteren Flächen ergeben könnten, quantifiziert werden. Neben der grundlegenden Analyse verschiedener Varianten der Mehrfachnutzung sollten drei konkrete Beispiele von Mehrfachnutzungen vertieft hinsichtlich ihrer Potentiale untersucht werden. Besonderer Fokus lag auf der Frage, ob und inwiefern durch Mehrfachnutzung zusätzliche Flächenpotentiale für die Offshore-Windenergie denkbar sind oder inwiefern auf sonstige Weise zusätzliche Beiträge zur Erreichung der Klimaschutzziele möglich erscheinen.

Definition: Mehrfachnutzung

Im Rahmen dieses Projekts ist unter einer Mehrfachnutzung die Nutzung eines räumlichen Gebiets durch zwei oder mehr Funktionen oder Nutzungen zu verstehen. Wenn in diesem Dokument also von einer Mehrfachnutzung die Rede ist, so ist damit die Nutzung eines Gebiets durch die Windenergie und durch mindestens eine andere Nutzung oder Funktion gemeint.

Der vorliegende Bericht dokumentiert in Kapitel 2 die Ergebnisse der Potentialanalyse, welche sich mit der Bewertung des Potentials für die Offshore-Windenergie auf der Grundlage des ROP 2021 befasst und zunächst keine Mehrfachnutzung berücksichtigt. Es wird das Flächen-, Gesamtleistungs- und Ertragspotential untersucht.

In Kapitel 3 bis Kapitel 5 werden die grundsätzlichen Chancen und Herausforderungen für eine Mehrfachnutzung analysiert. Die Analyse gliedert sich in drei Abschnitte. Im ersten Abschnitt sind die Ergebnisse zu den rechtlichen Grundlagen der Mehrfachnutzung von Offshore-Windenergie mit anderen maritimen Nutzungen dargestellt. Im zweiten Abschnitt werden die unterschiedlichen anthropogenen Wirkfaktoren auf die Meeresumwelt in der deutschen AWZ beschrieben, die Auswirkungen der Offshore-Windenergie auf die Meeresumwelt erläutert, technische Optionen zur Minderung der negativen Umweltauswirkungen durch die Offshore-Windenergie aufgelistet und kumulative Effekte definiert. Im dritten Abschnitt sind die Ergebnisse der Analyse unterschiedlicher möglicher Mehrfachnutzungsoptionen (Schifffahrt, Leitungen, Rohstoffgewinnung, Fischerei, Forschung, Verteidigung und hybride Energieerzeugung) enthalten.

In Kapitel 6 bis Kapitel 8 werden drei ausgewählte Beispiele für Mehrfachnutzungsoptionen mit Offshore-Windenergie vertieft untersucht: Landes- und Bündnisverteidigung, Fischereiforschung und hybride Energieerzeugung. Die Darstellung der Ergebnisse der vertieften Untersuchung gliedert sich jeweils in drei Schritte. Zunächst werden die Möglichkeiten der Mehrfachnutzung beschrieben und das zusätzliche Potential für die Offshore-Windenergie durch die Mehrfachnutzungsoption bewertet. Jede der drei Mehrfachnutzungsoptionen ist mit spezifischen juristischen Fragestellungen verbunden, deren Beantwortung folgt jeweils in einem zweiten Schritt. Darauf folgt als Drittes die Beschreibung der kumulativen Effekte der Mehrfachnutzungsoptionen auf die Meeresumwelt.

Der Bericht schließt in Kapitel 9 mit einem Fazit hinsichtlich der Potentiale für die Offshore-Windenergie unter Berücksichtigung von Mehrfachnutzungen.

2 Potentiale für Windenergie auf See auf Basis des Raumordnungsplans 2021

Den Ausgangspunkt der Potentialanalyse für die Windenergie auf See stellt die Flächenverfügbarkeit dar. In Deutschland wird die Flächenverfügbarkeit für Windenergieanlagen im Raumordnungsplan (ROP) grundlegend in Form von Vorrang- und Vorbehaltsgebieten festgelegt. Im Flächenentwicklungsplan (FEP) werden anschließend die Flächen für einzelne Windparks festgeschrieben. Die durchgeführte Potentialanalyse folgt einem dreistufigen Verfahren, welches das Flächen-, Gesamtleistungs- und Ertragspotentials für die Windenergie auf See in der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) gemäß ROP 2021 untersucht. Die Vorgehensweise wird zunächst grundlegend vorgestellt. In den nachfolgenden Abschnitten werden alle drei Schritte noch einmal detaillierter dargestellt.

Der zentrale Parameter, um von den Windenergieflächen auf das Gesamtleistungspotential zu schließen, ist die Leistungsdichte. Die Leistungsdichte bezeichnet das Verhältnis aus der installierten Nennleistung eines Windparks zu seiner Grundfläche. Für Windparks innerhalb der AWZ Deutschlands mit Inbetriebnahme ab 2021 erfolgt neben der Festlegung von Windparkflächen die Festlegung der ihnen zugewiesenen Netzanbindungskapazitäten durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) im FEP. Das BSH legt damit indirekt die Leistungsdichte der Windparks fest. Für die Festlegung der Leistungsdichte berücksichtigt das BSH auf Basis der Regelungen des Windenergie-auf-See-Gesetzes (WindSeeG) unterschiedliche Faktoren, wie die Flächensparsamkeit der Stromerzeugung, z.B. gemessen in der Größe der Energiedichte, und die Kosteneffizienz der Stromerzeugung. Dabei handelt es sich um konkurrierende Ziele, da die Energiedichte mit steigender Leistungsdichte zunimmt, während die Kosteneffizienz abnimmt (Falkenberg et al., 2020). Darüber hinaus stellen die gesetzlichen Ziele für den Ausbau der Offshore-Windenergie, die im WindSeeG in der Größe der Nennleistung formuliert sind, eine wichtige Randbedingung für die Festlegung der Leistungsdichte dar, da das BSH bei begrenztem Flächenpotential die Erreichung der Nennleistungsziele sicherstellen muss.

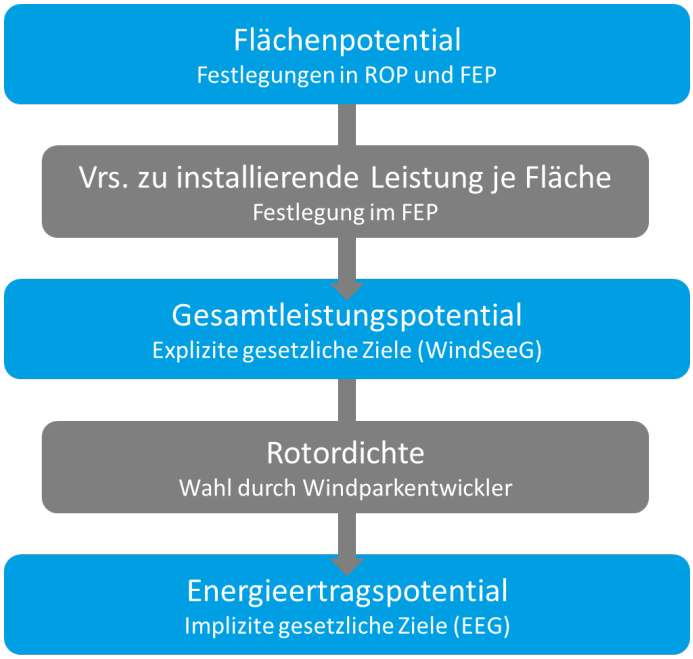
Auf Basis der festgelegten Leistungsdichte kann ein Offshore-Windparkentwickler die konkrete Auslegung seines Windparks vornehmen. Als eine Kenngröße für die Auslegung wird an dieser Stelle die Kenngröße der Rotordichte betrachtet. Die Rotordichte bezeichnet das Verhältnis aus der gesamten überstrichenen Rotorfläche eines Windparks zu seiner Grundfläche. Es handelt sich damit um eine dimensionslose Kennzahl. Die Rotordichte beeinflusst die eingespeiste Leistung im Teillastbereich und wirkt sich auf den absoluten Energieertrag und damit auf die Volllaststunden eines Offshore-Windparks und die Netzauslastung aus. Neben den gegebenen regionalen Windbedingungen und der festgelegten Leistungsdichte stellt die Rotordichte eine wichtige Kenngröße für die Abschätzung des Energieertrags dar.

Eine Anpassung der Rotordichte kann durch die Wahl der spezifischen Flächenleistung der eingesetzten Windenergieanlagen und in geringerem Umfang durch Overplanting[1] erfolgen. Die Wahl der Rotordichte trifft der Windparkentwickler in den Grenzen, die sich aus der Leistungsdichte und der spezifischen Flächenleistung der verfügbaren Windenergieanlagen sowie aus dem zulässigen Umfang an Overplanting ergeben.

Die nachfolgende Grafik stellt das dreistufige Verfahren und die skizzierten Zusammenhänge dar.

[1] Overplanting bedeutet, dass die installierte Nennleistung eines Windparks die zugewiesene Netzanbindungskapazität übersteigt.

Abbildung 1: Vorgehen Potentialanalyse



Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

2.1 Flächenpotential

Flächen auf See, für welche ein Nutzungsrecht Deutschlands vorliegt, liegen im Küstenmeer und innerhalb der AWZ. Als Küstenmeer wird nach dem Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen ein an die Landfläche angrenzender Meeresstreifen mit einer Breite von bis zu 12 Seemeilen bezeichnet, innerhalb dessen Deutschland über die volle Souveränität verfügt. Das Meeresgebiet jenseits des Küstenmeeres, in welchem Deutschland über begrenzte Souveränität verfügt, wird als AWZ bezeichnet.

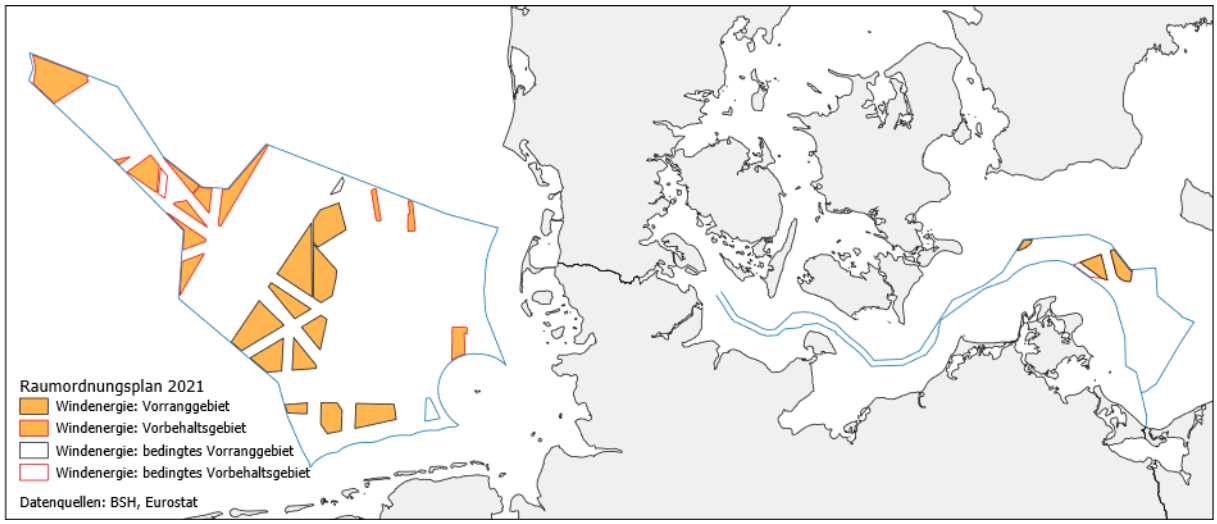
Windenergieanlagen auf See können in Deutschland grundsätzlich im Küstenmeer oder in der AWZ errichtet werden. Die Zuständigkeit für die Ausweisung von geeigneten Flächen innerhalb des Küstenmeeres liegt bei den jeweils betroffenen Küstenländern Schleswig-Holstein, Niedersachsen und Mecklenburg-Vorpommern. Für Flächen innerhalb der AWZ liegt die Zuständigkeit beim Bund, die Festlegung von Flächen und Anbindungstrassen wird vom BSH wahrgenommen. Die Küstenländer können einzelne Zuständigkeiten, beispielsweise für die Festlegung von Flächen und Anbindungstrassen, im Rahmen von Verwaltungsvereinbarungen an das BSH übertragen.

Die Fläche des Küstenmeeres umfasst rund 16.900 km², die AWZ ist mit rund 33.000 km² etwa doppelt so groß. Der allergrößte Teil der Flächen, welche für eine Nutzung durch Windenergieanlagen in Betracht gezogen werden können, liegt innerhalb der AWZ. Die Betrachtung des Flächenpotentials beschränkt sich daher hier auf die AWZ.

Im ROP für die AWZ in der Nordsee und in der Ostsee werden neben anderen Nutzungsansprüchen umfangreiche Gebiete für Windenergieanlagen auf See festgelegt. Dabei wird grundsätzlich zwischen Vorranggebieten und Vorbehaltsgebieten unterschieden. In Vorranggebieten für Windenergieanlagen auf See ist eine solche Nutzung fest vorgesehen. Andere raumbedeutsame Nutzung sind hier ausgeschlossen, falls sie mit der Windenergie auf See nicht vereinbar sind. In Windenergie-Vorbehaltsgebieten ist der Windenergie auf See bei der Abwägung mit anderen raumbedeutsamen Nutzungen besonderes Gewicht beizumessen. Der aktuelle ROP 2021 legt in Nord- und Ostsee Vorranggebiete mit einer Fläche von rund 3.300 km² und Vorbehaltsgebiete mit einer Gesamtfläche von etwa 1.900 km² fest.

Darüber hinaus legt der ROP in der Nordsee das bedingte Vorranggebiet EN13-Nord und in der Ostsee das bedingte Vorbehaltsgebiet EO2-West fest, die jeweils zu Vorrang- bzw. Vorbehaltsgebieten werden, wenn nicht nachgewiesen wird, dass diese zwingend für die Schifffahrt benötigt werden. Ähnlich verhält es sich mit dem Gebiet EN20 in der Nordsee, welches zum Vorbehaltsgebiet wird, falls nicht nachgewiesen wird, dass die Freihaltung dieses Gebiets von Windenergieanlagen für die Fischereiforschung unerlässlich ist. Abbildung 2 stellt die Festlegungen von Windenergiegebieten in den vier beschriebenen Kategorien für die AWZ der Nordsee und der Ostsee dar. Die Gesamtflächen je Art des Gebiets werden in Tabelle 1 zusammengefasst. Es wird deutlich, dass der größte Teil des Flächenpotentials für Windenergie auf See in der AWZ der Nordsee liegt. Rund 60 % der Flächen werden im ROP 2021 bereits als Vorranggebiete festgelegt.

Abbildung 2: Festlegungen für Windenergie im Raumordnungsplan 2021



Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

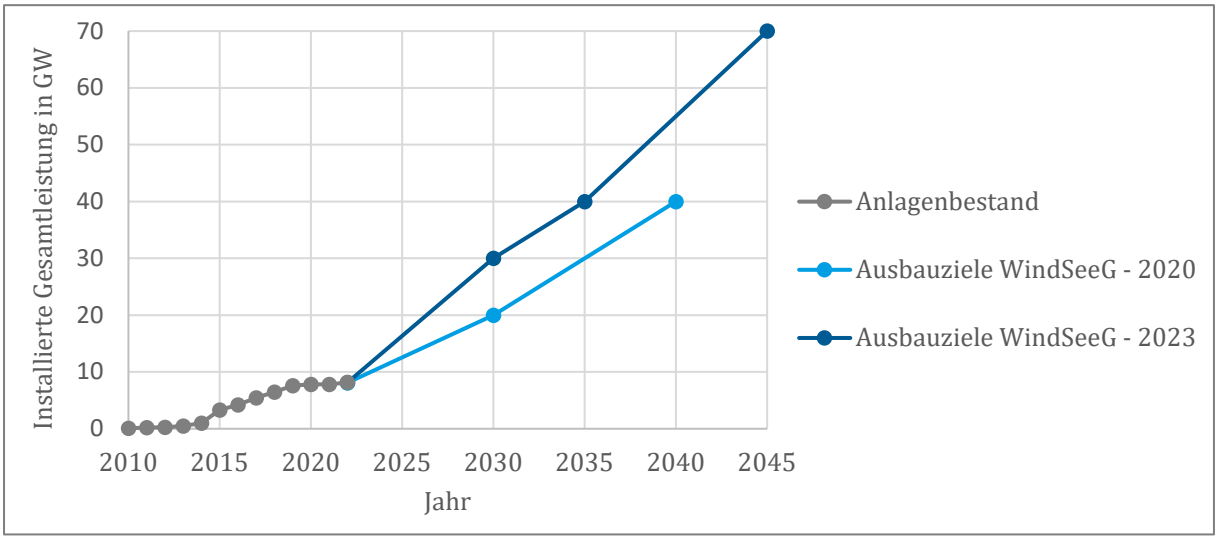
Tabelle 1: Flächenpotential für Windenergie auf Basis des Raumordnungsplans 2021

Art des Gebiets	Nordsee Fläche [km²]	Ostsee Fläche [km²]	Summe Fläche [km²]
Vorranggebiet	3.055	279	3.334
Vorbehaltsgebiet	1.946	0	1.946
Bedingtes Vorranggebiet	31	0	31
Bedingtes Vorbehaltsgebiet	67	55	122
Summe	5.099	334	5.433

2.2 Gesamtleistung

Nach dem Regierungswechsel Ende des Jahres 2021 wurden die Ausbauziele für die Offshore-Windenergie deutlich erhöht. Ein Vergleich der ursprünglichen Ausbauziele, festgelegt in der WindSeeG-Novelle 2020, mit den in der Novelle 2023 des WindSeeG gesetzlich verankerten Zielen ist in der nachfolgenden Abbildung 3 dargestellt. Die Abbildung macht deutlich, dass die aktuellen Ausbauziele nur durch eine deutliche Erhöhung der jährlichen Zubauraten im Vergleich zu den bisherigen jährlichen Zubauraten erreicht werden kann.

Abbildung 3: Ausbauziele für Windenergie auf See



Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Die erhöhten Ausbauziele von mindestens 70 GW machen eine geeignete Steuerung der Leistungsdichte erforderlich. In der Fortschreibung des FEP sowie dem derzeitigen Vorentwurf sah das BSH je nach Fläche Leistungsdichten von bis zu rund 11 MW/km² vor. Diese Entwicklung zeigt das Bemühen, den gesetzlichen Zielsetzungen zu entsprechen und gleichzeitig durch eine geeignete Steuerung der Leistungsdichte den im WindSeeG gesetzten Kriterien der Flächensparsamkeit (§ 4 WindSeeG) und Kosteneffizienz (§ 1 WindSeeG) Rechnung zu tragen.

Wie zuvor dargestellt und verdeutlicht durch die Festlegungen des BSH, stellt die Leistungsdichte den zentralen Parameter zur Bestimmung der installierten Gesamtleistung auf einer gegebenen Fläche dar. Daher soll im Rahmen dieser Untersuchung ein besonderes Augenmerk auf der Leistungsdichte liegen und die installierte Gesamtleistung auf den Flächen des ROP 2021 für unterschiedliche Leistungsdichten dargestellt werden, um den Einfluss dieser Kenngröße auf das Potential zu untersuchen.

Die Anwendung der korrigierten Leistungsdichte erfordert die Festlegung eines Pufferabstands zur Bestimmung der korrigierten Fläche. Beim Pufferabstand handelt es sich um eine rechnerische Hilfsgröße, die sich aus der festgelegten Leistungsdichte in Kombination mit der angenommenen Anlagentechnologie ergibt. Die betrachtete Fläche wird somit um einen Rahmen in der Breite eines halben Anlagenabstandes erweitert. Eine Erläuterung dieses Ansatzes findet sich in einem wissenschaftlichen Bericht für das BSH (Falkenberg et al., 2020). Im Rahmen dieser Analyse wird einheitlich ein Pufferabstand von 500 m verwendet. Diese Annahme stellt das Maximum des Pufferabstands dar, bei dem es noch nicht zu Überschneidungen benachbarter korrigierter Flächen und damit zu einer theoretischen Doppelbelegung kommt (da die im FEP ausgewiesenen direkt aneinander angrenzenden Flächen über einen Abstand von 1.000 m verfügen). Gleichzeitig bedeutet dies, dass zwischen auf dem Rand von ausgewiesenen Flächen platzierten Anlagen ein Mindestabstand von mindestens vier Rotordurchmessern eingehalten werden kann, solange der Rotordurchmesser kleiner gleich 250 m ist. Sollten darüber hinaus gehende Rotordurchmesser gewählt werden, bedingen die ausgewiesenen Flächenzuschnitte daraufhin geringere Abstände oder ein Layout, bei dem die Anlagen nicht direkt auf dem Rand platziert werden. Festzuhalten ist, dass es sich hier lediglich um eine Hilfsgröße zur Bestimmung der korrigierten Flächen handelt und hierdurch keine Technologiefestlegung getroffen wird.

In der nachfolgenden Tabelle 2 sind die korrigierten Flächen für jede der in Tabelle 1 dargestellten Gebietsarten dargestellt. Aus der Multiplikation der korrigierten Fläche mit der korrigierten Leistungsdichte ergibt sich die insgesamt installierbare Leistung. Das Vorgehen erfolgt hierbei

analog zu durchgeführten Vorgängeranalysen (beispielsweise Borrmann et al., 2021), wobei die gewählten Kategorien und Parametervariationen an die hier anvisierten Analysezwecke angepasst und weiterentwickelt wurden.

Die Darstellung erfolgt für zwei unterschiedliche Grundannahmen:

- Das Potential wird unter der Annahme einer freien Planung in allen Gebieten abgeschätzt, d.h. ohne Berücksichtigung der bereits realisierten oder genehmigten Windparks mit gegebenenfalls abweichenden Leistungsdichten. Diese Annahme stellt die theoretische Gesamtleistung auf der Basis des ROP 2021 für eine gleichverteilte Leistungsdichte dar. In nachfolgenden Analyseschritten ist dies hilfreich, um grundsätzliche Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen Leistungsdichten und anderen Parametervariationen aufzuzeigen. Zudem trägt die Betrachtung auch dem Umstand Rechnung, dass heute belegte Flächen im Zuge eines zukünftigen Repowerings über andere Leistungsdichten verfügen können.
- Ergänzend wird das Potential für die installierbare Nennleistung unter Berücksichtigung bestehender und genehmigter Windparks dargestellt. In diesem Fall werden somit räumlich differenzierte Leistungsdichten bei der Berechnung der Gesamtkapazität berücksichtigt, da die Leistungsdichte von Gebieten, die bestehende oder genehmigte Windparks umfassen, dem aktuellen Stand der Planung entspricht. Eine freie Planung wird demnach in dieser Variante für die verbleibenden Gebiete EN9 – EN20 berücksichtigt

Die folgende Tabelle 2 gibt einen Überblick über die resultierenden Ergebnisse.

Tabelle 2: Installierbare Gesamtleistung aus Windenergie auf See in der AWZ

Art des Gebiets	Fläche nach ROP 2021 [km²]	Korrigierte Fläche (Rand 500m) [km²]	Installierbare Leistung bei 8 MW/km² [GW]	Installierbare Leistung bei 9 MW/km² [GW]	Installierbare Leistung bei 10 MW/km² [GW]	Installierbare Leistung bei 11 MW/km² [GW]
Nordsee bei freier Planung in allen Gebieten						
Unbedingte Vorbehalts- und Vorranggebiete	5.001	5.790	46	52	58	64
Alle Gebiete	5.099	5.925	47,4	53,3	59,3	65,2
Ostsee bei freier Planung in allen Gebieten						
Unbedingtes Vorranggebiet	279	345	2,8	3,1	3,5	3,8
Alle Gebiete	334	412	3,3	3,7	4,1	4,5
Gesamte AWZ bei freier Planung in allen Gebieten						
Unbedingte Vorbehalts- und Vorranggebiete	5.280	6.135	49,1	55,2	61,4	67,5
Alle Gebiete	5.433	6.337	50,7	57,0	63,4	69,7
Gesamte AWZ bei freier Planung in den Gebieten EN9 – EN20 (andere Gebiete gemäß Bestand bzw. Planung)						
Unbedingte Vorbehalts- und Vorranggebiete	5.280	6.135	47,8	51,8	55,9	60,0
Alle Gebiete	5.433	6.337	49,4	53,7	57,9	62,2

Die Analyse zeigt, dass rein theoretisch auf den bestehenden Flächen bei einer gleichbleibenden, relativ hohen Leistungsdichte von 11 MW/km² eine installierte Gesamtleistung von 69,7 GW möglich ist (entspricht annähernd der Zielgröße von 70 GW). Davon entfallen deutlich über 90 % auf die AWZ der Nordsee.

Berücksichtigt man die bereits realisierten und geplanten Windparks in den Gebieten EN1 – EN8 und EO1 – EO3 mit ihrer aktuell (geplanten) Leistungsdichte und setzt lediglich für die Gebiete EN9 – EN20 eine Leistungsdichte von 11 MW/km² an, so beträgt die maximale Gesamtleistung für die AWZ 62,2 GW. Sollte auf weiteren Flächen eine geringere Leistungsdichte verwendet werden, fällt die installierbare Gesamtleistung ebenfalls proportional geringer aus.

Beispielsweise beträgt diese 49,4 GW, wenn zusätzlich zu den bereits realisierten und genehmigten Flächen ausschließlich neue Flächen mit einer Leistungsdichte von 8 MW/km^2 hinzukämen.

Zentral im Hinblick auf das Erreichen der Klimaschutzziele sind jedoch die Stromerträge, welche sich mit der installierten Nennleistung erreichen lassen. Daher erfolgt im nächsten Schritt die Abschätzung der Stromerträge für unterschiedliche Ausbauszenarien in der Nordsee. Hierbei wird von räumlich nicht differenzierten Leistungsdichten ausgegangen (entspricht der Grundannahme einer freien Planung in allen Gebieten), die variiert werden, um vergleichende Ergebnisanalysen vornehmen zu können. Die Berechnungen in Abschnitt 2.3 fußen somit auf Zeile 1 der oben dargestellten Tabelle 2 (unbedingte Vorbehalts- und Vorranggebiete in der Nordsee bei freier Planung).

2.3 Ertragspotential

Im Folgenden wird aus den ermittelten Leistungspotentialen auf erzielbare Energieerträge rückgeschlossen. Von zentralem Interesse ist hierbei erneut die vergleichende Betrachtung, um den Einfluss unterschiedlicher Grundannahmen auf die Erträge zu verdeutlichen. Hierbei erfolgt hinsichtlich der Ertragspotentiale eine Fokussierung auf die Nordsee, wo im Vergleich zur Ostsee die deutlich überwiegenden Leistungsanteile geplant werden und zudem das größte Mehrfachnutzungspotential vermutet wird. Verschiedene Untersuchungen in den vergangenen Jahren haben gezeigt, dass bei Ertragsabschätzungen für die Nordsee Fragen der großräumigen Abschattung in die Berechnungen einzubeziehen sind. Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens soll hierfür das durch Modell KEBA (Kinetic Energy Budget of the Atmosphere) (Agora Energiewende et al., 2020) genutzt werden, was in Abschnitt 2.3.2 näher begründet wird. Zur Einordnung der Modellwahl wird zuvor in Abschnitt 2.3.1 ein Überblick über den aktuellen Forschungsstand hinsichtlich des Einflusses großräumiger Abschattungseffekte auf die Energieerträge deutscher Offshore-Windparks gegeben. Die konkreten Berechnungen werden in Abschnitt 2.3.3 vorbereitet, indem beschrieben wird, welche Parameter im Fokus der vergleichenden Ertragsberechnungen im Rahmen des vorliegenden Vorhabens stehen. In Abschnitt 2.3.4 werden die Ergebnisse der Ertragsberechnung dargestellt und wichtige Zusammenhänge zwischen Eingangsparametern und Stromerträgen diskutiert. Die Grenzen der Betrachtung sowie zukünftiger Untersuchungsbedarf werden zum Abschluss des Kapitels erläutert.

2.3.1 Aktueller Forschungsstand zu großräumigen Abschattungseffekten zwischen Offshore-Windparks in der Nordsee

In den letzten Jahren waren die auf See vorhandenen Ertragspotentiale wiederholt Gegenstand der wissenschaftlichen Diskussion, da im Zuge der erhöhten Ausbauziele die Frage des Einflusses großräumiger Abschattungseffekte – vornehmlich in der Nordsee – eine zunehmende Rolle spielt. Im Fokus der Aufmerksamkeit stand hier insbesondere die sogenannte Agora-Studie, bei der zwei stark unterschiedliche Ansätze zur Abschätzung der Abschattungsverluste miteinander verglichen wurden und zu sehr ähnlichen Ergebnissen kamen. Daran anknüpfend und verbunden mit den erneut erhöhten Zielsetzungen für die Offshore-Windenergie strebte das BSH eine vertiefte Untersuchung der großräumigen Ertragspotentiale auf See unter verschiedenen Annahmen an, hiermit ist das Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme (IWES) beauftragt, das eine mesoskalige Modellierung mittels WRF (Weather Research and Forecasting) nutzt (Baumgärtner et al., 2021).

Grundsätzlich gilt es in diesem Zusammenhang zu berücksichtigen, dass großräumige Ertragsermittlungen wie für die AWZ der Nordsee stets mit Unsicherheiten verbunden sind, da sie von einer Vielzahl meteorologischer und technologischer Annahmen und Wechselwirkungen abhängen. Darüber hinaus gibt es in der hier betrachteten Größenordnung keine vergleichbaren real existierenden Windparks, an welchen Modelle validiert werden könnten. Neben den genannten

wissenschaftlichen Untersuchungen laufen aktuell mehrere große Forschungsprojekte mit dem Ziel, die großräumigen Zusammenhänge von Offshore-Windenergie besser verstehen zu können. Dazu zählen beispielsweise die Projekte „X-Wakes“ und „Global Blockage Effect in Offshore Wind“.

Neben den Untersuchungen zu Abschattungseffekten, deren Intention es ist, die Ertragspotentiale von Offshore-Windparks immer besser einschätzen zu können, wird in der wissenschaftlichen Diskussion auch vermehrt darauf hingewiesen, dass die Untersuchung der Abschattungseffekte von Offshore-Windparks nicht nur hinsichtlich der zu erzielenden Erträge relevant ist. Denn da die Windbedingungen zentral für die vorliegenden Ökosysteme sind, beeinflussen sie lokale klimatische und ökologische Veränderungen, die laut der Autoren und Autorinnen näher zu untersuchen sind (Akhtar et al., 2021). In diese Richtung gehen auch weitere Forschungsprojekte, die sich mit hydrodynamischen Strukturen und Effekten wie Desoxygenierung bodennaher Wasserschichten in Folge der Einflüsse von Offshore-Windparks auf die lokalen Windbedingungen in der Nordsee befassen und einen relevanten Einfluss auf Strukturen mariner küstennaher Ökosystemen vermuten (Christiansen et al., 2022; Daewel et al., 2022). Fragen im Bereich der gegenseitigen Abhängigkeiten von durch die Windparks induzierten Prozessen in der Luft und im Wasser, also beispielsweise. die wechselseitige Beeinflussung von Strömung, Seegang und Windfeld werden in zukünftigen Forschungsprojekten eine Rolle spielen. Diese Kopplungsprozesse sind bereits ohne den Einfluss von Windparks schon äußerst komplex; nun kommt die Interaktion zwischen Offshore-Windenergieanlagen und Grenzschicht hinzu. Die Forschungsergebnisse sind auch in Bezug auf Untersuchungen zum Klimawandel relevant (Eschenbach, 2021).

Im Folgenden erfolgt eine Übersicht über die einzelnen Vorhaben und den aktuellen Kenntnisstand hinsichtlich der Frage des Einflusses großräumiger Abschattungseffekte zwischen Offshore-Windparks in der Nordsee auf den zu erzielenden Gesamtertrag.

2.3.1.1 Windpark-Fernfeld – WIPAFF (2015-2019)

Das Forschungsprojekt „Windpark-Fernfeld“ (WIPAFF) widmete sich bereits frühzeitig Fragestellungen rund um die Beeinflussung des Windfeldes und des lokalen Klimas durch Offshore-Windparks. Die Laufzeit des Vorhabens war November 2015 bis April 2019. Im Rahmen des Projektes sollte die Modellierung des Windfeldes für den Bereich zwischen 10 und 100 km im Nachlauf der Offshore-Windparks weiterentwickelt werden. Hierzu wurde ein bereits bestehendes numerisches Windfeldmodell (WRF) auf die Seegangsbedingungen in der Nordsee angepasst. Es wurde eine größere Anzahl an lokalen Messungen auf Nabenhöhe im Nachlauf bestehender Offshore-Windparks durchgeführt, um bestehende Berechnungsmodelle zu evaluieren und weiterzuentwickeln. Die Ergebnisse zeigten, dass Wake-Effekte bei stabiler Schichtung noch in einer Entfernung von über 50 km bestehen, während bei neutraler Schichtung die Nachlauflänge nur bis zu 15 km beträgt. Es wurde festgestellt, dass eine höhere Leistungsdichte die Nachlauflänge erhöht. Zudem wurde auf Schwächen aktueller Berechnungsmodelle hingewiesen (Platis et al., 2020).

2.3.1.2 Agora Energiewende (2018-2020)

Agora Energiewende beauftragte Ende 2018 Forscher der Technischen Universität Dänemark (DTU) in Roskilde und des Max-Planck-Instituts (MPI) für Biogeochemie in Jena mit der Untersuchung des Offshore-Windpotentials in der deutschen AWZ der Nordsee. Die DTU nutzte dabei das mesoskaliges Modell WRF, das mit einem hohen Detaillierungsgrad und Rechenaufwand anhand von Wetterdaten und Simulation von Abschattungseffekten das Ertragspotential ermittelt. Das MPI verwendete das eigens entwickelte Modell KEBA (Kinetic Energy Budget of the Atmosphere), das durch eine deutlich geringere Komplexität gekennzeichnet ist und auf Basis von Excel-Kalkulationen arbeitet, die aus dem vorhandenen kinetischen Energiebudget und Prognosen zur

durch Windparks verursachten Windgeschwindigkeitsreduktion Ertragsabschätzungen trifft. Obwohl die beiden Modelle stark unterschiedlich arbeiten, stimmten die Anfang 2020 veröffentlichten Ergebnisse unter Verwendung verschiedener Parametrisierungen hinsichtlich Anzahl und Leistung der installierten Offshore-Anlagen im Ergebnis weitgehend überein. Beispielsweise wurde für eine gesamtinstallierte Leistung von 72 GW und eine Leistungsdichte von 10 MW/km^2 eine Volllaststundenzahl von 3.040 Stunden durch das WRF- und 2.966 Stunden durch das KEBA-Modell prognostiziert. Die Prognoseabweichungen beider Modelle waren damit überraschend gering, insbesondere da diese Prognosen ohnehin großen Unsicherheiten unterliegen (Agora Energiewende et al., 2020).

2.3.1.3 X-Wakes (2019-2023)

Seit Ende 2019 lief das Forschungsprojekt „Interaktion der Nachläufe großer Offshore-Windparks und Windparkcluster mit der marinen atmosphärischen Grenzschicht“ (X-Wakes) und endete im April 2023. Das Fraunhofer IWES, die Technische Universität Braunschweig, das Karlsruher Institut für Technologie, ForWind, die Universität Tübingen, das Helmholtz-Zentrum Hereon in Geesthacht sowie UL International waren an dem Projekt beteiligt. Im Projekt X-Wakes wurden Modellierungen zu den Windverhältnissen mit gemessenen Daten (in situ, per Satellit, LIDAR, Flugzeugmesskampagnen) kombiniert. Nachlaufströmungen der Anlagen und andere kumulative Effekte, wie der „Global Blockage Effect“ sollten vertieft untersucht werden, um mehr darüber herauszufinden, wie sich Windparkcluster gegenseitig beeinflussen und welche Auswirkungen deren großflächiger Ausbau auf die Windverhältnisse auf See haben wird. Auf Basis der Messergebnisse und Erkenntnisse sollten Simulationen weiterentwickelt werden, um die Ertragsprognosen für Offshore-Windparks zu verbessern. Das Fraunhofer IWES zielte im Projekt auf die Weiterentwicklung von mesoskaligen Modellen hinsichtlich der Windparkparametrisierung ab, wozu diese mit Messdaten des Projektes validiert werden sollten. Daneben wurden Methoden für Industriemodelle zur Verbesserung der Darstellung der Nachläufe großer Windparks und Windparkcluster sowie Küsteneffekte abgeleitet und dokumentiert (Fraunhofer IWES, 2023b). Es ist davon auszugehen, dass sich seitens des Fraunhofer IWES Synergieeffekte zwischen dem Forschungsprojekt X-Wakes und den für das BSH erstellten Gutachten ergeben und die (öffentlich verfügbaren) Gutachten für das BSH somit den aktuellen Forschungsstand abbilden.

2.3.1.4 Global Blockage Effect in Offshore Wind OWA (2021-2023)

Das Projekt „Global Blockage Effect in Offshore Wind“ (OWA GloBE) widmete sich dem „Global Blockage Effect“ (GBE) und ist eine gemeinsame Brancheninitiative im Rahmen des Offshore Wind Accelerators (OWA), einem Programm des Carbon Trusts. Das Projekt wurde von RWE geleitet, zudem waren sechs weitere Windparkentwickler sowie die Forschungs- und Industriepartnern DTU Wind Energy und Leosphere beteiligt. Daneben integrierte das Projekt eine „Independent Technical Review Group”, zu der sechs führende Beratungsunternehmen gehörten, u.a. auch die Deutsche WindGuard. Das Projekt startete 2021 und wurde Ende 2023 abgeschlossen. Gegenstand von OWA GloBE war es, die tatsächlichen Auswirkungen des GBE zu untersuchen, indem umfassende Messreihen unter realen Offshore-Bedingungen (und zwar in den Windparks Nordsee Ost und Amrumbank West) durchgeführt wurden. Der GBE beschreibt ein komplexes, schwer messbares Phänomen, das in der bodennahen Atmosphäre auftritt, wenn ein Offshore-Windpark die Strömung beeinflusst. Ziel des Projektes war es, einen umfassenden Datensatz zu erstellen und einen neuen Standard für die Bewertung und Quantifizierung der Auswirkungen des GBE auf die Stromerzeugung in Offshore-Windparks zu entwickeln (Carbon Trust, 2021).

2.3.1.5 IWES-Begleitgutachten i.A. des BSH (2023/2024) im Rahmen der Fortschreibung des Flächenentwicklungsplans

Im Rahmen der Begleituntersuchungen zum Flächenentwicklungsplan untersuchte das IWES wiederholt und für unterschiedliche Szenarien die Ertragspotentiale in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee. Es wird das WRF-Modell verwendet, in die Simulation gehen auch die Einflüsse benachbarter Windparks in den Niederlanden ein. Die Simulation erfolgt für zwei Modellgebiete, eins bezeichnet die Deutsche Bucht und eins die südliche Ostsee, hierbei werden für alle Windenergieflächen Windparkparametrisierungen vorgenommen, d.h. für alle geplanten und noch nicht mit Windenergieanlagen bestückten Flächen müssen exemplarische Layouts unter Verwendung einer Referenzanlage generiert werden. Als Referenzanlage wird für den Zeitraum bis 2030 die IEA-240-15, also eine generische Anlage mit 15 MW und 240 m Rotordurchmesser verwendet, für nach 2030 wird diese Anlage skaliert auf eine Leistung von 22 MW und einen Rotordurchmesser von 290 m. Für die Ertragspotentialberechnungen wurde ein repräsentatives Windjahr verwendet, das auf Basis eines Abgleichs von Langzeitdaten mit den Daten der FINO-Plattformen (Forschungsplattformen in Nord- und Ostsee) ermittelt wurde. Auf dieser Basis wurde das Windjahr 2006 als besonders geeignet ausgewählt. Im Endbericht aus Januar 2023 wurden 15 Szenarien für den Ausbau in der Nordsee sowie ein Szenario für den Ausbau in der Ostsee berechnet, als Kernindikatoren für den Vergleich der Szenarien werden die Jahresenergieproduktion und der Kapazitätsfaktor verwendet (Fraunhofer IWES, 2023a). Der Endbericht wurde um weitere Analysen ergänzt. In diesen ergänzenden Analysen wurden weitere Szenarien (S16-S21) analysiert (Vollmer & Dörenkämper, 2024), von denen Szenario 19 den Stand des Vorentwurfs des FEP (also inkl. zusätzlich Flächen in der Schifffahrtsroute SN 10) vom 01.09.2023 darstellt. Im Szenario 16 wurden auch Flächen im Bereich der Doggerbank betrachtet. Des Weiteren wurden verschiedene Annahmen zum Gebietszuschnitt, der installierten Leistung, dem Ausbau der niederländischen AWZ und zur Nachnutzung der Fläche N5 modelliert. In allen sechs Szenarien werden die Ausbauziele von mehr als 70 GW bei Jahresenergieerträgen zwischen 232 und 248 TWh erreicht. Die mittleren Volllaststunden liegen für alle sechs Szenarien in der gleichen Größenordnung (3153-3269 h/a).

2.3.1.6 IWES-Potentialanalysen unter Beachtung von Co-Nutzungspotential i.A. des BWO und BDEW (2022)

Im Rahmen des Gutachtens berechnete das IWES auf Basis einer mesoskaligen Modellierung (WRF-Modell) Erträge und Effizienzen auf den gemäß Raumordnungsplan 2021 verfügbaren Flächen in der deutschen AWZ, ähnlich den Berechnungen im Auftrag des BSH. Zusätzlich wurden mögliche Co-Nutzungspotentiale analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass bei geringerer Leistungsdichte in den bisher ausgewiesenen Flächen in Verbindung mit zusätzlicher Nutzung Co-genutzter Flächen die durchschnittlichen Effizienzen und Volllaststunden erhöht werden können. Beispielsweise wurden bei einem Gesamtpotential von 81,6 GW installierter Leistung Erträge von bis zu 292,1 TWh ermittelt (bei rund 3.580 Volllaststunden). Der Schwerpunkt lag hier auf der Analyse der Ertragspotentiale einer etwaigen Co-Nutzung (Gebiete mit Nutzungsform Naturschutz und Verteidigung). Hierfür wurden Annahmen für mögliche Co-Nutzungsflächen getroffen, die nicht mit konkreteren Absichtsbekundungen oder Aussagen zu Wahrscheinlichkeiten einer tatsächlichen Nutzungsmöglichkeit verbunden sind (Stoevesandt & Schwegmann, 2022).

2.3.1.7 RWE/DNV-Studie zu Auswirkungen weitläufiger Abschattungseffekten durch Windpark-Cluster (2023)

Im März 2022 gab RWE bekannt, dass gemeinsam mit DNV eine umfangreiche Studie zu den Auswirkungen von weitläufigen Abschattungseffekten von Offshore-Windparks geplant sei. Dies bekräftigt die kommerzielle Bedeutung des Themas. Demnach prognostiziert das vorläufige

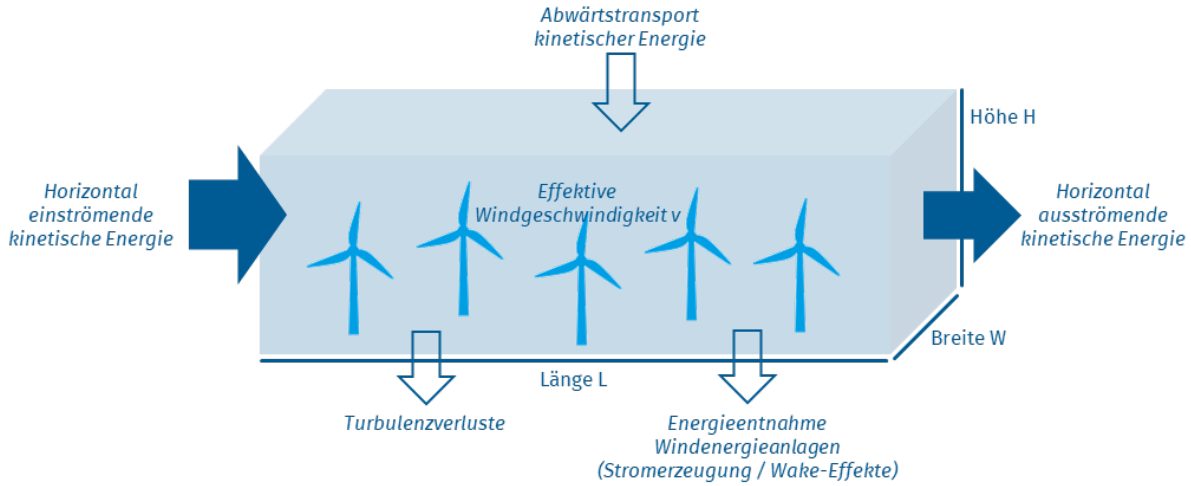
Modell von RWE, dass sich Nachlaufeffekte von Offshore-Windparks bis zu 200 km weit auswirken könnten und so den Energieertrag betroffener Windparks verringern, teils um deutlich über 10 %. Die Modellierungsergebnisse sollen von DNV auf Basis einer unabhängigen Analyse der Daten sowie einer numerischen Strömungssimulationen mittels Computational Fluid Dynamics Modellen überprüft werden. Mögliche Auswirkungen auf die Energieerträge sollen im Anschluss quantifiziert werden (RWE, 2023).

2.3.2 Vorgehensweise zur Abschätzung des Ertragspotentials

Die Ertragsermittlung erfolgt im Rahmen des vorliegenden Vorhabens mit dem Modell KEBA (Kinetic Energy Budget of the Atmosphere) (Agora Energiewende et al., 2020), das auf dem regionalen Budget kinetischer Energie innerhalb der atmosphärischen Grenzschicht basiert.

Das KEBA-Modell nutzt das kinetische Energiebudget der Atmosphäre, um Windgeschwindigkeitsreduktionen aufgrund von Offshore-Windparks zu kalkulieren und so Ertragspotentiale abzuleiten. Um das Energiebudget zu definieren, wird eine rechteckige Box entworfen, die in ihrer Größe der zu betrachtenden Region entspricht. Die Höhe der Box wird auf 700 m definiert, was der typischen Höhe der maritimen Grenzschicht entspricht. Das kinetische Energiebudget in der Box ergibt sich nun aus der Energie des Windes und den windgeschwindigkeitsreduzierenden Einflüssen (Agora Energiewende et al., 2020).

Abbildung 4: Schematische Übersicht der Funktionsweise des KEBA-Modells



Quelle: eigene Darstellung nach (Agora Energiewende et al., 2020), Deutsche WindGuard GmbH

Das Modell nutzt eine Formel, die die sich unter diesen Einflüssen ergebende Windgeschwindigkeit in der Box abschätzt und die in einem Excel-Modell aufgebaut ist. Eingangsparameter sind insbesondere die Definition der Box, der Luftwiderstandsbeiwert, eine Referenz-Leistungskurve und die Anzahl der Windenergieanlagen sowie eine zu hinterlegende Windgeschwindigkeitszeitreihe (im Rahmen der Agora-Studie FINO-1-Daten) (Agora Energiewende et al., 2020).

Das KEBA-Modell eignet sich insbesondere für übergeordnete Abschätzungen im Hinblick auf ein großräumiges Gesamtertragspotentials sowie Vergleiche unterschiedlicher Szenarien in dieser Hinsicht. Es wurde beispielsweise auch zur Untersuchung von Mehrfachnutzungspotentialen in den Niederlanden genutzt (Taminiau & van der Zwaan, 2022). Ein großer Vorteil des KEBA-Modells ist die Möglichkeit zur schnellen Darstellung unterschiedlichster Parametervariationen, wodurch die Betrachtung unterschiedlichster Auslegungskonstellationen möglich wird.

Im Gegensatz dazu ist die Ertragsermittlung mit Hilfe meteorologischer Modelle mit einem wesentlich größeren Aufwand verbunden, und es werden umfangreiche Rechenkapazitäten

benötigt. Häufig genutzte Modelle sind in diesem Zusammenhang WRF und COSMO-CLM (siehe hierzu auch (Akhtar et al., 2021)). Ein Vorteil dieser Modelle ist die Möglichkeit zur Darstellung räumlich aufgelöster Erträge und zur Berücksichtigung räumlich differenzierterer Annahmen Vergleichende Analysen haben ergeben, dass das KEBA-Modell für großräumige Ertragsermittlung Ergebnisse liefert, die in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen deutlich aufwendigerer meteorologischer Modelle wie WRF liegen (siehe dazu (Agora Energiewende et al., 2020) und (Kleidon & Miller, 2020)).

Zuletzt wurden insbesondere im Zuge der Fortschreibung des Flächenentwicklungsplans eine Vielzahl weiterer Berechnungen mit dem WRF-Modell durchgeführt (IWES-Begleitgutachten im Auftrag des BSH, 2023/2024), die sich direkt auf die Planungen für die deutsche AWZ gemäß Flächenentwicklungsplan beziehen. Deshalb wurde im Rahmen des vorliegenden Vorhabens eine erneute Einschätzung zur Vergleichbarkeit der Ertragsergebnisse aus beiden Modellen auf Basis von zwei Anfang 2022 mit dem IWES abgestimmten Szenarien vorgenommen (diese wurden damals im Rahmen eines Fachgesprächs zum FEP vorgestellt).[2] Hierbei wurden analog zu den Berechnungen mit dem WRF-Modell die Anlagenparameter der IEA 15 MW-Referenzturbine (Gaertner et al., 2020) angenommen. Als Windgeschwindigkeitsverteilung wird eine Weibull-Verteilung für das Jahr 2006 am Standort FINO 1 in einer Höhe von 150 m angenommen, welche durch das IWES bereitgestellt wurde. Für den Betrachtungsraum wird im KEBA-Modell die in Abschnitt 2.2 hergeleitete korrigierte Gesamtfläche der Vorrang- und Vorbehaltsgebiete mit quadratischer Grundfläche angenommen. In der nachfolgenden Tabelle 3 sind die Ergebnisse auf Basis von WRF und KEBA für die zwei Anfang 2022 mit dem IWES abgestimmten Szenarien dargestellt. Die Vergleichswerte für die WRF-Berechnung berücksichtigen für die Ertragsberechnung den Effekt geplanter niederländischer Windparks, der mit einer Ertragsreduzierung von rund 2,8 % angegeben wird. Da in der KEBA-Berechnung keine Berücksichtigung niederländischer Windparks erfolgt, wird dieser Effekt für eine bessere Vergleichbarkeit in den WRF-Ergebnissen herausgerechnet.

Tabelle 3: Modellvergleich

Szenario	Installierte Leistung	Energieertrag WRF (Vollmer & Dörenkämper, 2022)	Energieertrag WRF (zzgl. 2,8%)	Energieertrag KEBA	Abweichung KEBA
Szenario 1	45,2 GW	164 TWh/a	169 TWh/a	167 TWh/a	-1,3 %
Szenario 2	53,2 GW	182 TWh/a	187 TWh/a	186 TWh/a	-0,9 %

Demnach liefert das Modell KEBA für die zwei Beispielszenarien Erträge, die minimal unterhalb der WRF-Ergebnisse liegen (Abweichung unter 2 %). Angesichts der stets bei Ertragsermittlungen zu berücksichtigenden Unsicherheiten, die im Offshore-Bereich in einer Größenordnung von rund 10 % oder höher liegen, ist die Übereinstimmung für die betrachteten Beispiele als sehr gut zu bezeichnen.[3]

[2] Der hier vorgestellte Vergleich wurde im Juni 2022 mit dem damaligen Kenntnisstand vorgenommen. Im Nachgang entwickelte sich der FEP weiter und weitere Szenarien wurden durch IWES berechnet. Der grundlegende Zweck der hier vorgestellten Betrachtung, nämlich beide Modelle unter Verwendung gleicher Eingangsparameter zu vergleichen, ist allerdings erst einmal nicht abhängig von der Aktualität des Szenarios und kann somit weiterhin erfüllt werden.

[3] Die Übereinstimmung der Modelle für die untersuchten Szenarien ist besser als man dies aufgrund der Vielzahl an technologischen und meteorologischen Parametern für einen solchen Vergleich erwarten darf. Für andere Szenarien kann die Abweichung zwischen den Modellen unter Umständen größer ausfallen. Der Vergleich wurde Anfang 2022 auf Basis zu diesem Zeitpunkt verfügbarer Szenarien durchgeführt.

Das KEBA-Modell wird entsprechend im Folgenden dazu verwendet, unterschiedliche Ausbauszenarien hinsichtlich Leistungsdichte und Anlagentechnologie zu betrachten und insbesondere die Auswirkungen einzelner Parameterveränderungen zu analysieren. Es geht hierbei weniger um eine Abschätzung der absoluten Erträge, sondern um eine vergleichende Darstellung, auch um die später zu identifizierenden Mehrfachnutzungspotenziale in einen Kontext setzen zu können. Zunächst werden in Abschnitt 2.3.3 die Eingangsparameter und Grundannahmen, die im Rahmen des vorliegenden Vorhabens genutzt und in das Modell eingespeist wurden, näher erläutert.

2.3.3 Eingangsparameter und Grundannahmen der modellbasierten Abschätzung des Ertragspotentials

Die hier definierten Szenarien konzentrieren sich auf die Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Leistungsdichte, Windparkauslegung und Energieertrag. Zusätzlich erfolgt für ein Szenario eine Sensitivitätsanalyse für vier Anlagenparameter.

Das hier vorgestellte Vorgehen sowie die Szenarien knüpfen an eine Untersuchung im Auftrag des BSH (Falkenberg et al., 2020) an, in der bereits für einen beispielhaften Windpark mit einer Nennleistung von etwa 1 GW dargestellt wird, wie sich die Anlagenwahl und die Leistungsdichte auf den Energieertrag auswirken. Im Unterschied dazu liegt der Fokus hier nicht auf der Windparkebene, sondern auf Ebene des Gesamtbestands. Darüber hinaus erfolgen die Parametervariationen in einem größeren Bereich.

Alle Szenarien beziehen sich auf die Betrachtung der Effizienz der Erzeugung auf Basis der vorherrschenden Windbedingungen unter Berücksichtigung der vorhandenen Nachlaufeffekte. Wie auch in anderen Studien zu diesem Thema (beispielsweise Agora Energiewende et al., 2020; Stoevesandt & Schwegmann, 2022; Vollmer & Dörenkämper, 2022) werden aus den vorherrschenden Windbedingungen Erträge in Verbindung mit einer eingesetzten Technologie errechnet. Ertragsausfälle aufgrund technischer Gründe (elektrische Verluste, Nichtverfügbarkeit von Anlagen oder Netz, Einspeisemanagement) werden nicht betrachtet. In der Realität werden die Erträge somit unter den hier berechneten Szenarien liegen.

2.3.3.1 Leistungsdichte und Gesamtleistung

Die Ertragsberechnung erfolgt für die in Abschnitt 2.2 vorgestellte Variation der Leistungsdichte von 8 – 11 MW/km² in Schritten von 1 MW/km². Die Anwendung einer einheitlichen Leistungsdichte wird durch das KEBA-Modell vorausgesetzt. Auf diese Weise können die Effekte einer veränderten Leistungsdichte auf den Gesamtertrag gut verglichen werden. Es ist nicht möglich, für einzelne Gebiete abweichende Leistungsdichten und deren Effekte zu simulieren, hierzu sind die ausführlicheren WRF-Modellierungen geeigneter. Als Flächenpotential wird für die Nordsee wie die Ostsee jeweils die Gesamtfläche der Vorrang- und Vorbehaltsgebiete in der AWZ angenommen.

Auch bei festgelegter Leistungsdichte ergibt sich durch die Anlagenwahl und die Möglichkeit des Overplanting ein Spielraum für die Windparkentwickler bei der Auslegung des Windparks, welcher zusammenfassend in der Größe der Rotordichte dargestellt werden kann. Um die Auswirkungen dieser Spielräume auf das Ertragspotential abschätzen zu können, sollen die Szenarien Variationen der spezifischen Flächenleistung und des Overplanting abdecken.

2.3.3.2 Spezifische Flächenleistung

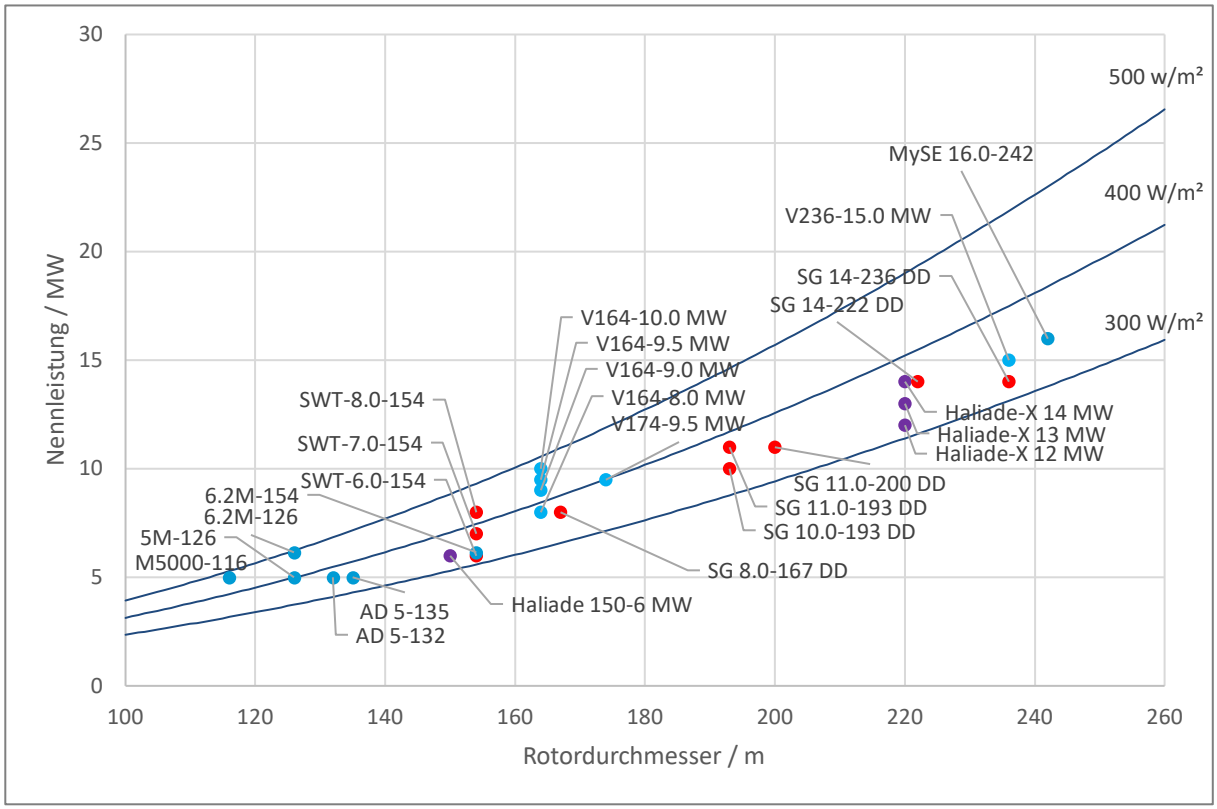
Bei der technologischen Weiterentwicklung von Offshore-Windenergieanlagen spielt neben der absoluten Größe insbesondere das Verhältnis aus Nennleistung und überstrichener Rotorfläche eine wichtige Rolle für den Ertrag. Abbildung 5 stellt die Entwicklung der Anlagennennleistung über der Entwicklung des Rotordurchmessers dar, welche bestimmend für die überstrichene

Rotorfläche ist. Das Verhältnis aus Anlagennennleistung und überstrichener Rotorfläche wird als spezifische Flächenleistung bezeichnet und für drei beispielhaften Werte in Abbildung 5 dargestellt. Die bisher in Deutschland eingesetzten Offshore-Windenergieanlagen mit Nennleistungen von unter 10 MW verfügen über spezifische Flächenleistungen im Bereich von 300 – 500 W/m².

Die Weiterentwicklung von Offshore-Windenergieanlagen erfolgt auf der Basis sogenannter Plattformen, bei denen wesentliche Komponenten bis auf kleinere Anpassungen für unterschiedliche Anlagenmodelle übereinstimmen. Grundlage für die Einführung einer neuen Plattform ist meist die Entwicklung eines deutlich größeren Rotordurchmessers. Die ersten Anlagen einer neuen Plattform sind in der Regel durch eine geringe spezifische Flächenleistung gekennzeichnet. Durch Optimierung der Anlagensteuerung und einzelne strukturelle Modifikationen können später häufig Anlagemodelle mit höherer Nennleistung bei gleichem Rotordurchmesser angeboten werden. Diese Entwicklung kann beispielhaft an der 8 MW-Plattform von Siemens nachvollzogen werden. Eingeführt mit einem Rotordurchmesser von 154 m und einer Nennleistung von 6 MW (entspricht 322 W/m²) wurde zunächst die Nennleistung in zwei Schritten auf bis zu 8 MW gesteigert (entspricht 429 W/m²). Anschließend wurde der Rotordurchmesser noch einmal leicht auf 167 m erhöht (entspricht 365 W/m²).

Die neuesten angekündigten Offshore-Windenergieanlagen verfügen über spezifische Flächenleistung, die 400 W/m² nicht überschreiten. Es erscheint jedoch wahrscheinlich, dass die angekündigten Anlagen zukünftig bei gleichem Rotordurchmesser auch mit höherer Nennleistung angeboten werden könnten, wie dies auch bei bisherigen Anlagen der Fall war. Allerdings erscheint es derzeit eher unwahrscheinlich, dass die neuesten Generationen von Offshore-Anlagen zukünftig mit spezifischen Flächenleistungen nahe 500 W/m² verfügbar sein werden. In einer internationalen Expertenumfrage zur erwarteten Entwicklung der Windenergiekosten (Wiser et al., 2021) wurden auch die Erwartungen zur Entwicklung der Anlagentechnologie abgefragt. Für Offshore-Windparks mit Inbetriebnahme im Jahr 2035 ergibt sich im Mittel ein erwarteter Rotordurchmesser von 250 m und eine erwartete Nennleistung von 17 MW. Dies entspricht einer spezifischen Flächenleistung von 346 W/m² und liegt in guter Übereinstimmung mit den Werten aktuell angekündigter Anlagen. Die aktuellen Anlagenentwicklungen deuten eher darauf hin, dass die mittlere spezifischen Flächenleistung im Offshore-Bereich unterhalb von 400 W/m² liegen wird.

Abbildung 5: Entwicklung von Offshore-Windenergieanlagen

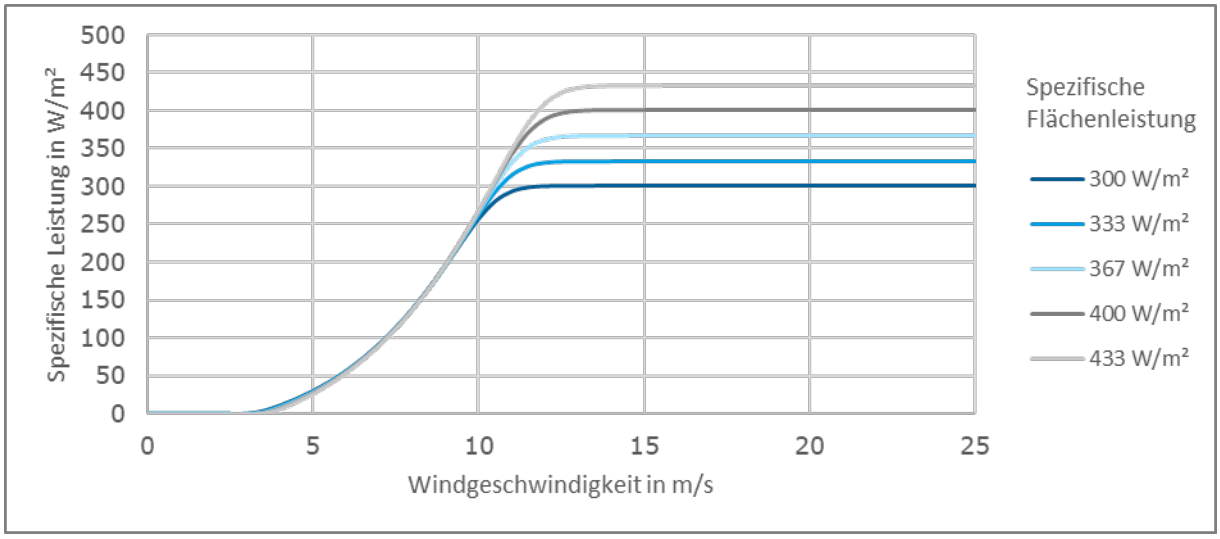


Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Bei gegebener Leistungsdichte steigt die Rotordichte, wenn Anlagen mit geringerer spezifischer Flächenleistung eingesetzt werden. Gleichzeitig führt eine steigende Rotordichte zu geringeren relativen Abständen zwischen den Windenergieanlagen, da entweder mehr Anlagen oder Anlagen mit größerem Rotordurchmesser eingesetzt werden. Um den Einfluss der spezifischen Flächenleistung auf den Energieertrag abschätzen zu können, erfolgt die Ertragsermittlung für fünf unterschiedliche spezifische Flächenleistungen. Als untere Grenze der spezifischen Flächenleistung wird ein Wert von 300 W/m² gewählt, der sich aus den Anlagenparameter bisher eingesetzter und angekündigter Offshore-Windenergieanlagen ergibt. Als obere Grenze wird ein Wert von 433 W/m² gewählt, um mögliche Leistungssteigerung der neuesten Plattformen um bis zu 25 % abzudecken.

Die Ertragsermittlungen mit dem Modell KEBA sind bei fester Leistungsdichte und fester spezifischer Flächenleistung unabhängig von der absoluten Anlagengröße: Es macht beispielsweise keinen Unterschied für den Ertrag, ob ein Windpark aus 200 Anlagen mit jeweils 10 MW Nennleistung oder aus 100 Anlagen mit jeweils 20 MW Nennleistung besteht. Entscheidend für den Energieertrag ist die Rotordichte. Die Anlagentechnologie wird daher hier unabhängig von der absoluten Größe allein über die spezifische Flächenleistung definiert. Entsprechende Leistungskennlinien sind in Abbildung 6 beispielhaft dargestellt. Es wird ein Leistungsbeiwert von 0,44 angenommen. Der angenommene Betriebsbereich der Windenergieanlagen liegt bei Windgeschwindigkeiten von 4 – 25 m/s.

Abbildung 6: Leistungskennlinien



Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Auch wenn spezifische Flächenleistungen von 300 – 433 W/m² als realistisch für zukünftige Offshore-Windenergieanlagen angesehen werden können, heißt dies nicht, dass zu jedem Zeitpunkt auch tatsächlich eine entsprechende Auswahl an Anlagen zur Verfügung steht. Es gibt aktuell nur wenige Hersteller von Offshore-Windenergieanlagen und eine begrenzte Auswahl an Modellen. Bei der Entscheidung für eine Anlage spielen auch andere Faktoren als die spezifische Flächenleistung eine Rolle, beispielsweise die Kosten. Der faktische Spielraum der Windparkentwickler bei der Anlagenauswahl wird daher in vielen Fällen kleiner sein als der hier angenommene Spielraum.

2.3.3.3 Overplanting

Eine weitere Möglichkeit, die Rotordichte eines Windparks zu erhöhen, ist das sogenannte Overplanting. Nach dem Planungsgrundsatz des FEP 2023 ist es möglich, dass die tatsächlich installierte Nennleistung eines Windparks von der zugewiesenen Netzanbindungskapazität abweicht. Wenn diese Nennleistungserhöhung einen Umfang von 10 % der zugewiesenen Netzanbindungskapazität nicht überschreitet, ist gemäß des FEP kein Nachweis über die Vereinbarkeit einer solchen Nennleistungserhöhung mit dem 2 K-Kriterium erforderlich. Diese Option erlaubt häufig die Errichtung einer oder mehrerer zusätzlicher Anlagen. Um den Effekt des Overplanting auf den Energieertrag zu ermitteln, erfolgt die Ertragsermittlung für jede der 20 Kombinationen aus Leistungsdichte und spezifischer Flächenleistung einmal ohne Overplanting und einmal mit 10 % Overplanting.

Es wird allein der Effekt des Overplanting auf die Rotordichte und den Energieertrag bei voller Anlagenverfügbarkeit untersucht (diese wird im Modell generell vorausgesetzt). In diesem Modellfall kann durch das Overplanting im Teillastbereich mehr eingespeist werden. In der Praxis ergibt sich ein zusätzlicher Nutzen des Overplanting dadurch, auch bei Ausfall einer Windenergieanlage noch in vollen Umfang der Netzanbindungskapazität einspeisen zu können.

2.3.3.4 Windgeschwindigkeiten

Die Ertragsberechnung mit dem Modell KEBA erfolgt unter Verwendung einer einzigen Windgeschwindigkeitsverteilung, da diese im Modell auf die gesamte zuvor definierte Region angewendet wird. Im Rahmen der Agora-Studie, im Rahmen derer eine vergleichbare Ertragsermittlung mit Hilfe des KEBA-Modells durchgeführt wurde, wurde für die Nordsee die Windgeschwindigkeitsverteilung am Standort FINO 1 verwendet. (Agora Energiewende et al., 2020) Um die Eignung dieser Verteilung nochmals zu prüfen, wurden für drei Standorte innerhalb der AWZ der

Nordsee (Forschungsplattformen FINO 1 und FINO 3 sowie innerhalb des Gebiets EN17 des ROP) die vorliegenden Windgeschwindigkeitsverteilungen (Dörenkämper, M., persönliche Kommunikation, 19. Mai 2022) für eine vergleichende Ertragsabschätzung heran gezogen. Die entsprechende Auswertung zeigte, dass die mit den Windgeschwindigkeitsverteilungen für FINO 3 und EN17 errechneten Erträge etwa 3 % beziehungsweise 7 % höher liegen als mit der Windgeschwindigkeitsverteilung am Standort FINO 1. Darauf aufbauend wurde entschieden, auch im Rahmen der vorliegenden Analyse die Windgeschwindigkeitsverteilung für den Standort FINO 1 zu nutzen. Hierdurch wird somit eine eher konservative Annahme getroffen, um das Gesamtertragspotential nicht zu überschätzen. In Anbetracht der zukünftig zu erwartenden Anlagengrößen (Wiser et al., 2021) wird von einer Nabenhöhe von 150 m ausgegangen.

2.3.3.5 Überblick Szenarien

Es werden insgesamt 40 Szenarien mit Variationen der Leistungsdichte im Bereich 8 – 11 MW/km², Variationen der spezifischen Flächenleistungen im Bereich 300 – 433 W/m² sowie Overplanting im Umfang von 0 % und 10 % untersucht.

Alle relevanten Einstellungen für die Berechnungen im Modell KEBA finden sich in Tabelle 4.

Tabelle 4: Annahmen KEBA

Parameter	Einstellung	Quelle
Spezifikationen Windpark		
Leistungsbeiwert	0,44	eigene Annahme
Spezifische Flächenleistung	variierend	eigene Annahme gemäß definierter Szenarien
Einschaltwindgeschwindigkeit	4 m/s	eigene Annahme
Abschaltwindgeschwindigkeit	25 m/s	eigene Annahme
Windenergiefläche	Nordsee: 5.790 km² Ostsee: 345 km²	korrigierte Fläche der Vorrang- und Vorbehaltsgebiete (siehe dazu Tabelle 2)
Leistungsdichte	variierend	eigene Annahme gemäß definierter Szenarien (siehe dazu Tabelle 2)
Spezifikation Umwelt		
Höhe des Querschnitts („Box“)	700 m	(Agora Energiewende et al., 2020)
Schubbeiwert	0,001	(Agora Energiewende et al., 2020)
Luftdichte	1,20 kg/m³	(Agora Energiewende et al., 2020)
Windgeschwindigkeitsverteilung	Weibull FINO 1: k = 2,04, A = 11,4 m/s Weibull FINO 2: k = 2,33, A = 11,0 m/s	(Dörenkämper, M., persönliche Kommunikation, 19. Mai 2022) (DNV, 2022)

Zusätzlich werden im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse für eine Leistungsdichte von 10 MW/km² neben der spezifischen Flächenleistung die Anlagenparameter Leistungsbeiwert, Einschaltwindgeschwindigkeit und Abschaltwindgeschwindigkeit wie in Tabelle 5 dargestellt variiert: Der Leistungsbeiwert ist eine Kennzahl zur Messung der Effizienz einer Windenergieanlage (Wirkungsgrad). Er beschreibt zu jedem Zeitpunkt, welcher Anteil der im Wind enthaltenen Leistung in mechanische Leistung des Rotors umgewandelt werden kann. Der theoretisch maximale Leistungsbeiwert liegt bei 0,593 (nach Betz), moderne Windenergieanlagen erreichen Werte zwischen etwa 0,4 und etwa 0,5, deshalb wird in diesem Spektrum variiert, um den Einfluss unterschiedlich effizienter Technologien zu analysieren. Die Variation der genannten Anlagenparameter, spezifische Flächenleistung, Leistungsbeiwert, Einschaltwindgeschwindigkeit und Abschaltwindgeschwindigkeit, ermöglicht eine Einschätzung des Einflusses der gewählten Anlagentechnologie auf die Ergebnisse.

Tabelle 5: Parametervariation Sensitivitätsanalyse

Parameter	Referenz	Minimum	Maximum
Spezifische Flächenleistung in W/m²	367	300	433
Leistungsbeiwert	0,44	0,42	0,48
Einschaltwindgeschwindigkeit in m/s	4	3	5
Abschaltwindgeschwindigkeit in m/s	25	22	28

2.3.4 Ertragspotentialermittlung für die deutsche AWZ der Nordsee

Der Fokus der Ergebnisdarstellung liegt auf der AWZ der Nordsee, da hier der Großteil des Flächenpotentials zu verorten ist. Die Zusammenhänge gelten in ähnlicher Weise für die AWZ der Ostsee. Tabelle 6 stellt die berücksichtigte Windparknennleistung und den errechneten Ertrag für sämtliche Szenarien der Nordsee dar. Daraus lassen sich einige Zusammenhänge ableiten, die insbesondere in Abbildung 7 und Abbildung 8 deutlich werden.

Tabelle 6: Ertragspotential für die AWZ der Nordsee (ohne sonstige Verluste)

Leistungsdichte in MW/km²		8	9	10	11
Unbedingte Vorbehalts- und Vorranggebiete für die Windenergie gemäß ROP 2021 (korrigierte Fläche) [km²]		5.790	5.790	5.790	5.790
Netzanschlussleistung [GW]		46,3	52,1	57,9	63,7
Windparkleistung [GW]		46,3	52,1	57,9	63,7
Windparkleistung inkl. Overplanting [GW]		51,0	57,3	63,7	70,1
		Ertragspotential in TWh/a			
Spezifische Flächenleistung in W/m²	300	169	182	195	207
	333	165	178	191	203
	367	161	175	187	199
	400	158	171	183	195
	433	155	168	180	191

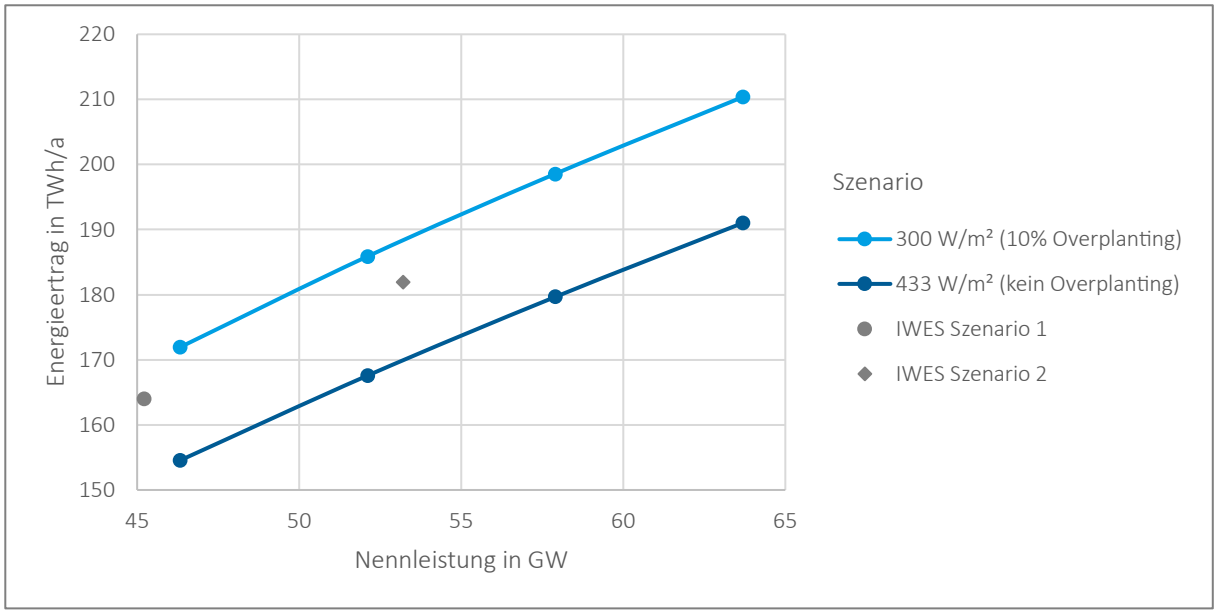
Leistungsdichte in MW/km²		8	9	10	11
		Ertragspotential inkl. Overplanting in TWh/a			
Spezifische Flächenleistung in W/m²	300	172	186	199	210
	333	168	182	195	206
	367	165	178	191	203
	400	162	175	187	199
	433	158	172	184	195

Der abgeschätzte Energieertrag für die Nordsee liegt je nach Szenario zwischen 155 und 210 TWh/a. Hinzu kommt ein Ertrag von 12 - 18 TWh/a für die Ostsee. Wie Tabelle 6 zeigt, geht das Absenken der spezifischen Flächenleistung um 33 W/m² in den hier betrachteten Szenarien für die Nordsee bei gleicher Leistungsdichte mit einer Steigerung der Energiedichte in einem Umfang von rund 2 % einher. Ein ähnlicher Effekt kann durch das Overplanting erreicht werden. In den hier untersuchten Fällen führt ein Overplanting von 10 % bei uneingeschränkter Anlagenverfügbarkeit und gleichbleibender Leistungsdichte ebenfalls zu einer Ertragssteigerung von etwa 2 %. Dies ist plausibel, da in beiden Varianten eine ähnliche Steigerung der Rotordichte erreicht wird. Ferner zeigt die Tabelle 6, dass der Energieertrag mit zunehmender Leistungsdichte steigt. Im betrachteten Bereich führt eine Steigerung der Leistungsdichte um 1 MW/km² bei gleicher Windparkauslegung zu einer Erhöhung des Energieertrags um 6 - 8 %.

Demnach ist der höchste Energieertrag bei fester Leistungsdichte stets im Szenario mit der niedrigsten spezifischen Flächenleistung und bei Realisierung von Overplanting zu erwarten, da hier die höchste Rotordichte erreicht wird. Der geringste Ertrag ergibt sich entsprechend im entgegengesetzten Szenario mit der höchsten spezifischen Flächenleistung und ohne Overplanting.

Abbildung 7 stellt den im Rahmen der Szenarien ermittelten Bereich des zu erwartenden Ertrags über der betrachteten Gesamtnennleistung für die Nordsee dar, welche sich aus der Variation der Leistungsdichte und der Windparkauslegung ergibt (maximal im Rahmen der Szenarien festgestellte Bandbreite). Daraus lässt sich ableiten, dass der hier unterstellte Spielraum der Windparkentwickler bei der Auslegung der Windparks bei festgelegter Leistungsdichte etwa 10 – 11 % des zu erwartenden Energieertrags ausmacht (Vergleich der dargestellten Stützwerte der in Abbildung 7 dargestellten Szenarien). Zum Vergleich werden in Abbildung 7 zusätzlich die Ergebnisse der WRF-Berechnung des IWES (Vollmer & Dörenkämper, 2022) dargestellt. Diese Ergebnisse liegen innerhalb des hier aufgespannten Bereichs.

Abbildung 7: Energieertrag Nordsee in Abhängigkeit von der Gesamtnennleistung und der Windparkauslegung



Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

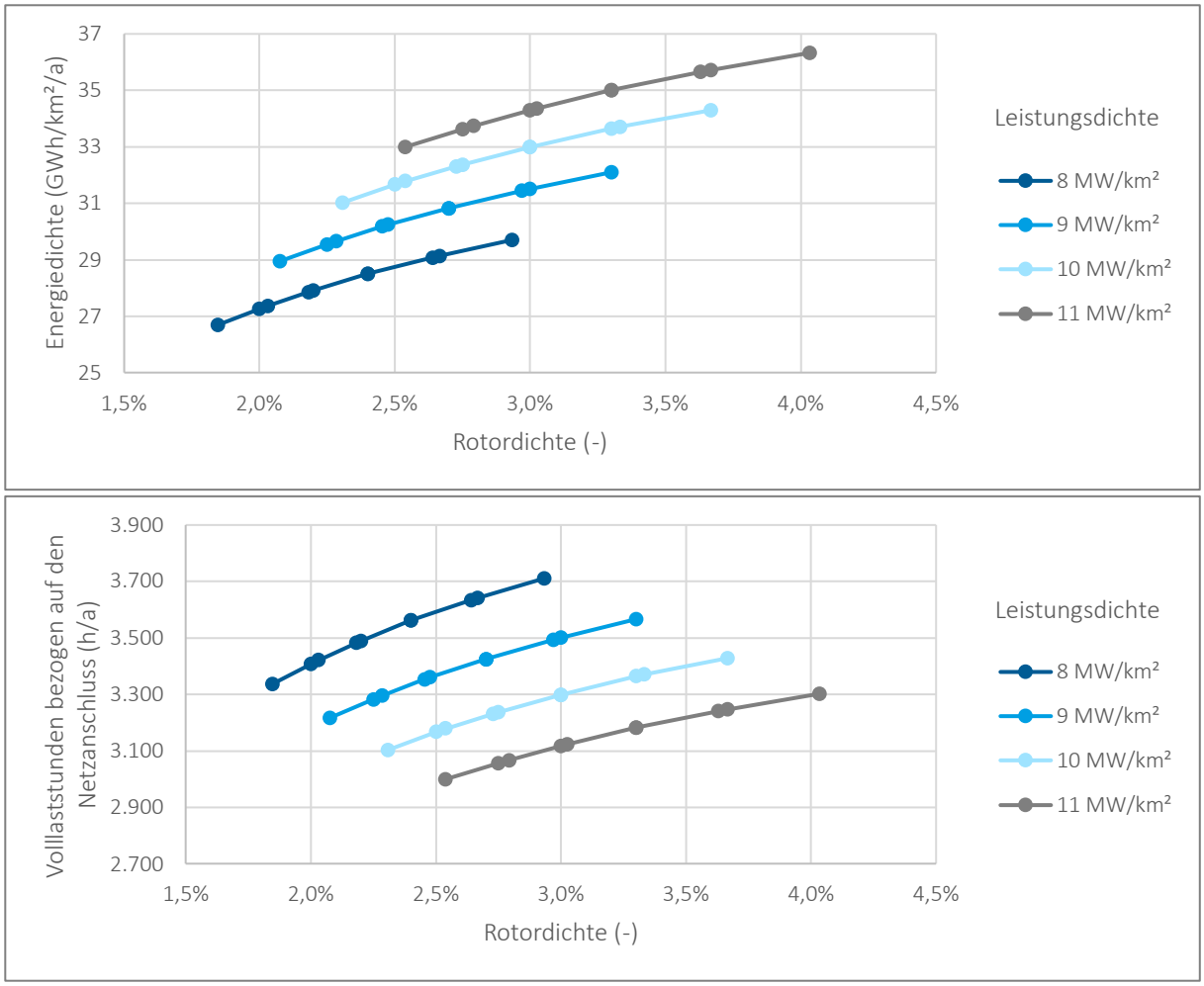
Das Diagramm stellt den zu erwartenden Jahresenergieertrag (ohne sonstige Verluste wie durch parkinterne Verkabelung, eingeschränkte Verfügbarkeit) für die Nordsee in Abhängigkeit von der festgelegten Gesamtnennleistung und der Windparkauslegung dar. Die Darstellung gilt für eine korrigierte Gesamtfläche der Windenergiegebiete von 5.790 km². Die Nennleistung bezieht sich auf den Netzanschluss, die Nennleistung der Windparks kann durch Overplanting höher ausfallen. Die IWES-Szenarien verwenden für Bestandswindparks und konkret geplante Windparks die tatsächlichen spezifischen Flächenleistung. Für den Großteil der Gesamtleistung wird jedoch eine spezifische Flächenleistung von 332 W/m² angenommen.

In Abbildung 8 werden die in den Szenarien ermittelte Energiedichte und die Volllaststunden in Abhängigkeit von Leistungsdichte und Rotordichte dargestellt. Die Kenngröße der Energiedichte drückt den zu erwartenden Energieertrag pro Windparkfläche aus, die Kenngröße der Rotordichte bezieht die vorhandene Gesamtrotorfläche auf die Windparkfläche. Die Betrachtung erfolgt jeweils für die vier betrachteten Leistungsdichten. Bei fester Leistungsdichte haben das Absenken der spezifischen Flächenleistung und ein Overplanting denselben Effekt: sie führen zu einer Steigerung der Rotordichte. Es wird gezeigt, dass die Energiedichte mit zunehmender Rotordichte erwartungsgemäß zunimmt, die Zuwächse sind allerdings nicht linear, da mit zunehmender Rotordichte auch die Abschattungsverluste zunehmen.

Vergleicht man zudem die Auswertungen für die vier verschiedenen Leistungsdichten, wird zudem deutlich, dass wie zu erwarten die Energiedichte mit zunehmender Leistungsdichte steigt. Die Zuwächse je zusätzlichem MW/km² nehmen mit jedem Sprung etwas ab, da mit zunehmender Leistungsdichte bei gleicher Anlagentechnologie ebenfalls die Abschattungsverluste zunehmen.

Abbildung 8 stellt ergänzend die erwartbaren Volllaststunden für alle Szenarien dar. Die Volllaststunden setzen den Energieertrag ins Verhältnis zur Nennleistung einer Windenergieanlage. Um Verwechselungen bei der Nennleistung im Falle eines Overplanting zu vermeiden, werden die Volllaststunden in dieser Darstellung auf die Nennleistung des Netzanschlusses bezogen. Bei fester Leistungsdichte nehmen die Volllaststunden mit zunehmender Rotordichte zu. Bei Variation der Leistungsdichte sinken die Volllaststunden mit zunehmender Leistungsdichte. Dies ist auf die zunehmenden Abschattungsverluste bei steigender Rotordichte zurückzuführen. Allein durch die Wahl der Rotordichte ergibt sich in den hier untersuchten Szenarien für die Nordsee je nach vorgegebener Leistungsdichte eine Schwankungsbreite der Volllaststunden von 300 - 400 h/a.

Abbildung 8: Energiedichte und Volllaststunden in Abhängigkeit von Leistungsdichte und Rotordichte

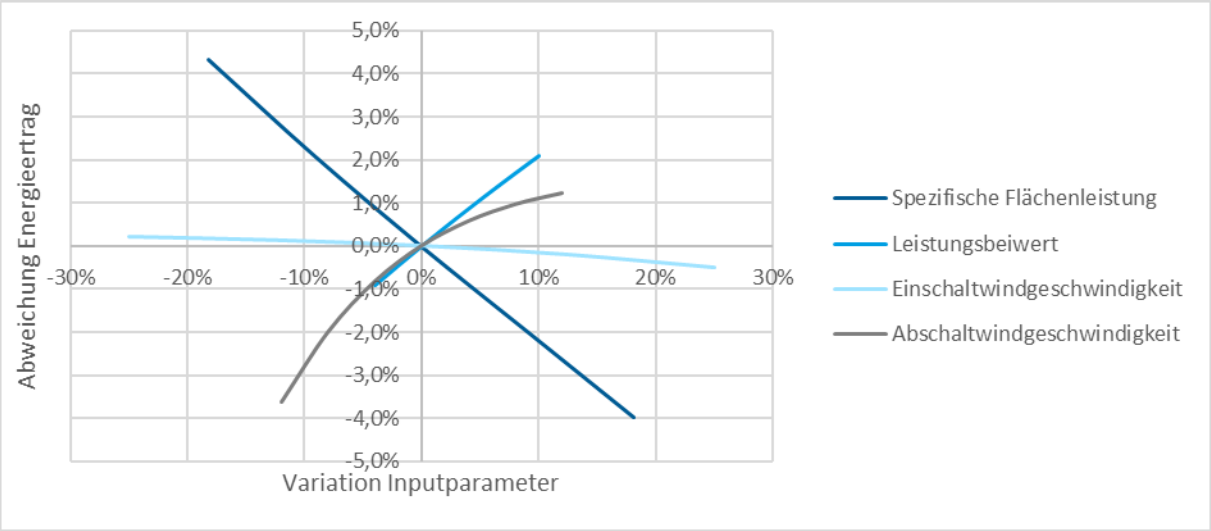


Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Das obere Diagramm zeigt die Energiedichte in Abhängigkeit von der Rotordichte, welche sich durch die Anlagenwahl und das Overplanting ergibt, für unterschiedliche Leistungsdichten. Das untere Diagramm stellt die Volllaststunden in Abhängigkeit von der Rotordichte für unterschiedliche Leistungsdichten dar. Die Darstellung gilt für die Nordsee und eine korrigierte Gesamtfläche der Windenergiegebiete von 5.790 km². Ohne Berücksichtigung sonstiger Verluste wie z.B. durch parkinterne Verkabelung oder eingeschränkte Verfügbarkeit.

Abbildung 9 stellt neben dem bereits beschriebenen Einfluss der spezifischen Flächenleistung die Auswirkungen der Variation weiterer Anlagenparameter auf den Energieertrag anhand eines Referenzszenarios dar. Daraus lässt sich ableiten, dass der Energieertrag nach der spezifischen Flächenleistung am sensitivsten auf die Variation des Leistungsbeiwerts reagiert. Auch der Betriebsbereich der Windenergieanlage beeinflusst den Energieertrag. Die Variation der Abschaltwindgeschwindigkeit wirkt sich dabei bedingt durch den überproportionalen Einfluss der Windgeschwindigkeit deutlich stärker auf den Energieertrag aus als die Variation der Einschaltwindgeschwindigkeit.

Abbildung 9: Sensitivitätsanalyse Anlagenparameter



Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Das Diagramm zeigt die relative Abweichung des erwarteten Energieertrags in Abhängigkeit von der relativen Variation der Anlagenparameter. Als Referenzszenario werden eine Leistungsdichte von 10 MW/km² und eine spezifische Flächenleistung von 367 W/m² bei einem Leistungsbeiwert von 0,44, einer Einschaltwindgeschwindigkeit von 4 m/s und einer Abschaltwindgeschwindigkeit von 25 m/s angenommen. Die Darstellung gilt für die Nordsee mit einer korrigierten Gesamtfläche der Windenergiegebiete von 5.790 km².

2.4 Einschätzung der Ergebnisse der Potentialermittlung auf Basis des Raumordnungsplans 2021

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse zusammengefasst und eingeordnet, die Grenzen der Untersuchung diskutiert und auf weiteren Forschungsbedarf verwiesen.

2.4.1 Einschätzung des Windenergiepotentials

Die Potentialanalyse fasst das Flächenpotential für Windenergie nach dem ROP 2021 zusammen. Die angehobenen Ausbauziele von mindestens 70 GW machen ein Anheben der Leistungsdichte gegenüber vorherigen Planungen erforderlich. Zudem wurden im Rahmen der Fortschreibung des Flächenentwicklungsplans über die Festlegungen des Raumordnungsplans hinaus gehende Flächen für die Windenergie auf See vorgesehen. Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens wird auf den Festlegungen des ROP 2021 aufgebaut, in dem die unterschiedlichen Nutzungsformen auf See definiert und entsprechende Flächen festgelegt sind. Die Ergebnisse der Potentialanalyse sind damit weniger als eine konkrete Abschätzung der installierbaren Leistung und erzielbaren Erträge auf Offshore-Windenergieflächen zu verstehen, sondern vielmehr als eine vergleichende Auswertung bzgl. des Einflusses unterschiedlicher Auslegungsparameter auf die sich aus einer gegebenen Gesamtfläche erreichbaren Ertragspotentiale.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich auf den Vorrang- und Vorbehaltsgebieten für Windenergie gemäß ROP 2021 mit hohen Leistungsdichten von 8 – 11 MW/km² bei freier Planung theoretisch Gesamtleistungen von 49,1 – 67,5 GW installieren lassen, kommen die bedingten Gebiete hinzu, steigert sich die mögliche Gesamtleistung auf 50,7 – 69,7 GW. Unter Berücksichtigung bereits belegter Flächen reduziert sich die realisierbare Gesamtleistung auf 47,8 – 60 GW, beziehungsweise 49,4 – 62,2 GW (siehe Tabelle 2).

Die Abschätzung der erwartbaren Energieerträge für die Flächen in der deutschen AWZ der Nordsee mit dem Modell KEBA zeigt, wie auch vorherige Untersuchungen des Ertragspotentials für die Nordsee (z.B. (Falkenberg et al., 2020), (Agora Energiewende et al., 2020), (Baumgärtner

et al., 2021)), dass die Volllaststunden bei zunehmender Leistungsdichte abnehmen. Ergänzend dazu wird in dieser Untersuchung der Einfluss der Parkauslegung bei gegebener Leistungsdichte abgeschätzt. Der Einfluss der für die Parkauslegung relevanten Parameter der spezifischen Flächenleistung und des Overplanting werden anhand der Kenngröße der Rotordichte betrachtet. Die Ertragsabschätzung zeigt, dass die Rotordichte einen relevanten Einfluss auf den Stromertrag hat. In den betrachteten Leistungsdichte-Bereichen führt eine Erhöhung der Rotordichte um 10 % zu einer Ertragssteigerung von etwa 2 %. Der Leistungsbeiwert der Windenergieanlagen hat einen ähnlichen Einfluss auf den erwartbaren Ertrag wie die spezifische Flächenleistung – wird dieser um 10 % gesteigert, führt dies ebenfalls zu einer Ertragserhöhung um 2 %. Dies zeigt, dass die Wahl der Anlagentechnologie und somit auch die Wahl der Referenzanlage in den Szenarien einen nennenswerten Einfluss auf die Abschätzung der Ertragspotentiale in der deutschen AWZ hat.

2.4.2 Grenzen der Untersuchung

Großräumige Ertragsermittlungen wie für die AWZ der Nordsee sind grundsätzlich mit Unsicherheiten verbunden, da sie von einer Vielzahl meteorologischer und technologischer Annahmen und Wechselwirkungen abhängen. Darüber hinaus gibt es in der hier betrachteten Größenordnung (Zielsetzung von mindestens 70 GW offshore bei vergleichsweise hoher Bebauungsdichte) keine realen Erfahrungen bezüglich der tatsächlichen Effekte auf die Strömung und die Ertragspotentiale. Durch die laufenden Forschungsprojekte existiert allerdings eine immer größere Anzahl an Berechnungen und Erkenntnissen sowie teils auch Messdaten, die miteinander verglichen und interpretiert werden können.

Bei dem hier für die Ertragsabschätzung verwendeten Modell KEBA handelt es sich um eine vergleichsweise einfache Berechnungsmethode, welche beispielsweise keine räumlich aufgelöste Untersuchung oder Berücksichtigung unterschiedlicher atmosphärischer Zustände erlaubt. Dennoch konnte gezeigt werden, dass sich die mit deutlich komplexeren Modellen berechneten Ergebnisse auch hier gut reproduzieren lassen. Während die grundlegenden Zusammenhänge zwischen Leistungsdichte, Rotordichte und Energiedichte als plausibel eingeschätzt werden, ist es möglich, dass andere Berechnungsmodelle die beschriebenen Effekte stärker oder weniger stark wiedergeben. Insbesondere kann nur mit Hilfe der meteorologischen Modelle auch auf die räumliche Verteilung der Erträge eingegangen sowie einzelne Flächen betrachtet werden.

Es sollte stets beachtet werden, dass alle Berechnungen im Hinblick auf die großräumigen Ertragspotentiale in der deutschen AWZ der Nordsee (unabhängig vom verwendeten Modell) zu großen Teilen auf Annahmen fußen, da für den Großteil der Flächen noch keine Informationen zur geplanten Anlagentechnik vorliegen. Zudem sind Windgeschwindigkeitszeitreihen immer mit Unsicherheiten behaftet. Die Auswahl der Annahmen beeinflusst die Ergebnisse in nicht unerheblicher Form, wie in Abschnitt 2.3.4 gezeigt werden konnte. Die grundlegenden Zusammenhänge und Verhältnisse zwischen unterschiedlichen Szenarien können aber Aufschluss darüber gehen, in welche Richtung eine geeignete Entwicklung gehen könnte.

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist stets zu beachten, dass sich alle Szenarien auf die Betrachtung der Effizienz der Erzeugung auf Basis der vorherrschenden Windbedingungen unter Berücksichtigung der vorhandenen Nachlaufeffekte beziehen und dass, wie auch in anderen Studien zu diesem Thema, Ertragsausfälle aufgrund technischer Gründe (elektrische Verluste, Nichtverfügbarkeit von Anlagen oder Netz, Einspeisemanagement) nicht betrachtet werden. In der Realität werden die Erträge somit unter den hier berechneten Szenarien liegen.

2.4.3 Weiterer Untersuchungsbedarf

Vor dem Hintergrund ambitionierter Ausbauziele bei gleichzeitig begrenzten Flächen, welche in der deutschen AWZ für die Nutzung durch Windenergieanlagen zur Verfügung stehen, stellt sich

die Frage, welchen Einfluss die Flächenkulisse auf das Ertragspotential hat. Es ist anzunehmen, dass ein höherer Ertrag erzielt werden kann, wenn eine fixe Gesamtleistung wie etwa das Ausbauziel von mindestens 70 GW auf einer größeren Fläche als der bisher festgelegten realisiert würde. Wie groß dieser Effekt ist, könnte eine Fragestellung weiterführender Untersuchungen sein.

Eine weitere Frage ergibt sich aus dem in dieser Analyse dargestellten Spielraum bei der Windparkauslegung, auch bei festgelegter Leistungsdichte. Geht es allein um die Maximierung des Energieertrags, wäre eine hohe Rotordichte erstrebenswert, eine solche ist jedoch mit zusätzlichen Kosten verbunden. Die Frage nach dem betriebswirtschaftlichen beziehungsweise volkswirtschaftlichen Optimum könnte Inhalt weiterführender Betrachtungen sein.

In dieser Untersuchung wurde der Effekt des Overplanting auf die Rotordichte untersucht. Hierfür wurde eine volle Anlagenverfügbarkeit angenommen. Der ertragssteigernde Effekt des Overplanting ist größer, wenn eine eingeschränkte Anlagenverfügbarkeit angenommen wird. Die Quantifizierung dieses Effekts ist eine weitere interessante Fragestellung, deren nähere Untersuchung aber nicht auf Basis des KEBA-Modells erfolgen kann.

3 Rechtswissenschaftliche Analyse: Rechtliche Grundlagen der Mehrfachnutzung von Windenergie auf See mit anderen maritimen Nutzungen

Die AWZ wird im gegenwärtigen Raumordnungsplan (ROP 2021)[4] nahezu vollständig überplant. Die räumliche Begrenzung der AWZ und der damit einhergehende Nutzungsdruck müssen mit den Ausbauzielen für Windenergie auf See nach der neuen Fassung des Windenergie-auf-See-Gesetzes (WindSeeG)[5] in Einklang gebracht werden. Darin sind Ausbauziele von mindestens 30 GW bis 2030, mindestens 40 GW bis 2035 und schließlich mindestens 70 GW bis 2045 festgelegt. Um diese Ziele zu erreichen, muss die verfügbare Fläche möglichst effizient genutzt werden.[6] Dies erfordert, die rechtlichen Potentiale für Mehrfachnutzungen von Windenergie und anderen maritimen Nutzungen zu untersuchen. Ausgangspunkt ist das Raumordnungsgesetz (ROG)[7], welches dem Plangeber erlaubt, die Nutzungsansprüche der AWZ zu ordnen und ihnen jeweils Flächen zuzuweisen. Im nächsten Schritt ist das WindSeeG das zentrale rechtliche Werk, nach dem Windenergieanlagen auf See geplant und genehmigt werden.

Ziel dieses Abschnitts ist es, den Status Quo der rechtlichen Rahmenbedingungen des ROG und WindSeeG für Mehrfachnutzungen von Windenergie mit anderen maritimen Nutzungen in der AWZ darzustellen, rechtliche Hemmnisse und Potentiale aufzuzeigen sowie zu untersuchen, wie Mehrfachnutzung rechtssicher geplant werden kann. Dabei werden zunächst die Grundlagen der Mehrfachnutzung aufgearbeitet, wobei offengelassen wird, mit welcher anderen maritimen Nutzung die Windenergie kombiniert werden soll.

Die Status Quo Analyse beginnt mit der Darstellung des Raumordnungsrechts und den dort verfügbaren Planungsinstrumenten. Als nächstes wird das Fachplanungsrecht der Windenergieanlagen auf See in Bezug auf Mehrfachnutzung dargestellt. Es folgt ein kurzer Exkurs ins Naturschutzrecht. Bestandteil dieser Darstellungen ist auch die Untersuchung der jeweiligen rechtlichen Potentiale und Hemmnisse für Mehrfachnutzung. Im letzten Abschnitt werden die Ergebnisse zusammengefasst und knapp bewertet.

Bei der Untersuchung des Rechtsrahmens zur Mehrfachnutzung im Raumordnungsrecht fällt zunächst auf, dass das ROG den Begriff der Mehrfachnutzung nicht kennt. Damit kennt das Gesetz keine Begriffsdefinition für Mehrfachnutzungen, regelt diese aber auch nicht in anderen Zusammenhängen, etwa als unbestimmten Rechtsbegriff. Zur Durchführung dieses Projekts hat sich das Konsortium daher auf eine gemeinsame Definition geeinigt:

Mehrfachnutzung

Im Rahmen dieses Projekts ist unter einer Mehrfachnutzung die Nutzung eines räumlichen Gebiets durch zwei oder mehr Funktionen oder Nutzungen zu verstehen. Wenn in diesem Dokument also von einer Mehrfachnutzung die Rede ist, so ist damit die Nutzung eines Gebiets durch die Windenergie und durch mindestens eine andere Nutzung oder Funktion gemeint.

[4] Anlage Raumordnungsplan für die deutsche ausschließliche Wirtschaftszone in der Nordsee und in der Ostsee (Anlage zur Verordnung über die Raumordnung in der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone in der Nordsee und in der Ostsee) vom 19. August 2021 (BGBl. I S. 3886) (AWZROVAnl).

[5] Windenergie-auf-See-Gesetz vom 13. Oktober 2016 (BGBl. I S. 2258, 2310), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 27. März 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 107) geändert worden ist.

[6] § 1 Abs. 2 WindSeeG.

[7] Raumordnungsgesetz vom 22. Dezember 2008 (BGBl. I S. 2986), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 22. März 2022 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist.

Im Zentrum dieser Projekt-Definition steht also die Windenergienutzung, die mit einer anderen Nutzung kombiniert werden soll. Neben Mehrfachnutzung gibt es noch weitere Begriffe.[8] So zeichnet sich der Begriff „Multi-Use“ für die Mehrfachnutzung von mehreren Offshore-Energieerzeugungsanlagen, insbesondere auch andere Energieerzeugungsformen als Offshore-Windenergie auf einem Gebiet ab.[9] Ein anderer Begriff ist die „Co-Nutzung“, dessen begriffliche Abgrenzung von der Projekt-Definition nicht eindeutig ist. Sie könnte sich auf Mehrfachnutzung von Offshore-Windenergie mit anderen maritimen Nutzungen[10] oder ganz grundsätzlich die Nutzung von einer Fläche durch zwei maritime Nutzungen, gleich welcher Art beziehen. Keiner der Begriffe hat bislang Eingang ins Gesetz gefunden.

3.1 Chancen und Herausforderungen für Mehrfachnutzungen bei planerischen Festlegungen im Raumordnungsrecht

Da das Gesetz die Mehrfachnutzung nicht ausdrücklich regelt, stellt sich die Frage, ob eine solche trotzdem vom Raumordnungsrecht zugelassen wird. Grundsätzlich schließt die mangelnde gesetzliche Regelung die raumordnerische Ausweisung von Flächen zur Nutzung durch zwei oder mehr raumbedeutsame Funktionen oder Nutzungen nicht aus, sofern die verfügbaren Planungsinstrumente es ermöglichen und eine gemeinsame Nutzung grundsätzlich oder unter zu bestimmenden Bedingungen als vereinbar bewertet wird. Im Folgenden werden kurz die verfügbaren Planungsinstrumente für die AWZ erläutert und ihr Potential für Mehrfachnutzungen analysiert.

Raumordnungspläne für die AWZ werden nach § 17 Abs. 1 ROG als Rechtsverordnung aufgestellt. Sie sollen Festlegungen treffen zur Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs (§ 17 Abs. 1 Nr. 1 ROG), zu weiteren wirtschaftlichen Nutzungen (§ 17 Abs. 1 Nr.2 ROG), wissenschaftlichen Nutzungen (§ 17 Abs. 1 Nr. 3 ROG) sowie zum Schutz und zur Verbesserung der Meeresumwelt (§ 17 Abs. 1 Nr. 4 ROG). Die Festlegungen nach § 17 Abs. 1 ROG können gebietsscharf erfolgen als Vorrang-, Vorbehalts- oder Eignungsgebiet für die Meeresraumnutzung, § 7 Abs. 2 ROG. Dabei ist zu beachten, dass die Festlegungen zum Schiffsverkehr internationale Vorgaben konkretisieren[11] und Festlegungen zum Schutz und zur Verbesserung der Meeresumwelt insbesondere nach europäischen naturschutzrechtlichen Maßgaben erfolgen. Die Festlegungen, von denen Bindungswirkung nach § 4 Abs. 1 ROG ausgeht, erfolgen als Ziele und Grundsätze der Raumordnung. Diese Bindungswirkung entfaltet sich erst, wenn die Ziele und Grundsätze der Raumordnung vom Plangeber festgelegt worden sind. Die Ziele und Grundsätze der Raumordnung bilden gemeinsam mit den „sonstigen Erfordernissen der Raumordnung“ die sogenannten Erfordernisse der Raumordnung und werden in § 3 ROG legaldefiniert.

Ziele und Grundsätze der Raumordnung

Ziele und Grundsätze der Raumordnung sind sogenannte Erfordernisse der Raumordnung.[12]

Ziele der Raumordnung sind verbindliche Vorgaben in Form von räumlich und sachlich bestimmten oder bestimmbaren, vom Träger der Raumordnung abschließend abgewogenen textlichen oder zeichnerischen Festlegungen in Raumordnungsplänen zur Entwicklung, Ordnung und Sicherung

[8] Der ROP 2021 benutzt den Begriff „Mehrfach-Nutzung“ (s. 2.2.2 (3)) für die Überschneidung der Vorranggebiete für Windenergie mit den Vorbehaltsgebieten für die Forschung.

[9] Vgl. z.B. BR-Drs. 163/22(B), S. 3.

[10] Vgl. BR-Drs. 163/22(B), S. 4 bezieht den Begriff „Co-Nutzung“ auf Nutzung zwischen Offshore-Windenergie und Fischerei.

[11] Insb. Art. 58, 60 SRÜ.

[12] § 3 Abs. 1 Nr. 1 ROG.

des Raums, § 3 Abs. 1 Nr. 2 ROG. Vorranggebieten wird die Wirkung von Zielen der Raumordnung zugeschrieben.[13]

Grundsätze der Raumordnung sind Aussagen zur Entwicklung, Ordnung und Sicherung des Raums als Vorgaben für nachfolgende Abwägungs- oder Ermessensentscheidungen, § 3 Abs. 1 Nr. 3 ROG; Grundsätze der Raumordnung können durch Gesetz oder als Festlegungen in einem Raumordnungsplan aufgestellt werden. Das ROG enthält in § 2 Abs. 2 ROG eine Anzahl von gesetzlich vorgegebenen Grundsätzen der Raumordnung, die jedoch nicht abschließend aufgezählt werden.[14] Neben ihren Voraussetzungen unterscheiden Ziele und Grundsätze der Raumordnung sich auch in ihrer Rechtsfolge, vgl. § 4 Abs. 1 ROG: Während Ziele der Raumordnung zu beachten sind, sind Grundsätze der Raumordnung in Abwägungs- oder Ermessensentscheidungen lediglich zu berücksichtigen. Vorbehaltsgebiete zählen zu den Grundsätzen der Raumordnung.

Nachfolgend wird untersucht, wie diese verfügbaren raumordnungsrechtlichen Planungsinstrumente Mehrfachnutzung ermöglichen können. Die denkbaren Planungsinstrumente sind die Festlegung einer Mehrfachnutzung z.B. als Grundsatz oder Ziel der Raumordnung. Daneben könnten Gebiete nach § 7 Abs. 3 ROG räumlich so festgelegt werden, dass sie sich überschneiden. Auf diese Weise würden die jeweiligen Gebietsnutzungen planerisch zusammengelegt.

3.1.1 Mehrfachnutzung als planerische Festlegung

Die planerische Festlegung einer Mehrfachnutzung ist im Raumordnungsrecht zulässig. Festlegungen dürfen erfolgen mit der Rechtsqualität von Zielen der Raumordnung nach § 3 Abs. 1 Nr. 2 ROG oder planerischen Grundsätzen nach § 3 Abs. 1 Nr. 3 ROG. Daneben können auch rein informatorische Festlegungen erfolgen, die keine darüberhinausgehende Rechtswirkung entfalten.[15] Rein informatorische Festlegungen bieten daher kein Potential für die Ermöglichung von Mehrfachnutzung. In Verbindung mit § 2 Abs. 1 ROG wird einschränkend bestimmt, dass in Raumordnungsplänen nur festgelegt werden darf, was der Konkretisierung der gesetzlichen Grundsätze der Raumordnung nach § 2 Abs. 2 ROG dient und dazu erforderlich ist.[16] Dient eine Mehrfachnutzung der Konkretisierung eines solchen Grundsatzes und ist dazu erforderlich, dann ist nach § 2 Abs. 1 ROG eine planerische Kennzeichnung als Festlegung im Raumordnungsplan geboten. Dabei steht es dem Gesetz nicht entgegen, auch mehrere gesetzliche Grundsätze durch eine Festlegung zu konkretisieren. Eine Festlegung der Mehrfachnutzung als Grundsatz der Raumplanung könnte beispielsweise dem Klimaschutz (§ 2 Abs. 2 Nr. 6 ROG) und der Verteidigung (§ 2 Abs. 2 Nr. 7 ROG) dienen und diese gesetzlichen Grundsätze der Raumordnung konkretisieren. Darüber hinaus ist der Katalog in § 2 Abs. 2 ROG nicht abschließend. Die Grenze raumordnerischer Entscheidungsfreiheit ist vielmehr durch die Aufgabenbeschreibung des § 1 Abs. 1 ROG, nämlich den Gesamtraum durch raumordnerische Maßnahmen zu entwickeln, zu ordnen und zu sichern, sowie wie in den Festlegungsmöglichkeiten des § 7 Abs. 2 ROG, private und öffentliche Belange abzuwägen und Raumordnungspläne aufeinander abzustimmen, festgelegt.[17] Eine Mehrfachnutzung kann – ganz im Sinne der Aufgabe der Raumordnungsplanung – dazu beitragen, Nutzungskonflikte auszugleichen, sofern die in Rede stehenden Nutzungen miteinander vereinbar sind, und sparsam mit dem verfügbaren Raum umzugehen,

[13] S. die Begründung zum Entwurf des ROG 1998, BT-Drs. 13/6392; (Kment et al., 2019, § 7, Rn. 54 m.w.N.).

[14] Siehe die Verwendung von „insbesondere“ in der Aufzählung nach § 2 Abs. 2 ROG.

[15] Nur die Ziele und Grundsätze der Raumordnung entfalten Bindungswirkung nach § 4 Abs. 1 ROG. Als Beispiel für eine rein informatorische Festlegung wird im ROP 2023 festgeschrieben, dass die von der IMO festgelegten Verkehrstrennungsgebiete der Nord- und Ostsee zu berücksichtigen sind. Da diese nicht als Erfordernisse der Raumordnung festgelegt sind, entfalten sie keine Bindungswirkung.

[16] (Spannowsky et al., 2018 § 7 Rn. 12).

[17] (Kment et al., 2019 § 2 Rn. 36.).

vgl. § 1 Abs. 1 ROG. Damit steht das ROG einer Festlegung im ROP als Mehrfachnutzung grundsätzlich nicht entgegen.

Nachfolgend ist zu klären, wie eine Festlegung zur Mehrfachnutzung konkretisiert werden kann. In Betracht kommt die überschneidende Festlegung von Gebieten unterschiedlicher Nutzung nach § 7 Abs. 3 ROG. Zu unterscheiden sind Überschneidungen zwischen Vorbehaltsgebieten und Vorranggebieten sowie Kombinationen untereinander. Vorranggebiete mit Ausschlusswirkung nach § 7 Abs. 3 S. 3 ROG werden nicht betrachtet, da für sie Festlegungen getroffen werden können, die die konkrete Nutzung an anderer Stelle im Plangebiet ausschließen. Würde Windenergie in Vorranggebieten mit Ausschlusswirkung festgelegt, könnte zwar eine hiermit kompatible Nutzung ermöglicht werden, sofern für diese ansonsten keine Ausschlusswirkung gilt. Gleichwohl wäre damit ausgeschlossen, dass sich die festgelegten Vorranggebiete für Windenergie mit für andere Nutzungen und/oder Funktionen festgelegte Gebiete überschneiden. Damit weisen sie wenig Potential für Mehrfachnutzung in der AWZ auf.

3.1.2 Festlegung überschneidender Vorbehaltsgebiete (als Grundsätze der Raumordnung)

Fraglich ist, ob Vorbehaltsgebiete räumlich überschneidend im Raumordnungsplan der AWZ festgelegt werden können.

Vorbehaltsgebiete

Vorbehaltsgebiete sind Gebiete, die bestimmten raumbedeutsamen Funktionen oder Nutzungen vorbehalten bleiben sollen, denen bei der Abwägung mit konkurrierenden raumbedeutsamen Funktionen oder Nutzungen besonderes Gewicht beizumessen ist, § 7 Abs. 3 Nr. 2 ROG. Vorbehaltsgebiete entfalten für die nachfolgende Planungsebene die Wirkung einer Abwägungsdirektive.[18]

Die Nutzung ist in der Folge mit besonderem Gewicht in der Abwägung zu berücksichtigen, kann aber bei Vorliegen überwiegender Belange durch konkurrierende Nutzungen überwunden werden.[19] Da den Festlegungen von Vorbehaltsgebieten Abwägungen nachfolgen, können sie auch überlagernd festgelegt werden.[20] Die Abwägungsentscheidung kann schließlich auch die Vereinbarkeit von zwei Nutzungen zum Ergebnis haben, sodass diese dann als überlagerte Vorbehaltsgebiete festgelegt werden können. Das bedeutet, der Plangeber spricht diesen Nutzungen eine generelle oder unter bestimmten Bedingungen vorliegende Kompatibilität zu. Der Festlegung wird dann in nachfolgenden Abwägungsentscheidungen ein besonderes Gewicht beigemessen.

Rechtssicherer für nachfolgende Planungsebenen kann die Mehrfachnutzung in diesen Fällen ausgestaltet werden, wenn neben der überschneidenden Festlegung der Vorbehaltsgebiete auch eine schriftliche Festlegung im ROP erfolgt, welche die überschneidende Festlegung als Mehrfachnutzung kennzeichnet und den Willen des Planungsgebers zum Ausdruck bringt, dass beide Nutzungen ermöglicht werden sollen. Dies ist beispielsweise umgesetzt im ROP 2021 bei den überschneidend ausgewiesenen Vorbehaltsgebieten Windenergie EO2-West und EN20 und den Vorbehaltsgebieten für Fischereiforschung FoN3 und FoO3.[21] Darüber hinaus weist der ROP 2021 noch weitere überschneidende Vorbehaltsgebiete aus, ohne diese darüber hinaus in schriftlicher Festlegung zur Mehrfachnutzung zu konkretisieren. Dies ist der Fall der Vorbehaltsgebiete KWN2 und KWN3 zur Gewinnung von Kohlenwasserstoffen, die die Vorbehaltsgebiete

[18] (Kment et al., 2019 § 7 Rn. 61.).

[19] (Spannowsky et al., 2018 § 3 Rn. 67.).

[20] (Kment et al., 2019§ 7 Rn. 62; Spannowsky et al., 2018 § 7 Rn. 82).

[21] Siehe Anlage, Festlegung 2.2.2 (3) AWZROVAnl.

für Windenergie EN14 und EN15 räumlich überschneiden. Eine schriftliche Festlegung kann als Abwägungsdirektive im Sinne eines Grundsatzes der Raumordnung für nachfolgende Planungsebenen vorgeben, unter welchen Umständen bzw. anhand welcher Parameter die Mehrfachnutzung erfolgen soll. Dies kann die Realisierung erhöhen, da eine Festlegung als Grundsatz der Raumordnung zwar von der Fachplanung überwunden werden kann, aber jedenfalls die Art und Weise der so beabsichtigten Mehrfachnutzung mit dem entsprechenden Gewicht in die Abwägung eingestellt werden muss und nur mit überzeugender Begründung überwiegender anderer Belange übergangen werden kann.[22] Eine derartige raumordnerische Festlegung von überschneidenden Vorbehaltsgebieten unterschiedlicher Nutzungen ist somit gleichermaßen rechtlich zulässig und in der Praxis üblich.[23]

3.1.3 Festlegung überschneidender Vorranggebiete (als Ziele der Raumordnung)

Fraglich ist, ob die Festlegung von räumlich überschneidenden Vorranggebieten zulässig ist.

Vorranggebiete

Vorranggebiete sind Gebiete, die für bestimmte raumbedeutsame Funktionen oder Nutzungen vorgesehen sind und andere raumbedeutsame Funktionen oder Nutzungen in diesem Gebiet ausschließen, soweit diese mit den vorrangigen Funktionen oder Nutzungen nicht vereinbar sind, § 7 Abs 3 Nr. 1 ROG. Damit kommt dem Vorranggebiet besondere Sicherungsfunktion zu, die nicht vereinbare Nutzungen innerhalb des Gebiets ausschließt.

Ob eine überschneidende Festlegung von Vorranggebieten unterschiedlicher Nutzungen zulässig ist, wird von der Literatur uneinheitlich beantwortet. Nach einer Ansicht ist solch eine überschneidende Festlegung nur bei Vorbehaltsgebieten möglich, da diese anders als Vorranggebiete nachfolgende Abwägung zulassen.[24] Nach anderer Ansicht soll die raumordnerische Festlegung von überschneidenden Vorranggebieten unter gewissen Bedingungen rechtlich zulässig sein. Der Zielcharakter von Vorranggebieten führt dazu, dass eine Überlagerung unterschiedlicher vorrangiger Nutzungen in einem Gebiet nur dann zulässig sein kann, wenn sie neutral zueinander oder ergänzend nebeneinanderstehen und sich nicht gegenseitig ausschließen.[25] Dies kann bei besonders großflächigen Vorrangausweisungen in Betracht kommen.[26] Dadurch, dass in diesem Fall mehr Platz zwischen den jeweiligen Nutzungen und für die einzelnen Nutzungen besteht, ist das Spannungsverhältnis gering. Wenn Nutzungen räumlich eine solche Distanz zueinander aufweisen, dass sie sich nicht gegenseitig beeinflussen, können sie neutral nebeneinanderstehen. Für diese zweite Auslegung spricht, dass Vorranggebiete zumindest dann überschneidende Nutzungen ausweisen können, wenn diese entsprechend der Legaldefinition der Vorranggebiete miteinander vereinbar sind. Eine Vereinbarkeit liegt jedenfalls vor, wenn die vorrangige Nutzung nicht beeinträchtigt wird. Umgekehrt sind Nutzungen „nicht vereinbar“, die die vorrangige Nutzung im Gebiet vereiteln oder wesentlich erschweren würden oder ihr zuwiderliefen.[27] Damit ist der Spielraum für überschneidende Vorranggebiete denkbar eng, da beide Nutzungen sich nebeneinander realisieren lassen müssen. Im ROP 2021 werden überschneidende Vorranggebiete festgelegt, wie z.B. das Naturschutzgebiet (NSG) Sylter Außenriff/Östliche Deutsche Bucht, das sich mit den Vorranggebieten der Schifffahrt SN5, SN6, SN7, SN8 und SN9 überschneidet. Das Spannungsverhältnis wurde adressiert, indem der Schifffahrt aufgrund der

[22] (Spannowsky et al., 2018 § 4 Rn. 52 ff.).

[23] (Kment et al., 2019 § z Rn. 62. Spannowsky et al., 2018 § 7 Rn. 82.).

[24] (Spannowsky et al., 2018§ 7 Rn. 82.).

[25] (Kment et al., 2019 § 7 Rn. 54).

[26] (Kment et al., 2019 § 7 Rn. 54).

[27] BVerwG 20.8.1992 – 4 NB 20.91; BVerwG, Urt. v. 19.7.2001 – 4 C 4/00.

völkerrechtlichen Vorgaben des Seerechtsübereinkommens (SRÜ) Vorrang gegenüber den Vorranggebieten Naturschutz als Ziel der Raumordnung eingeräumt wird.[28]

Die überschneidende Festlegung von Vorranggebieten bietet Potential für die Mehrfachnutzung. Sie ermöglicht ein Nebeneinander von kompatiblen Nutzungen in einer Fläche und trägt so dem bestehenden Nutzungsdruck in der AWZ Rechnung. Ihre rechtliche Zulässigkeit besteht jedenfalls nach der oben dargestellten Auffassung, sofern die verschiedenen Nutzungen miteinander vereinbar sind. Ob überschneidende Vorranggebiete zwischen Windenergie und anderen maritimen Nutzungen im ROP im konkreten Fall zulässig sind, kann allerdings nicht pauschal beantwortet werden. Es kommt dabei ganz konkret auf die andere jeweilige Nutzungsart in der spezifischen Fläche an und ob diese beiden Nutzungen miteinander vereinbar sind oder eine Vereinbarkeit durch bestimmte Kriterien hergestellt werden kann.

3.1.4 Festlegung überschneidender Vorrang- mit Vorbehaltsgebieten (als Ziele und Grundsätze der Raumordnung)

Zuletzt ist zu erörtern, ob die Festlegung von überschneidenden Vorrang- mit Vorbehaltsgebieten raumordnungsrechtlich zulässig ist. Nach den obigen Feststellungen ist dies jedenfalls zu bejahen, wenn und soweit das Vorbehalts- und Vorranggebiet bei einer überschneidenden Festlegung seine jeweilige rechtliche Wirkung entfalten kann. In Anbetracht ihrer Rechtsfolgen wäre dann die Nutzung des Vorbehaltsgebiets mit besonderem Gewicht in die Abwägung nachfolgender Behördenentscheidungen einzustellen, vgl. § 7 Abs. 3 Nr. 2 ROG und von der Nutzung des Vorranggebiets ausgeschlossen, wenn sie mit dieser nicht vereinbar ist, vgl. § 7 Abs. 3 Nr. 1 ROG. „Nicht vereinbar“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Realisierung der anderen Nutzung die vorrangige Nutzung vereiteln oder wesentlich erschweren würde oder ihr zuwiderliefe.[29] Sofern also sowohl die im Vorbehaltsgebiet enthaltene Abwägungsdirektive berücksichtigt wird und die Nutzung des Vorbehaltsgebietes mit der des Vorranggebiets vereinbar ist, dürfte das ROG einer überschneidenden Festlegung von Vorrang- und Vorbehaltsgebiet nicht entgegenstehen. Der ROP 2021 weist überschneidende Vorrang- bzw. Vorbehaltsgebiete aus. Mit Windenergie überschneidend werden festgelegt: Das Vorbehaltsgebiet Forschung FoO3 und das Vorranggebiet Windenergie EO2. Das Vorranggebiet EN13 und das jahreszeitlich befristete Vorbehaltsgebiet Schweinswale - als Hauptverbreitungsgebiet dieser Art - sind ebenfalls überschneidend festgelegt. An dieser Stelle hat der Plangeber Bedingungen aufgestellt: zum einen soll bei der Errichtung von Windenergieanlagen auf Zulassungsebene besonderes Augenmerk auf die Wirksamkeit von Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen gelegt werden[30], zum anderen steht das Vorranggebiet EN13 unter dem Vorbehalt, dass nicht bis zum 31.12.2025 nachgewiesen wird, dass das Gebiet aus zwingenden Gründen der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs für die Schifffahrt benötigt wird.[31] Als Abwägungsdirektive legt der ROP 2021 besonderes Augenmerk auf Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen in der sensiblen Jahreszeit und damit auf die Wahrung der artenschutzrechtlichen Vorgaben (auch in einem Vorranggebiet Windenergie). So kann der Standort als Vorranggebiet für Windenergie gesichert werden. Der vorbehaltenen Nutzung und Funktion ist gleichermaßen ein besonderes Gewicht zumindest bei der Abwägung beizumessen.

[28] Anlage, Festlegung 2.1.(1) AWZROVAnl., vgl. weitere Einzelheiten zur naturschutzrechtlichen Einordnung in Abschnitt 3.2.2.5.

[29] BVerwG 20.8.1992 – 4 NB 20.91.

[30] (BSH, 2021c, S. 20.).

[31] (BSH, 2021c, S. 12.).

3.1.5 Zwischenergebnis

Das ROG regelt Mehrfachnutzungen nicht ausdrücklich. Dies ist jedoch kein rechtliches Hemmnis: durch Verwendung der verfügbaren Planungsinstrumente – wie Vorranggebiete und Vorbehaltsgebiete – kann die Mehrfachnutzung auf Raumordnungsebene in der AWZ ermöglicht werden. Potential bietet insoweit die überschneidende Festlegung von Gebieten.

- Die überschneidende Festlegung von Vorbehaltsgebieten ist zulässig und in der Praxis üblich.
- Die überschneidende Festlegung von Vorranggebieten ist innerhalb der Grenzen des Zielcharakters der Vorranggebiete grundsätzlich zulässig. Die überschneidenden Nutzungen der Vorranggebiete müssen neutral zueinanderstehen oder sich ergänzen.
- Die überschneidende Festlegung von Vorbehalts- mit Vorranggebieten ist ebenfalls zulässig. Die vorbehaltene Nutzung muss in diesem Fall mit der vorrangigen Nutzung vereinbar sein. Sie ist nur zulässig, wenn die vorrangige Nutzung nicht wesentlich erschwert wird.

Daneben kann die Mehrfachnutzung als schriftliche Kennzeichnung (z.B. als Grundsatz der Raumordnung) für nachfolgende Planungsebenen vorgeben, unter welchen Umständen bzw. anhand welcher Parameter die Mehrfachnutzung erfolgen soll.

Mehrfachnutzung ist also nach der derzeitigen Rechtslage möglich und wird bereits praktiziert.

3.1.6 Wirkung für die nachfolgenden Planungsebenen

Die Wirkung solcher Festlegungen auf die nachfolgenden Planungsebenen hängt von der Bindungswirkung der unterschiedlichen Planungsinstrumente ab. Nur die Erfordernisse der Raumordnung, also Ziele, Grundsätze und sonstige Erfordernisse der Raumordnung nach § 3 Abs. 1 Nr. 1 ROG haben Bindungswirkung für die nachgelagerten Abwägungs- und Ermessensentscheidungen öffentlicher Stellen, § 4 Abs. 1 ROG. Soll eine solche erreicht werden, müsste die Mehrfachnutzung daher durch ein zulässiges Planungsinstrument als Ziel oder Grundsatz im Raumordnungsplan gekennzeichnet werden. Daneben gibt es beispielsweise rein informatorische Zusätze im ROP ohne Bindungswirkung. Zu beachten ist auch, dass die Bezeichnung als Ziel oder Grundsatz der Raumordnung zwar indizielle Hinweise für die Auslegung des Plans liefern, es aber jeweils auf die tatsächliche Erfüllung der gesetzlichen Voraussetzungen ankommt, um die Bindungswirkung zu erzielen.[32]

Die Bindungswirkung unterscheidet sich je nach Festlegung. Ziele der Raumordnung nach § 3 Abs. 1 Nr. 1 sind im Zielkern abschließend abgewogen und zwingend zu beachten. Hierzu werden Vorranggebiete gezählt.[33] Das bedeutet, dass in nachfolgenden Planungsentscheidungen das Ziel nicht mehr abgewogen werden darf. Ist also der Standort eines Vorhabens als Ziel festgelegt, bestehen nachfolgend keine Standortspielräume mehr – jedoch können Ausformungsspielräume über das „Wie“ der Realisierung durchaus bestehen. Im Hinblick auf die Festlegung von Vorranggebieten erfordert die Vereinbarkeit mit der vorrangigen Nutzung eine Einzelfallprüfung.[34] Dies ist nicht zu verwechseln mit einem Abwägungsspielraum, denn das Ziel der vorrangigen Nutzung ist abschließend abgewogen. Dies kann für Mehrfachnutzungen relevante Spielräume ergeben, um einerseits die als Ziel festgelegte Nutzung zu realisieren und daneben eine andere Nutzung zu ermöglichen. Gleichzeitig zeigt dies auch die Grenzen der Ziele der

[32] BVerwG 7.3.2002 – 4 BN 60/01.

[33] BVerwG, Urteil vom 18. 9. 2003 - 4 CN 20/02; BVerwG, Urteil vom 13. 3. 2003 - 4 C 4/02.

[34] (Kment et al., 2019 § 4 Rn. 60.).

Raumordnung für Mehrfachnutzungen auf. Das konkrete „Wie“ des Zusammenspiels der Nutzungen wird auf raumordnungsrechtlicher Ebene nicht abschließend beantwortet bzw. abgewogen. Hierbei kommt es auf die konkreten Vorgaben, die ggf. bereits durch die Flächenausschreibungen nach dem WindSeeG erfolgen, sowie jeweils auf die einzelnen Anlagen und ihre Betriebsausgestaltung an. So könnte eine potentielle Mehrfachnutzung, die in ROP und FEP vorgesehen ist, auf nachfolgender Ebene in die Ausschreibung für einzelne Flächen oder Projekte z.B. als sogenanntes nicht-finanzielles Kriterium aufgenommen werden. Die Entscheidungen hierüber werden auf Ebene des Fachrechts getroffen – unter zwingender Beachtung der Ziele der Raumordnung.[35]

Grundsätze der Raumordnung nach § 3 Abs. 1 Nr. 3 ROG und sonstige Erfordernisse der Raumordnung nach § 3 Abs. 1 Nr. 4 ROG sind als Belang in der nachfolgenden Abwägung zu berücksichtigen, können jedoch im Rahmen einer Abwägungs- und Ermessensentscheidung überwunden werden.[36] Hierzu zählen insbesondere Vorbehaltsgebiete, die als Grundsätze der Raumordnung bezeichnet werden können.[37] Grundsätze der Raumordnung werden in die fachrechtliche Abwägungsentscheidung einbezogen. Im Rahmen dieses Abwägungsvorgangs können sie jedoch gegenüber anderen Grundsätzen oder anderen abwägungsrelevanten Fachbelangen unterliegen.[38] Nachfolgende Behördenentscheidungen mit Abwägungsspielraum müssen sie als Vorgabe berücksichtigen. Dies setzt jedoch voraus, dass das Gesetz eine Abwägungs- oder Ermessensentscheidung vorschreibt bzw. öffentliche Belange zu berücksichtigen sind.[39] Wird daher eine Mehrfachnutzung als Grundsatz der Raumordnung festgelegt, bietet dies die Möglichkeit, schriftlich konkrete Abwägungsdirektiven für nachfolgende Planungs- oder Zulassungsentscheidungen im Sinne einer Mehrfachnutzung vorzugeben. Für nachfolgende Behördenentscheidungen bedeutet dies einen erhöhten Begründungsaufwand, wenn sie raumordnerisch vorgegebene Mehrfachnutzungen übergehen wollen.

3.2 Mehrfachnutzung in der Fachplanung des WindSeeG

Während die Raumordnung die gesamte AWZ und alle maritimen Nutzungen nach § 17 Abs. 1 ROG ordnet, fokussiert das Fachplanungsrecht für Windenergie auf See diese Nutzung. Die maritime Raumordnung ordnet demnach wirtschaftliche und wissenschaftliche Nutzungen, sowie den Schiffverkehr und die Meeresumwelt und weist diesen Nutzungen Räume zu. Das WindSeeG widmet sich der genaueren Fachplanung von Einrichtungen des WindSeeG, insbesondere von Windenergieanlagen auf See, sonstigen Energiegewinnungsanlagen sowie Offshore-Anbindungsleitungen und nimmt andere Nutzungen als konkurrierende Belange im Planungs- und Genehmigungsregime wahr, die ggfs. durch Windenergie beeinträchtigt werden könnten oder der Windenergie entgegenstehen. Das übergeordnete Ziel des WindSeeG ist, die Nutzung der Windenergie auf See auszubauen, § 1 Abs. 1 WindSeeG.

Der folgende Teil geht zunächst der Frage nach, welche Flächen in der AWZ der Fachplanung zur Verfügung stehen und ob über die Vorbehalts- und Vorrangflächen des ROP hinaus Flächen beplant werden dürfen. Dann werden Chancen und Herausforderungen für die Mehrfachnutzung bei der Festlegung im Flächenentwicklungsplan untersucht und auch beleuchtet, wie sich das neue überragende öffentliche Interesse am Ausbau von Windenergie auf Mehrfachnutzungen auswirkt. Der Teil schließt damit, darzustellen, wie sich der Flächenentwicklungsplan auf das

[35] Für Windenergieanalagen auf See auf Genehmigungsebene in § 69 Abs. 3 Nr. 8 WindSeeG.

[36] (Spannowsky et al., 2018 § 3 Rn. 67.).

[37] BVerwG (4. Senat), Beschluss vom 14.10.2020 – 4 BN 42.20.

[38] (Spannowsky et al., 2018 § 4 Rn. 54.).

[39] (Kment et al., 2019 § 2 Rn. 34.).

nachfolgende Planungsregime auswirkt und wie Mehrfachnutzung von dort an vom WindSeeG beeinflusst wird.

3.2.1 Verfügbare Flächen für die Fachplanung zur Ausweisung von Flächen und Gebieten

Der Flächenentwicklungsplan der AWZ trifft die fachplanerischen Festlegungen für die Orte, an denen Windenergieanlagen, die ans Netz angeschlossen werden, errichtet und betrieben werden sollen.[40] Das BSH trifft diese Festlegungen, indem es „Gebiete“ und „Flächen“ im FEP nach § 5 Abs. 1 WindSeeG festlegt.

Fachplanerische Festlegung von Gebieten und Flächen im FEP

Gebiete sind Bereiche in der ausschließlichen Wirtschaftszone oder im Küstenmeer für die Errichtung und den Betrieb von Windenergieanlagen auf See, die an das Netz angeschlossen werden, § 3 Nr. 3 WindSeeG.

Flächen sind Bereiche innerhalb von Gebieten, auf denen Windenergieanlagen auf See, die an das Netz angeschlossen werden, in räumlichem Zusammenhang errichtet werden sollen und für die deshalb eine gemeinsame Ausschreibung erfolgt, § 3 Nr. 4 WindSeeG.

Ob neue Potentiale für die Windenergie durch Mehrfachnutzung in der Fachplanung erschlossen werden können, ohne den ROP ändern zu müssen, soll nachfolgend untersucht werden.

Die Herangehensweise hierfür erfolgt zweigliedrig: Zunächst wird betrachtet, ob Festlegungen im FEP außerhalb der Vorrang- und Vorbehaltsgebiete des ROP für Windenergie erfolgen dürfen. Dann wird untersucht, ob die Festlegungen im FEP in Vorrang- und Vorbehaltsgebieten fremder Nutzungen zulässig sind.

3.2.1.1 Zulässigkeit von Gebietsfestlegungen im FEP außerhalb der im ROP 2021 festgelegten Vorbehalts- und Vorranggebiete Windenergie

Zunächst ist fraglich, ob das ROG und das WindSeeG die fachplanerische Festlegung von Gebieten nach § 5 Abs. 1 Nr. 1 WindSeeG auf die im ROP festgelegten Vorrang- bzw. Vorbehaltsgebiete Windenergie beschränkt. Es kommt daher auf die Bindungswirkung des ROP auf die Fachplanung an. Bindungswirkung wird neben § 4 Abs. 1 ROG auch durch das Fachrecht in § 5 Abs. 3 S. 2 Nr. 1 WindSeeG angeordnet. Die Festlegungen im FEP sind gem. § 5 Abs. 3 S. 2 Nr. 1 WindSeeG unzulässig, wenn sie nicht mit den Erfordernissen der Raumordnung nach § 17 Abs. 1 ROG übereinstimmen. Zu den Erfordernissen der Raumordnung zählen die Ziele und Grundsätze der Raumordnung, sowie die im ROP als solche gekennzeichneten Vorrang- und Vorbehaltsgebiete.[41] Ein solches Übereinstimmen der Festlegungen im FEP mit den Erfordernissen der Raumordnung ist jedenfalls zu bejahen, wenn die fachplanerischen Festlegungen innerhalb der Vorrang- und Vorbehaltsgebiete für Windenergie des ROP festgelegt werden.

Gegen eine fachplanerische Festlegung von Gebieten außerhalb der für die Nutzung vorgesehenen Vorbehalts- und Vorranggebiete spricht die Aufgabe der Raumordnung im Verhältnis zur Fachplanung. Die Raumordnung hat nach § 1 Abs. 1 ROG die Aufgabe, den Raum durch Raumordnungspläne, raumordnerische Zusammenarbeit und Abstimmung raumbedeutsamer Planungen und Maßnahmen zu entwickeln, zu ordnen und zu sichern. Die Ordnungs- und Steuerungsfunktion könnte unterlaufen werden, wenn die Fachplanung sich nicht an die ausgewiesenen Gebiete hielte. Dem ist entgegenzuhalten, dass das Raumordnungsrecht in § 4 Abs. 1 ROG und das

[40] Vgl. § 5 Abs. 1 Nr. 1 i.V.m. § 3 Nr. 3 WindSeeG.

[41] Vgl. § 3 Nr. 1 ROG.

Fachrecht in § 5 Abs. 3 Nr. 1 WindSeeG konkrete Vorgaben enthält, die sicherstellen, dass die Fachplanung die Erfordernisse der Raumordnung und damit die konkrete Rechtswirkung der Festlegungen im Raumordnungsplan beachtet.

Stattdessen spricht einiges *dafür*, dass fachplanerische Festlegungen außerhalb der Vorbehalts- und Vorranggebiete für Windenergie im ROP zulässig sind, solange sie mit den planerischen Festlegungen im ROP vereinbar sind. Dies lässt sich an der Rechtswirkung der Vorrang- und Vorbehaltsgebiete ableiten. Sie haben lediglich innergebietliche Wirkung. Mit ihrer Festlegung trifft der Plangeber keine bindende Entscheidung über die konkrete Nutzung im restlichen Plangebiet. Soll auch außergebietliche Wirkung erreicht werden, in diesem Fall konkret der Ausschluss der Nutzung außerhalb der im ROP festgelegten Gebiete, sieht das ROG ein spezielles Instrument vor: Die Festlegung von Vorranggebieten mit Ausschlusswirkung nach § 7 Abs. 3 S. 3 ROG. Innerhalb dieser Gebiete kann festgelegt werden, dass die Nutzung an anderer Stelle im Planungsraum ausgeschlossen ist. Darüber hinaus kann der Plangeber eine Ausschlusswirkung erreichen, indem er diese ausdrücklich als Ziel der Raumordnung im ROP kennzeichnet.[42] Im ROP 2021 wird weder eine Ausschlusswirkung als Ziel der Raumordnung noch wurden Vorranggebiete mit Ausschlusswirkung festgelegt.

3.2.1.2 Zulässigkeit von Gebietsfestlegungen im FEP in Vorbehalts-/Vorranggebieten anderer Nutzung oder Funktion als Windenergie

Aufgrund der vollständigen Überplanung der AWZ würde eine Gebietsfestlegung durch den FEP außerhalb der im ROP vorgesehenen Flächen für Windenergie zwangsläufig in einem Vorbehalts- oder Vorranggebiet anderer Nutzung oder Funktion liegen. Es ist daher zu prüfen, ob Gebietsfestlegungen von Flächen für die Windenergie in einem Vorrang- oder Vorbehaltsgebiet anderer Nutzung mit den Erfordernissen der Raumordnung übereinstimmen,
§ 5 Abs. 3 Nr. 1 WindSeeG. Dabei ist zwischen den Vorbehalts- und Vorranggebieten zu unterscheiden.

Fraglich ist also einerseits, ob eine Festlegung von Gebieten bzw. Flächen für die Windenergie in einem **Vorbehaltsgebiet** anderer Nutzungen mit den Erfordernissen der Raumordnung übereinstimmen kann. Dafür sprechen folgende Erwägungen: Bei der Festlegung von Vorbehaltsgebieten handelt es sich um Grundsätze der Raumordnung[43] und damit um Erfordernisse der Raumordnung nach § 1 Abs. 1 Nr. 1 ROG.[44] Sie entfalten innergebietliche Wirkung, indem sie der vorbehaltenen Nutzung oder Funktion ein besonderes Gewicht bei der Abwägung zumessen. Daher müssen in Vorbehaltsgebieten festgelegte Nutzungen in nachfolgenden Abwägungen zurückstehen, wenn der konkurrierenden Nutzung ein noch stärkeres Gewicht zukommt.[45] Dann muss auch ein Weniger, also ein Nebeneinander von Nutzungen anstelle eines Verdrängens möglich sein. Gleichwohl ist der gehobene Begründungsaufwand zu beachten, wenn die vorbehaltene Nutzung in der Abwägung überwunden oder geschwächt werden soll. Die Fachplanung kann nicht leichtfertig die Festlegungen des Vorbehaltsgebiets übergehen. Im Ergebnis schließt der Rechtsgehalt von Vorbehaltsgebieten die Beplanung mit anderen Nutzungen nicht grundsätzlich aus. Somit kann bei entsprechender Begründung davon ausgegangen werden, dass die Erfordernisse der Raumordnung gewahrt sind. Wenn keine mit Windenergie überschneidende Gebietsfestlegung getroffen wurde, kann zudem das „überragende öffentliche Interesse an der

[42] (Spannowsky et al., 2018 § 7 Rn. 69.).

[43] (Kment et al., 2019 § 7 Rn. 61 m.w.N.).

[44] BVerwG 13.3.2003 – 4 C 4/02; BVerwG 15.6.2009 – 4 BN 10/09; BVerwG 16.4.2015 – 4 CN 6/14.

[45] (Spannowsky et al., 2018 § 7 Rn. 77.).

Errichtung von Windenergieanlangen“ nach § 1 Abs. 3 bzw. § 5 Abs. 3 S. 3 WindSeeG als Gegengewicht in die Abwägung mit der Nutzung des Vorbehaltsgebiets eingestellt werden.[46]

Zu klären ist ferner, ob Gebiete bzw. Flächen für Windenergieanlagen im FEP auch in **Vorranggebieten** anderer Nutzungen festgelegt werden dürfen. Der Gesetzeswortlaut und Zweck von Vorranggebieten stehen dem nicht vollständig entgegen. Vorranggebiete sind Ziele der Raumordnung und somit ebenfalls Erfordernisse der Raumordnung.[47] Sie entfalten innergebietliche Ausschlusswirkung gegenüber unvereinbaren konkurrierenden Nutzungen. Nachfolgende Planungsträger dürfen sich nicht darüber hinwegsetzen, sie jedoch konkretisieren.[48] Somit kann auch innerhalb der Vorranggebiete unter engen Voraussetzungen Raum für weitere Nutzungen sein. Nur solche anderen Nutzungen können zulässig sein, die die vorrangige Nutzung nicht verhindern oder wesentlich erschweren. Ob sich in der Praxis ein Anwendungsfall finden ließe, bei dem die Errichtung und der Betrieb einer oder mehrerer Windenergieanlagen eine vorrangige andere Nutzung nicht vereitelt oder wesentlich erschwert, kann nicht pauschal beantwortet werden. Die Rahmenbedingungen der Errichtung und des Betriebes müssten sich jedenfalls der vorrangigen Nutzung unterordnen, um den Erfordernissen der Raumordnung Rechnung zu tragen.

Daneben müssen auch alle anderen Grundsätze und Ziele der Raumordnung, die im ROP festgelegt werden, beachtet bzw. berücksichtigt werden, vgl. § 4 Abs. 1 ROG. Dabei geht es neben den Vorrang- und Vorbehaltsgebieten insbesondere auch um alle anderen schriftlichen Festlegungen, die jeweils mit Rücksicht auf ihren Rechtscharakter als Grundsatz oder Ziel Beachtung finden müssen.

Zuletzt bleibt auch die Möglichkeit eines Zielabweichungsverfahrens. Von den Zielen der Raumordnung kann abgewichen werden, wenn die Abweichung unter raumordnerischen Gesichtspunkten vertretbar ist und die Grundzüge der Planung nicht berührt werden, § 7 Abs. 2 ROG. Das Verfahren bietet daher die Möglichkeit, von Zielen der Raumordnung abzuweichen, ohne den ROP ändern zu müssen.

3.2.1.3 Zulässigkeit von Gebietsfestlegungen durch Zielabweichungsverfahren im Vorentwurf des FEP vom 1.9.2023

Gegenwärtig wird der FEP nach dem WindSeeG geändert bzw. fortgeschrieben. Der gegenwärtig geltende FEP 2023[49] weist fast nur Gebiete aus, die auch im ROP 2021 als Vorbehalts- oder Vorrangfläche für die Windenergie festgelegt sind. Ausnahmen sind– nach erfolgreich durchgeführtem Zielabweichungsverfahren nach § 19 i.V.m. § 6 Abs. 2 ROG – die neue Fläche N-6.8, die Erweiterung des sonstigen Energiegewinnungsbereichs SEN-1 sowie die Erweiterung des Gebietes N-11 um die Fläche N-11.1 in den Bereichen, die im ROP als Vorranggebiete für Schifffahrt (SN6 und SN12) festgelegt sind.[50] Auch die beabsichtigten Festlegungen des sich in Aufstellung befindenden FEP[51] sehen fast ausschließlich Gebiete vor, die auch im ROP 2021 für die Nutzung von Windenergie entweder als Vorrang- oder Vorbehaltsgebiet festgelegt sind.[52] Eine Ausnahme hierzu stellt die geplante teilweise Nutzung der im ROP als Vorranggebiet bzw. befristetes Vorranggebiet Schifffahrt festgelegte Schifffahrtsroute SN10 für die Windenergie auf See dar. Eine

[46] Näheres hierzu in Abschnitt 3.2.2.6.

[47] BVerwG 13.3.2003 – 4 C 4.02; BVerwG 15.6.2009 – 4 BN 10/09; (Kment et al., 2019 § 7 Rn. 54).

[48] (Kment et al., 2019 § 7 Rn. 54; Spannowsky et al., 2018 § 7 Rn. 75).

[49] (BSH, 2023b.).

[50] (BSH, 2023b, S. 100 ff.)Hierbei handelt es sich jedoch nur auf den ersten Blick um eine Mehrfachnutzung. Hintergrund ist, dass der Bedarf der Schifffahrtsrouten entfällt, weil sie zugunsten der Ausweisung von Windenergie auf See durch die Niederlande geschlossen werden sollen.

[51] (BSH, 2023e.).

[52] (Vgl. BSH, 2023b, S. 10 ff.).

zusätzliche Flächenplanung soll hier vor allem im östlichen Bereich der Schifffahrtsroute SN10 erfolgen. Grund dafür sind die trilateralen Gespräche mit Dänemark und den Niederlanden. Denkbar sind laut Vorentwurf auch weitere Festlegungen am westlichen Rand. Eine finale Abstimmung steht noch aus. Dies gilt ebenfalls für die Schifffahrtsroute SN17, die als Gebiet für die Windenergie in Erwägung gezogen wird.[53]

3.2.1.4 Zwischenergebnis

Hinsichtlich der Flächenverfügbarkeit für Festlegungen im Raumordnungsplan stehen Vorbehalt- und Vorranggebiete für Windenergie zur Verfügung. Der ROP legt damit die wesentliche Grundlage für eine rechtssichere Ausgestaltung von Mehrfachnutzung. Eine Gebietsfestlegung im FEP kann also auch in einem raumordnungsrechtlichen Gebiet anderer Nutzung zulässig sein. Eine rechtssicherere Ausgestaltung wird jedoch stets der Weg über die überschneidende Gebietsfestlegung im ROP sein, denn dann wird jedenfalls den Erfordernissen der Raumordnung Rechnung getragen und der Plangeber kann bereits Vorgaben hinsichtlich der Verwirklichung von Mehrfachnutzung für die Fachplanung treffen. Im Übrigen ist der jeweilige Einzelfall konkret zu prüfen, auch unter Beachtung des jeweiligen Fachrechts. **Im Ergebnis kann die Festlegung von Gebieten des FEP in Vorrang- und Vorbehaltsgebieten anderer Nutzungen daher weder pauschal verneint noch pauschal bejaht werden. Vielmehr ist die Festlegung** abhängig vom Einzelfall, sowie davon, ob auf der fraglichen Fläche Ziele oder Grundsätze der Raumordnung festgelegt wurden. Unter engen Voraussetzungen, also wenn die jeweilige Nutzung die jeweils andere, vorrangige Nutzung nicht verhindert oder wesentlich erschwert, d.h. eine Vereinbarkeit der Festlegungen besteht, können aber auch andere Flächen außerhalb dieser Gebiete für Windenergie in der AWZ für Festlegungen im FEP in Betracht kommen.

3.2.2 Chancen und Herausforderungen bei der Festlegung von Flächen und Gebieten im FEP nach dem WindSeeG

Im Folgenden werden Chancen und Herausforderungen für Mehrfachnutzungen bei der Festlegung von Flächen und Gebieten im FEP nach dem WindSeeG untersucht.

Ausdrücklich wird die Mehrfachnutzung im WindSeeG nicht geregelt. § 5 Abs. 1 WindSeeG enthält eine Auflistung von grundsätzlich in den Flächenentwicklungsplan aufzunehmenden Festlegungen. Jedoch gibt § 5 Abs. 3 WindSeeG vor, dass für die Aufnahme bestimmter in Abs. 1 genannter Festlegungen in den FEP im Rahmen einer Abwägung zu untersuchen ist, ob überwiegende öffentliche oder private Belange der Festlegung im Einzelfall entgegenstehen. Nutzungen bzw. Interessen können daher nur in den FEP aufgenommen werden, wenn sie nicht gegen diese öffentlichen oder privaten Belange verstoßen. Im Rahmen der Prüfung wird festgestellt, ob die einzelnen Nutzungen einander entgegenstehen oder miteinander vereinbar sind, d.h. ob sie miteinander oder nebeneinander auf einer Fläche stehen können. Diese Interessenabwägung ist notwendige Voraussetzung, um eine Mehrfachnutzung zu ermöglichen oder zu verhindern.

Die Prüfung erfolgt dabei in zwei Schritten: zunächst sind in § 5 Abs. 3 S. 2 WindSeeG genannte ausdrückliche Fälle der Unzulässigkeit zu prüfen. Liegt einer dieser Ausschlussgründe vor, ist die Festlegung unzulässig. Anderenfalls muss eine Interessenabwägung nach § 5 Abs. 3 S. 1 WindSeeG vorgenommen werden.

§ 5 Abs. 3 S. 2 WindSeeG hält einen nicht abschließenden („insbesondere“) Katalog unzulässiger Festlegungen vor.[54] Diese „Tabukriterien“ betreffen andere, konkurrierende maritime Nutzungen. Jedenfalls wenn einer dieser Ausschlussgründe vorliegt, ist eine Festlegung im Sinne von § 5

[53] (BSH, 2023e, S. 2.).

[54] BT-Drs. 18/8860, 273.

Abs. 1 S. 1 Nr. 1, 2, 6-11, Abs. 2 S. 1 Nr. 1 lit. a und Abs. 2a unzulässig.[55] Die Voraussetzungen des § 5 Abs. 3 S. 2 WindSeeG sind spezieller als die allgemeine Interessenabwägung nach Satz 1 und daher vorrangig zu prüfen.[56] Auch können durch den ROP vorgegebene Abwägungsdirektiven für Mehrfachnutzung keine Wirkung entfalten, die diese gesetzlich geschützten Belange im Einzelfall überwiegen könnte. Nach § 5 Abs. 3 S. 2 WindSeeG sind Festlegungen unzulässig, wenn sie nicht mit den Erfordernissen der Raumordnung vereinbar sind (Nr. 1, siehe oben), die Meeresumwelt gefährden (Nr. 2), die Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs beeinträchtigen (Nr. 3) oder die Sicherheit der Landes- und Bündnisverteidigung beeinträchtigen (Nr. 4). Mit der WindSeeG-Novelle 2022 ist zudem § 5 Abs. 3 S. 2 Nr. 5 WindSeeG hinzugekommen. Er erlaubt unter engen Voraussetzungen Festlegungen in Schutzgebieten, wenn diese mit dem Schutzzweck einer nach § 57 BNatSchG erlassenen Schutzgebietsverordnung vereinbar sind.[57]

3.2.2.1 Erfordernisse der Raumordnung, § 5 Abs. 3 S. 2 Nr. 1 WindSeeG

Die Festlegung im FEP muss mit den Erfordernissen der Raumordnung vereinbar sein. Es müssen also die Ziele und Grundsätze der Raumordnung in Form des ROP 2021 berücksichtigt werden. Insofern wird auf Abschnitt 3.2.1 verwiesen, der die Flächenausweisung im Zusammenhang mit den Erfordernissen der Raumordnung bereits beleuchtet.

3.2.2.2 Gefährdung der Meeresumwelt, § 5 Abs. 3 S. 2 Nr. 2 WindSeeG

Festlegungen sind unzulässig, wenn sie die Meeresumwelt gefährden. Der Schutz ist im Vergleich zu den anderen unzulässigen Festlegungen intensiv, da bereits eine Gefährdung ausreicht. Eine tatsächliche Beeinträchtigung muss nicht vorliegen.[58] Bezug genommen wird auf § 69 Abs. 3 Nr. 1 WindSeeG, der eine nicht abschließende Aufzählung enthält. Nach § 69 Abs. 3 Nr. 1a WindSeeG gehört zur Erfüllung des Tatbestands insbesondere, dass eine Verschmutzung der Meeresumwelt nicht zu besorgen ist. Der Begriff der Verschmutzung der Meeresumwelt nach Art. 1 Abs. 1 Nr. 4 SRÜ wird weit gefasst und unterliegt in der Abwägung einer ausdifferenzierten und detaillierten Bewertung. Danach bedeutet Verschmutzung der Meeresumwelt die „unmittelbare oder mittelbare Zuführung von Stoffen oder Energie durch den Menschen in die Meeresumwelt einschließlich der Flussmündungen, aus der sich abträgliche Wirkungen wie eine Schädigung der lebenden Ressourcen sowie der Tier- und Pflanzenwelt des Meeres, eine Gefährdung der menschlichen Gesundheit, eine Behinderung der maritimen Tätigkeiten einschließlich der Fischerei und der sonstigen rechtmäßigen Nutzung des Meeres, eine Beeinträchtigung des Gebrauchswerts des Meerwassers und eine Verringerung der Annehmlichkeiten der Umwelt ergeben oder ergeben können." Dieser weite Verschmutzungsbegriff in Kombination mit der lediglich erforderlichen Gefährdung der Meeresumwelt gewährleistet einen intensiven gesetzlichen Schutz, der Mehrfachnutzung zwischen Windenergie und anderen maritimen Nutzungen im Einzelfall entgegenstehen kann. Für alle Beeinträchtigungen der Meeresumwelt muss jedoch eine gewisse Erheblichkeitsschwelle überschritten sein. So kann eine Gefährdung in der Regel ausgeschlossen werden, wenn ein Ausnahme- oder Befreiungstatbestand nach dem Bundesnaturschutzgesetz erfüllt ist.[59] Diese Möglichkeit wäre etwa auch dann in den Blick zu nehmen, wenn durch die Mehrfachnutzung die Meeresumwelt stärker beansprucht und dadurch die Schwelle zur tatbestandlichen Gefährdung überschritten wird.

Der im Rahmen der Novellierung des WindSeeG 2023 geänderte § 69 Abs. 3 Nr. 1b WindSeeG enthält hinsichtlich der Gefährdung der Meeresumwelt die weitere Vorgabe dass insbesondere

[55] (Kerth, in: F. J. Säcker & Steffens, 2022, § 5 WindSeeG, Rn. 44.).

[56] (Spieht, in: Spieth & Lutz-Bachmann, 2018, § 5 WindSeeG, Rn. 30).

[57] S. dazu unter Abschnitt 3.2.2.5.

[58] (F.-J. Säcker et al., 2017 WindSeeG, § 5 Rn. 39).

[59] (Uibeleisen/Groneberg, in: F. J. Säcker & Steffens, 2022, § 48 WindSeeG, Rn. 52.).

kein nachgewiesenes signifikant erhöhtes Kollisionsrisiko von Vögeln mit Windenergieanlagen besteht, das nicht durch Schutzmaßnahmen gemindert werden kann. Damit ist der Schutz des Vogelzugs nach dem neugefassten Wortlaut weniger streng als noch vor der WindSeeG-Novelle.[60] Nunmehr muss positiv nachgewiesen werden, dass ein signifikant erhöhtes Kollisionsrisiko besteht. Selbst wenn ein solches nachgewiesen wird, kann die Festlegung noch zulässig sein, sofern das Risiko gemindert werden kann. Im Vergleich zu der Regelung vor der WindSeeG-Novelle stellt der Schutz des Vogelzugs damit eine deutlich niedrigere Hürde für Festlegungen im FEP dar, auch im Hinblick auf Mehrfachnutzungen.

3.2.2.3 Beeinträchtigung der Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs, § 5 Abs. 3 S. 2 Nr. 3 WindSeeG

Ferner sind Festlegungen unzulässig, die die Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs beeinträchtigen. Gemeint sind dabei sowohl der Schiffs- als auch der Flugverkehr.[61] Die Gebiete bzw. Flächen für Windenergie müssen also den Verkehr gewährleisten. Der Schiffsverkehr in der AWZ unterliegt insbesondere den Regelungen des SRÜ. Art. 60 Abs. 7 SRÜ bestimmt insoweit, dass Anlagen nicht errichtet werden dürfen, wo dies die Benutzung anerkannter und für die internationale Schifffahrt wichtiger Schifffahrtswege behindern kann. Damit trifft der Gesetzgeber eine normative Vorgabe mit internationalrechtlicher Ausprägung dafür, dass eine Mehrfachnutzung von Verkehr und Windenergie nur zulässig ist, wenn der Verkehr hierdurch nicht beeinträchtigt wird. Eine Beeinträchtigung bedeutet in Abgrenzung zur Gefährdung begrifflich einen weniger intensiven Schutz. Der Belang muss tatsächlich behindert werden und nicht bloß gefährdet.

3.2.2.4 Beeinträchtigung der Landes- und Bündnisverteidigung, § 5 Abs. 3 S. 2 Nr. 4 WindSeeG

Unzulässig sind außerdem Festlegungen, die die Landes- und Bündnisverteidigung beeinträchtigen. Die Marine muss im Verteidigungs- oder Bündnisfall ohne Einschränkung der Gefahrenabwehr nachkommen können. Eine für die Landes- bzw. Bündnisverteidigung beeinträchtigende Mehrfachnutzung mit Windenergie ist damit gesetzlich ausgeschlossen. Für Mehrfachnutzungen mit militärischen Nutzungen bedeutet dies, dass die Mehrfachnutzung mit der Windenergie die Landes- und Bündnisverteidigung nicht behindern darf. Damit trifft der Gesetzgeber eine Vorgabe für die erforderliche Verträglichkeit zwischen der Mehrfachnutzung von Windenergie und der Landes- und Bündnisverteidigung.

3.2.2.5 Ausgewiesene Schutzgebiete nach § 57 BNatSchG, § 5 Abs. 3 S. 2 Nr. 5 WindSeeG

Die Neuregelung des § 5 Abs. 3 Nr. 5 WindSeeG eröffnet Chancen für Mehrfachnutzungen zwischen Windenergie auf See und Meeresschutzgebieten. § 5 Abs. 3 Nr. 5 WindSeeG öffnet nach § 57 BNatSchG ausgewiesene Schutzgebiete unter bestimmten Bedingungen für Festlegungen von Gebieten und Flächen für Windenergie. Die Norm stellt eine ausnahmsweise Durchbrechung des Grundsatzes der Trennung konfligierender Nutzungen auf raumordnerischer Ebene dar. Von der Regelung kann indes nur Gebrauch gemacht werden, wenn die Ausbauziele für Windenergie auf See andernfalls nicht erreicht würden, § 5 Abs. 6 WindSeeG. Damit soll sichergestellt werden, dass eine Flächenausweisung in Schutzgebieten erst als letzte Option erfolgt, wenn das Ausbauziel nicht erreicht wird.[62] § 5 Abs. 3 S. 2 Nr. 5 WindSeeG ist im Rahmen der Neufassung des WindSeeG auf Grundlage der Festlegungen des Raumordnungsplans AWZ zum

[60] Die vormalige Fassung des WindSeeG formulierte, der Vogelzug dürfe „nicht gefährdet“ werden.

[61] (F.-J. Säcker et al., 2017 WindSeeG, § 5 Rn. 43.).

[62] BT-Drs. 20/2657, S. 9.

Naturschutzgebiet Doggerbank eingefügt worden. Bezweckt wird zugleich eine Angleichung an die §§ 57, 34 Abs. 2-5 BNatSchG.[63]

Um einen möglichst weitgehenden, wirksamen Gebietsschutz für die Nord- und Ostsee zu erzielen, halten §§ 56 f. BNatSchG Kompetenz- und Verfahrensregelungen für die Unterschutzstellung von Meeresgebieten bereit. Die Unterschutzstellung eines Meeresgebietes erfolgt durch Rechtsverordnung, § 57 Abs. 2 BNatSchG. Zuständig für die Auswahl der geschützten Meeresgebiete im Bereich der deutschen AWZ und des Festlandsockels ist das Bundesamt für Naturschutz, § 57 Abs. 1 BNatSchG. Das BMUV ist dann zuständig für die Erklärung der Meeresgebiete zu geschützten Teilen von Natur und Landschaft im Sinne von § 20 Abs. 2 BNatSchG.
§ 57 Abs. 3 NatSchG schließlich unterwirft Auswahl und Erklärung von Meeresgebieten in der AWZ und auf dem Festlandsockel zu geschützten Teilen von Natur und Landschaft Beschränkungen, mit denen den völker- und europarechtlichen Bindungen Deutschlands entsprochen werden soll.[64]

Die Schutzgebietsverordnungen der ausgewiesenen Schutzgebiete bestimmen, welchen Schutzzweck das Gebiet erfüllen muss und welche Nutzungen im Gebiet mit dem Schutzzweck übereinstimmen. In der AWZ liegen sechs solcher Gebiete: Borkum Riffgrund[65], Doggerbank[66], Sylter Außenriff – Östliche Deutsche Bucht[67] in der Nordsee sowie Fehmarnbelt[68], Kadetrinne[69] und Pommersche Bucht – Rönnebank in der Ostsee.[70] In den Schutzgebietsverordnungen sind Windenergieprojekte nicht pauschal verboten. Beispielsweise lässt § 5 Borkum Riffgrund Verordnung[71] die Kombination mit Projekten der Energieerzeugung unter bestimmten Voraussetzungen mit Verweis auf § 34 BNatSchG bereits zu. Die Ausweisung als Schutzgebiet steht damit einer weiteren Verwendung dieser Flächen für die Errichtung und den Betrieb von Windenergie nach dem WindSeeG nicht zwingend entgegen.

Stattdessen ist nach Maßgabe der Neuregelung in § 5 Abs. 3 S. 2 Nr. 5 WindSeeG im Einzelnen zu prüfen, ob im Falle des Schutzgebiets Borkum Riffgrund Festlegungen von Flächen für die Windenergie nach § 5 Borkum Riffgrund Verordnung mit dem Schutzzweck des Schutzgebietes vereinbar sind. Die Errichtung von Windenergieanlagen auf See ist in den Schutzgebieten also nicht ohne Weiteres möglich; die Entscheidung fällt auf Grundlage einer Abwägungsentscheidung.[72] Die Vereinbarkeit mit dem Schutzzweck des Schutzgebietes ist nach § 5 Abs. 3 S. 2 Nr. 5 Hs. 2 WindSeeG gegeben, wenn die Festlegungen nach § 34 Abs. 2 BNatSchG nicht zu erheblichen Beeinträchtigungen der für den Schutzzweck der jeweiligen Schutzgebietsverordnung maßgeblichen Bestandteile des Gebietes führen können oder wenn sie die Anforderungen nach § 34 Abs. 3-5 BNatSchG erfüllen. Damit wird Bezug genommen auf die strengen Kriterien der FFH-Verträglichkeitsprüfung in Gestalt der Plan-FFH-Verträglichkeitsprüfung nach § 36 BNatSchG.[73] Sie sollen nachfolgend kurz dargestellt werden.

[63] BT-Drs. 20/1634, S. 73.

[64] (Gellermann, in: Landmann et al., 2022, § 57 BNatSchG, Rn. 14.).

[65] Verordnung über die Festsetzung des Naturschutzgebietes „Borkum Riffgrund“ vom 22. September 2017 (BGBl. I S. 3395).

[66] Verordnung über die Festsetzung des Naturschutzgebietes „Doggerbank“ vom 22.09.2017, BGBl. I S. 3400.

[67] Verordnung über die Festsetzung des Naturschutzgebietes „Sylter Außenriff – Östliche Deutsche Bucht“ vom 22.09.2017, BGBl. I S. 3423.

[68] Verordnung über die Festsetzung des Naturschutzgebietes „Fehmarnbelt“ vom 22.09.2017, BGBl. I S. 3405.

[69] Verordnung über die Festsetzung des Naturschutzgebietes „Kadetrinne“ vom 22.09.2017, BGBl. I S. 3410.

[70] Verordnung über die Festsetzung des Naturschutzgebietes „Pommersche Bucht – Rönnebank“ vom 22.09.2017, BGBl. I S. 3415.

[71] Verordnung über die Festsetzung des Naturschutzgebietes „Borkum Riffgrund“ vom 22. September 2017 (BGBl. I S. 3395).

[72] BT-Drs. 20/1634, S. 73; (Gellermann in: Landmann et al., 2022, § 34, Rn. 4.).

[73] Nach § 36 BNatSchG findet § 34 Abs. 1-5 entsprechende Anwendung auf Pläne, die bei behördlichen Entscheidungen zu beachten oder zu berücksichtigen sind.

Exkurs: FFH-Verträglichkeitsprüfung § 34 BNatSchG: Verträglichkeit und Unzulässigkeit von Projekten

(1) Projekte sind vor ihrer Zulassung oder Durchführung **auf ihre Verträglichkeit mit den Erhaltungszielen eines Natura 2000-Gebiets** zu überprüfen, wenn sie einzeln oder im Zusammenwirken mit anderen Projekten oder Plänen **geeignet sind, das Gebiet erheblich zu beeinträchtigen**, und nicht unmittelbar der Verwaltung des Gebiets dienen, § 34 Abs. 1 BNatSchG.

(2) Ergibt die Prüfung der Verträglichkeit, dass das Projekt **zu erheblichen Beeinträchtigungen des Gebiets** in seinen für die Erhaltungsziele oder den Schutzzweck maßgeblichen Bestandteilen führen kann, ist es **unzulässig**, § 34 Abs. 2 BNatSchG.

(3) Abweichend von Absatz 2 darf ein Projekt nur zugelassen oder durchgeführt werden, soweit es erstens **aus zwingenden Gründen des überwiegenden öffentlichen Interesses**, einschließlich solcher sozialer oder wirtschaftlicher Art, **notwendig** ist **und zweitens zumutbare Alternativen**, den mit dem Projekt verfolgten Zweck an anderer Stelle ohne oder mit geringeren Beeinträchtigungen zu erreichen, **nicht gegeben** sind, § 34 Abs. 3 BNatSchG.

Nach diesem Maßstab sind Projekte[74] geeignet, ein Gebiet erheblich zu beeinträchtigen, wenn sie drohen, die für das Gebiet festgelegten Erhaltungsziele zu gefährden.[75] Ein günstiger Erhaltungszustand muss trotz Durchführung eines Vorhabens stabil bleiben. Nur, wenn keine vernünftigen Zweifel darüber bestehen, dass keine erheblichen Beeinträchtigungen auftreten, darf die Verträglichkeitsprüfung mit einem positiven Ergebnis abgeschlossen werden.[76] Dies setzt voraus, dass kein vernünftiger Zweifel daran besteht, dass Beeinträchtigungen der gebietsbezogenen Erhaltungsziele jenseits eventuell bestehender naturschutzfachlich begründeter Bagatellschwellen unter Heranziehung der besten verfügbaren wissenschaftlichen Erkenntnisse ausgeschlossen werden können.[77] Grundsätzlich ist jede Beeinträchtigung, also jedes nachteilige Berühren von Erhaltungszielen bzw. der Stabilität eines günstigen Erhaltungszustandes des Gebietes erheblich.[78] Wenn sich aus der Verträglichkeitsprüfung ergibt, dass erhebliche Beeinträchtigungen nicht mit der gebotenen Sicherheit ausgeschlossen werden können, dann dürfen vorgesehene Schutzmaßnahmen einbezogen werden, um Zweifel auszuräumen.[79] Die Wirkung der Schutzmaßnahmen muss aber mit der gebotenen Sicherheit festgestellt werden.[80]

Führt die Verträglichkeitsprüfung zu einem negativen Ergebnis, so ist das Vorhaben nach § 34 Abs. 2 BNatSchG grundsätzlich unzulässig. Zur Unzulässigkeit führt auch bereits die Möglichkeit einer erheblichen Beeinträchtigung – also vernünftige wissenschaftliche Zweifel hierüber.[81]

Im Falle der Möglichkeit einer erheblichen Beeinträchtigung ist eine Zulassung nach Art. 6 Abs. 4 FFH-RL und § 34 Abs. 3 ff. BNatSchG nur ausnahmsweise möglich. Diese

[74] Der in § 34 BNatSchG verwendete, aus dem Unionsrecht stammende Begriff des "Projekts" umfasst sämtliche Aktivitäten, die eine Gefährdung des jeweils geschützten Gebietes mit sich bringen können, also jedenfalls die Errichtung baulicher oder sonstiger Anlagen sowie sonstige Eingriffe in Natur und Landschaft (BVerwG, Urt. v. 10.4.2013 – 4 C 3.12 – ZUR 2013, S. 541, Rn. 29).

[75] EuGH, Urt. v. 7.9.2004 – C-127/02 (Waddenvereniging und Vogelbeschermingsvereniging) – EuZW 2004, S. 730, Rn. 49.

[76] BVerwG, Urt. v. 17.1.2007 – 9 A 20.05 – NVwZ 2007, S. 1054 (1059); Urt. v. 14.7.2011 – 9 A 12.10 – BeckRS 2011, 55589, Rn. 59.

[77] (Gerbig/Schütte, in: Landmann et al., 2022, § 9, Rn. 118.).

[78] BVerwG, Urt. v. 17.1.2007 – 9 A 20.05 – NVwZ 2007, S. 1054 (1059).

[79] EuGH, Urt. V. 15.5.204 – C-521/12 (Briels u.a.) – NVwZ 2014, S. 931 (Rn. 28); Urt. v. 21.7.2016 – C-387/15, C-388/15 (Hilde Orleans u.a./Vlaams Gewest) – NVwZ 2016, S. 1548 (Rn. 53 ff.).

[80] Vgl. EuGH – Urt. v. 26.4.2017 – C-142/16 (Moorburg) – ZUR 2017, S. 414 (Rn. 34-38).

[81] EuGH, Urt. v. 20.10.2006 – C 239/04 (Kommission/Portugiesische Republik) – BeckRS 2006, 70816, Rn. 20.

ausnahmsweise Zulassung setzt voraus, dass zwingende Gründe des überwiegenden öffentlichen Interesses vorliegen und keine zumutbaren Alternativen bestehen. Im Rahmen der Prüfung der Ausnahmevoraussetzungen ist eine Abwägungsentscheidung vorzunehmen, wobei die Ausnahmetatbestände des Art. 6 Abs. 4 FFH-RL eng auszulegen sind.[82] Die zwingenden Gründe müssen so wichtig sein, dass sie gegen das mit der FFH-RL verfolgte Ziel der Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wild lebenden Tiere und Pflanzen abgewogen werden können.[83] Ein derartiger zwingender Grund des überwiegenden öffentlichen Interesses ist nach der Rechtsprechung unter anderem das Ziel, die Stromversorgungssicherheit eines Mitgliedstaats jederzeit zu gewährleisten.[84] Das Interesse, Energie aus erneuerbaren Quellen zu gewinnen, ist mit Priorität in die Abwägung einzustellen.[85] Zusätzlich ist zu prüfen, ob zumutbare Alternativen gegeben sind. Eine zumutbare Alternative im Sinne von § 34 Abs. 3 Nr. 2 BNatSchG besteht, wenn das Planungsziel sich an einem nach dem Schutzkonzept der FFH-RL günstigeren Standort oder mit geringerer Eingriffsintensität verwirklichen lässt.[86]

Bei einer möglichen Betroffenheit prioritärer Lebensraumtypen oder Arten ist § 34 Abs. 4 S. 1 BNatSchG maßgeblich, wonach nur solche Gründe die Beeinträchtigung eines Schutzgebiets rechtfertigen können, die die Gesundheit des Menschen, die öffentliche Sicherheit oder ökologische Vorteile betreffen. Andere zwingende Gründe des überwiegenden öffentlichen Interesses (insbesondere wirtschaftliche und soziale Belange) können nur dann herangezogen werden, wenn vorher eine Stellungnahme der Europäischen Kommission eingeholt wurde (§ 34 Abs. 4 S. 2 BNatSchG).

§ 34 Abs. 5 BNatSchG erfordert schließlich, dass die mit dem Eingriff verbundenen erheblichen Beeinträchtigungen durch zum Eingriffszeitpunkt wirksame Kohärenzsicherungsmaßnahmen so ausgeglichen werden, dass die Kohärenz des Natura-2000-Netzes erhalten bleibt. Dabei handelt es sich um eine zwingende Voraussetzung für die Zulassung eines Vorhabens.[87]

3.2.2.6 Öffentliche und private Belange nach § 5 Abs. 3 S. 1 WindSeeG

Soweit keiner der in § 5 Abs. 3 S. 2 WindSeeG genannten Fälle vorliegt, hat die in § 5 Abs. 3 S. 1 WindSeeG vorgesehene Interessenabwägung stattzufinden. Wie bereits ausgeführt, sind danach Gebiets- bzw. Flächenfestlegungen für Windenergie im FEP unzulässig, wenn überwiegende öffentliche oder private Belange entgegenstehen. Der Plangeber muss daher entgegenstehende öffentliche und private Belange ermitteln und bewerten, ob sie dem Interesse der Festlegung der Fläche bzw. des Gebiets überwiegen und damit entgegenstehen. Dabei handelt es sich zum einen um öffentliche Belange, darunter insbesondere gesetzliche Wertungen und Vorgaben. Zum anderen müssen private Belange eingestellt werden. Zu den Belangen nach § 5 Abs. 3 S. 1 WindSeeG sollen nach dem Willen des Gesetzgebers insbesondere Belange der Fischerei und der marinen Aquakultur sowie die Belange des Natur- und Artenschutzes zählen.[88] Überwiegende öffentliche oder private Belange müssen in einer vergleichbaren Schwere wie die kataloghaft aufgezählten Belange in § 5 Abs. 3 WindSeeG beeinträchtigt sein.[89]

Neu ist in diesem Kontext das überragende öffentliche Interesse am Ausbau der Windenergie (vgl. § 1 Abs. 3 WindSeeG), das als Gegengewicht in die Interessenabwägung eingestellt werden

[82] EuGH, Urt. v. 16.2.2012 – C-182/10 (Solvay u.a.) – NVwZ 2012, S. 617 (622).

[83] Ebd.

[84] EuGH, Urt. V. 29.7.2019 – C-411/17 (Inter-Environnement Wallonie) – BeckRS 2019, 15835, Rn. 159.

[85] VG Köln, Beschl. v. 19.1.2023 – 14 L 387/22 – BeckRS 2023, 2502, Rn. 106.

[86] BVerwG, Urt. v. 6.11.2012 – 9 A 17.11 – BeckRS 2013, 50523, Rn 69.

[87] (Wysk, in: Kopp & Ramsauer, 2023, § 74, Rn. 78.); Die zehn Natura 2000-Gebiete in der deutschen AWZ sind zusammengefasst zu sechs Naturschutzgebieten und seit dem 22.09.2017 unter Schutz gestellt

[88] BT-Drs. 18/8860, 273.

[89] (Spieth & Lutz-Bachmann, 2018 § 5 WindSeeG Rn. 30.).

muss (§ 5 Abs. 3 S. 3 WindSeeG).[90] Dieser Grundsatz wirkt von der Planungs- bis auf die Genehmigungsebene des WindSeeG. Es handelt sich um eine gesetzliche Abwägungsdirektive, die dem Ausbau der Windenergie gegenüber anderen Belangen im Abwägungsvorgang ein entsprechendes Gewicht gibt. Dem Ausbau von Windenergie kommt in solchen Abwägungsvorgängen ein besonderes Durchsetzungsvermögen zu.[91] Dieses gilt nicht uneingeschränkt, da der Vorrang nicht absolut gilt.[92] Das bedeutet, dass der Belang „Ausbau der Windenergie auf See" als überragendes öffentliches Interesse neben andere Belange gestellt wird und im Einzelfall eine Abwägung mit anderen Interessen erfolgt.[93] Es zeichnen sich bereits Tendenzen in der Rechtsprechung ab, wie sich das überragende öffentliche Interesse in der Praxis auswirkt.

Nachdem kurz nach der Einführung der Abwägungsdirektive die Umsetzung durch die Gerichte noch unklar war, tendiert die Rechtsprechung nun jedenfalls für die Windenergie an Land dazu, das überragende öffentliche Interesse an der Errichtung von Windenergieanlagen nur ausnahmsweise – in sog. atypischen Ausnahmefällen – zu überwinden.[94] Die grundsätzliche Bedeutung der neuen Abwägungsdirektive wurde auch für die Offshore-Windenergie festgestellt. Die Energiegewinnung aus Offshore-Windenergieanlagen ist demnach mit Priorität in Abwägungen einzustellen.[95] Rechtsprechung zur Auswirkung des überragenden öffentlichen Interesses auf Festlegungen im Flächenentwicklungsplan (vgl. § 5 Abs. 3 S. 3 WindSeeG) ist jedoch – soweit ersichtlich – noch nicht ergangen.

Festzuhalten ist, dass das „überragende öffentliche Interesse" als Abwägungsdirektive jeweils im Einzelfall zu bewerten ist. Das kann dazu führen, dass das Interesse am Ausbau der Windenergie auf See überwiegt und sich andere Belange nur noch in Ausnahmefällen durchsetzen.

3.2.3 Wirkung auf die nachfolgende Planungsebene

Die im FEP festgelegten Gebiete bzw. Flächen geben den Rahmen für die nachfolgenden Planungsentscheidungen vor und werden in den nachfolgenden Planungsschritten weiterentwickelt. Sie werden nach § 9 Abs. 1 WindSeeG zentral voruntersucht und ausgeschrieben, § 50 WindSeeG. Flächen für Windenergie können auch ohne zentrale Voruntersuchung ausgeschrieben werden, § 16 WindSeeG. Wer den Zuschlag erhält, kann einen Antrag auf Durchführung des Planfeststellungs- bzw. Plangenehmigungsverfahrens zur Errichtung und zum Betrieb einer Windenergieanlage stellen, §§ 24 Abs. 1, 55 Abs. 1 WindSeeG. Es können daher im Ergebnis nur Windenergieanlagen errichtet werden, die im Bereich der Gebiete bzw. Flächen des FEP liegen. Das bedeutet, dass im weiteren Zulassungsverlauf keine weiteren Flächen für Windenergie hinzukommen. Der FEP gibt vor, wo Windenergieanlangen errichtet werden können und wo nicht. Damit kommt der Festlegung im FEP eine Schlüsselfunktion bei der Ermöglichung von Mehrfachnutzung zu. So legt auch der gegenwärtige Entwurf des FEP fest: „Eine Errichtung von Windenergieanlagen (…) ist nur innerhalb der festgelegten Flächen (…) zulässig".[96]

In den weiteren Planungsschritten sind für die Verwirklichung von Windenergieanlagen die bekannten Voraussetzungen des Plangenehmigungs- bzw. Planfeststellungsverfahrens maßgeblich.

[90] BT-Drs. 20/1634, S. 73.

[91] BT-Drs. 20/1634, S. 70.

[92] (Versteyl & Marschhäuser, 2022, S. 77).

[93] BT-Drs. 20/1630, S. 159.

[94] Vgl. insbesondere OVG Greifswald, Urt. v. 7.2.2023 - 5 K 171/22 – KlimR 2023, 120, Rn. 155 ff. (m. Anmerkung Graetschel). Rechtsprechungsübersichten zur Auslegung des überragenden öffentlichen Interesses quer durch die unterschiedlichen Rechtsbereiche finden sich bei Lingemann NVwZ 2023, 1634; Birkhölzer ZNER 2023, 374; Sailer/Militz/Deutinger, Das überragende öffentliche Interesse und die öffentliche Sicherheit nach § 2 EEG 2023.

[95] VG Köln, Beschl. v. 19.1.2023 – 14 L 387/22 – BeckRS 2023, 2502, Rn. 106 ff.

[96](BSH, 2023b, Nr. 6.2.1.d.).

Die Belange, welche in § 5 Abs. 3 WindSeeG genannt sind, werden wiederholend auch in §§ 10 Abs. 2 und 69 Abs. 3 WindSeeG genannt.

3.2.4 Mehrfachnutzung im weiteren Planungs- und Zulassungsverfahren für Windenergieanlagen auf See

Die Standortentscheidungen für Windenergie, und damit auch für solche in Mehrfachnutzung mit anderen maritimen Nutzungen, fallen im ROP und im FEP. Hier sollen nur einige Regelungen hervorgehoben werden, die im weiteren Planungs- und Zulassungsverfahren von Windenergie auf See im Hinblick auf Mehrfachnutzung Potential oder Hemmnis sein können.

Die erfolgreiche Eignungsprüfung der zentral voruntersuchten Flächen mündet in eine Feststellung durch Rechtsverordnung, § 12 Abs. 5 WindSeeG. Nach § 12 Abs. 5 S. 3 und 4 WindSeeG kann diese Rechtsverordnung Vorgaben für das spätere Vorhaben enthalten, wenn andernfalls eine Beeinträchtigung der Kriterien des § 10 Abs. 2 WindSeeG zu besorgen wären. Solche Vorgaben können insbesondere (also nicht abschließend normiert) die Bauausführung, Art und Umfang der Bebauung der Fläche, die Lage der Bebauung auf der Fläche sowie den Betrieb der Windenergieanlage betreffen. Somit können an dieser Stelle konkrete Vorgaben zur Lösung von Nutzungskonflikten gemacht werden, die eine Mehrfachnutzung mit anderen maritimen Nutzungen erleichtert.

Windenergieprojekte werden letztlich im Planfeststellungs- bzw. Plangenehmigungsverfahren zugelassen. § 69 Abs. 3 WindSeeG hält „Tabukriterien“ bereit, die bei der Planfeststellung oder -genehmigung nicht übergangen werden dürfen. Diese Kriterien stellen rechtliche Grenzen für Nutzungskonflikte mit anderen maritimen Nutzungen auf und sind sogenannte abwägungsfeste Belange.[97] Sie sind zu einem großen Teil identische mit den „Tabukriterien“ des § 5 Abs. 3 WindSeeG: Die Meeresumwelt darf nicht gefährdet werden, die Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs sowie die Sicherheit der Landes- und Bündnisverteidigung nicht beeinträchtigt werden. Insofern gelten die Ausführungen in Abschnitt 3.2.2. Darüber hinaus sind die öffentlich-rechtlichen Bestimmungen zu beachten, § 69 Abs. 3 Nr. 8 WindSeeG: also auch die bindenden Vorgaben des ROP und des FEP.

3.2.5 Zwischenergebnis

Im Hinblick auf die Chancen und Herausforderungen für die Mehrfachnutzung bei der Festlegung von Flächen und Gebieten für Windenergie im FEP nach dem WindSeeG bleibt festzuhalten, dass die Zulässigkeit von Vorhaben von der Gefährdung oder Beeinträchtigung anderer Nutzungsbelange abhängt, vgl. § 5 Abs. 3 WindSeeG. Als Hemmnis für den Ausbau von WEA im Rahmen einer Mehrfachnutzung gilt diese normative Grenze auf der Ebene des FEP. Zudem wirken sich Flächen- und Gebietsfestlegungen im FEP auf nachfolgende Planungsebenen wie die Voruntersuchung und Ausschreibung von Flächen und auf weitere Planungs- und Zulassungsverfahren für Windenergieanlagen auf See aus. Hierbei bietet die Möglichkeit nach § 12 Abs. 5 WindSeeG eine Rechtsverordnung zu erlassen, in der die Eignungsprüfung festgestellt sowie gleichzeitig mögliche Vorgaben zur Lösung von potentiellen Nutzungskonflikten gemacht werden, eine Chance zur konfliktfreien Ermöglichung von Mehrfachnutzung.

Dem FEP kommt dabei insgesamt eine Schlüsselfunktion zu, da grundsätzlich nur in den dort festgelegten Flächen Windenergieanlagen errichtet werden können. In der Regel erfolgen die Festlegungen in den Vorrang- und Vorbehaltsgebieten Windenergie des ROP. Eine über die Festlegung von Gebieten im ROP hinausgehende Planung ist jedoch rechtlich zulässig, solange eine

[97] (Spieth & Lutz-Bachmann, 2018 § 48 WindSeeG Rn. 49 ff).

Vereinbarkeit mit anderen Nutzungen und den festgelegten Grundsätzen und Zielen der Raumordnung besteht. Dies bemisst sich nach den Voraussetzungen im konkreten Einzelfall.

3.3 Kompensationsmaßnahmen im Kontext von Windenergieanlagen auf See und Mehrfachnutzung

Im Rahmen der Erstellung dieser Studie wurde die Frage aufgeworfen, ob das Naturschutzrecht bei einer Besserstellung einer naturschutzrelevanten Nutzung in einer Fläche die intensivere Nutzung zum Beispiel durch Mehrfachnutzung mit Windenergie an anderer Stelle erlaube. Da bei der Errichtung und dem Betrieb von Windenergieanlagen auf See die Natur und Landschaft erheblich beeinträchtigt wird, ordnet das Gesetz Kompensationsmaßnahmen an.[98] In diesem Kontext wurde im Verlauf des Projekts der Blick auf die Kompensationsregelungen der BKompV gerichtet. § 15 BKompV enthält eine ausschließlich für WEA auf See sowie die hierfür erforderlichen Nebeneinrichtungen geltende Maßgabe für die Kompensation. § 15 BKompV steht im Kontext der naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung. Im Folgenden werden zunächst die Grundlagen der Eingriffsregelung nach dem BNatSchG dargestellt. Im Anschluss daran erfolgt eine rechtliche Einordnung für das Kompensationsregime von WEA auf See nach der BKompV. Hierbei wird auch auf die Mehrfachnutzung von WEA auf See und Fischerei eingegangen. In diesem Zusammenhang wurde die Frage aufgeworfen, ob aus naturschutzrechtlicher Sicht durch die umweltverbessernde Nutzung einer Fläche, eine Privilegierung der Windenergie durch eine intensivere Nutzung in einer anderen Fläche herbeigeführt werden kann. Ob also eine Fläche intensiver durch die Energieerzeugung genutzt werden könnte, wenn die Meeresumwelt einer anderen Fläche dafür umso intensiver durch z.B. Ausschluss von Fischerei und Schifffahrt geschützt würde. Dies ist jedoch weder nach den Vorgaben des BNatSchG noch nach der BKompV der Fall. Abschließend wird das für andere Nutzungen als Windenergie geltende Kompensationsregime untersucht.

3.3.1 Grundlagen zur naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung

Die Eingriffsregelung der §§ 13-19 BNatSchG unterzieht alle potentiell naturschädigenden und landschaftsverbrauchenden Vorhaben einer zusätzlichen Prüfung, um die Leistungsfähigkeit des Naturhaushaltes und die Qualität des Landschaftsbildes soweit als möglich zu bewahren bzw. wiederherzustellen bzw. nachrangig durch Geldersatz zu kompensieren.[99] Zum Naturhaushalt gehören die Naturgüter Boden, Wasser, Luft, Klima, Tiere und Pflanzen sowie das Wirkungsgefüge zwischen ihnen.[100] Die Eingriffsregelung tritt zu sonstigen fachrechtlichen Anforderungen hinzu und ist auf andere Zulassungsverfahren wie das Planfeststellungs- oder das Plangenehmigungsverfahren „aufgesattelt".[101]

Systematisch enthält § 13 BNatSchG den allgemeinen Grundsatz für das Instrument der naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung. § 14 Abs. 1 BNatSchG definiert den Eingriffsbegriff. Liegt ein Eingriff vor, so sieht § 15 BNatSchG ein mehrstufiges Rechtsfolgensystem vor.

Die Eingriffsregelung gilt auch für die AWZ: § 56 Abs. 1 BNatSchG erklärt die Vorschriften des Bundesnaturschutzgesetzes auch für den Bereich der Küstengewässer sowie nach Maßgabe des Seerechtsübereinkommens[102] für den Bereich der deutschen AWZ und des Festlandsockels für

[98] §§ 13 ff., 56 BNatSchG.

[99] (Landmann et al., 2022, § 10, Rn. 41.); (Schrader, in: Giesberts & Reinhardt, 2022, § 13 BNatSchG, Rn. 1.).

[100] § 7 Abs. 1 Nr. 2 BNatSchG.

[101] BVerwG, Urt. v. 7.3.1997 – 4 C 10.96 – NVwZ 1997, S. 914.

[102] Anhaltspunkte für die Geltungsgrenzen des nationalen Rechts, die sich aus den völkerrechtlichen Bestimmungen des Seerechtsübereinkommens ergeben, lassen sich § 57 Abs. 3 Nr. 1, 2 und 4 BNatSchG entnehmen ((Gellermann, in: Landmann et al., 2022, § 56 BNatSchG, Rn. 12.); Einzelheiten bei (Proelß, 2010, S. 359 (361 ff.)).

anwendbar.[103] Dies gilt indes nicht für Errichtung und Betrieb von Windenergieanlagen in der AWZ, die vor dem 1.1.2017 genehmigt worden sind, oder die auf Grundlage eines Zuschlags nach § 34 WindSeeG zugelassen werden. Auf sie findet die Eingriffsregelung keine Anwendung, § 56 Abs. 3 BNatSchG.[104] Die Regelung soll die Förderung des Ausbaus erneuerbarer Energien wirksam unterstützen.[105] Die Zuständigkeit für die Durchführung des BNatSchG liegt für den Bereich von AWZ und Festlandsockel beim Bundesamt für Naturschutz, § 58 Abs. 1 S. 1 BNatSchG.

Gem. § 13 BNatSchG sind erhebliche Beeinträchtigungen von Natur und Landschaft von dem Verursacher vorrangig zu vermeiden. Erhebliche Beeinträchtigungen, die sich nicht vermeiden lassen, sind durch Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen oder, soweit dies nicht möglich ist, durch Ersatz in Geld zu kompensieren. § 14 Abs. 1 BNatSchG definiert den Eingriff in Natur und Landschaft als Veränderung der Gestalt oder Nutzung von Grundflächen oder Veränderung des mit der belebten Bodenschicht in Verbindung stehenden Grundwasserspiegels (sog. *Eingriffs**handlung***), die die Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushalts oder das Landschaftsbild erheblich beeinträchtigen kann (sog. *Eingriffs**wirkung***). § 15 BNatSchG regelt in Bezug auf Eingriffe in Natur und Landschaft abgestufte Rechtsfolgen. Beim Vorliegen eines Eingriffs tritt die sog. „Kaskade der Eingriffsfolgen“[106] ein: Vermeidbare Beeinträchtigungen muss der Verursacher gem. § 15 Abs. 1 S. 1 BNatSchG unterlassen. Eine Beeinträchtigung ist dabei vermeidbar, wenn zumutbare Alternativen bestehen, um den Zweck, den der Eingriff verfolgt, am gleichen Ort oder mit geringen Beeinträchtigungen zu erreichen (§ 15 Abs. 1 S. 2 BNatSchG).

Bei unvermeidbaren Beeinträchtigungen hat der Verursacher Ausgleichs- oder Ersatzmaßnahmen zu treffen (§ 15 Abs. 2 S. 1 BNatSchG). Der Ausgleich setzt voraus, dass die beeinträchtigten Funktionen des Naturhaushalts in gleichartiger Weise wiederhergestellt oder neugestaltet werden (§ 15 Abs. 2 S. 2 BNatSchG). Eine Beeinträchtigung ist ersetzt, wenn und sobald die beeinträchtigten Funktionen des Naturhaushalts in dem betroffenen Naturraum[107] in gleichwertiger Weise hergestellt oder neugestaltet sind (§ 15 Abs. 2 S. 3 BNatSchG). Sowohl Ausgleichs- wie Ersatzmaßnahmen knüpfen an die Funktionen des Naturhaushalts und das Landschaftsbild an. Zwischen ihnen besteht grundsätzlich kein Rangverhältnis.[108] Ersatzmaßnahmen führen anders als Ausgleichsmaßnahmen nicht zu einer gleichartigen, sondern nur zu einer gleichwertigen Wiederherstellung. Gleichartigkeit (Ausgleich) liegt vor, wenn inhaltlich wie räumlich eng an den beeinträchtigten Funktionen angeknüpft wird und also der Ausgleich sich am Ort der Beeinträchtigung auswirkt (sog. räumlich-funktionaler Zusammenhang[109]). Hinsichtlich des Naturhaushalts ist für eine „gleichartige Wieder-herstellung“ erforderlich, die Beeinträchtigung der ökologischen Funktionen zu beheben.[110] Nicht umfasst sind die Verbesserung anderer Funktionen sowie eine Kompensation an anderer Stelle ohne Bezug zum Ort der Beeinträchtigung.[111] Eine gleichwertige Wiederherstellung (Ersatz) liegt vor bei der Herstellung ähnlicher

[103] Über § 56 Abs. 1 BNatSchG finden auch sonstige Regelungen wie diejenigen des Arten- und Biotopschutzes Anwendung. Sie sollen dazu dienen, die Meeresbiodiversität zu erhalten und ggf. wiederherzustellen (Lütkes, in: Lütkes & Ewer, 2018, § 56 BNatSchG, Rn. 5.).

[104] Näher BT-Drs. 16/13430, S. 26. § 34 BNatSchG bezieht sich auf Projekte aus der sog. Übergangsphase des WindSeeG aus den Gebotsterminen vom 1.3.2017 und vom 1.3.2018. Für alle späteren Zulassungsverfahren findet die Ausgleichsregelung Anwendung (Lütkes, in: Lütkes & Ewer, 2018, § 56 BNatSchG, Rn. 10.).

[105] (Proelß, in: Koch et al., 2024, § 7, Rn. 59.).

[106] (Louis, 2007, S. 94 (95 ff.)).

[107] Das deutsche Bundesgebiet ist in naturräumliche Einheiten verschiedener Ordnungen unterteilt. Hier sind 69 naturräumliche Haupteinheiten entscheidend. Diese Gliederung auf Bundesebene basiert auf dem Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands der Bundesanstalt für Landeskunde (BfL) und orientiert sich an geomorphologischen, geologischen, hydrologischen, biogeographischen und bodenkundlichen Kriterien (BT-Drs. 16/12274, S. 57; Karte in BR-Drs. 332/13, Anlage 4 S. 49).

[108] (Kahl & Gärditz, 2023, § 10, Rn. 52.).

[109] Dazu BVerwG, Urt. v. 1.9.1997 – 4 A 36.96 – NVwZ 1998, S. 504 (507).

[110] (Kahl & Gärditz, 2023, § 10, Rn. 55.).

[111] BVerwG, Urt. v. 24.3.2011 – 7 A 3.10 – BeckRS 2011, 50754, Rn 44.

Funktionen. Herzustellen ist ein – unter Beachtung des Verhältnismäßigkeitsprinzips – im Hinblick auf Naturhaushalt oder Landschaftsbild funktional gleichwertiger Zustand, der in einer räumlichen Nähebeziehung zum Ort des Eingriffs steht.[112]

Auch die Kompensation selbst kann einen Eingriff im Sinne des § 14 BNatSchG darstellen. Auf diese ist dann wiederum der Mechanismus von § 15 BNatSchG anzuwenden.[113]

Sofern sich eine Beeinträchtigung nicht vermeiden oder nicht in angemessener Frist ausgleichen oder ersetzen lässt, so ist der Eingriff nicht zuzulassen bzw. darf nicht durchgeführt werden, wenn die Belange des Naturschutzes und der Landschaftspflege bei der Abwägung aller Anforderungen an Natur und Landschaft anderen Belangen im Rang vorgehen (§ 15 Abs. 5 BNatSchG). Diese besondere naturschutzfachliche Abwägung ist von der allgemeinen Abwägung im Rahmen des Planfeststellungs-/Plangenehmigungsbeschlusses zu unterscheiden und tritt zu dieser hinzu.[114] Die Abwägung ist bipolar auf die Frage gerichtet, ob die Belange des Naturschutzes und der Landschaftspflege anderen Belangen vorgehen.[115] Es müssen die Belange des Naturschutzes und der Landschaftspflege einerseits sowie die für das Vorhaben sprechenden Gesichtspunkte andererseits gegeneinander abgewogen werden.

Wird ein nicht durch Realkompensation ausgleichbarer oder ersetzbarer Eingriff infolge der Abwägungsentscheidung zugelassen, so hat der Verursacher Ersatz in Geld zu leisten und den Eingriff auf diese Weise zu kompensieren (§ 15 Abs. 6 S. 1 BNatSchG). Für den Zuständigkeitsbereich der Bundesverwaltung enthält die auf Grundlage von § 15 Abs. 8 S. 1 BNatSchG erlassene Bundeskompensationsverordnung[116] (BKompV) Regelungen zu Inhalt, Art und Umfang von Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen. Sie gilt auch im Bereich der Küstengewässer, der AWZ und des Festlandsockels, § 1 Abs. 2 BKompV.

3.3.2 Ausgleichs- und Ersatzregime bei der Errichtung und dem Betrieb von Windenergieanlagen auf See

Bei der Anwendung der Eingriffsregelung auf Errichtung und Betrieb von Windenergieanlagen auf See bestehen einige Besonderheiten. Sie sollen nachfolgend erläutert werden.

Die Anwendung der eigentlich auf landseitige Gegebenheiten zugeschnittenen Eingriffsregelung auf den Meeresbereich birgt spezifische Probleme. Denn das Meer umfasst den Meeresgrund, die Wassersäule, die Meeresoberfläche und den Luftraum darüber, während terrestrische Naturschutzkonzepte wie die Eingriffsregelung auf den Schutz von Flächen fokussiert sind.[117] Erforderlich ist dementsprechend eine vertikale Aufrüstung vom Flächenschutz zum dreidimensionalen Lebensraumschutz im fließenden Medium Meer, um die Leistungs- und Funktionsfähigkeit des marinen Naturhaushalts zu berücksichtigen.[118] Zugleich setzt die Eingriffsregelung jedoch stets einen Grundflächenbezug des eingriffsverursachenden Vorhabens voraus.[119] Dementsprechend müsste auch für das Auslösen der Kompensationspflicht eine Beeinträchtigung des Meeresboden erforderlich sein.

Die Errichtung von Windenergieanlagen an Land und auf See stellt im Sinne der Eingriffsregelung einen Eingriff in den Naturhaushalt und das Landschaftsbild dar, allein schon wegen der

[112] BVerwG, Urt. v. 1.9.1997 – 4 A 36.96 – NVwZ 1998, S. 504 (506).

[113] BVerwG, Beschl. v. 28.1.2009 – 7 B 45.08 – NVwZ 2009, S. 521.

[114] BVerwG, Urt. v. 17.1.2007 – 9 C 1.06 – NVwZ 2007, S. 581 (583 f.).

[115] Ebd.

[116] Bundeskompensationsverordnung vom 14. Mai 2020 (BGBl. I S. 1088).

[117] (Wolf, 2010, S. 365 (366)).

[118] Die Berücksichtigung der Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushalts verlangt § 14 Abs. 1 BNatSchG.

[119] (Wolf, 2010, 366 ff.).

notwendigen Veränderungen am Boden und auch weil Fläche in ihrem äußeren Erscheinungsbild verändert wird.[120] Bau und Betrieb von Offshore-Windenergieanlagen beeinträchtigen nicht nur das Landschaftsbild, sondern auch die im Meeresraum befindlichen Pflanzen und Tiere sowie das Wasser und die Luft.[121] Darüber hinaus kann in die Habitate von Seevögeln sowie den Vogelzug eingegriffen und können marine Säugetiere aufgrund von Schallemissionen gestört werden.[122]

Denkbare Kompensationsmaßnahmen für den Naturhaushalt sind beispielsweise die Schaffung oder Aufwertung von Riffen oder anderen Biotopen oder Maßnahmen zur Wiederansiedlung und Stützung einzelner Arten.[123] Solche Maßnahmen werden in der Literatur als für die AWZ schwierig realisierbar bewertet.[124] Die Möglichkeiten einer Naturalkompensation für Eingriffe in den Meeresgebieten seien begrenzt. So sei die Beeinträchtigung eines dreidimensionalen Lebensraums nur schwer durch flächenbezogene Maßnahmen zu kompensieren.[125] Auch wenn häufig die Möglichkeit fehlt, Kompensationsmaßnahmen durchzuführen, werden in der Praxis Kompensationsmaßnahmen zuweilen auch in der AWZ angeordnet und durchgeführt.[126]

In diesem Zusammenhang ist auch das Instrument des sog. Ökokontos von Bedeutung. Das BNatSchG sieht die Möglichkeit einer Bevorratung von Kompensationsmaßnahmen mittels Ökokonten vor, welche Art, Ort, Umfang und Kompensationswert (Ökopunkte) festlegen.[127] Vorgezogene Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen im Bereich von AWZ und Festlandsockel bedürfen der Zustimmung des Bundesamtes für Naturschutz, § 56a Abs. 1 BNatSchG. Anschließend sind die Maßnahmen zustimmungsgemäß durchzuführen. Die vorgezogenen Maßnahmen werden dann durch das Bundesamt für Naturschutz in einem Ökokonto bevorratet und können später bei der Zulassung eines Vorhabens nach den Eingriffsregelungen angerechnet werden.[128] Der Eingriffsverursacher erhält mit der verbindlichen Verbuchung also die Sicherheit, die bevorratete Maßnahme später zu einem bestimmten Kompensationswert anerkennen und den daraus folgenden Anspruch auch auf Dritte übertragen zu können.[129] Durch die Bevorratung können Eingriff und Kompensation zudem zeitlich entkoppelt und damit flexibilisiert werden.[130] Der Verursacher von Eingriffen hat dann die Möglichkeit, Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen aus der Bevorratung zu kaufen, um sich von seinen Pflichten zu befreien.[131] Insofern kann für Eingriffe bereits „vorgesorgt“ werden. Diese Bestimmungen gelten auch für Vorhaben in der AWZ.[132] Zur Koordinierung und Planung der marinen Kompensation ist ein Verzeichnis über die ergriffenen Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen sowie die dafür in Anspruch genommenen Flächen (Kompensationsverzeichnis) nach § 17 Abs. 6 BNatSchG zu führen.

Zwar sollen Ausgleichmaßnahmen nach Möglichkeit eng mit dem beeinträchtigten Raum verbunden sein, doch gilt in der AWZ die Besonderheit, dass Ersatzmaßnahmen auch außerhalb des

[120] (Landmann et al., 2022 BNatSchG, § 14 Rn. 6, 12f.); Auf die Errichtung und den Betrieb von Windenergieanlagen in der deutschen AWZ, die vor dem 1. Januar 2017 genehmigt worden sind, oder die auf Grundlage eines Zuschlags nach § 34 WindSeeG zugelassen werden, findet die Eingriffsregelung keine Anwendung, § 56 Abs. 3 BNatSchG.

[121] Vgl. hierzu § 15 Abs. 1 Nr. 1 BKompV.

[122] BT (2019), WD 8 – 3000 – 054/19, S. 10, m.w.N.

[123] Anlage 5 BKompV.

[124] (F.-J. Säcker et al., 2017 WindSeeG, § 48 Rn. 91 ff. Wolf, 2010); (Gellermann, in: Landmann et al., 2022, § 56 BNatSchG, Rn. 11.).

[125] (Wolf, 2010 (370)).

[126] (Proelß, in: Koch et al., 2024, § 7, Rn. 62.).

[127] §§ 16, 56a BNatSchG.

[128] § 56a Abs. 1 und 2 BNatSchG.

[129] BR-Drs. 168/17, S. 17.

[130] BT-Drs. 18/11939, 19.

[131] (Giesberts & Reinhardt, 2022§ 16 Rn. 2).

[132] § 56 Abs. 1; 56a BNatSchG; § 1 Abs. 2 BKompV i.V.m. SRÜ.

von dem Eingriff betroffenen Naturraums durchgeführt werden dürfen, sofern dadurch die jeweils beeinträchtigte Funktion des Schutzgutes im betroffenen Naturraum, also der AWZ, hergestellt wird.[133] Dies kann in der Praxis durch den Erwerb der entsprechenden Menge von Kompensationswerten bzw. Ökopunkten aus bevorrateten Kompensationsmaßnahmen anderer Naturräume erfüllt werden.

Durch die Kompensationsmaßnahmen erlaubt das Naturschutzrecht im Grundsatz also, dass der Eingriff durch Windenergie auf See durch die Wiederherstellung bzw. Aufwertung von Funktionen des Naturhaushaltes an einem anderen Ort ersetzt werden kann. Durch das Instrument des Ökokontos ist zudem eine zeitliche Entkopplung möglich.

Sind Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen nicht möglich, z.B. weil keine entsprechenden Ersatzmaßnahmen bevorratet sind und deshalb Ökopunkte eines anderen Naturraums die beeinträchtigte Funktion eines Schutzgutes in der AWZ nicht herstellen können, bleibt als letzte Möglichkeit die Ersatzzahlung. In diesem Zusammenhang ist auf die gesetzliche Vermutung hinzuweisen, wonach Beeinträchtigungen des Landschaftsbildes, die von mehr als 20 m hohen Mast-, Turm- oder sonstigen Hochbauten verursacht werden, i.d.R. nicht ausgleich- oder ersetzbar sind.[134] Gleichwohl ist stets zu prüfen, ob Maßnahmen der Realkompensation im Einzelfall in Betracht kommen, obwohl die Höhe der zu errichtenden Bauten 20 m überschreitet. Gegebenenfalls kommt eine Teilrealkompensation in Betracht.[135] Liegt ein solcher Ausnahmefall jedoch nicht vor, so fällt für die Windenergieanlage auf See eine Ersatzzahlung für die Beeinträchtigung des Landschaftsbildes an. Die Höhe des zu leistenden Geldersatzes richtet sich regelmäßig nach Dauer und Schwere des Eingriffs unter Berücksichtigung der Vorteile, die dem Verursacher aus dem Vorhaben erwachsen, § 15 Abs. 6 S. 3 BNatSchG.[136] Die Höhe der Ersatzzahlungen für Beeinträchtigungen des Landschaftsbildes wird in § 14 Abs. 2-3 BKompV näher konkretisiert. Dabei gilt die Besonderheit, dass Ersatzzahlungen zum Ausgleich von Beeinträchtigungen durch Windenergieanlagen auf See gesetzlich reduziert sind.[137] Die gesetzliche Vermutung und die reduzierten Ersatzzahlungen gelten nur für Beeinträchtigungen des Landschaftsbildes, nicht jedoch für den Ausgleich des Eingriffs in den Naturhaushalt (Boden, Wasser, Luft, Tiere, Pflanzen, Klima). Die Ersatzzahlungen sind als zweckgebundene Abgaben an den Bund zu leisten, § 56 Abs. 4 S. 1 BNatSchG.

3.3.3 Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen bei Mehrfachnutzung durch Windenergie auf See und Fischerei

In Bezug auf Windenergie auf See und Fischerei gilt zusätzlich eine naturschutzrechtliche Besonderheit. § 15 BKompV stellt besondere Maßgaben für das Ersatzmaßnahmenregime für Windenergieanlagen auf See (einschließlich der hierfür erforderlichen Nebeneinrichtungen wie beispielsweise Konverter) im Bereich der AWZ und des Festlandsockels auf. Gemäß § 15 Abs. 1 Nr. 1 S. 1 BKompV gelten die Schutzgüter Biotope und Boden einschließlich der darin vorkommenden Pflanzen und Tiere als auch der Schutzgüter Wasser und Luft als kompensiert, wenn eine Sicherheitszone nach dem WindSeeG eingerichtet ist, in der die Fischerei während der gesamten Betriebsdauer ausgeschlossen wird.

Derartige Sicherheitszonen werden durch das BSH um Einrichtungen in der AWZ errichtet, soweit dies zur Gewährleistung der Sicherheit der Schifffahrt oder der Einrichtungen notwendig

[133] § 9 Abs. 3 und 4, Anlage 5 BKompV.

[134] § 13 Abs. 2 S. 1 BKompV. Abweichend davon ist der Rückbau bestehender Mast- und Turmbauten im räumlichen Zusammenhang als Ausgleichs- und Ersatzmaßnahme anzuerkennen, § 13 Abs. 2 S. 2 BKompV.

[135] (BfN & BMU, 2021, S. 96).

[136] (Proelß, in: Koch et al., 2024, § 7, Rn. 65.).

[137] §§ 15 Abs. 1 Nr. 2, 3 BKompV.

ist, § 74 Abs. 1 WindSeeG. Der Legaldefinition in § 74 Abs. 2 WindSeeG zufolge handelt es sich um Wasserflächen, die sich in einem Abstand von bis zu 500 m, gemessen von jedem Punkt des äußeren Randes, um die Einrichtung erstrecken. Die Breite der Sicherheitszone darf 500 m überschreiten, wenn allgemeine anerkannte internationale Normen dies gestatten oder die zuständige internationale Organisation dies empfiehlt. Sicherheitszonen dienen neben der Sicherheit des Schiffsverkehrs insbesondere dem Schutz von Leib und Leben der auf den Einrichtungen beschäftigten Personen, des Eigentums an den Einrichtungen selbst und vor eventuellen Umweltgefahren im Falle einer Beschädigung.[138] Wenn das BSH es für sachgerecht erachtet, kann auch um einen ganzen OWP eine Sicherheitszone eingerichtet werden.[139]Die Rechtsfolgen der Einrichtung einer Sicherheitszone folgen nicht unmittelbar aus § 74 WindSeeG, sondern ergeben sich aus der Verordnung zu den internationalen Regeln von 1972 zur Verhütung von Zusammenstößen auf See[140] (SeeStrOV). § 7 Abs. 2 SeeStrOV formuliert ein generelles Befahrensverbot der Schifffahrt in den Sicherheitszonen.[141] Eine Ausnahme gilt lediglich für Fahrzeuge, die für die Versorgung der Anlagen oder Vorrichtungen eingesetzt sind, sowie für Fahrzeuge, deren Rumpflänge 24 m nicht übersteigt oder die vom Befahrensverbot befreit sind. Die Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS) legt die Bedingungen fest, nach denen die Kleinschifffahrt Sicherheitszonen befahren darf. Darüber hinaus erteilt sie im Einzelfall Befreiungen, wobei ihr Ermessen eingeräumt ist (vgl. § 7 Abs. 3 SeeStrOV).[142] In der Praxis wird im Zuge der Errichtung von Windenergieanlagen bzw. OWP in der AWZ eine Sicherheitszone eingerichtet, durch die die Fischerei in den OWP währen deren gesamter Betriebsdauer untersagt wird.[143]

Wird die Fischerei in der Sicherheitszone einer Windenergieanlage während der gesamten Betriebsdauer ausgeschlossen, wird durch die BKompV sowohl die Kompensation der Schutzgüter Biotope und Boden (einschließlich der darin vorkommenden Pflanzen und Tiere) als auch der Schutzgüter Wasser und Luft fingiert.[144] Es sind dann weder Realkompensationen noch Ersatzzahlungen hinsichtlich dieser Schutzgüter zu leisten.[145] Die Kompensation der betreffenden Schutzgüter erfolgt automatisch durch die Einrichtung der Sicherheitszone und den damit einhergehenden Ausschluss der Flächennutzung durch Fischerei. Die Kompensationswirkung gilt aber nur für die in § 15 Abs. 1 Nr. 1 S. 1 BKompV ausdrücklich genannten Schutzgüter und nicht als Kompensation des Eingriffs insgesamt. Es handelt sich bei den in § 15 Abs. 1 Nr. 1 BKompV genannten um die im Regelfall von dem Eingriff betroffenen relevanten Schutzgüter.[146] Damit bleibt der Sache nach als beeinträchtigtes Schutzgut noch das Landschaftsbild.[147] Können unvermeidbare Beeinträchtigungen des Landschaftsbildes durch Turm und Rotor nicht kompensiert werden, besteht die Möglichkeit der Zahlung eines Ersatzgeldes.

Die sog. passive Fischerei mit Reusen und Körben *außerhalb* des Bereichs der Sicherheitszone, in dem sich die Anlagen selbst befinden, beeinträchtigt nicht die Kompensationswirkung des Fischereiausschlusses, § 15 Abs. 1 Nr. 1 S. 3 BKompV. Dies betrifft die passive Fischerei im Bereich der äußeren Sicherheitszone, außerhalb des unmittelbaren Nahbereichs der äußeren Anlage

[138] (Uibeleisen/Groneberg, in: F. J. Säcker & Steffens, 2022, § 53 WindSeeG, Rn. 1.).

[139] (Uibeleisen/Groneberg, in: F. J. Säcker & Steffens, 2022, § 53 WindSeeG, Rn. 5.).

[140] Verordnung zu den Internationalen Regeln von 1972 zur Verhütung von Zusammenstößen auf See vom 13.6.1977 (BGBl. I S. 813), die zuletzt durch Verordnung vom 7.12.2021 (BGBl. I S. 5188) geändert worden ist.

[141] Die SeeStrOV ist noch nicht an die Neufassung des WindSeeG angepasst worden. Dort wird noch Bezug genommen auf § 53 WindSeeG a.F.

[142] (Uibeleisen/Groneberg, in: F. J. Säcker & Steffens, 2022, § 53 WindSeeG, Rn. 15.).

[143] BT-Drs. 19/17344, S. 171.

[144] § 15 Abs. 1 Nr. 1 S. 1 BKompV.

[145] BT-Drs. 19/17344, S. 171.

[146] Vgl. BT-Drs. 19/17344, S. 171-172.

[147] Für eine kritische Auseinandersetzung mit der Frage, ob in der AWZ eine erhebliche Beeinträchtigung des Landschaftsbildes vorliegen kann, s. (Wolf, 2010, S. 369 f.).

und des Bereichs, der von den äußeren Anlagen des Windparks umgrenzt wird.[148] Dahinter steht die Überlegung, dass auch Fischereifahrzeuge Windparks auf dem Weg zu ihren Fanggründen durchfahren können sollen.[149]

Auch der Flächenentwicklungsplan 2023 für die deutsche Nord- und Ostsee (FEP 2023) sieht in Nr. 6.1.2 a) das Einrichten von Sicherheitszonen um Windenergieanlagen auf See vor. In den Sicherheitszonen der Windparks soll die passive Fischerei mit Reusen und Körben möglich sein; dies gilt aber nicht für den Bereich, der von den äußeren Anlagen des Windparks umgrenzt wird, und nicht für den unmittelbaren Nahbereich der äußeren Anlagen (Nr. 6.1.6 g) FEP 2023). Außerdem steht diese Festsetzung unter dem Vorbehalt etwaig entgegenstehender fachrechtlicher Regelungen. Eine nahezu wortgleiche Regelung findet sich auch in Nr. 2.2.2 (4) der Anlage zu § 1 des Raumordnungsplans für die deutsche AWZ.

Ausgeschlossen in der Sicherheitszone sind alle fischereilichen Aktivitäten, die ein zeitweiliges Unterbrechen der Durchfahrt zwingend erfordern.[150] Auch jeglicher Einsatz aktiver Fischerei mit Schleppnetzen und anderen Fangmethoden beseitigt die Kompensationswirkung.[151] Dies hat zur Folge, dass sich ein Betreiber von Windenergieanlagen auf See bei der Mehrfachnutzung mit Fischerei innerhalb der Sicherheitszone nicht auf diese Gesetzesfiktion berufen könnte. Ihn träfen dann Kompensationspflichten hinsichtlich der Schutzgüter Biotop und Boden, die er nach den oben aufgeführten Maßstäben auszugleichen, zu ersetzen oder bei Unmöglichkeit derartiger Maßnahmen per Ersatzzahlung zu erfüllen hätte.[152]

Im Ergebnis kommt für Windenergie auf See die Eingriffskompensation durch Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen in Betracht. Es besteht auch die Möglichkeit einer Bevorratung derartiger Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen. Insoweit erlaubt es das Naturschutzrecht im Grundsatz, dass der durch Windenergie auf See verursachte Eingriff durch den Schutz oder die Wiederherstellung bzw. Aufwertung von Funktionen des Naturhaushaltes an einem anderen Ort ersetzt werden kann. Sofern dies nicht möglich ist, der unvermeidbare Eingriff aber nach der erforderlichen naturschutzrechtlichen Abwägung zugelassen wird, ist eine Ersatzzahlung zu leisten. Insbesondere eine Beeinträchtigung des Landschaftsbildes durch den Mast der Anlagen wird in aller Regel durch Ersatzzahlung zu kompensieren sein.

3.3.4 Naturschutzrechtliches Kompensationsregime im Kontext anderer Nutzungen als Windenergie auf See[153]

Im Projektverlauf wurde die Frage nach der Anwendbarkeit des naturschutzrechtlichen Kompensationsregimes auf andere Nutzungen als Windenergie auf See aufgeworfen. Darauf aufbauend wurde untersucht, wie sich Maßnahmen der Landes- und Bündnisverteidigung (z.B. militärische Übungen innerhalb eines Offshore-Windparks (OWP) und der hybriden Energieerzeugung (schwimmende PV-Anlagen, die mit Leinen im Meeresboden verankert werden) zu der Kompensationsregelung aus § 15 Abs. 1 Nr. 1 BKompV verhalten. Es sollte auch untersucht werden, inwieweit und nach welchem Rechtsregime diese Nutzungen zu kompensieren wären. Es hat sich

[148] (BSH, 2023b).

[149] (BSH, 2023b); Nach dem Vorentwurf für die Fortschreibung des FEP aus Sep. 2023 dürfen OWP und ihre Sicherheitszonen im Übrigen auch von Fahrzeugen der Bundeswehr entsprechend den Grundsätzen der guten Seemannschaft befahren werden, soweit Betrieb und Wartung der OWP nicht oder nur unerheblich beeinträchtigt werden (BSH, 2023e).

[150] BT-Drs. 19/17344, S. 172.

[151] In den Sicherheitszonen der deutschen AWZ ist der Einsatz von Grund-, Schlepp- und Treibnetzen oder ähnlichen Fischereigeräten ohnehin größtenteils untersagt, s. Deutscher Bundestag, WD 5 – 3000 – 082/18, Kurzinformation Befahren und Fischen in Offshore-Windparkgebieten, S. 2; (Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, 2014).

[152] Die Ersatzzahlung berechnet sich anhand der Maßgaben der BKompV und hängt von einer Vielzahl von Faktoren (ermittelte Wertstufen der betroffenen Schutzgüter) ab, sodass dies nicht pauschal pro Anlage oder Windpark beantwortet werden kann.

[153] Für eine vertiefte Auseinandersetzung mit dem naturschutzrechtlichen Kompensationsregime s. Abschnitt 3.3.

gezeigt, dass die Fiktion des § 15 Abs. 1 Nr. 1 BKompV nur bei Ausschluss der Fischerei gilt. Für andere Nutzungen bleibt es bei dem allgemeinen Regime der §§ 13 ff., 56 BNatSchG.

Wie bereits weiter oben dargestellt, löst grundsätzlich jede nicht vermeidbare erhebliche Beeinträchtigung des Meeresbodens das naturschutzrechtliche Kompensationsregime aus. Die Wirkung von Eingriffen auf den marinen Lebensraum wird nur dann betrachtet, wenn sie von einem Vorhaben ausgehen, das eine Veränderung der Gestalt oder Nutzung des Meeresbodens als Grundfläche darstellt. Daran fehlt es bei Beeinträchtigungen, die nur die Meeresoberfläche, die Wassersäule oder den Untergrund betreffen, wie etwa Schadstoff- und Lärmemissionen, die von Schiffen ausgehen, sowie jegliche Art von Fischfang ohne Grundberührung[154]. Dies gilt ebenso für den Flugverkehr und die militärische Nutzung ohne Grundflächenbezug.[155]

Demgegenüber stellen sowohl den Meeresboden beschädigender Fischfang (beispielsweise Grundschleppnetzfischfang) wie auch die Errichtung hybrider Energieerzeugungsanlagen wie Floating-PV-Anlagen, die mit Leinen im Meeresboden verankert werden, wegen der mit ihnen einhergehenden erheblichen Beeinträchtigung des Meeresbodens grundsätzlich kompensationspflichtige Eingriffe in Natur und Landschaft dar.[156] Dies gilt tatbestandlich auch bei einem möglichen Forschungshintergrund der Fischerei.

Die konkrete Ausgestaltung der Kompensation richtet sich nach den allgemeinen Regelungen des BNatSchG sowie der für die Bundesverwaltung geltenden BKompV, die indes keine speziellen Regelungen für derartige Nutzungen enthält. Die ausdrücklich für Windenergieanlagen auf See in § 15 BKompV geregelte Kompensationsmaßnahme der Einrichtung einer nutzungsfreien Zone im Bereich des Sicherheitsabstandes bezieht sich nicht auf sonstige Meeresnutzungen in der AWZ. Stattdessen gilt das – durch die BKompV leicht modifizierte – Regime der §§ 13 ff., 56 BNatSchG.[157] Wie bereits erläutert, können Ersatzmaßnahmen bei Eingriffen im Bereich der ausschließlichen Wirtschaftszone und des Festlandsockels auch außerhalb des betroffenen Naturraums durchgeführt werden, sofern dadurch die jeweils erheblich beeinträchtigte Funktion des Schutzguts im betroffenen Naturraum hergestellt wird.[158] In den Anlagen zur BKompV sind mögliche Kompensationsmaßnahmen beispielhaft vorgegeben.[159]

Sind Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen zur Kompensation der unvermeidbaren Beeinträchtigung von Natur und Landschaft nicht möglich, dann ist die Abwägung nach § 15 Abs. 5 BNatSchG vorzunehmen.[160] Wird danach der Eingriff zugelassen, so ist Geldersatz nach § 15 Abs. 6 BNatSchG sowie §§ 13, 14 BKompV zu leisten.

3.3.5 Exkurs: Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie im Kontext naturschutzrechtlicher Vorgaben

Im fortgeschrittenen Projektverlauf wurde im Anschluss an die Betrachtung der naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung die Frage aufgeworfen, welche Rolle hierbei die **europäische**

[154] (Kment et al., 2019, § 7, Rn. 54. m.w.N.) Derartiger Fischfang ist keine Bodennutzung im Sinne der Eingriffsregelung und stellt dementsprechend keinen dieser unterfallenden Eingriff dar. Deshalb kommt es insoweit auch nicht auf die Bereichsausnahme zugunsten der land-, forst- und fischereiwirtschaftlichen Bodennutzung, soweit sie der guten fachlichen Praxis entspricht, § 14 Abs. 2 BNatSchG, an.

[155] (Proelß, in: Koch et al., 2024, § 7, Rn. 61.).

[156] Die Grundschleppnetzfischerei unterfällt nicht der Bereichsausnahme zugunsten der land-, forst- und fischereiwirtschaftlichen Bodennutzung, soweit sie der guten fachlichen Praxis entspricht, § 14 Abs. 2 BNatSchG . Denn der Bodenbezug der Grundschleppnetzfischerei stellt keine Nutzung des Bodens im Sinne eines Hegens der Potenziale der Urproduktion dar, vgl. (Wolf, 2010, S. 365 (369)) sowie (Proelß, in: Koch et al., 2024, § 7, Rn. 73.). Sie unterfällt deswegen der Eingriffsregelung.

[157] Dazu bereits oben (Abschnitt 3.3 ff.).

[158] Vgl. Anlage 5 zur BKompV.

[159] Welche Maßnahme konkret in Betracht kommt, bedarf einer spezifischen Prüfung des Einzelfalls.

[160] Zu den Einzelheiten siehe bereits oben (Abschnitt 3.3.1).

Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL – 2008/56/EU)[161] spielt. Insbesondere sollte untersucht werden, ob die MSRL **spezifische Vorgaben** für die Berücksichtigung der im Projektkontext herausgearbeiteten **Stressoren auf die Meeresumwelt** in der AWZ (Biotope am Meeresboden, Fische, Säugetiere, sowie See- und Küstenvögel) festlegt.

Die MSRL verpflichtet die EU-Mitgliedstaaten dazu, auf nationaler Ebene Maßnahmen zu ergreifen, um bis 2020 einen guten Zustand der Meeresumwelt zu erreichen und aufrechtzuerhalten. Sie schafft einen Ordnungsrahmen (vgl. Art. 1 Abs. 1 MSRL), gibt jedoch keine konkreten Maßnahmen vor. Sie formuliert weder konkrete Umweltschutzstandards noch enthält sie Anforderungen an einzelne Vorhaben oder Nutzungen.[162] Allerdings sieht Art. 9 der MRSL vor, dass die Mitgliedstaaten die in Anhang III festgelegten Belastungen und Auswirkungen bei der Bewertung des Meeresumweltzustandes zu berücksichtigen haben. In Anhang III werden Merkmale, Belastungen und Auswirkungen indikativ gelistet, so finden sich u.a. auch die im Rahmen des Projekts betrachteten Schutzgüter wie die Biotoptypen sowie physische Schädigungen und sonstige physikalische Störungen als Stressoren. Art. 13 MSRL enthält Vorgaben zu den von den Mitgliedstaaten zu erarbeitenden Maßnahmenprogrammen. Sie sollen unter anderem räumliche Schutzmaßnahmen enthalten, die zu kohärenten und repräsentativen Netzwerken geschützter Meeresgebiete beitragen, welche die Vielfalt der einzelnen Ökosysteme angemessen abdecken (Art. 13 Abs. 4 MSRL).

Im nationalen Recht halten die §§ 56-58 BNatSchG Kompetenz- und Verfahrensregelungen für die Unterschutzstellung von Meeresgebieten bereit, um einen möglichst weitgehenden, wirksamen Gebietsschutz für die Nord- und Ostsee zu erzielen. § 57 Abs. 2 BNatSchG ermächtigt das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, hierfür ausgewählte Meeresgebiete zu geschützten Teilen von Natur und Landschaft im Sinne des § 20 Abs. 2 BNatSchG zu erklären. Der Verweis auf § 20 Abs. 2 BNatSchG verdeutlicht, dass der Gesetzgeber keine eigenständige Gebietskategorie der Meeresschutzgebiete einführen wollte: im nationalen Recht wurde durch die Vorgaben der MSRL keine weitere Gebietskategorie geschaffen.[163] Maßgeblich sind vielmehr die in § 20 Abs. 2 BNatSchG genannten Schutzgebietskategorien. Die Erklärung von Gebieten zu geschützten Teilen von Natur und Landschaft kann auch dazu dienen, zusammenhängende und repräsentative geschützter Meeresgebiete im Sinne von Art. 13 Abs. 4 MSRL aufzubauen (§ 56 Abs. 2 BNatSchG).[164] Auf diese Weise dient die Unterschutzstellung auch der Umsetzung der Vorgaben der MSRL.

Die Unterschutzstellung eines Meeresgebietes muss zugleich bestimmten Vorgaben des Seevölkerrechts und des Europarechts entsprechen, die in § 57 Abs. 3 BNatSchG näher beschrieben sind. So sind Beschränkungen des Flugverkehrs, der Schifffahrt und der nach internationalem Recht erlaubten militärischen Nutzung sowie von bestimmten Vorhaben der wissenschaftlichen Meeresforschung *grundsätzlich unzulässig*, § 57 Abs. 3 Nr. 1 BNatSchG. Mit der Regelung soll insbesondere den in Art. 58 Abs. 1 SRÜ i.V.m. Art. 87 SRÜ festgelegten Freiheiten der Meere Rechnung getragen werden.[165] Hinsichtlich der Fischerei gelten EU-Recht und das Seefischereigesetz (§ 57 Abs. 3 Nr. 3 BNatSchG), wobei zwischen berufsmäßiger Seefischerei und Freizeitfischerei unterschieden wird.[166] Jedenfalls für letztere darf auch der Küstenstaat im Interesse des Meeresschutzes Verbote erlassen, für eine grundsätzliche Beschränkung der Fischerei mangelt es nach der in der Praxis überwiegenden Auffassung vor dem Hintergrund von Art. 3 Abs. 1 lit. a AEUV

[161] 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).

[162] (Durner, 2022).

[163] (Lüttgau in: Giesberts & Reinhardt, 2018, BNatschG § 57, Rn.7.).

[164] BT-Drs. 17/6055, S. 23.

[165] (Lüttgau in: Giesberts & Reinhardt, 2018, BNatschG § 57, Rn.13.).

[166] (Salomon/Schumacher, 2018, S. 84 (90)).

den Mitgliedstaaten jedoch an der erforderlichen Kompetenz.[167] Insoweit liegt nach dieser Auffassung die Zuständigkeit zum Erlass naturschutzbezogener Regelungen, die sich beschränkend auf die Fischerei auswirken, bei der Europäischen Union.[168]

Die Unterschutzstellung darf auch die erneuerbare Energieerzeugung nicht unnötig beschränken. So bestimmt § 57 Abs. 3 Nr. 5 BNatSchG, dass Beschränkungen von Vorhaben der Energieerzeugung aus Wasser, Strömung und Wind nur nach § 34 BNatSchG zulässig sind.[169] Im Rahmen der Unterschutzstellung können in der Schutzverordnung die zur ordnungsgemäßen Umsetzung des europäischen Mindestschutzes erforderlichen Regelungen (vgl. § 32 Abs. 3 S. 3 BNatSchG), aber keine weitergehenden Schutzvorschriften (vgl. § 32 Abs. 3 S. 4 BNatSchG) erlassen werden. Zudem darf kein generelles Verbot der erneuerbaren Energieerzeugung für das Gebiet ausgesprochen werden.[170] Die Erzeugung erneuerbarer Energie darf vielmehr nur nach Maßgabe der projektbezogenen Bestimmung des § 34 BNatSchG beschränkt werden. Mit der Regelung des § 57 Abs. 3 Nr. 5 BNatSchG soll sichergestellt werden, dass vor der Erteilung einer Zulassungsentscheidung eine Verträglichkeitsprüfung durchgeführt wird.[171]

Die Sicherung geschützter Natura-2000-Gebiete vor Beeinträchtigungen durch Vorhaben der Energieerzeugung vollzieht sich also in den Verfahren, in denen über die Zulassung der Vorhaben (sog. Projekte) entschieden wird.[172] Zu den Projekten in diesem Sinne zählt auch die Zulassung von Windenergieanlagen auf See. Eine Beschränkung aus naturschutzrechtlichen Gründen kommt nur in Betracht, wenn ein Projekt zur Erzeugung erneuerbarer Energien zu erheblichen Beeinträchtigungen der Erhaltungsziele von europäisch geschützten Arten und Lebensräumen führen kann. Gleiches gilt, wenn durch das Projekt der MSRL dienende Schutzzwecke erheblich beeinträchtigt werden können. Derartige Projekte, die zu erheblichen Beeinträchtigungen eines Natura-2000-Gebiets in seinen für die Erhaltungsziele oder den Schutzzweck maßgeblichen Bestandteilen führen können, sind grundsätzlich verboten (§ 33 Abs. 1 BNatSchG). Nur unter den Voraussetzungen des § 34 Abs. 3-5 BNatSchG können Ausnahmen von diesem Verbot zugelassen werden.[173] Mithilfe der Verträglichkeitsprüfung wird also festgestellt, ob ein Projekt mit den Erhaltungszielen eines Natura-2000-Gebietes vereinbar ist oder nicht. Von dem Ergebnis dieser Prüfung hängt die Zulässigkeit des Projekts ab.

Die Verträglichkeitsprüfung nach §§ 33 ff. BNatSchG spielt im Kontext von Schutzgebieten, die zugleich Natura-2000-Gebiete sind, also eine herausragende Rolle. Dabei dient dieser spezifische Gebietsschutz gleichzeitig der Umsetzung der MSRL. Ist ein Vorhaben nach den Anforderungen von Natura-2000 rechtmäßig, d.h. liegt keine wesentliche Beeinträchtigung der Schutzgüter vor, so gilt dies i.d.R. auch für die Anforderungen der MSRL.[174] Die MSRL bietet der Meeresumwelt zwar besonderen gebietsspezifischen Schutz, geht aber nicht über die in § 34 BNatSchG verankerten Einschränkungsmöglichkeiten des BNatSchG hinaus.

Wie bereits erwähnt, ergibt sich aus § 57 Abs. 3 Nr. 3 BNatSchG, dass § 34 BNatSchG in Bezug auf die Energieerzeugung die möglichen Einschränkungen abschließend normiert. § 34 BNatSchG normiert also den Mindestschutz für die Meeresumwelt, der bei der Unterschutzstellung und der Gestattung von Vorhaben zu berücksichtigen ist. Daraus folgt zugleich, dass die

[167] (Lüttgau in: Giesberts & Reinhardt, 2018, BNatschG § 57, Rn.18.).

[168] Anders die überwiegende Auffassung in der Literatur, vgl. (Salomon/Schumacher, 2018, S. 84 (91); (Landmann et al., 2022, § 56 BNatSchG, Rn. 16 m.w.N.).

[169] (Gellermann in: Landmann et al., 2022, BNatSchG § 57 Rn. 20.).

[170] Lütkes, in: Lütkes/Ewer, § 57 BNatSchG Rn. 46.

[171] (Salomon/Schumacher, 2018, S. 84 (93))Salomon/Schumacher ZUR 2018, 84 (93).

[172] Vgl. (Gellermann, in: Giesberts & Reinhardt, 2022 § 57, Rn. 19; Landmann et al., 2022, § 57 BNatSchG, Rn. 19).

[173] Zur Verträglichkeitsprüfung nach §§ 34 ff. BNatSchG eingehend bereits oben (Abschnitt 3.2.2.5).

[174] (Mohr, 2020).

Unterschutzstellung nach §§ 56 ff. BNatSchG insoweit unabhängig von der dem nationalen Recht entspringenden, naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung erfolgt.

3.3.6 Zwischenergebnis

Der vertiefte Blick auf die naturschutzrechtlichen Kompensationsregeln verdeutlicht die nationale Bedeutung der Meeresumwelt im Kontext der Mehrfachnutzung. Jede erhebliche Beeinträchtigung mit Bezug zum Meeresboden löst die Eingriffsfolgenkaskade des BNatSchG (i.V.m der BKompV) in der AWZ aus. Der Flugverkehr, die militärische Nutzung sowie auch die Schifffahrt sind dementsprechend mangels Grundflächenbezug tatbestandlich nicht von der Eingriffsregelung umfasst, die Errichtung von Windenergieanlagen sowie (perspektivisch) auch von Floating-PV-Anlagen oder Wellenkraftwerken in der AWZ hingegen schon.

Die MSRL wirkt sich auf das naturschutzrechtliche Eingriffsregime nach nationalem Recht nicht aus. Sie bietet mangels konkret gefassten Umweltschutzstandards oder besonderen Anforderungen an einzelne Vorhaben auch keine über die bereits in §§ 34 ff. BNatSchG verankerte Verträglichkeitsprüfung hinausgehenden Vorgaben zum Schutz der Meeresumwelt in der AWZ.
§ 34 Abs. 3 BNatSchG lässt unter bestimmten Voraussetzungen sowie bei Vorliegen von zwingenden Gründen des überwiegenden öffentlichen Interesses (vgl. § 5 Abs. 3 S. 2 Nr. 5, S. 3, Abs. 6 WindSeeG) jedoch auch erhebliche Beeinträchtigungen von Meeresschutzgebieten bei der Errichtung von EE-Anlagen zu, wenn die Ausbauziele des WindSeeG ohne diese Gebiete oder Flächen nicht erreicht werden können.

3.4 Ergebnis und Bewertung

Das Konzept der Mehrfachnutzung ist kein ausdrücklich geregeltes Rechtsinstitut bei der Planung und Zulassung von Windenergie auf See. Trotzdem erlaubt der umsichtige Einsatz der verfügbaren Planungsinstrumente des ROG und WindSeeG Mehrfachnutzung in der AWZ. Im Folgenden sollen die wesentlichen, kumulierten Ergebnisse aufgezeigt werden und eine knappe Einordnung erfolgen und, soweit möglich, Optionen zur Förderung von Potentialen und Beseitigung von Hürden aufgezeigt werden.

Ergebnisse der rechtlichen Bestandsaufnahme auf Raumordnungsebene

- Es existiert keine ausdrückliche gesetzliche Regelung zu Mehrfachnutzungen im ROG. Die Entscheidungsträger haben daher keinen verpflichtenden Anreiz, Mehrfachnutzungen zu berücksichtigen und zu planen.
- Im ROP erfolgt die Weichenstellung für erfolgreiche Mehrfachnutzung durch die Festlegung überschneidender Vorrang- und Vorbehaltsgebiete und durch textliche Festlegungen. Ansätze hierzu sind im ROP 2021 schon erkennbar.
- Die Festlegung überschneidender Vorrang- und Vorbehaltsgebiete ist unter unterschiedlichen Voraussetzungen zulässig und hat unterschiedliche Rechtsfolgen:
    - Überschneidende Vorbehaltsgebiete und die textliche Festlegung von Mehrfachnutzung bewirken, dass diese in nachfolgenden Behördenentscheidungen zwingend als Abwägungsbelang zu berücksichtigen sind.
    - Bei der Festlegung überschneidender Vorranggebiete werden die Standorte beider Nutzungen gesichert und müssen miteinander vereinbar sein. Dies ist insbesondere der Fall, wenn sie neutral zueinanderstehen.

- Bei der Festlegung von sich überschneidenden Vorrang- und Vorbehaltsgebieten wird der Standort der vorrangigen Nutzung gesichert, während die Nutzung des Vorbehaltsgebiets als Abwägungsbelang in nachfolgende Behördenentscheidungen eingestellt werden muss.

- Textliche Festlegungen können als Grundsätze der Raumordnung für nachfolgende Behördenentscheidungen zu berücksichtigende Rahmenbedingungen vorgeben, innerhalb derer konkrete Mehrfachnutzungen erfolgen sollen.

Die erforderliche Weichenstellung für eine rechtssichere Planung von Mehrfachnutzungen in der AWZ erfolgt auf Ebene der Raumordnungsplanung. Der Plangeber kann durch überschneidende Gebietsfestlegungen vorgeben, in welchem Verhältnis Nutzungen zueinanderstehen sollen, unter welchen Bedingungen Mehrfachnutzungen erfolgen sollen und an welchen Standorten die Mehrfachnutzungen verwirklicht werden sollen. Diese Festlegungen können je nach Willen des Plangebers und individuellen Eigenheiten der Mehrfachnutzungsvorhaben mit den unterschiedlichen Rechtsfolgen der Vorbehalts- und Vorranggebiete bzw. der Grundsätze und Ziele der Raumordnung ausgestattet werden. Dies ermöglicht für die AWZ eine übergeordnete Steuerung des Standorts sowie der Art und Weise der Mehrfachnutzung, die in nachfolgende Behördenentscheidungen wirkt.

Das Festlegen von überschneidenden *Vorbehaltsgebieten* ist in diesem Zusammenhang die flexibelste Steuerung, da sie als Grundsätze der Raumordnung wie Abwägungsdirektiven wirken. So wird den nachfolgenden Behördenentscheidungen der entsprechende Anreiz gegeben, die Bedingungen für Mehrfachnutzungen im Wege der Abwägung zu schaffen. Im Fall einander überschneidender *Vorrang- und Vorbehaltsgebiete* kann der Plangeber vorgeben, welche Nutzung im Zweifel Vorrang haben soll. Der Standort der vorrangigen Nutzung kann so hinreichend gesichert und die vorbehaltene Nutzung als Abwägungsbelang berücksichtigt werden. Da überschneidende Vorranggebiete dagegen nur zulässig sind, wenn die Nutzungen der jeweiligen Gebiete neutral zueinanderstehen, d.h. beide Nutzungen müssen sich nebeneinander realisieren lassen, ist der Anwendungsbereich für Windenergie eng. Ein vollkommen neutrales und beeinträchtigungsloses Nebeneinander von Windenergie mit einer anderen maritimen Nutzung wäre Voraussetzung. Dies wäre im Einzelfall von der anderen maritimen Nutzung abhängig.

Von diesen Möglichkeiten macht der ROP der AWZ für Mehrfachnutzung mit Windenergie bisher auch im Ansatz Gebrauch. Anders als bei anderen maritimen Nutzungen der AWZ liegt der Großteil der Gebiete für Windenergie auf Flächen des ROP ohne andere überschneidende Nutzungen. Mehrfachnutzung wurde allerdings beispielsweise festgelegt, indem die Windenergiegebiete EN20 und EO2 mit den Vorbehaltsgebieten Forschung FoN3 und FoO3 überschneidend ausgewiesen und als Grundsatz festgelegt wurden.[175] Daneben gibt es weitere Überschneidungen. Beispielsweise die Überschneidung des Vogelzugkorridors Rügen-Schonen, der als Grundsatz der Raumordnung zu berücksichtigen ist und das Vorranggebiet Wind EO3 und EO2 sowie ein kleiner Teil des Vorranggebiets EO1. Als Abwägungsdirektive wird für diese Gebiete festgelegt, dass der Betrieb, Bau und Wartungsarbeiten von Windenergieanlagen in Zeiten des Vogelzugs unter bestimmten Voraussetzungen nicht stattfinden und damit zurücktreten soll.[176] Die Möglichkeit, bereits im ROP konkrete Vorgaben für Mehrfachnutzung zu machen, wird im Zusammenhang mit Gebieten der Windenergie nur wenig genutzt, obwohl die rechtlichen Möglichkeiten grundsätzlich bestehen. Da die Erfordernisse der Raumordnung von nachfolgenden Behördenentscheidungen zu berücksichtigen sind, stehen die Behörden vor rechtlichen Hürden, wenn sie Nutzungen, die nicht auf dieser Fläche durch den ROP zugewiesen sind, auf solchen Flächen

[175] (BSH, 2021c, Nr. 2.2.2. Abs. 3).

[176] (BSH, 2021c, S. 18).

zulassen wollen. Daher sind für eine rechtssichere Planung von Mehrfachnutzung die überschneidenden Gebietsausweisungen und textlichen Festlegungen im ROP der AWZ zentral. Dies auch vor dem Hintergrund, dass Risiken vermieden werden sollten, die dazu führen könnten, dass Vorhaben im Rahmen von Mehrfachnutzung wegen Unvereinbarkeit mit den Erfordernissen der Raumordnung nicht verwirklicht werden könnten.

Eine denkbare Option, einen gesetzlichen Anreiz für Mehrfachnutzung in der AWZ auf raumordnungsrechtlicher Ebene zu setzen, wäre eine **Verankerung in den gesetzlichen Grundsätzen der Raumordnung, § 2 ROG**. Dann müsste etwa der Belang, Mehrfachnutzungsoptionen in der AWZ für den sparsamen Flächenumgang zu fördern, als Abwägungsbelang immer und unabhängig von Festsetzungen im ROP in die Planungs- und Genehmigungsentscheidungen der nachfolgenden Behördenentscheidungen eingestellt werden. Vorteilhaft wäre an dieser Option, dass Behörden sich aktiv mit Mehrfachnutzungen auseinandersetzen müssten und diese als gesetzlich intendierten Belang fördern müssten.

Ergebnisse der rechtlichen Bestandsaufnahme auf Fachplanungsebene

- Den Festlegungen im FEP kommt eine Schlüsselfunktion bei der Ermöglichung von Mehrfachnutzung zu, da nur in den dort festgelegten Flächen Windenergieanlagen errichtet werden. Bei diesen Festlegungen werden die Standortentscheidungen des ROP weiterentwickelt, da die Erfordernisse der Raumordnung zu beachten sind.
- Trotzdem ist in den raumordnungsrechtlichen Grenzen möglich, Festlegungen im FEP für Windenergie außerhalb der Vorbehalts-/Vorranggebiete Windenergie und in Gebieten anderer Nutzungen des ROP zu treffen. Das bedeutet, dass der ROP nicht zwingend geändert werden muss, um weitere Flächen für die Mehrfachnutzung mit Windenergie zu mobilisieren. Ob ein solches Vorgehen konkrete Mehrfachnutzungspotentiale mit Windenergie schaffen könnte, wäre jedoch jeweils abhängig vom Einzelfall.
- Die unzulässigen Festlegungen im FEP nach § 5 Abs. 3 WindSeeG (und § 69 Abs. 3 WindSeeG, sowie § 5 Abs. 3 SeeAnlG) sind „Tabukriterien“, die Mehrfachnutzungsoptionen abwägungsfest beschränken. So kann z.B. eine Mehrfachnutzung zwischen Windenergie auf See und der Landes- und Bündnisverteidigung nur erfolgen, wenn letztere nicht beeinträchtigt wird.
- Falls die Ausbauziele nicht erreicht werden können, eröffnet die Neuregelung des § 5 Abs. 3 Nr. 5 WindSeeG Möglichkeiten für Mehrfachnutzungen mit Meeresschutzgebieten.

Da die Festlegungen des FEP die Erfordernisse der Raumordnung zu beachten haben, bieten sich vor allem die Standorte der ROP-Gebiete für eine rechtssichere Ausweisung von Standorten im FEP an. Die wesentlichen Potentiale für Mehrfachnutzung werden daher auf Raumordnungsebene erzeugt. Die Festlegungen für Windenergie bewegen sich folglich im aktuell gültigen FEP wie auch im FEP-Entwurf fast ausschließlich auf den für sie vorgesehenen Vorrang- und Vorbehaltsflächen des ROP. Dies unterstreicht die praktische Bedeutung der Festlegungen im ROP für die künftige Standortverwirklichung und damit die Rolle für Mehrfachnutzungen. Zwar kann im FEP von den Festlegungen des ROP in gewissen Grenzen auch abgewichen werden. Dies bedeutet jedoch einen vermeidbaren Mehraufwand, der bei einer Planung auf Raumordnungsebene vermieden werden kann. Ob Windenergie abseits der im ROP festgelegten Flächen zulässigerweise geplant werden kann, richtet sich stets nach dem Einzelfall der dort festgelegten Erfordernisse der Raumordnung. Die Hürden sind bei Vorbehaltsgebieten geringer, da sie lediglich die Wirkung von Abwägungsdirektiven haben. Da Windenergie eine intensive Nutzung von Flächen darstellt, bei der in der Regel auch von intensiven Wechselwirkungen auf andere Nutzungen

auszugehen ist, sind die Erfolgsaussichten solchen Vorgehens zur Erschließung weiterer Standorte im Rahmen von Mehrfachnutzung zurückhaltend zu bewerten. Dies erfordert jedenfalls stets eine genaue Prüfung des Einzelfalls und kann nicht pauschal beantwortet werden. Bei Abweichungen von festgelegten Vorranggebieten wird ein Zielabweichungsverfahren erforderlich sein.

Darüber hinaus setzt das Gesetz in § 5 Abs. 3 WindSeeG eine normative Grenze der Mehrfachnutzung von Windenergie und der dort geschützten Belange. Folglich könnte eine Abschwächung dieser Belange die Hürden für Mehrfachnutzungen abbauen. Bei einer Abschwächung müssen die rechtlichen Grenzen der dort geschützten Belange beachtet werden, wie beispielsweise die Verpflichtungen des SRÜ hinsichtlich der Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt oder auch die europa- und völkerrechtlichen Vorgaben hinsichtlich des Meeresnaturschutzes. Bei der Neuregelung des § 5 Abs. 3 Nr. 5 WindSeeG hinsichtlich der Meeresschutzgebiete könnte man den neuen § 5 Abs. 6 WindSeeG überdenken, der die Zulässigkeit auf den Fall beschränkt, dass andernfalls die Ausbauziele nicht erreicht würden. § 5 Abs. 6 WindSeeG schafft so eine hohe rechtliche Hürde für Mehrfachnutzungen von Windenergie mit Meeresschutzgebieten.

Zuletzt stellt diese Studie fest, dass zumindest innerhalb von Sicherheitszonen kein gesetzlicher Anreiz für eine Mehrfachnutzung von Fischerei und Windenergie besteht. Sollte aktive Fischerei innerhalb der Sicherheitszone zugelassen werden, kann sich der Vorhabenträger nicht mehr auf die Fiktion der naturschutzrechtlich erforderlichen Kompensation bestimmter Schutzgüter berufen. Einer Änderung dieser Vorgaben, die eine Erlaubnis der Fischerei in der Sicherheitszone zum Ergebnis hätte, stehen Sicherheitsbedenken entgegen.[177] Sicherheitszonen dürfen grundsätzlich nicht befahren werden.[178] Dies vor dem Hintergrund, Kollisionsrisiken zu minimieren und Gefahren von den am Meeresgrund liegenden Verkabelungen durch Ankersetzen oder Reusen und Körbe zu vermeiden.[179] Zwar können Ausnahmegenehmigungen erwirkt werden,[180] doch gilt dies regelmäßig nur für eine direkte Durchfahrt, also ohne das Anhalten des Schiffs. Ein „Anhalten“ wird bei der Fischerei, aber auch anderen Nutzungen regelmäßig erforderlich sein. Im Rahmen dieser Feststellungen hat Mehrfachnutzung von aktiver Fischerei mit Windenergie innerhalb der Sicherheitszonen aus Gründen ebenjener Sicherheit wenig Potential.

[177] Zur Sicherheit maritimer kritischer Infrastruktur s. auch Abschnitt 6.4.1.

[178] § 7 Abs. 2 SeeStrOV (Verordnung zu den Internationalen Regeln von 1972 zur Verhütung von Zusammenstößen auf See vom 13. Juni 1977 (BGBl. I S. 813), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 7. Dezember 2021 (BGBl. I S. 5188) geändert worden ist).

[179] BT-Drs. 19/17344, S. 172; eine Ausnahme hierzu besteht, wie oben dargestellt, für passive Fischerei mit Reusen und Körben außerhalb des Bereichs der Sicherheitszone, in dem sich die Anlagen selbst befinden.

[180] § 7 Abs. 2 und 3 SeeStrOV.

4 Überblick Meeresumwelt

Die meisten Meeresökosysteme sind auf allen räumlichen Skalen bis zu einem gewissen Grad durch menschliche Aktivitäten verändert worden, die von Verschmutzung und Fischerei bis hin zum Klimawandel reichen (Butt et al., 2022; Halpern et al., 2008, 2019). Jede Umsetzung eines OWPs geht mit Auswirkungen auf die Meeresumwelt in den Phasen der Voruntersuchung, des Baus, Betriebs und Rückbaus einher.

Ziel dieses Kapitels ist es,

- einen Überblick über die unterschiedlichen anthropogenen Wirkfaktoren auf die vier Schutzgüter Biotope am Meeresboden, Fische, marine Säugetiere, sowie See- und Rastvögel in der deutschen AWZ zu geben (unabhängig von OWE; Abschnitt 4.1),
- die zusätzlichen spezifischen Wirkfaktoren, die durch die Installation von OWE auf die verschiedenen Schutzgüter in der deutschen AWZ einwirken, aufzulisten (Abschnitt 4.2),
- einen Überblick über den technischen Stand zu ggf. möglichen technischen Optionen zur Minderung negativer Umweltauswirkungen durch OWE auf die Meeresumwelt zu geben (Abschnitt 4.3), und
- eine Definition kumulativer Effekten anthropogener Eingriffe im gesamten Offshore-Bereich auf die Meeresumwelt zu geben (Abschnitt 4.4).

Dieses Kapitel dient als Orientierung, um einen Überblick über die generellen, menschlichen Aktivitäten in der deutschen AWZ und über die spezifischen Auswirkungen durch OWE zu geben. Es wird Grundlagenwissen zusammengefasst, jedoch findet keine abschließende Bewertung statt. Vielmehr soll dieses Kapitel als Basis dienen, um kumulative Effekte durch beispielhafte Mehrfachnutzungsformen in den Abschnitten 6.5, 7.4 und 8.5 zu betrachten und Auswirkungen auf die Meeresumwelt verglichen mit keiner Nutzungsform bzw. einer Einfachnutzung zu vergleichen.

4.1 Überblick über anthropogene Wirkfaktoren (außer OWE) auf die Schutzgüter in der deutschen AWZ

In den Schutzgebieten der deutschen Nord- und Ostsee werden gemäß FFH-Richtlinie die Schutzgüter Biotope am Meeresboden, Fische, marine Säugetiere, sowie See- und Rastvögel geschützt (Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen (FFH-RL), 1992). Diesen Schutzgütern wird entsprechend für die deutsche AWZ die höchste Relevanz beigemessen. Fledermäuse, für die der Ausbau von Offshore-Windenergie ebenfalls Auswirkungen haben könnte (Arnett & Baerwald, 2013), die jedoch in den Standard-Untersuchungen der Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf die deutsche Meeresumwelt (StUK 4) nicht erfasst werden, werden im Folgenden ebenfalls nicht behandelt.

Auch unabhängig von dem Ausbau der OWE werden diese Schutzgüter durch unterschiedliche anthropogene Eingriffe beeinträchtigt. In Tabelle 7 und im folgenden Text werden diese Wirkfaktoren für die vier Schutzgüter aufgeführt und ihr Einfluss näher betrachtet.

Tabelle 7: Anthropogene Eingriffe auf alle Schutzgüter, die gemäß FFH-Richtlinie in den Schutzgebieten der deutschen Nord- und Ostsee geschützt werden.

Schutzgut	Kategorie	Anthropogener Wirkfaktor	Quelle
Biotope am Meeresboden	Lebensraumveränderung	Klimawandel	Vuorinen et al. (2015), Weinert et al. (2021)
	Lebensraumveränderung	Sand- und Kiesgewinnung	Kortekaas et al. (2010), Krause et al. (2010), Uścinowicz et al. (2014)
	Lebensraumveränderung	Eintrag invasiver Arten	Büttger et al. (2008), Jensen et al. (2023)
	Fischerei	Verlust von Meeresboden-Lebensräumen	de Groot (1984)
	Fischerei	Störung/Beschädigung der benthischen Fauna	de Groot (1984)
	Fischerei	Trübung des Wassers	de Groot (1984)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Teilchenbewegung („particle motion“)	Popper & Hawkins (2018)
	Chemische Emissionen und Mülleintrag	Eintrag von Abwasser, Düngemittel, Müll und schädlichen Substanzen	D’Alessandro et al. (2018)
Fische	Lebensraumveränderung	Klimawandel	Pörtner & Peck (2010)
	Lebensraumveränderung	Eingeschränkter Zugang zu ihren Wanderwegen und Laichablageplätzen	Freyhof & Kottelat (2008)
	Lebensraumveränderung	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Chapman et al. (2021), Jensen et al. (2023)
	Fischerei	Entnahme von Individuen	Edebohls et al. (2020)
	Fischerei	Verringerte Nahrungsverfügbarkeit	Edebohls et al. (2020)
	Fischerei	Beifang	Pons et al. (2022), Senko et al. (2022)

Schutzgut	Kategorie	Anthropogener Wirkfaktor	Quelle
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Schiffsverkehr	Popper & Hastings (2009), Browman (2011), Halvorsen et al. (2017), Nedelec et al. (2017)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Sprengungen	Popper & Hastings (2009), Browman (2011), Halvorsen et al. (2017), Nedelec et al. (2017)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Bauarbeiten, Betriebsgeräusche	Popper & Hastings (2009), Browman (2011), Halvorsen et al. (2017), Nedelec et al. (2017)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Geophysikalische Untersuchungen mit Airguns	Popper et al. (2005), Fewtrell & McCauley (2012), Davidsen et al. (2019)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Teilchenbewegung („particle motion“)	Popper & Hawkins (2018)
	Chemische Emissionen und Mülleintrag	Eintrag von Abwasser, Düngemittel, Müll und schädlichen Substanzen	Zeitoun & Mehana (2014)
Marine Säugetiere	Lebensraumveränderung	Klimawandel	Jüssi et al. (2008)
	Lebensraumveränderung	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Sonne et al. (2020), Jensen et al. (2023), Stokholm et al. (2023)
	Fischerei	Verringerte Nahrungsverfügbarkeit	Herrmann (2004), Meinig et al. (2020)
	Fischerei	Beifang	Vogel & Nordheim (1995), Berggren et al. (2002), Herrmann (2004), Fahlman (2014)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Schiffsverkehr	Southall et al. (2007, 2019)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Sprengungen	Southall et al. (2007, 2019), Siebert et al. (2022)

Schutzgut	Kategorie	Anthropogener Wirkfaktor	Quelle
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Bauarbeiten, Betriebsgeräusche	Southall et al. (2007, 2019)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Geophysikalische Untersuchungen mit Airguns	Pirotta et al. (2014), Kastelein et al. (2017), van Beest et al. (2018), Sarnocińska et al. (2020)
	Chemische Emissionen und Mülleintrag	Eintrag von Abwasser, Düngemittel, Müll und schädlichen Substanzen	Niethammer & Krapp (1994), Berggren et al. (1999), Bruhn et al. (1999), Meinig et al. (2020)
	Störung/ Kollisionsrisiko	Schiffsverkehr	Southall et al. (2021), Erbe et al. (2019)
	Störung/ Kollisionsrisiko	Wassersport	Carreño & Lloret (2021)
See- und Rastvögel	Lebensraumveränderung	Klimawandel	Mitchell et al. (2004)
	Lebensraumveränderung	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Sonne et al. (2020), Jensen et al. (2023)
	Fischerei	Verringerte Nahrungsverfügbarkeit	Mitchell et al. (2004)
	Fischerei	Beifang	Olsson et al. (2000), Österblom et al. (2002)
	Akustische Emissionen	Schiffsverkehr	Mooney et al. (2019), Jalkanen et al. (2022)
	Akustische Emissionen	Sprengungen	Mooney et al. (2019), Robinson et al. (2022)
	Akustische Emissionen	Bauarbeiten, Betriebsgeräusche	Mooney et al. (2019), Bellmann et al. (2023)
	Akustische Emissionen	Geophysikalische Untersuchungen mit Airguns	Mooney et al. (2019), Robinson et al. (2022)

Schutzgut	Kategorie	Anthropogener Wirkfaktor	Quelle
	Chemische Emissionen und Mülleintrag	Eintrag von Abwasser, Düngemittel, Müll und schädlichen Substanzen (insbesondere Öl)	Roman et al. (2020), Heubeck et al. (2003), Guse et al. (2005)
	Störung/ Kollisionsrisiko	Schiffsverkehr	Garthe & Hüppop (1994), Schwemmer et al. (2011)
	Störung/ Kollisionsrisiko	Wassersport	Doherty et al. (2021)

4.1.1 Biotope am Meeresboden

In der deutschen Nord- und Ostsee sind in der FFH-Richtlinie zwei schützenswerte Biotope am Meeresboden gelistet (Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen (FFH-RL), 1992): „Sandbänken mit nur schwacher ständiger Überspülung durch Meerwasser“ (EU Code 110) und „Riffe“ (EU Code 1170). Durch § 30 BNatSchG werden weitere Biotoptypen pauschal vor erheblichen und nachhaltigen Eingriffen geschützt. Zusammenfassend wirken folgende anthropogene Wirkfaktoren auf Biotope am Meeresboden:

- **Klimawandel:** Durch den Klimawandel verändert sich das Habitat wie beispielsweise die Wassertemperatur, was wiederum die Artzusammensetzung in lokalen Ökosystemen beeinflussen und bei temperaturbegrenzten Pathogenen zu einer erhöhten Prävalenz führen kann (Vuorinen et al., 2015; Weinert et al., 2021).
- **Sand- und Kiesgewinnung:** Sand und Kies werden beispielsweise für den Straßenbau, zur Herstellung von Beton und Mörtel und im Rahmen von Küstenschutzmaßnahmen gewonnen. Diese Rohstoffgewinnung kann u. a. das Relief, den Sedimenttransport, die Sauerstoffkonzentration und die Abundanz von benthischen Arten beeinflussen (Kortekaas et al., 2010; Krause et al., 2010; Uścinowicz et al., 2014).
- **Eintrag invasiver Arten:** Invasive Arten können beispielsweise durch den Schiffsverkehr eingetragen werden und in Konkurrenz zu einheimischen Arten stehen, sodass sich die Artenzusammensetzung verändern kann (Büttger et al., 2008; Jensen et al., 2023).
- **Kommerzielle Fischerei:** Grundnetzfischerei kann zum Verlust von Meeresboden-Lebensräumen, zur Trübung des Wassers und zur Störung oder Beschädigung der benthischen Fauna führen (de Groot, 1984). Zudem führt generell Fischerei über den Beifang von Vögeln und Meeressäugern zu direktem Verlust von Individuen schützenswerter Populationen (Žydelis et al., 2009, 2013).
- **Akustische Emissionen:** Die Teilchenbewegung („particle motion“) kann zu Verhaltensänderungen bei Invertebraten führen (Popper & Hawkins, 2018).
- **Chemische Emissionen und Mülleintrag:** Chemische Emissionen wie der Eintrag von Abwasser, Düngemittel, Müll und schädlichen Substanzen können die Artzusammensetzung in lokalen Ökosystemen beeinflussen (D’Alessandro et al., 2018). Zudem beeinträchtigt der Nährstoffeintrag aus der Landwirtschaft zunehmend die Wasserqualität; durch die sogenannte Eutrophierung werden Algenblüten und Sauerstoffverarmung begünstigt (Horta et al., 2021; Withers et al., 2014).

4.1.2 Fische

In der deutschen Nordsee leben mehr als 250 Fischarten, in der deutschen Ostsee etwa 100 Fischarten. Folgende anthropogene Wirkfaktoren beeinflussen die Bestandsentwicklungen:

- **Klimawandel:** Durch den Klimawandel erhöht sich beispielsweise die Wassertemperatur, der Wasserspiegel sinkt in den Flüssen, Dauer und Häufigkeit von Hypoxie-Ereignissen sowie Tendenzen zur Versauerung der Ozeane nehmen zu, was Fischbestände erheblich beeinflussen kann (Pörtner & Peck, 2010). Durch die unterschiedlichen Ansprüche der einzelnen Arten kann es durch die Klimaerwärmung zu einer Verschiebung der Artvorkommen kommen. Ein Beispiel hierfür ist die Verbreitung verschiedener Dorscharten, welche für die erfolgreiche Laichablage und Entwicklung der Larven auf bestimmte Wassertemperaturen angewiesen sind, und für die eine Erwärmung um 2°C eine deutliche

Reduktion der zur Verfügung stehenden Laichhabitate bedeuten könnte (Dahlke et al., 2018). Zusätzlich kann die Temperaturerhöhung bei temperaturbegrenzten Pathogenen zu einer erhöhten Prävalenz führen, sodass der Faktor Temperaturanstieg zweifach negativ auf die Fitness z.B. von Fischen wirkt.

- **Eingeschränkter Zugang zu ihren Wanderwegen und Laichablageplätzen:** Durch morphologische Veränderungen und Bebauungen der bewanderten Flüsse, wie Begradigungen, Baggerungen und Querbauten kann Fischen der Zugang zu ihren Wanderwegen und Laichablageplätzen erschwert oder ganz versperrt werden (Freyhof & Kottelat, 2008), was durch verringerten Fortpflanzungserfolg wiederum die Bestände in den marinen Ökosystemen negativ beeinflussen kann.

- **Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten:** Die Einschleppung von invasiven Arten durch den Schiffsverkehr kann die Artzusammensetzung in lokalen Ökosystemen beeinflussen (Jensen et al., 2023). Durch den Schiffsverkehr können ebenfalls pathogene Arten eingetragen werden, welche meist Viren, Bakterien oder Pilze sind (Chapman et al., 2021). Der Ausbruch einer Fischkrankheit hängt von verschiedenen Faktoren ab, beispielsweise der Art des Erregers, der Erregerdichte, der Kondition und Konstitution der Fische sowie physikalischen und chemischen Eigenschaften des Wassers.

- **Kommerzielle Fischerei:** Durch die kommerzielle Fischerei werden Individuen einer Population direkt entnommen. Allein von der deutschen Flotte wurde in den vergangenen Jahren insgesamt jeweils zwischen 250.000 und 300.000 t Fisch im In- und Ausland angelandet (Edebohls et al., 2020). Kommerzielle Fischerei (und zu einem geringen Anteil auch Forschungsfischerei) hat dementsprechend einen sehr negativen Einfluss auf die Verteilung und vielmehr noch auf die Bestände von Fischen: Populationen werden direkt dezimiert und es verringert sich die Nahrungsgrundlage für höhere trophische Ebenen (Fische, Vögel und Meeressäuger). In Deutschland werden vor allem Hering (35,2 %) und Krabben sowie Krebse (20 %) angelandet (Edebohls et al., 2020), welche zur Nahrungsquelle von Schweinswalen bzw. See- und Rastvögeln gehören. Zudem werden auch Nicht-Zielarten oder untermaßige Exemplare der Zielarten als Beifang gefischt und ebenfalls entsprechend dezimiert (Pons et al., 2022; Senko et al., 2022).

- **Akustische Emissionen/Druckänderungen:** Einige Fischarten kommunizieren über verschiedene Formen der Tonbildung über tieffrequenten Schall meist unterhalb 500 Hz und nutzen diese Vokalisation zur innerartlichen Kommunikation, wie z. B. zur Paarung und Warnung, aber auch zur Beutejagd (Fine et al., 1977; Ladich, 2014, 2019). Dementsprechend können akustische Emissionen das Verhalten von Fischen beeinflussen wie eine Unterbrechung der Nahrungsaufnahme, tieferes Abtauchen, weiträumige Trennung von Schwärmen, Verlassen von Jungtieren und Orientierungslosigkeit (Nedelec et al., 2017; Purser & Radford, 2011). Anderson et al. (2011) konnten beispielsweise in Versuchen feststellen, dass eine durchgehende weiträumige Schallbelastung zu Stress und Einschränkung im Wachstum, Reifung zur Geschlechtsreife und Reproduktion von Fischen führen kann und Tiere verstärkt zu Infektionen und Parasitenbefall neigen. Bei temporären Schallemissionen wie Airgun Surveys hingegen wurden u. a. temporäre Verhaltensänderungen, Alarmreaktionen und Hörschwellenverschiebungen festgestellt (Davidsen et al., 2019; Fewtrell & McCauley, 2012; Popper et al., 2005). Zudem kann die Teilchenbewegung („particle motion“) zu Verhaltensänderungen bei Fischen führen (Popper & Hawkins, 2018). Zusätzlich wirken beispielsweise bei Sprengungen von Altmunition Druckänderungen auf gasgefüllte Organe wie die Schwimmblase und es kann somit bei Fischen mit Schwimmblase wie der Finte und dem Stör zu Verletzungen wie Rissen der Schwimmblase, Abrissen, inneren Blutungen und Quetschungen kommen (Halvorsen et

al., 2017; z. B. Popper & Hastings, 2009). Die Schwere der Verletzung ist hierbei von der Stärke der entstehenden Druckwelle und der Art der Schwimmblase abhängig. Für Fische und Rundmäuler ohne Schwimmblase, wie das Flussneunauge, sind Auswirkungen auf andere (Hohl-) Organe nicht bekannt.

- **Chemische Emissionen und Mülleintrag:** Chemische Emissionen wie Einträge von Öl, industriellen Abwässern und landwirtschaftlichen Nährstoffen können ebenfalls die Kondition eines Individuums, sowie den Reproduktionserfolg beeinflussen und bis zum Tod führen (Zeitoun & Mehana, 2014).

4.1.3 Marine Säugetiere

In der deutschen Nord- und Ostsee kommen regelmäßig der Schweinswal (*Phocoena phocoena phocoena)*, der Seehund (*Phoca vitulina vitulina*) und die Kegelrobbe (*Halichoerus grypus*) vor. Diese Arten pflanzen sich auch in deutschen Gewässern fort. Folgende anthropogene Wirkfaktoren beeinflussen die Bestandsentwicklungen:

- **Klimawandel:** Durch den Klimawandel erhöht sich beispielsweise die Wassertemperatur, was wiederum die Abundanz von Sandaalen verringert und bei temperaturbegrenzten Pathogenen zu einer erhöhten Prävalenz führen kann. Hier wirkt der Faktor Temperaturanstieg zweifach negativ auf die Fitness z.B. von Schweinswalen, die sich u. a. von Sandaalen ernähren (Blanchet et al., 2021; MacLeod et al., 2007).

- **Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten:** Die Einschleppung von invasiven und pathogen Arten beispielsweise durch den Schiffsverkehr kann die Artzusammensetzung von lokalen Ökosystemen beeinflussen (Jensen et al., 2023). Die deutsche Seehund-Populationen wurden beispielsweise 2014 und 2015 von dem tödlichen Influenza A-Virus befallen, dass zu einem Massensterben führte, ohne allerdings die Populationsentwicklung längerfristig zu beeinflussen (Galatius et al., 2021; Sonne, Lakemeyer, et al., 2020; Stokholm et al., 2023).

- **Kommerzielle Fischerei:** Das Vorkommen mariner Säugetiere ist hauptsächlich durch die Verbreitung der Beutetiere bestimmt (Herr, Fock, et al., 2009; Sveegaard et al., 2012). Entsprechend wirkt sich eine Verringerung der Fischbestände auch auf die Verteilung von Schweinswalen, Seehunden und Kegelrobben aus. Durch inländische und ausländische kommerzielle Fischerei verringert sich die Nahrungsgrundlage für marine Säugetiere (Herrmann, 2004; Meinig et al., 2020), und somit stellt die Fischerei einen erheblichen anthropogenen Wirkfaktor auf die Bestände und die Verbreitung mariner Säugetiere in der Nord- und Ostsee dar. Zudem können sich die Tiere insbesondere in Treib- und Stellnetzen oder Reusen verfangen und ertrinken (Berggren et al., 2002; Herrmann, 2004; Vanhatalo et al., 2014; Vogel & Nordheim, 1995). Während für Schweinswale der Beifang in Stellnetzen eine der führenden Todesursachen darstellt, sind Robben auch durch das Verfangen in Reusen erheblich bedroht (Vanhatalo et al., 2014).

- **Akustische Emissionen/Druckänderungen:** Seehunde und Kegelrobben benötigen ihren Hörsinn für die Kommunikation mit Artgenossen, zur Beutejagd und zur frühzeitigen Warnung vor Prädatoren (Kastelein et al., 2009, 2010). Schweinswale nutzen die Echoortung zur Orientierung, zur Beutejagd und zur Kommunikation (Clausen et al., 2011; Koschinski et al., 2008; Wisniewska et al., 2012, 2016). Schalleinträge durch Schiffsverkehr, Sprengungen, Airgun Surveys und Bauarbeiten können zu einer temporären oder permanenten Hörschwellenverschiebung führen, was wiederum die Fähigkeit zur Beutejagd und Orientierung beeinflusst (Southall et al., 2007, 2019). Bei einer permanenten Hörschwellenverschiebung werden die Haarzellen oder andere Strukturen im Innenohr

irreversibel geschädigt, sodass das Tier dauerhaft ein schlechteres Hörvermögen aufweist. Im Gegensatz dazu stellt sich bei einer vorübergehenden Hörschwellenverschiebung, die ursprüngliche Hörfähigkeit nach einem von Dauer und Art der Beschallung abhängigen Zeitraum wieder ein (Kastelein et al., 2017). Neben Hörschwellenverschiebung führt Unterwasserlärm auch zu Verhaltensänderungen, die die biologische Fitness von Tieren negativ beinträchtigen können; z. B. haben Schweinswale während Airgun Surveys ihre Tauchlänge, Tauchtiefe, Tauchrichtung, akustischen Signale geändert und das Gebiet gemieden (Pirotta et al., 2014; Sarnocińska et al., 2020; van Beest et al., 2018). Akustische Störungen können so zu einem temporären Habitatverlust führen. Zusätzlich können beispielsweise bei Sprengungen von Altmunition insbesondere Hohlorgane wie das Ohr, die Lunge oder das Magen-Darm-System von Säugern verletzt werden, da durch die Druckzu- und -abnahme die Luft in den Organen stark oszilliert, sodass es zu inneren – teils letalen – Verletzungen kommen kann (Siebert et al., 2022).

- **Chemische Emissionen und Mülleintrag:** Chemische Emissionen wie Chemikalien-, Medikamenten-, Öl-, Abwasser- oder Nährstoffeintrag können beispielsweise über die Nahrung aufgenommen werden und sich anreichern, was zu gesundheitlichen Problemen und einer verringerten Fertilität führen kann (Berggren et al., 1999; Bruhn et al., 1999; Kinze, 1994; Meinig et al., 2020).
- **Schiffsverkehr/Wassersport:** Durch Schiffsverkehr und Wassersport können marine Säugetiere gestört werden, in ihren Schwimmrouten gekreuzt werden, durch anthropogene Einflüsse insbesondere während der sensiblen Zeit von ihren Liegeplätzen vertrieben werden oder mit Schiffen kollidieren (Erbe et al., 2019; Schoeman et al., 2020). Auch Baumaßnahmen an Land können zum Verlust von Liegeplätzen führen.

4.1.4 See- und Rastvögel

Die See- und Rastvogelarten in der deutschen Nord- und Ostsee weisen unterschiedliche ökologische Ansprüche auf, so dass sich anthropogene Einflüsse unterschiedlich intensiv auf die einzelnen Arten auswirken. Übergreifend gibt es folgende anthropogene Wirkfaktoren:

- **Klimawandel:** Durch den Klimawandel erhöht sich u. a. die Wassertemperatur, was die Verbreitung von Beutearten beeinflusst und dadurch die Nahrungsverfügbarkeit verändern kann (Mitchell et al., 2004). Zusätzlich kann die Temperaturerhöhung bei temperaturbegrenzten Pathogenen zu einer erhöhten Prävalenz führen, sodass der Faktor Temperaturanstieg zweifach negativ auf die Fitness z.B. von See- und Rastvögeln wirkt.
- **Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten:** Die Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten durch beispielsweise Schiffsverkehr kann die Artzusammensetzung in lokalen Ökosystemen beeinflussen (Jensen et al., 2023; Sonne, Lakemeyer, et al., 2020).
- **Kommerzielle Fischerei:** Durch kommerzielle Fischerei verringert sich die Nahrungsgrundlage für See- und Rastvögel. Der Bruterfolg der Dreizehenmöwe hängt beispielsweise stark vom Sandaalangebot ab (Mitchell et al., 2004). Zudem verfangen sich besonders tauchende Vogelarten - wie etwa der Beifang von tauchenden Vögeln (insbesondere Meeresenten) in der Ostseestellnetzfischerei zeigt - während der Nahrungssuche in Treib- und Stellnetzen, und ertrinken (Olsson et al., 2000; Österblom et al., 2002; Žydelis et al., 2013).
- **Akustische Emissionen:** Aktuell wird am Hörvermögen von See- und Rastvögeln geforscht (Mooney et al., 2019), die ebenfalls akustischen Emissionen wie beispielsweise

Sprengungen oder physikalische Untersuchungen mit Airguns wahrnehmen können (Bellmann et al., 2023; Mooney et al., 2019). Inwiefern See- und Rastvögeln ihr Verhalten aufgrund welcher akustischen Emissionen ändern, wird aktuell erforscht (Anderson Hansen et al., 2020).

- **Chemische Emissionen und Mülleintrag:** Chemische Emissionen stellen für Seevögel eine zunehmende Bedrohung dar. Die illegale Verklappung von Ölresten auf See, sowie der Austritt von Öl aufgrund von Unfällen führt bei Seevögeln zu einer Verklebung des Gefieders, wodurch die Isolationswirkung verloren geht. Da die Tiere versuchen, das Öl mit dem Schnabel aus dem Gefieder zu putzen, gelangt das Öl zusätzlich in ihren Körper, was oftmals zu Vergiftungen führt (Heubeck et al., 2003). Vogelarten, die ihre Nahrung hauptsächlich von der Wasseroberfläche aufnehmen, sind besonders durch den Eintrag von Plastikmüll ins Meer betroffen, da sie an der Oberfläche schwimmende Plastikpartikel mit der Nahrung aufnehmen (Roman et al., 2020) und auch an ihre Jungen verfüttern.
- **Schiffsverkehr:** Schiffsverkehr kann zu Scheuch-Effekten bei Seevögeln führen, bis hin zur dauerhaften Vertreibung sensitiver Seevogelarten wie insbesondere von Seetauchern und Meeresenten aus stark befahrenen Gebieten (Fliessbach et al., 2019).

4.2 Beschreibung spezifischer Auswirkungen von Bau, Betrieb und Rückbau von OWEAs auf die Meeresumwelt in der deutschen AWZ

Jede Form menschlicher Aktivität in der Meeresumwelt führt zu Auswirkungen auf die einzelnen Schutzgüter. Dieses Kapitel dient als Orientierung, um einen Überblick über die Auswirkungen spezifisch durch OWE zu geben. Die Wirkfaktoren der jeweiligen anderen Nutzungsform (als Einfachnutzung) auf die Meeresumwelt werden in den Abschnitten 6.5.1 (Landes- und Bündnisverteidigung), 7.4.1 (Fischereiforschung), 8.5.1.1 (Photovoltaik), 8.5.2.1 (Wellenenergie), 8.5.3.1 (Biokraftstoff aus Algen) betrachtet. Es wird jeweils Grundlagenwissen zusammengefasst, um als Basis für die Betrachtung kumulativer Effekte bei einer Mehrfachnutzung zu dienen.

Laut verschiedenen Studien, welche sich mit den Auswirkungen menschlicher Aktivitäten auf die Meeresumwelt beschäftigen (z. B. Defingou et al., 2019 und darin enthaltene Referenzen; Junge et al., 2022), können die Auswirkungen, welche beim Bau, Betrieb und Rückbau der OWEAs auf die Meeresumwelt entstehen, temporäre oder auch dauerhafte Belastungen in unterschiedlicher Intensität hervorrufen. Zudem gibt es Auswirkungen, die ausschließlich während des Baus, des Betriebs oder des Rückbaus der Anlagen auftreten.

In Tabelle 8 und im folgenden Text werden die spezifischen Auswirkungen von OWPs für die vier Schutzgüter Biotope am Meeresboden, Fische, marine Säugetiere, sowie See- und Rastvögel in deutschen Gewässern aufgeführt.

Die hier beschriebenen möglichen Auswirkungen leiten sich vor allem aus den bisherigen Studien beim Bau und Betrieb von OWPs ab, bei denen überwiegend Fundamente mit Impulsrammverfahren installiert wurden. Andere Fundamenttypen oder Installationsmethoden, wie z. B. unterschiedliche Arten von Schwimmfundamenten, weisen in bestimmten Merkmalen die gleichen Auswirkungen auf die Meeresumwelt auf, können in anderen Aspekten aber von den in Tabelle 8 aufgeführten Auswirkungen abweichen. Alternative Fundamenttypen und Installationsmethoden werden in Abschnitt 4.3 näher erläutert.

Tabelle 8: Direkte aktivitätsspezifische Auswirkungen von Bau, Betrieb und Rückbau von Offshore-Windenergieanlagen auf einzelne Schutzgüter, die gemäß FFH-Richtlinie in den Schutzgebieten der deutschen Nord- und Ostsee geschützt werden.

Schutzgut	Kategorie	Wirkfaktoren	Phase	Räumliche Skala um WEA	Quelle
Biotope am Meeresboden	Lebensraumveränderung	Sedimentaufwirbelung bei Errichtung, Betrieb und Rückbau der WEAs inkl. Kabelverlegung: Trübung im Wasser, Sedimentation am Boden	Bau, Betrieb, Rückbau	cm - m	Schultze et al. (2020)
	Lebensraumveränderung	Eintrag invasiver Arten	Bau, Betrieb, Rückbau	m - km	Büttger et al. (2008), Jensen et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Vibration der WEAs	Betrieb	cm - m	Vicen-Bueno et al. (2013), Djath et al. (2018), van Berkel et al. (2020), Lloret et al. (2022)
	Lebensraumveränderung	Veränderung der Hydrographie	Betrieb	m - km	Vicen-Bueno et al. (2013), Djath et al. (2018), Daewel et al. (2022), Lloret et al. (2022), Christiansen et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Elektrische Magnetfelder, Temperaturerhöhung durch Kabel	Betrieb	(cm -) m	Taormina et al. (2018), Hutchinson et al. (2021)
	Lebensraumveränderung	Künstliche Riffe = Änderung von Habitat + Artzusammensetzung	Betrieb	m – km	Krone et al. (2017), Glarou et al. (2020), Rezaei et al. (2023)
	Fischerei	Reserve effect: Ausschluss der Fischerei im OWP und der aktiven Fischerei in 500 m Radius um OWP	Betrieb	m – km	Coates et al. (2016), Bastardie et al. (2020), Hintzen et al. (2021)

Schutzgut	Kategorie	Wirkfaktoren	Phase	Räumliche Skala um WEA	Quelle
	Chemische Emissionen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Bau, Betrieb, Rückbau	m – km	Kirchgeorg et al. (2018), Lloret et al. (2022)
Fische	Lebensraumveränderung	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Bau, Betrieb, Rückbau	m – km	Chapman et al. (2021), Jensen et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Elektrische Magnetfelder durch Kabel	Betrieb	cm – m	Taormina et al. (2018), Hermans et al. (2024)
	Lebensraumveränderung	Künstliche Riffe = Änderung von Habitat + Artzusammensetzung	Betrieb	m – km	Glarou et al. (2020), Rezaei et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Floating OWE: Primäres und sekundäres Verfangen	Betrieb	cm – m	Maxwell et at. (2022)
	Fischerei	Reserve effect: Ausschluss der Fischerei im OWP und der aktiven Fischerei in 500 m Radius um OWP	Betrieb	m – km	Bigné et al. (2019), Halouani et al. (2020), Hintzen et al. (2021)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Sprengungen	Vor Bau	m – km	Popper & Hastings (2009), Browman (2011), Halvorsen et al. (2017), Nedelec et al. (2017)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Erhöhter Schiffsverkehr	Bau, Betrieb, Rückbau	m – km	Putland et al. (2017, 2018)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Rammungen	Bau, Rückbau	m – km	Mooney et al. (2020)

Schutzgut	Kategorie	Wirkfaktoren	Phase	Räumliche Skala um WEA	Quelle
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Betriebsgeräusche	Betrieb	cm – m	Wahlberg & Westerberg (2005), Bellmann et al. (2023)
	Chemische Emissionen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Bau, Betrieb, Rückbau	m – km	Kirchgeorg et al. (2018), Lloret et al. (2022)
Marine Säugetiere	Lebensraumveränderung	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Bau, Betrieb, Rückbau	m – km	Sonne et al. (2020), Jensen et al. (2023), Stokholm et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Elektrische Magnetfelder durch Kabel	Betrieb	cm – m	Taormina et al. (2018)
	Lebensraumveränderung	Floating OWE: Primäres und sekundäres Verfangen	Betrieb	cm – m	Benjamins et al. (2014), Maxwell et at. (2022)
	Fischerei	Reserve effect: Ausschluss der Fischerei im OWP und der aktiven Fischerei in 500 m Radius um OWP	Betrieb	m – km	Moan et al. (2020), Kindt-Larsen et al. (2023)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Sprengungen	Vor Bau	m – km	Southall et al. (2007, 2019), Siebert et al. (2022)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Erhöhter Schiffsverkehr	Bau, Betrieb, Rückbau	m – km	Dyndo et al. (2015), Putland et al. (2017), Wisniewska et al. (2018)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Rammungen	Bau, Rückbau	m – km	Brandt et al. (2018)

Schutzgut	Kategorie	Wirkfaktoren	Phase	Räumliche Skala um WEA	Quelle
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Betriebsgeräusche	Betrieb	(cm -) m	Tougaard et al. (2009, 2020), Bellmann et al. (2023)
	Chemische Emissionen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Bau, Betrieb, Rückbau	m - km	Kirchgeorg et al. (2018), Lloret et al. (2022)
	Störung/ Kollisionsrisiko	Erhöhter Schiffsverkehr	Bau, Betrieb, Rückbau	m - km	Benhemma-Le Gall (2023)
See- und Rastvögel	Lebensraumveränderung	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Bau, Betrieb, Rückbau	m - km	Sonne et al. (2020), Jensen et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Elektrische Magnetfelder durch Kabel	Betrieb	cm - m	Taormina et al. (2018)
	Lebensraumveränderung	Floating OWE: Primäres und sekundäres Verfangen	Betrieb	cm - m	Maxwell et at. (2022)
	Fischerei	Reserve effect: Ausschluss der Fischerei im OWP und der aktiven Fischerei in 500 m Radius um OWP	Betrieb	m - km	Daunt et al. (2008), Searle et al. (2023)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Sprengungen	Vor Bau	m – km	Mooney et al. (2019), Robinson et al. (2022)
	Akustische Emissionen	Erhöhter Schiffsverkehr	Bau, Betrieb, Rückbau	m - km	Mooney et al. (2019), Jalkanen et al. (2022)
	Akustische Emissionen	Rammungen	Bau, Rückbau	m - km	Mooney et al. (2019), Bellmann et al. (2023)
	Akustische Emissionen	Betriebsgeräusche	Betrieb	cm - m	Mooney et al. (2019), Bellmann et al. (2023)

Schutzgut	Kategorie	Wirkfaktoren	Phase	Räumliche Skala um WEA	Quelle
	Chemische Emissionen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Bau, Betrieb, Rückbau	m - km	Kirchgeorg et al. (2018), Lloret et al. (2022)
	Störung/ Kollisionsrisiko	Erhöhter Schiffsverkehr	Bau, Betrieb, Rückbau	m - km	Coleman et al. (2022)
	Störung/ Kollisionsrisiko	Kollisionsrisiko mit Rotorblättern	Betrieb	cm - m	Hüppop et al. (2006), Brabant et al. (2015), Ronconi et al. (2015)
	Störung/ Kollisionsrisiko	Vertreibungswirkung/ Barriere-Effekt durch OWP	Betrieb	m - km	Fox & Krag Petersen (2019), Vilela et al. (2021), Garthe et al. (2023)

4.2.1 Sandbänke und Riffe

Folgende Faktoren wirken während des Baus, Betriebs und Rückbaus eines OWPs auf die beiden nach FFH-Richtlinie geschützten Biotope am Meeresboden (Sandbänke und Riffe) ein:

- **Sedimentaufwirbelung:** Beim Bau, Betrieb und Rückbau eines OWPs inkl. Kabelverlegung wird die Sedimentation am Boden gestört und das Wasser durch die Sedimentaufwirbelung temporär getrübt, was Auswirkungen auf die Nährstoffversorgung des Planktons haben kann (Lloret et al., 2022). Dieser Wirkfaktor tritt meist nur wenige hundert Meter um die einzelnen Fundamente auf. Schultze et al. (2020) zeigte, dass ein einzelner Monopile verantwortlich für 7 bis 10 % zusätzliche Durchmischung zu der der unteren Mischschicht ist, wobei etwa 10 % der von der Struktur erzeugten turbulenten kinetischen Energie für die Durchmischung verwendet wird. Obwohl die Wirkung einer einzelnen Turbine auf die Schichtung relativ gering ist, könnten großräumige OWF die vertikale Struktur einer schwach geschichteten Wassersäule beeinflussen (Schultze et al., 2020).
- **Eintrag invasiver Arten:** Durch Schiffsverkehr können invasive Arten eingetragen werden (Büttger et al., 2008; Jensen et al., 2023). Dieser Wirkfaktor tritt während des Baus, Betriebs und Rückbaus von OWPs auf, kann die Artzusammensetzung in lokalen Ökosystemen beeinflussen und räumliche Effekte über mehrere km haben; jedoch werden nicht immer invasive Arten eingetragen, denn die Schiffe für Bau-/Rückbau- und Wartungsarbeiten kommen oft aus umliegenden Gebieten mit ähnlichen ökologischen Systemen anstatt fernen Ländern. Zudem kann ein Managementplan das Risiko der Einschleppung invasiver Arten minimieren: Gren et al. (2022) zeigten, dass die Schifffahrt das Risiko der Einschleppung invasiver Arten signifikant beeinflusst und für bis zu 38 % der Anzahl invasiver Arten verantwortlich sein kann. Vorhersagen über die Auswirkungen von Maßnahmen zur Umsetzung des Übereinkommens über die Kontrolle und das Management von Ballastwasser und Sedimenten von Schiffen hingegen ergaben eine Verringerung um 17 %, die durch eine erwartete Zunahme des Schiffsverkehrs wieder aufgehoben wurde.
- **Vibration der WEAs:** Die Vibration der WEAs kann akute Stressreaktionen bei benthischen Organismen auslösen, die das Verhalten und die Physiologie des Individuums beeinflussen (Hawkins et al., 2015). Es werden mehr Daten über das breite Spektrum an wirbellosen Arten in der Nähe, auf oder innerhalb des Substrats benötigt; jedoch gibt es bereits jetzt Hinweise darauf, dass zumindest einige Arten, darunter Muscheln und Einsiedlerkrebse, auf physikalische Vibrationen mit Frequenzen von 5-410 Hz reagieren (Hawkins et al., 2021; Roberts et al., 2015; Roberts & Elliott, 2017; Roberts & Laidre, 2019). Dieser Wirkfaktor tritt während der Betriebsphase auf, ist jedoch mit meist nur wenigen hundert Metern um die einzelnen WEAs räumlich begrenzt.
- **Veränderung der Hydrographie:** Beim Betrieb des Windparks kann sich außerdem die Hydrographie wie beispielsweise das Strömungsmuster verändern, denn WEAs entziehen einem Windfeld Dynamik, fügen aber gleichzeitig Turbulenzen hinzu (Christiansen et al., 2023; Daewel et al., 2022; Djath et al., 2018; Vicen-Bueno et al., 2013). Dadurch kann sich die vertikale Durchmischung des Ozeans verändern (Lloret et al., 2022). Wie sehr das Windfeld beeinflusst wird, hängt unter anderem von der Höhe der aufragenden Struktur ab. Schwimmende OWPs scheinen im Allgemeinen einen geringeren Einfluss auf die Unterwasserhydrodynamik zu haben als am Boden befestigte OWPs (Lloret et al., 2022). Christiansen et al. (2023) beobachtete in der Deutschen Bucht Veränderungen der Strömungsgeschwindigkeiten und der Schichtung mit Größenordnungen von etwa 10 %, die ähnlich groß sind wie die regionalen jährlichen und interannuellen Schwankungen.

Dieser Wirkfaktor tritt während des Baus, Betriebs und Rückbaus auf und kann räumliche Effekte über mehrere km haben (Christiansen et al., 2023).

- **Elektrische Magnetfelder/Temperaturerhöhung:** Stromführende Kabel erzeugen während der Betriebsphase elektromagnetische Felder um die Kabel. Das kann bei benthischen und pelagischen Organsimen zu Verhaltensänderungen führen (Boehlert & Gill, 2010; Hutchinson et al., 2021; Taormina et al., 2018). Wenn elektrische Energie über die stromführenden Kabel transportiert wird, geht aber auch ein gewisser Anteil als Wärme verloren. Die Erwärmung des umgebenden Meeresbodens durch die Kabel kann Auswirkungen auf Organismen haben und ebenfalls zu Verhaltensänderungen führen (Taormina et al., 2018). Ein Temperaturanstieg in der Nähe des Kabels kann die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Substrats wie beispielsweise das Profil der Sauerstoffkonzentration verändern und damit die Entwicklung von Mikroorganismengemeinschaften und/oder die bakterielle Aktivität beeinflussen. Magnetfelder an Ein- und Austrittsstellen von schwimmenden OWEAs sind gesondert zu betrachten, da die magnetische Flussdichte (EMF) in diesen Bereichen weit über denen der vergrabenen Seekabel liegt (z. B. 37,4 µT bei einem 1,5m tief vergrabenen Kabel bzw. 222,2 µT an der Ein- und Auftittsstelle; Wolters & Volkenandt, 2020). Inwiefern derartige magnetische Flussdichten die einzelnen Arten beeinflussen, ist noch weitgehend unerforscht (Pophof et al., 2023). Scott et al. (2021) beobachteten jedoch bereits begrenzte physiologische und verhaltensbezogene Auswirkungen von Taschenkrebsen bei EMF-Stärken von 250 µT. Die Kabel scheinen hingegen keine große Barriere für die Bewegungsmuster von am und im Boden lebenden Organismen darzustellen (Hutchison et al., 2018; Klimley et al., 2017). Der Wirkfaktor tritt während der Betriebsphase auf und ist mit meist nur wenigen Metern um die einzelnen WEAs und Kabel räumlich begrenzt, die Kabel führen allerdings kilometerweit bis zum Festland. In der deutschen AWZ darf sich die Temperatur der obersten 20 cm des Meeresbodens maximal um 2 Kelvin erhöhen (sog. 2K-Kriterium).

- **Versiegelung/künstliche Riffe:** Bei am Boden befestigten WEAs verändern die Fundamentstrukturen und andere windparkassoziierte Strukturen (z. B. Steinaufschüttungen über Kabeln, Kolkschutz) die natürlichen abiotischen Bedingungen und somit die Lebensräume am Meeresboden (Glarou et al., 2020). Durch die Versiegelung und Überbauung können die Biozönosen im betroffenen Bereich negativ verändert bzw. beeinflusst werden; invasive Arten können sich leichter ansiedeln und ausbreiten (Glarou et al., 2020). Wenn dadurch beispielsweise Arten, die bisher in dem Gebiet ansässig waren, verdrängt werden, kann es zu einem temporären oder dauerhaften Habitatverlust kommen: Die künstlichen Bauwerke können für invasive Arten als Sprungbrett für eine weitere Ausbreitung dienen (Watson et al., 2024) und das Gebiet negativ und/oder positiv beeinflussen. Auf der anderen Seite können eingebrachte Fundamente eines OWP als künstliche Riffstruktur („Artifical reef effect“) fungieren. Sie können ein zusätzliches Habitat für marine Tiere und Pflanzen bieten, indem sie Laichplätze bereitstellen und Unterschlupfmöglichkeiten bieten. In der südlichen Deutschen Bucht wurden die typischen Offshore-Fundamente von durchschnittlich etwa 5.000 Taschenkrebsen (pro Fundament) bewohnt, was mehr als doppelt so viel ist wie bei den Fundamenttypen ohne Kolkschutz ist (Krone et al., 2017). Vergleicht man die vorhandene Fauna an 1000 Schiffswracks und auf dem autochthonen Weichsubstrat mit derjenigen, die sich wahrscheinlich an den Fundamenten von 5.000 hypothetisch realisierten Windenergieanlagen etablieren wird, so wird erwartet, dass die Deutsche Bucht in Zukunft neue künstliche Riffhabitate für weitere 320 % Krebse (d. h. 13.740.000 weitere Individuen) und 50 % Lippfische (d. h. 334.000 weitere Individuen) bieten wird (Krone et al., 2017). Die Nahrungsverfügbarkeit wird erhöht, was zu Veränderungen der Fischbestände und der Artenvielfalt führt und wiederum

eine Nahrungsgrundlage für höhere trophische Ebenen bietet. Bei einem vollständigen Rückbau der OWP-Fundamente wird erwartet, dass es erneut zu Auswirkungen auf die künstlich entstandene Riffstruktur und somit auf künftige Fischbestände, die Fischerei und die Fischereiressourcen kommt. Mögliche Auswirkungen sind jedoch noch nicht hinreichend untersucht worden. Bei schwimmenden WEAs können die Verankerungsleinen und schwimmenden Unterkonstruktionen ebenfalls als Besiedlungsflächen für wirbellose Tiere und Algen dienen und somit Fische anlocken, was die Artenzusammensetzung der pelagischen Gemeinschaften positiv oder negativ verändern kann (Rezaei et al., 2023). Dieser Wirkfaktor (d. h. die Versiegelung) tritt während der Betriebsphase und räumlich begrenzt mit meist nur wenigen hundert Metern um den OWP auf; die Änderung des Habitats (d. h. die Effekte der Versiegelung) kann die Artzusammensetzung in lokalen Ökosystemen jedoch auf größerer räumlicher Skala wesentlich beeinflussen.

- **Kommerzielle Fischerei:** In Deutschland findet keine Fischerei innerhalb eines Windparks sowie keine aktive Fischerei in einem 500 m Radius um einen Windpark herum statt.[181] Durch die Fischerei kann es zu einem Verlust von Meeresboden-Lebensräumen kommen (Polet & Depestele, 2010; Rijnsdorp et al., 2020) und die benthische Fauna kann gestört und beschädigt werden (Collie et al., 2000; Frid et al., 2012). Durch den Ausschluss der aktiven Fischerei, vor allem grundberührender Methoden können benthische Habitate wiederhergestellt werden und sich erholen (Coates et al., 2016; Hintzen et al., 2021; Rijnsdorp et al., 2020). Dieser Wirkfaktor tritt während der Betriebsphase innerhalb des Windparks und in einem Radius von 500 m um den OWP auf; der Ausschluss der aktiven Fischerei kann die benthischen Habitate wesentlich beeinflussen. Generell kann ein Fischereiausschluss zu einer größeren Artenvielfalt, Artengleichmäßigkeit, Abundanz, Körpergröße und Lebenserwartung der benthischen Lebensgemeinschaft führen (Coates et al., 2016; Duineveld et al., 2007; Howarth, 2012). Der Effekt des Fischereiausschlusses wurde jedoch nicht in allen Fällen als signifikant eingestuft; die Intensität des Effekts (d. h. Auswirkungen auf räumlicher Skala, zeitlicher Skala und auf Populationsebene) hängt von folgenden Wirkfaktoren ab: Bedeutung des Gebiets, Größe des Gebiets, Intensität des Fischereiaufwands vor Fischereiausschluss, Verschiebung des Fischereiaufwands in andere Gebiete, Biologie der Arten, sowie abiotische Faktoren. Es besteht daher weiterer Forschungsbedarf, inwiefern ein Ausbau von OWE und somit eine räumliche Zunahme der Gebiete mit Fischereiausschluss Auswirkungen auf das Ökosystem hat.

- **Chemische Emissionen:** Während der Bau-, Betriebs- und Rückbauphase können chemische Emissionen freigesetzt werden (durch Unfälle sowie während des Normalbetriebs) und sich somit auf das umgebene Gebiet auswirken oder zu Anreicherungen im Meeresboden führen. Beispielsweise können Antifouling sowie Opferanoden während der Betriebsphase organische Verbindungen (z. B. Bisphenol A) und Metalle (z. B. Aluminium, Zink und Indium) absondern (Kirchgeorg et al., 2018). Diese können sich in benthischen Organismen anreichern und unter anderem negative Auswirkungen auf die Fertilität haben (Farr et al., 2021; Kirchgeorg et al., 2018; Sonne, Siebert, et al., 2020). Schwimmende OWPs können interne Tanks enthalten, die sowohl festen Ballast als auch Ballastwasser enthalten, das in der Regel mit Natriumhydroxid versetzt ist – einer chemischen Verbindung, die für marine Lebewesen giftig ist (Lloret et al., 2022). Bei Unfällen können diese Schadstoffe freigesetzt werden. Zudem kann es während der Bau- und Rückbauphase zu einem temporären Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen kommen (Sonne, Siebert, et al., 2020). Dieser Wirkfaktor tritt während des Baus,

[181] Vgl. in diesem Kontext die Darstellung der naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung in Abschnitt 3.3.3.

Betriebs und Rückbaus auf, jedoch wird das Risiko eines Unfalls durch Managementpläne minimiert.

4.2.2 Fische

Folgende Faktoren wirken während des Baus, Betriebs und Rückbaus eines OWPs auf Fische ein:

- **Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten:** Durch den Schiffsverkehr können invasive und pathogene Arten eingetragen werden (Chapman et al., 2021; Jensen et al., 2023). Beispielsweise wurde die Schwarzmund-Grundel (*Neogobius melanostomus*) erstmals 1990 in der Ostsee beobachtet und hat sich seitdem invasiv ausgebreitet und zahlreiche dichte Populationen gebildet, in denen sie einheimische Fische verdrängen und sich negativ auf Beutetiere auswirken kann. Die Ergebnisse von van Deurs et al. (2021) deuteten auf negative Auswirkungen auf bestimmte Molluskentaxa hin, während gleichzeitig viele andere Gruppen nach der Invasion weitgehend unbeeinflusst bleiben oder sogar positive Trends aufweisen. Dieser Wirkfaktor tritt während des Baus, Betriebs und Rückbaus auf und kann die Artzusammensetzung in lokalen Ökosystemen beeinflussen; jedoch werden nicht immer invasive Arten eingetragen, denn die Schiffe für Bau-/Rückbau- und Wartungsarbeiten kommen oft aus umliegenden Gebieten mit ähnlichen ökologischen Systemen anstatt fernen Ländern und zudem können Managementpläne das Risiko der Einschleppung invasiver Arten minimieren (Gren et al., 2022).
- **Elektrische Magnetfelder:** Bei Seekabeln (z. B. parkinterne Verkabelung, Netzanbindung) kommt es zur Ausbildung elektromagnetischer Felder. Viele Fischarten können elektromagnetische Felder wahrnehmen. Knorpelfische (Haie und Rochen) sind besonders sensitiv gegenüber elektrischen Feldern. Knorpelfische und einige andere Arten wie Lachs oder Aal orientieren sich u. a. mit Hilfe des Erdmagnetfeldes (Boehlert & Gill, 2010; Gill et al., 2012; Hutchison et al., 2018; Kavet et al., 2016; Krylov et al., 2014; Taormina et al., 2018). Es besteht somit die Möglichkeit, dass bei solchen Arten durch Seekabel-bedingte Änderungen im natürlichen Magnetfeld Orientierungsstörungen auftreten können (Meißner et al., 2006). Dieser Wirkfaktor tritt während der Betriebsphase auf und ist mit vermutlich nur wenigen Metern um die einzelnen WEAs und Kabel räumlich begrenzt, die Kabel führen allerdings kilometerweit bis zum Festland. In der deutschen AWZ darf sich die Temperatur der obersten 20 cm des Meeresbodens maximal um 2 Kelvin erhöhen (sog. 2K-Kriterium).
- **Versiegelung/künstliche Riffe:** Bei am Boden befestigten WEAs verändern die Fundamentstrukturen und andere windparkassoziierte Strukturen (z. B. Steinaufschüttungen über Kabeln, Kolkschutz) die natürlichen abiotischen Bedingungen und somit die Lebensräume am Meeresboden. Durch die Versiegelung und Überbauung können die Biozönosen im betroffenen Bereich negativ verändert bzw. beeinflusst werden; invasive Arten können sich leichter ansiedeln und ausbreiten (Glarou et al., 2020). Auf der anderen Seite können eingebrachte Fundamente eines OWP als künstliche Riffstruktur („Artifical reef effect“) fungieren. Sie können ein zusätzliches Habitat für marine Tiere und Pflanzen bieten, indem sie Laichplätze bereitstellen und Unterschlupfmöglichkeiten bieten. Die Nahrungsverfügbarkeit wird erhöht, was zu Veränderungen der Fischbestände und der Artenvielfalt führt und wiederum eine Nahrungsgrundlage für höhere trophische Ebenen bietet. Die Versiegelung durch OWEAs tritt während der Betriebsphase und räumlich begrenzt mit meist nur wenigen hundert Metern um den OWP auf; die Änderung des Habitats (d. h. die Wirkung der Versiegelung) kann die Artzusammensetzung in lokalen Ökosystemen jedoch auf größerer räumlicher Skala wesentlich beeinflussen.

- **Primäres und sekundäres Verfangen:** Fische können sich in den Verankerungsleinen von schwimmenden WEAs (primäres Verfangen) oder in Geisternetzen und anderem Plastikmüll, welches an den Verankerungsleinen hängen bleibt, verfangen (sekundäres Verfangen; Maxwell et al., 2022). Das primäre und sekundäre Verstrickungsrisiko an schwimmenden Turbinen wird wahrscheinlich durch eine Reihe von Faktoren beeinflusst, darunter (1) die Geometrie der Verankerungsleinen, (2) die Tiefe der Befestigung von Verankerungsleinen, wenn sie drapiert sind, (3) Verhalten von Tieren in der Nähe von Turbinen, (4) Erkennung von Verankerungsleinen durch Tiere (abhängig von der Konfiguration und dem Material der Festmacherleinen sowie von der Entfernung der Festmacherleinen in der Wassersäule), (5) die Häufigkeit von ausgedienten Fanggeräten oder anderen Materialien in der Region sowie (6) die Nähe zu Fischgründen (Benjamins et al., 2014; Maxwell et al., 2022). Dieser Wirkfaktor tritt während der Betriebsphase von schwimmenden OWPs und räumlich begrenzt um die einzelnen WEAs auf; insgesamt nehmen Maxwell et al. (2022) jedoch an, dass das Risiko des Verfangens gering ist.

- **Kommerzielle Fischerei:** In Deutschland findet während der Betriebsphase keine Fischerei innerhalb eines Windparks sowie keine aktive Fischerei in einem 500 m Radius um einen Windpark herum statt. Somit kann es innerhalb dieser Gebiete zu einem reduzierten Fischereidruck kommen (sog. „Reserve effect"). Dies könnte sich positiv auf die Fischbestände auswirken; jedoch ist der „Reserve effect" noch wenig erforscht. Raoux et al. (2019) konnten in dem untersuchten Modell und den Szenarien 30 Jahre nach der Einführung eines OWPs nur eine relativ begrenzte Gesamtauswirkung auf das Ökosystem nachweisen. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass das für die Fischerei gesperrte Gebiet zu klein war, um auf der Ebene des Ökosystems signifikante Auswirkungen zu haben. Generell kann ein Fischereiausschluss zu einer größeren Artenvielfalt, Artengleichmäßigkeit, Abundanz, Gleichmäßigkeit im Geschlechtsverhältnis, Körpergröße und Lebenserwartung von Fischen führen, sobald keine Individuen mehr aus dem Ökosystem entnommen werden (Bergström et al., 2023; Berkström et al., 2021; Eklöf et al., 2023; Florin et al., 2013; Halouani et al., 2020; Howarth, 2012; Roach et al., 2018; Röckmann et al., 2007; Rufener et al., 2023; Rybicki et al., 2021; Sala & Giakoumi, 2018; Simons et al., 2015; Sköld et al., 2022). Der Effekt des Fischereiausschlusses wurde jedoch nicht in allen Fällen als signifikant eingestuft; die Intensität des Effekts (d. h. Auswirkungen auf räumlicher Skala, zeitlicher Skala und auf Populationsebene) hängt von folgenden Wirkfaktoren ab: Bedeutung des Gebiets, Größe des Gebiets, Intensität des Fischereiaufwands vor Fischereiausschluss, Verschiebung des Fischereiaufwands in andere Gebiete, Biologie der Arten, sowie abiotische Faktoren.

- **Akustische Emissionen/Druckänderungen:** Beim Errichten der WEAs entstehen vor allem durch das Rammen der Fundamente und durch den mit dem Bau und der Wartung verbundenen erhöhten Schiffsverkehr akustische Emissionen. Je nach Abstand zur Schallquelle kann es zur Maskierung der Kommunikationssignale, zu Verhaltensänderungen, zu einer temporären Hörschwellenverschiebung oder sogar zum Tod von Fischen kommen (Mooney et al., 2020; Popper & Hawkins, 2019; Putland et al., 2017, 2018; F. Thomsen et al., 2006). Dieser Wirkfaktor tritt während des Baus, Betriebs und Rückbaus auf einer räumlichen Skala von bis zu mehreren Kilometern um den OWP auf. Siddagangaiah et al. (2024) beobachteten allerdings keinen signifikanten Effekt des Lärms einer einzelnen Turbine auf den saisonalen Fisch-Chorus. Zusätzlich kann es bei Fischen mit Schwimmblase während flächenvorbereitender Sprengungen von Altmunition oder Rammungen durch die Druckänderung zu Verletzungen wie Rissen der Schwimmblase, Abrissen, inneren Blutungen und Quetschungen kommen (Halvorsen et al., 2017; Popper & Hastings,

2009). Dieser Wirkfaktor tritt temporär während der Bau- und Rückbauphase auf einer räumlichen Skala von mehreren (hundert) Metern um die Schallquelle auf.

- **Chemische Emissionen:** Während der Bau-, Betriebs- und Rückbauphase können chemische Emissionen von Schadstoffen freigesetzt werden (durch Unfälle sowie während des Normalbetriebs), die sich in allen Schutzgütern anreichern (Farr et al., 2021; Kirchgeorg et al., 2018; Sonne, Siebert, et al., 2020). Diese Substanzen können bei Fischen zur Senkung der Fertilität, zu Krankheiten, zu Erbgutschädigung oder zum Tod führen (Gieron et al., 2010; Goldenman et al., 2017; Mackenzie et al., 2004; Rochman et al., 2015; Sonne, Siebert, et al., 2020). Dieser Wirkfaktor tritt während des Baus, Betriebs und Rückbaus auf, jedoch wird das Risiko eines Unfalls durch Managementpläne minimiert.

4.2.3 Marine Säugetiere

Folgende Wirkfaktoren wirken während des Baus, Betriebs und Rückbaus eines OWPs auf marine Säugetiere ein:

- **Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten:** Durch den Schiffsverkehr können invasive und pathogene Arten eingetragen werden (Jensen et al., 2023; Sonne, Lakemeyer, et al., 2020; Stokholm et al., 2023). Dieser Wirkfaktor tritt während des Baus, Betriebs und Rückbaus auf und kann die Artzusammensetzung in lokalen Ökosystemen beeinflussen; jedoch werden nicht immer invasive Arten eingetragen, denn die Schiffe für Bau-/Rückbau- und Wartungsarbeiten kommen oft aus umliegenden Gebieten mit ähnlichen ökologischen Systemen anstatt fernen Ländern und zudem können Managementpläne das Risiko der Einschleppung invasiver Arten minimieren (Gren et al., 2022).
- **Elektrische Magnetfelder:** Die elektromagnetischen Felder um die stromführenden Kabelkönnen bei marinen Säugetieren zu Verhaltensänderungen und Auswirkungen auf die Navigations- und Orientierungsfähigkeit der Arten führen, denn die meisten dieser Taxa erkennen und nutzen das geomagnetische Feld der Erde zur Orientierung und Migration (Boehlert & Gill, 2010; Taormina et al., 2018). Effekte auf marine Säuger werden bisher jedoch als unbedenklich eingestuft (BSH, 2021c; Gill & Desender, 2020; Hoffmann et al., 2000; Taormina, 2019). Dieser Wirkfaktor tritt während der Betriebsphase auf und ist mit vermutlich nur wenigen Metern um die einzelnen WEAs und Kabel räumlich begrenzt, die Kabel führen allerdings kilometerweit bis zum Festland. In der deutschen AWZ darf sich die Temperatur der obersten 20 cm des Meeresbodens maximal um 2 Kelvin erhöhen (sog. 2K-Kriterium).
- **Primäres und sekundäres Verfangen:** Meeressäuger können sich in den Verankerungsleinen von schwimmenden WEAs verfangen oder mit ihnen kollidieren (Maxwell et al., 2022). Primäres Verfangen, d. h. Meeressäuger verfangen sich in den Verankerungsleinen, wird als geringes bis mittleres Risiko je nach Verankerungstyp eingestuft (Benjamins et al., 2014). Sekundäres Verfangen, d. h. Fischernetze oder anderer Meeresmüll verheddert sich in den Verankerungsleinen, sodass sich Meeressäuger wiederum in den Fischernetzen oder dem Meeresmüll verfangen, kann das größere Risiko darstellen, ist jedoch noch weitgehend unerforscht (Harnois et al., 2015). Dieser Wirkfaktor tritt während der Betriebsphase von schwimmenden OWPs und räumlich begrenzt um die einzelnen WEAs auf; insgesamt nimmt Maxwell et al. (2022) jedoch an, dass das Risiko des Verfangens gering ist.
- **Kommerzielle Fischerei:** In Deutschland findet keine Fischerei innerhalb eines Windparks sowie keine aktive Fischerei in einem 500 m Radius um einen Windpark herum statt. Somit kann es innerhalb dieser Gebiete zu einem reduzierten Fischereidruck

kommen (sog. „Reserve effect"), welcher wiederum zu einer größeren Artenvielfalt, Artengleichmäßigkeit, Abundanz, Gleichmäßigkeit im Geschlechtsverhältnis, Körpergröße und Lebenserwartung von Fischen führen kann (Bergström et al., 2023; Berkström et al., 2021; Eklöf et al., 2023; Florin et al., 2013; Halouani et al., 2020; Howarth, 2012; Roach et al., 2018; Röckmann et al., 2007; Rufener et al., 2023; Rybicki et al., 2021; Sala & Giakoumi, 2018; Simons et al., 2015; Sköld et al., 2022). Für marine Säugetiere bedeutet das eine erhöhte Nahrungsverfügbarkeit; jedoch ist der „Reserve effect" noch wenig erforscht. Zudem ist durch den Fischereiausschluss kein Beifang von marinen Säugetieren in Fischereinetzen möglich (Kindt-Larsen et al., 2023; Moan et al., 2020). Der Effekt des Fischereiausschlusses wurde jedoch nicht in allen Fällen als signifikant eingestuft; die Intensität des Effekts (d. h. Auswirkungen auf räumlicher Skala, zeitlicher Skala und auf Populationsebene) hängt von folgenden Wirkfaktoren ab: Bedeutung des Gebiets, Größe des Gebiets, Intensität des Fischereiaufwands vor Fischereiausschluss, Verschiebung des Fischereiaufwands in andere Gebiete, Biologie der Arten, sowie abiotische Faktoren.

- **Akustische Emissionen/Druckänderungen:** Während der Bau-, Betriebs- und Rückbauphase entstehen Impuls- und Dauerschall. Dauerschall entsteht während der Bau-, Betriebs- und Rückbauphase z. B. beim Schiffsverkehr, bei Sonaren und bei Seal Scarern (Tougaard et al., 2022). Impulsschall entsteht während der Bau- und Rückbauphase z. B. bei Rammungen während OWP-Installationen, bei Airgun Schüssen während geophysikalischer Untersuchungen und bei Detonationen (Tougaard et al., 2022). Je nach Schallquelle und Abstand zur Schallquelle kann es zur Maskierung der Kommunikationssignale, zu Verhaltensänderungen, zu einer temporären Hörschwellenverschiebung, einer permanenten Hörschwellenverschiebung oder sogar zum Tod von marinen Säugetieren kommen (Dyndo et al., 2015; F. Thomsen et al., 2006; Wisniewska et al., 2018). Akustische Emissionen während des Baus und Rückbaus treten temporär auf einer räumlichen Skala von mehreren Kilometern um den OWP auf. Rose et al. (2019) beobachtete beispielsweise, dass Schweinswale während der Rammungen einen Bereich von etwa 17 km um die Rammposition verließen. Akustische Emissionen während des Betriebs treten hingegen auf einer räumlichen Skala von bis zu wenigen hundert Metern um den OWP auf (Bellmann et al., 2023; Tougaard et al., 2009). Laut Bellmann et al. (2023) können Schweinswale die OWEAs während der Betriebsphase bis zu einer Entfernung von ca. 100 m hören. Zusätzlich können während flächenvorbereitender Sprengungen von Altmunition oder Rammungen insbesondere Hohlorgane wie das Ohr, die Lunge oder das Magen-Darm-System von Säugern verletzt werden, da durch die Druckzu- und -abnahme die Luft in den Organen stark oszilliert (Siebert et al., 2022). Dieser Wirkfaktor tritt temporär während der Bau- und Rückbauphase auf einer räumlichen Skala von mehreren (hundert) Metern um die Schallquelle auf.

- **Chemische Emissionen:** Während der Bau-, Betriebs- und Rückbauphase können chemische Emissionen freigesetzt werden (durch Unfälle sowie während des Normalbetriebs) und sich in allen Schutzgütern anreichern (Farr et al., 2021; Kirchgeorg et al., 2018; Sonne, Siebert, et al., 2020). Folgen der Aufnahme dieser Substanzen können Senkung der Fertilität, Krankheiten, Erbgutschäden und Tod sein (Beineke et al., 2007; ECS/ASCOBANS/ACCOBAMS, 2013; Helm et al., 2015; Reijnders et al., 2008; Sonne, Siebert, et al., 2020, S. 21020). Dieser Wirkfaktor tritt während des Baus, Betriebs und Rückbaus auf, jedoch wird das Risiko eines Unfalls durch Managementpläne minimiert.

- **Störung und Kollision durch Schiffsverkehr:** Während der Bauphase eines OWPs kommt es zu erhöhtem Schiffsverkehr und auch während der Betriebsphase zu regelmäßigen Wartungsfahrten. Benhemma-Le Gall et al. (2023) beobachteten beispielsweise eine Abnahme der akustischen Aktivität von Schweinswalen in den 48 Stunden vor der

Rammung um bis zu 33 %. Dieser Rückgang der Vokalisation stand im Zusammenhang mit einer Zunahme der Schiffsaktivitäten und vorbereitender Aktivitäten der eigentlichen Rammarbeiten und so mit einem Anstieg des lokalen Breitband-Unterwasserschallpegels (Benhemma-Le Gall et al., 2023). Zudem können Meeressäuger mit dem Bug eines Schiffes oder der Schiffsschraube kollidieren, was zu Verletzungen oder zum Tod führen kann (IJsseldijk et al., 2022; Onoufriou et al., 2016; Schoeman et al., 2020). Dieser Wirkfaktor tritt während des Baus, Betriebs und Rückbaus auf.

4.2.4 See- und Rastvögel

Folgende Wirkfaktoren wirken während des Baus, Betriebs und Rückbaus eines OWPs auf See- und Rastvögel ein:

- **Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten:** Durch den Schiffsverkehr können invasive und pathogene Arten eingetragen werden (Jensen et al., 2023; Sonne, Lakemeyer, et al., 2020). Dieser Wirkfaktor tritt während des Baus, Betriebs und Rückbaus auf und kann die Artzusammensetzung in lokalen Ökosystemen beeinflussen; jedoch werden nicht immer invasive Arten eingetragen, denn die Schiffe für Bau-/Rückbau- und Wartungsarbeiten kommen oft aus umliegenden Gebieten mit ähnlichen ökologischen Systemen anstatt fernen Ländern, sodass das Risiko der Einschleppung für dieses Schutzgut eher vernachlässigbar ist. Jedoch sind See- und Rastvögel verglichen mit anderen Schutzgütern weniger ortstreu, sodass sich invasive und pathogene Arten im Falle einer Einschleppung schneller ausbreiten können.

- **Elektrische Magnetfelder:** Die elektromagnetischen Felder um die stromführenden Kabel können bei See- und Rastvögeln zu Verhaltensänderungen und Auswirkungen auf die Navigations- und Orientierungsfähigkeit der Arten führen, denn die meisten dieser Taxa erkennen und nutzen das geomagnetische Feld der Erde zur Orientierung und Migration (Boehlert & Gill, 2010; Taormina et al., 2018). Dieser Wirkfaktor tritt während der Betriebsphase auf und ist mit vermutlich nur wenigen Metern um die einzelnen WEAs und Kabel räumlich begrenzt, die Kabel führen allerdings kilometerweit bis zum Festland. In der deutschen AWZ darf sich die Temperatur der obersten 20 cm des Meeresbodens maximal um 2 Kelvin erhöhen (sog. 2K-Kriterium).

- **Primäres und sekundäres Verfangen:** Tauchende Arten wie Alkenvögel können sich bei ihrer Nahrungssuche in den Verankerungsleinen von schwimmenden WEAs verfangen, mit ihnen kollidieren oder in Geisternetzen und anderem Plastikmüll, welches an den Verankerungsleinen hängen bleibt, verfangen (Benjamins et al., 2014; Harnois et al., 2015; Maxwell et al., 2022). Dieser Wirkfaktor tritt während der Betriebsphase von schwimmenden OWPs und räumlich begrenzt um die einzelnen WEAs auf; insgesamt nehmen Maxwell et al. (2022) jedoch an, dass die Wahrscheinlichkeit des Verfangens gering ist.

- **Kommerzielle Fischerei:** In Deutschland findet keine Fischerei innerhalb eines Windparks sowie keine aktive Fischerei in einem 500 m Radius um einen Windpark herum statt. Somit kann es innerhalb dieser Gebiete zu einem reduzierten Fischereidruck kommen (sog. „Reserve effect“), welcher wiederum zu einer größeren Artenvielfalt, Artengleichmäßigkeit, Abundanz, Gleichmäßigkeit im Geschlechtsverhältnis, Körpergröße und Lebenserwartung von Fischen führen kann (Bergström et al., 2023; Berkström et al., 2021; Eklöf et al., 2023; Florin et al., 2013; Halouani et al., 2020; Howarth, 2012; Roach et al., 2018; Röckmann et al., 2007; Rufener et al., 2023; Rybicki et al., 2021; Sala & Giakoumi, 2018; Simons et al., 2015; Sköld et al., 2022). Für See- und Rastvögel bedeutet das eine erhöhte Nahrungsverfügbarkeit, was wiederum den Bruterfolg beeinflussen kann

(Daunt et al., 2008; Searle et al., 2023); der „Reserve effect“ ist jedoch noch wenig erforscht. Außerdem ist durch den Fischereiausschluss kein Beifang von See- und Rastvögeln in Fischereinetzen möglich. Der Effekt des Fischereiausschlusses wurde nicht in allen Fällen als signifikant eingestuft; die Intensität des Effekts (d. h. Auswirkungen auf räumlicher Skala, zeitlicher Skala und auf Populationsebene) hängt von folgenden Wirkfaktoren ab: Bedeutung des Gebiets, Größe des Gebiets, Intensität des Fischereiaufwands vor Fischereiausschluss, Verschiebung des Fischereiaufwands in andere Gebiete, Biologie der Arten, sowie abiotische Faktoren.

- **Akustische Emissionen:** Aktuell wird am Hörvermögen von See- und Rastvögeln geforscht, die scheinbar ebenfalls die Betriebsgeräusche, sowie die akustischen Emissionen beim Bau und Rückbau von OWPs wahrnehmen können (Bellmann et al., 2023; Mooney et al., 2019). Inwiefern See- und Rastvögeln ihr Verhalten aufgrund von akustischen Emissionen beim Bau, Betrieb und Rückbau von OWPs verändern, ist aber noch unerforscht.

- **Chemische Emissionen:** Während der Bau-, Betriebs- und Rückbauphase können chemische Emissionen freigesetzt werden (durch Unfälle sowie während des Normalbetriebs) und sich in allen Schutzgütern anreichern (Farr et al., 2021; Kirchgeorg et al., 2018; Sonne, Siebert, et al., 2020). Beispielsweise kann es während der Bau- und Rückbauphase zu einem temporären Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen kommen, deren Anreicherung in allen Tierarten unter anderem die Fertilität senken kann (Sonne, Siebert, et al., 2020). Dieser Wirkfaktor tritt während des Baus, Betriebs und Rückbaus auf, jedoch wird das Risiko eines Unfalls durch Managementpläne minimiert.

- **Störung und Kollision durch Schiffsverkehr:** Während der Bauphase eines OWPs kommt es zu erhöhtem Schiffsverkehr und auch während der Betriebsphase zu regelmäßigen Wartungsfahrten. Alkenvögel reagieren beispielsweise auf sich nähernde Schiffe häufig durch Abtauchen, gelegentlich auch durch Auffliegen (Fliessbach et al., 2019). Stern- und Prachttaucher hingegen zeigen eine relative hohe Fluchtdistanz von mehreren hundert Metern bis Kilometern gegenüber sich nähernden Schiffen (Bellebaum et al., 2006; Fliessbach et al., 2019; Garthe et al., 2004), und in Gebieten mit hohem Schiffsaufkommen wurden stark reduzierte Dichten nachgewiesen (Burger et al., 2019). Bei mausernden Eiderenten wurde eine durchschnittliche Fluchtdistanz von 771 m zu kleinen Booten beobachtet (Dehnhard et al., 2020). Die Beleuchtung an Schiffen kann außerdem das Kollisionsrisiko mit Vögeln erhöhen (Coleman et al., 2022). Dieser Wirkfaktor tritt während des Baus, Betriebs und Rückbaus auf einer räumlichen Skala von mehreren hundert Metern bis zu mehreren Kilometern um den OWP auf.

- **Kollisionsrisiko:** See- und Rastvögel können mit den WEA-Strukturen kollidieren, was zur Verletzung oder zum Tod der Tiere führen kann. Artspezifische Faktoren (morphologische Merkmale, Sinneswahrnehmung, Verhalten der Vögel, Meideverhalten, Abundanz der Vögel, Phänologie), standortspezifische Faktoren (Merkmale der Umgebung, Flugrouten, Nahrungsverfügbarkeit, Wetter) und Windpark-spezifische Faktoren (Merkmale der Turbine, Sichtbarkeit der Rotorblätter, Windparkkonfiguration, Windparkbeleuchtung) beeinflussen das Kollisionsrisiko (Marques et al., 2014). Ob das Licht beispielsweise kontinuierlich oder blinkend leuchtet und welche Farbe das Licht hat, beeinflusst, wie stark Vögel auf See von den WEAs angezogen werden und somit das Kollisionsrisiko (Rebke et al., 2019). Generell wird bei einer Höhe der Rotorblätter von etwa 20 bis 150 m über Meeresspiegel angenommen, dass beispielsweise Seeschwalben ein moderates Kollisionsrisiko haben, und Möwen, Singvögel und Basstölpel ein potentiell hohes Kollisionsrisiko haben (Brabant et al., 2015; Degraer et al., 2019; Furness et al., 2013; Gaertner et al.,

2020; Johnston et al., 2014). Das Kollisionsrisiko ist jedoch sehr stark wetterabhängig und kann variieren. Verglichen dazu hat die heutige Referenzanlage IEA_15MW_240_RW eine Höhe der Rotorblätter von etwa 30 bis 270 m über Meeresspiegel (Gaertner et al., 2020), aber aufgrund der Flughöhe dieser Arten wird ein ähnliches Kollisionsrisiko erwartet (Johnston et al., 2014). Empirische Daten zu Kollisionen auf See und systematische Untersuchungen fehlen jedoch bisher, und Risikoeinschätzungen sind zurzeit somit rein theoretischer Natur. Oft werden hierfür Collision Risk Models (CRM) berechnet: Brabant et al. (2021) schätzten beispielsweise 761 Kollisionen von Singvögeln für alle belgischen OWPs im Herbst 2019 während Nächte mit intensivem Vogelzug. Derartige Modelle sind jedoch noch mit Unsicherheiten behaftet (Brabant et al., 2021). Dieser Wirkfaktor tritt während der Betriebsphase auf.

- **Vertreibungswirkung/Barriere-Effekt:** Die sich bewegenden Rotorblätter können durch die Kulissenwirkung sowie die Drehbewegungen zu einem Vertreibungseffekt und damit zu einem funktionalem Habitatverlust von Vögeln führen, d. h. ehemalige Ruhe- und Nahrungsgründe können nach dem Bau von OWPs temporär oder dauerhaft ganz oder nur teilweise gemieden werden (Fox & Krag Petersen, 2019; Vilela et al., 2021). Beispielsweise zeigen **Basstölpel** ein konsistentes und ausgeprägtes Meide-/Vertreibungsverhalten, bei vielen **Möwen**arten wurde eine schwache Anziehung zu OWPs festgestellt und **Seeschwalben** reagieren kaum auf OWPs bzw. bei ihnen wurde Anziehungs- und Meideverhalten über verschiedene Studien hinweg ungefähr gleich beobachtet und **Singvögel** zeigen meist eine schwache Meidung von OWP-Gebieten zeigen, aber werden auch während Nächten mit intensivem Vogelzug weiterhin regelmäßig in OWP-Gebieten beobachtet (Brabant et al., 2015; Dierschke et al., 2016; Krijgsveld, 2014). Der Effekte der Vertreibungswirkung hat im Allgemeinen jedoch einen deutlich größeren Effekt auf See- und Rastvögel verglichen mit den Zugvögeln, da Rastvögel bei einer Meidungsreaktion potentielles Habitat verlieren. **Kormorane** werden stark angezogen von OWPs; **Sturm- und Heringsmöwen** werden schwach angezogen von OWPs; **Dreizehenmöwen** zeigen Anziehungs- und Meideverhalten über verschiedene Studien hinweg ungefähr gleich; **Eisenente, Trauerente, Tordalk** und **Trottellumme** meiden OWPs stark (Dierschke et al., 2016; Fox & Krag Petersen, 2019; Marques et al., 2021; Peschko, Mendel, et al., 2020; Peschko et al., 2024). Störempfindliche Arten wie **Pracht-** und **Sterntaucher** sowie **Trottellumme** gehören zu den von Habitatverlust durch den Betrieb von OWPs am stärksten betroffenen Arten: Mehrere Studien zeigen, dass die Tiere die OWP-Flächen meist komplett meiden und sogar Meideradien von über 10 km zur äußeren Windparkgrenze aufweisen (Dierschke et al., 2016; Garthe et al., 2018, 2023; Heinänen et al., 2020; Mendel et al., 2019; Vilela et al., 2020). Wenn sich OWPs innerhalb der Migrationsrouten, zwischen oder in verschiedenen Nahrungs- und/oder Rasthabitaten befinden, kann es dementsprechend zu Barriereeffekten kommen. Die Trottellummen-Dichte war beispielsweise im Herbst in einem Radius von 19,5 km um die in Betrieb befindlichen OWFs deutlich reduziert (Peschko et al., 2024). Wendet man diese Störungsdistanz auf die aktuellen Installationspläne der OWE in der deutschen AWZ an, wären etwa 70 % der deutschen Nordsee betroffen, und schätzungsweise 68 % der Trottellummen in der deutschen Nordsee würden einen Lebensraumverlust erleiden (Peschko et al., 2024). Aber auch bei beispielsweise **Meeresenten** wurde eine Meidung von Windparkflächen festgestellt (Dierschke et al., 2016; Dierschke & Garthe, 2006; Garthe & Hüppop, 2004; Petersen et al., 2011). Dieser Wirkfaktor tritt während der Betriebsphase auf einer räumlichen Skala von bis zu über 10 km um den OWP auf.

4.3 Überblick technischer Optionen zur Minderung negativer Umweltwirkungen bei Bau, Betrieb und Rückbau von OWPs

Jede Form menschlicher Aktivität (beispielsweise Offshore-Windenergie; siehe Abschnitt 4.1.4) in der Meeresumwelt führt zu Auswirkungen auf die einzelnen Schutzgüter. Dieses Kapitel soll einen Überblick über die technischen Optionen zur Minderung der negativen Umweltauswirkungen bei Bau, Betrieb und Rückbau von OWPs geben. Dieser Überblick erfasst nur technische Maßnahmen, somit keine Managementmaßnahmen oder gesetzlich unveränderbare Verfahren, wie z. B. die Verlegetiefe von Seekabeln (2K-Kriterium). Dieses Kapitel soll als Basis dienen, um kumulative Effekte bei einer Mehrfachnutzung mit der Landes- und Bündnisverteidigung (Abschnitt 6.5.4), Fischereiforschung (Abschnitt 7.4.4), Photovoltaik (Abschnitt 8.5.1.4), Wellenenergie (Abschnitt 8.5.2.4) und Biokraftstoff aus Algen (Abschnitt 8.5.3.4) anhand von technischen Optionen zu verringern.

Alle aufgelisteten Punkte sind unterschiedlich gut erforscht und unterschiedlich effizient in der Minderung der Auswirkungen von negativen Effekten durch OWPs auf die Meeresumwelt. Außerdem können diese Maßnahmen wiederum zu einer Zunahme anderer potentieller Belastungen für Meeresorganismen und Lebensräume führen. Daher werden zur jeweiligen technischen Option ebenfalls die Funktionsweise, Effektivität und Nachteile benannt.

4.3.1 Technische Optionen, um Schallemissionen während der Bau-, Betriebs- und Rückbauphase zu reduzieren

Um die Schallemissionen während der Bau-, Betriebs- und Rückbauphase zu reduzieren, wurde bereits in folgenden Bereichen geforscht: (1) Alternative Fundamentarten, (2) veränderte Gründungsmethoden, (3) externe Lärmminderungssysteme, (4) Senkung der akustischen Emissionen durch Schiffsverkehr und (5) angepasste Betriebs- und Wartungsmethoden. Die verschiedenen Optionen werden nach aktuellem Stand in Tabelle 9 mit ihrer Funktionsweise, dem Stand der Entwicklung, der Effektivität und den Nachteilen aufgelistet und im Folgenden erläutert.

Bisher wurden „Monopiles“ als häufigste **Fundamentart** in OWPs eingesetzt. Alternative Fundamentarten zu Monopiles, welche ohne Rammung und daraus resultierende Schallemissionen installiert werden können, sind Schwerkraftfundamente, die in flacher See und bei entsprechend tragfähigem Boden eingesetzt werden können (Esteban et al., 2019). Als weitere Alternative könnten schwimmende Fundamente eingesetzt werden, welche sich für tiefere Gewässer eignen. Sie benötigen allerdings große Verankerungssysteme (Degraer et al., 2020). Jacket-Gründungen, nutzen eine fachwerkartige Unterstruktur, die auf meist 4 kleineren Monopiles im Boden verankert ist. Dies Pfähle sind deutlich kleiner als die vorab benannten Monopiles und verursachen daher geringere Schallbelastungen bei der Verankerung (durch Rammschläge) im Meeresboden. Die Möglichkeit des Einsatzes der Fundamentarten ist durch die jeweiligen Standortbedingungen begrenzt.

Die bisher gängigste **Gründungsmethode**, um die Monopiles eines OWPs in den Meeresboden zu treiben, ist die Impulsrammung mithilfe eines hydraulischen Hammers. Je größer der Monopile und je stärker die Wanddicke wird, desto mehr Energie muss für den Vorgang eingesetzt werden und desto mehr Schallemissionen entstehen. Mit alternativen Gründungsmethoden kann der erzeugte Impulsschall reduziert werden (Bellmann et al., 2020). Jedoch kann beispielsweise bei der Vibrationsrammung auch ein Vibrationshammer anstatt eines hydraulischen Hammers eingesetzt werden, was den SEL um 10 bis 20 dB bei Wassertiefen von unter 25 m reduziert (Koschinski & Lüdemann, 2020). Außerdem kann beim PULSE-Verfahren (Piling Under Limited Stress Equipment, IQIP, 2021) ein Zusatzgerät zwischen Rammhammer und Fundament positioniert werden, um mit zwei Hydraulikkolben den Schlag abzudämpfen. Mit dieser Technik wird

der SPL nach Modellrechnungen um 9 dB reduziert (Koschinski & Lüdemann, 2020). Andere Rammverfahren werden derzeit getestet: Fundamentbohrungen, bei der anstatt des hydraulischen Hammers Bohrungen durchgeführt werden, oder BLUE Piling, bei dem anstatt eines metallischen Fallgewichts eine große Wassermasse über einen langen Zeitraum einwirkt, um eine Druckkraft auf den Pfahl zu erzeugen.

Lärmminderungssysteme werden bei den Rammungen während des Baus eines OWPs eingesetzt, um das in Deutschland vorgeschriebene doppelte Schallschutzkriterium einzuhalten (BMUV, 2013; Koschinski & Lüdemann, 2013): Der Schallbelastungspegel für ein Einzelschallereignis SEL_{05} muss in einer Entfernung von 750 m zu Rammstelle unter 160 d B re 1 μPa^2 s und der gepaarte Spitzenschalldruckpegel (L_{Peak}) muss in einer Entfernung von 750 m unter 190 dB re 1 µPa liegen. Um diese Grenzwerte einzuhalten, sind die drei derzeit am meisten genutzten Lärmminderungssysteme das Blasenschleiersystem, der Hydroschalldämpfer und das IHC-NMS, welche auch oft in Kombination genutzt werden (Bellmann et al., 2020).

Das Blasenschleiersystem ist eines der am besten untersuchten Lärmminderungssysteme unter Offshore-Bedingungen und hat sich im Laufe der Zeit immer weiterentwickelt (Einfacher Kleiner Blasenschleier, Einfacher Großer Blasenschleier, Doppelter Großer Blasenschleier, erweiterter Doppelter Großer Blasenschleier), wobei mittlerweile der Doppelte Große Blasenschleier oder der erweiterte Doppelte Große Blasenschleier eingesetzt werden. Hier befindet sich ein perforierter Rohrring auf dem Meeresboden und umgibt die Gründungsstruktur. Kompressoren blasen Luft in den perforierten Düsenschlauch ein, aus dem die Blasen aufsteigen und einen Vorhang um die Gründungsstruktur bilden. Beim Doppelten Großen Blasenschleier sind zwei Blasenschleier/Düsenschläuche hintereinander angeordnet. Der Doppelte Große Blasenschleier reduziert den SEL bei einer Wassertiefe von 40 m und einem Pile-Durchmesser von 8 m um 8-18 dB (Koschinski & Lüdemann, 2020).

Anstelle von freien Gasblasen wie beim Blasenschleiersystem werden beim Hydroschalldämpfer (HSD) elastische, luftgefüllte Ballons oder PE-Hartschaumelemente zur Reduzierung der Schallemissionen eingesetzt und an einem Netz um das Fundament abgesenkt. Hier wird der SEL im Durchschnitt um 10-13 dB reduziert (Koschinski & Lüdemann, 2020).

Der Einsatz eines Kofferdamm ist eine weitere Art von Schallschutzsystem. Hier wird eine Stahlkonstruktion, bestehend aus einem inneren und einem äußeren Stahlrohr, über den Gründungspfahl gestülpt. Bei einer besonderen Art dieses Schallschutzsystems – dem IHC-NMS, einem Schallschutzsystem (Noise Mitigation System, NMS) der Firma IHC (Industriële Handels Combinatie) Merwede B.V., NL) – wird der Raum zwischen dem inneren und dem äußeren Stahlrohr mit Luft gefüllt und zusätzlich ein pfahlnaher (kleiner) Blasenschleier zwischen der Stahlkonstruktion und dem Gründungspfahl installiert. Mit dieser Technik wird der SEL um 13-16 dB reduziert (Koschinski & Lüdemann, 2020).

Mit Hilfe eines Doppelpfahls kann der SEL um 16 dB bei einer Wassertiefe von 10 m reduziert werden (Koschinski & Lüdemann, 2020). In diesem Fall besteht der Doppelpfahl aus zwei flexibel miteinander verbundenen Stahlpfählen, zwischen denen ein Luftspalt besteht. Ein hydraulischer Schlaghammer schlägt nur auf den Innenpfahl ein, der den angebundenen Außenpfahl in das Sediment zieht.

Alle hier erwähnten Studien beruhen auf bisher installierten Monopiles von bis zu 8 m Durchmesser (Koschinski & Lüdemann, 2020): Für derzeit in Planung befindliche Windparks mit 15 MW-Turbinen werden Monopiles mit einem einen Durchmesser von 9 bis 11 m eingeplant. Schon jetzt werden Anlagen für Monopiles mit einen Durchmesser von bis zu 15 m geplant (HANSA International Maritime Journal, 2023; Koschinski & Lüdemann, 2020), sodass bei deren Rammung höhere Spitzenschalldruck- und Schallbelastungspegel erwartet werden (Bellmann et al., 2018). Daher besteht weiterer Forschungsbedarf und ggf. weiterer Handlungsbedarf, um die

heutigen Lärmminderungssysteme weiterzuentwickeln und zu optimieren (Bellmann et al., 2020).

Die **Senkung der akustischen Emissionen durch Schiffsverkehr** kann durch verschieden Ansätze erreicht werden. Solarelektrische Schiffe können akustische Emissionen im tieffrequenten Bereich reduzieren (Parsons et al., 2020)[182]. Zudem können passive Isolationshalterungen (Verwendung auf militärischen und Forschungsschiffen), aktive/hybride Isolationshalterungen (Verwendung auf militärischen Schiffen) oder Mineralwolle (Verwendung in der Schifffahrt) zur Schalldämmung des Maschinenlärms verwendet werden (T. Smith & Rigby, 2022). Diese Technologien sind bereits jetzt gut erforscht und weit verbreitet. Auch wird an nichtlinearen isolierenden Halterungen, Aerogelen und akustischen schwarzen Löchern geforscht, um den Schall des Maschinenlärms in der maritimen Industrie zu dämmen (T. Smith & Rigby, 2022). Durch den Propeller verursachter Lärm ist jedoch die relevanteste Lärmquelle: Um Propeller-Kavitation und nicht-kavitierende Propellergeräusche zu senken, können Wirbelgeneratoren, Propeller-Nabenabdeckungen und gezackte Vorder-/Hinterkanten eingesetzt werden (T. Smith & Rigby, 2022). Außerdem wird an verschiedenen anderen Technologien geforscht, u. a. Winglets, Einspritzung von Wasser/Polymeren, flexibles Gewinde und raue Spitzen/Kanten (T. Smith & Rigby, 2022).

Zusätzlich kann mit Hilfe von **angepassten Betriebs- und Wartungsmethoden** die Präsenz und somit auch die Lärmbelästigung durch Schiffe reduziert werden. Beispielsweise wird an den Einsatz von sogenannten „Digital Twins“, also ein virtuelles Abbild eines Objekts oder Systems aus der realen Welt, für eine virtuelle Betrachtung der OWEA und eine vorausschauende Instandhaltungsstrategie geforscht. Auch ist der Einsatz von Drohnen zukünftig vorstellbar, um die Emissionen durch Wartungsschifffahrten zu senken. Die Möglichkeiten zur Wartung und Reparatur werden aktuell erforscht und weiterentwickelt, inwieweit Drohnen Menschen bei der Reparatur ersetzen können und inwieweit Drohnen Menschen und Material für die Wartung und Reparatur transportieren können.

[182] “At frequencies below 500 Hz, spectral levels of the electric ferry at a range of <5 m were 10–25 dB lower than those of the conventional ferry […].”

Tabelle 9: **Technische Optionen zur Lärmminderung: Alternative Fundamentarten, alternative Gründungsmethoden, Lärmminderungssysteme, angepasste Betriebs- und Wartungsmethoden.** Nur Rammverfahren und Fundamenttypen, welche die akustischen Emissionen minimieren können, sind aufgeführt. Die angegebene Effektivität kann in anderen Umgebungen und bei größeren Durchmessern oder OWEAs abweichen.

Typ	Funktionsweise	Stand der Entwicklung	Effektivität in der jeweiligen Studie	Nachteile	Quelle
Fundamentarten					
Schwimmfundamente	Verschiedene Plattformtypen wie Kahn-, Spierenboje, halbtauchend oder Plattform mit Spannbeinen	Im kommerziellen Einsatz		Große Verankerungssysteme nötig; Kollisionen/Verfangen von Tieren möglich; attraktiv für invasive Arten von ankommenden Schiffen	Koschinski & Lüdemann (2013), Jiang (2021), Degraer et al. (2020), Koschinski & Lüdemann (2020)
Schwerkraftfundamente	Fundamente aufgrund des hohen Gewichtes von 1500 bis 4500 Tonnen auf Meeresboden	Im kommerziellen Einsatz		Keine Massenproduktion möglich; große Produktions- und Lagerhalle nötig; hohe Tragfähigkeit des Bodens nötig begrenzte Rückbaufähigkeit	Koschinski & Lüdemann (2013), Thomsen (2014), Esteban et al. (2019), Koschinski & Lüdemann (2020)
Suction Buckets	Gründungsart aus nach unten geöffnetem Stahlzylinder, der auf den Meeresboden gesetzt und ausgepumpt wird	Im kommerziellen Einsatz		Verwendung auf Sandböden, Ton und andere homogene wassergesättigte Sedimente beschränkt; Weiterentwicklung möglicherweise erforderlich	Koschinski & Lüdemann (2013), Koschinski & Lüdemann (2020), Jiang (2021)
Gründungsmethoden					
Vibrationsrammung	Vibrationshammer anstatt hydraulischen Hammers	Entwicklungsphase: Forschungsprojekt VISSKA im deutschen	ΔSEL: 10-20 dB (bei Wassertiefe <25 m)	Derzeit auf die oberen Meter beschränkt, da die derzeitigen Bemessungsrichtlinien für den Nachweis	ISD (2007), Koschinski & Lüdemann (2013), BSH & BMU

Typ	Funktionsweise	Stand der Entwicklung	Effektivität in der jeweiligen Studie	Nachteile	Quelle
		OWP „Kaskasi“ (Projektabschluss 2024)		der axialen Tragfähigkeit auf Rammpfähle beschränkt sind; schwierig bei festerem Sediment	(2014), Koschinski & Lüdemann (2020)
Impulsverlängerung durch Änderung des hydraulischen Hammers (PULSE)	Zwischen Kolben und Pfahl werden Pfahlkissen verwendet, um die Rammkraft zu verringern und gleichzeitig über einen längeren Zeitraum auf den Pfahl einzuwirken.	Im kommerziellen Einsatz	ΔSEL: 9 dB (durch Modellierung angenommen)	Noch keine Ergebnisse zur Effektivität im kommerziellen Einsatz veröffentlicht	IQIP (2021), Koschinski & Lüdemann (2020)
Fundamentbohrungen	Bohrungen anstatt Rammung	Entwicklungsphase	derzeit Tests; erfolgreicher Versuch an Land	Bisher nicht bereit für Standardeinsatz; Kostensenkung und größere Toleranz gegenüber Offshore-Wetterbedingungen nötig	BSH & BMU (2014), Koschinski & Lüdemann (2020)
BLUE Piling	Einwirkung einer großen Wassermasse über einen langen Zeitraum, um eine Druckkraft auf den Pfahl zu erzeugen, anstatt eines metallischen Fallgewichts	Entwicklungsphase: Beim Test im Sommer 2018 konnte die Funktion des BLUE 25M Hammer-Prototyps nachgewiesen werden.	ΔSEL: 19-24 dB (bei Wassertiefe von 22,4 m)	Bisher nur als Prototyp getestet	Koschinski & Lüdemann (2020)
Lärmminderungssysteme					
Einfacher Kleiner Blasenschleier	Perforierter Düsenschlauch, aus dem Luftblasen aussteigen, direkt um Fundament	Nicht mehr im kommerziellen Einsatz	ΔSEL: 4-14 dB	Geringeres Minderungspotential in tiefen Frequenzen	Wilke et al. (2012), Davy (2014)
Einfacher Großer Blasenschleier	Perforierter Düsenschlauch, aus dem Luftblasen aussteigen, in Abstand um Fundament	Nicht mehr im kommerziellen Einsatz	ΔSEL: 7-15 dB (bei Wassertiefe von 25 bis 40 m und Durchmesser Pile von 8 m)	Geringeres Minderungspotential in tiefen Frequenzen	Lucke et al. (2011), Bellmann & Remmers (2013), Davy

Typ	Funktionsweise	Stand der Entwicklung	Effektivität in der jeweiligen Studie	Nachteile	Quelle
					(2014), Dähne et al. (2017), Bellmann (2018, 2020), Koschinski & Lüdemann (2020)
Doppelter Großer Blasenschleier	Zwei perforierte Düsenschläuche, aus denen Luftblasen aufsteigen, in Abstand um Fundament	Im kommerziellen Einsatz	ΔSEL: 8-18 dB (bei Wassertiefe von 25 bis 40 m und Durchmesser Pile von 8 m)	Geringeres Minderungspotential in tiefen Frequenzen (physikalisch bedingt); Schallminderung kann je nach Meeresgebiet und vorherrschender Strömung richtungsabhängig ausfallen	Davy (2014), Bellmann (2018; 2020), Koschinski & Lüdemann (2020)
Doppelpfähle/ Doppeldornpfähle	Der Doppelpfahl besteht aus zwei flexibel miteinander verbundenen Stahlpfählen, zwischen denen ein Luftspalt besteht. Ein hydraulischer Schlaghammer schlägt nur auf den Innenpfahl ein, der den angebundenen Außenpfahl in das Sediment zieht.	Entwicklungsphase: 2014 und 2015 wurden zwei Testpfähle in Originalgröße an zwei Standorten mit unterschiedlichen Bodenarten in küstennaher Umgebung erfolgreich gerammt	ΔSEL: 16 dB (bei Wassertiefe von 10 m)	Bisher nur in Küstennähe getestet	Koschinski & Lüdemann (2020)
Kofferdamm/IHC-NMS	Entwässerte Hülle um Pfahl und somit Rammung in Luft anstatt Wasser	Im kommerziellen Einsatz	ΔSEL: 13-17 dB (bei Wassertiefe von bis 40 m und Durchmesser Pile von 8 m)	Größe und Masse (Logistik), Bodenkupplungen, Anwendungen in variablen Wassertiefen?	Davy (2014), Bellmann et al. (2020)
Hydroschalldämpfer (HSD)	Elastische, luftgefüllte Ballons oder PE-Hartschaumelemente an einem Netz um Fundament abgesenkt	Im kommerziellen Einsatz	ΔSEL: 10-12 dB (bei Wassertiefe von bis 40 m und Durchmesser Pile von 8 m)	Anpassungen für Durchmesser Pile von über 10 m notwendig	Lee et al. (2012), Davy (2014), Bellmann (2018; 2020),

Typ	Funktionsweise	Stand der Entwicklung	Effektivität in der jeweiligen Studie	Nachteile	Quelle
					Koschinski & Lüdemann (2020)
Helmholtz Resonatoren (AdBm-NAS)	Platten mit tauchfähigen, luftgefüllten Helmholtz-Resonatoren, die das Fundament während der Rammung umschließen	Entwicklungsphase	ΔSEL: <10 dB bis <20 dB	Starke Variabilität bei der Effektivität; noch in der Entwicklungsphase	Degraer et al. (2019), Wochner (2019), Tsouvalas (2020)
BEKA shells	Stahlrohr über Gründungspfahl gestülpt, Doppelwand mit schallabsorbierendem Verbundmaterial, zusätzlicher geschlossener Blasenschleier	Im kommerziellen Einsatz	ΔSEL: 6-8 dB	Effektivität geringer als bei anderen Lärmminderungsystemen	Wilke et al. (2012)
HydroNAS	Leichtes, aufblasbares Gewebe, das im Inneren eingespannt ist, um eine kontinuierliche Luftsäule zu bilden, die das Fundament vom Meeresboden bis zur Oberfläche umgibt	Im kommerziellen Einsatz	ΔSEL: 25 dB (Herstellerangabe)	Noch keine Ergebnisse zur Effektivität im kommerziellen Einsatz veröffentlicht	Koschinski & Lüdemann (2020), Tsouvalas (2020)
IHC-NMS & einfacher Großer Blasenschleier	Kombination aus IHC-NMS und BBC	s. o.	ΔSEL: 17-18 dB (bei Wassertiefe von 40 m und Durchmesser Pile von 8 m)	Siehe jeweilige Methode	Davy (2014), Bellmann (2018; 2020)
IHC-NMS & doppelter Großer Blasenschleier	Kombination aus IHC-NMS und DBBC	s. o.	ΔSEL: 19-22 dB (bei Wassertiefe von 40 m und Durchmesser Pile von 8 m)	Siehe jeweilige Methode	Davy (2014), Bellmann (2018; 2020)
Hydroschalldämpfer & einfacher Großer Blasenschleier	Kombination aus HSD und BBC	s. o.	ΔSEL: 15-20 dB (bei Wassertiefe von 30 m und Durchmesser Pile von 8 m)	Siehe jeweilige Methode	Bellmann (2018; 2020)

Typ	Funktionsweise	Stand der Entwicklung	Effektivität in der jeweiligen Studie	Nachteile	Quelle
Hydroschalldämpfer & doppelter Großer Blasenschleier	Kombination aus HSD und DBBC	s. o.	ΔSEL: 18-19 dB (bei Wassertiefe von 40 m und Durchmesser Pile von 8 m)	Siehe jeweilige Methode	Bellmann (2018; 2020)
Schiffsverkehr					
Solarelektrische Schiffe	Schiffe, die die Kraft der Sonne nutzen und damit Antriebsenergie generieren	Im kommerziellen Einsatz	Je nach Schiffstyp und Geschwindigkeit	Reduzierung der akustischen Emissionen im tieffrequenten Bereich	Parsons et al. (2020)
Schalldämmung des Maschinenlärms	- Passive Isolationshalterungen (Verwendung auf militärischen und Forschungsschiffen; K) - Aktive/hybride Isolationshalterungen (Verwendung auf militärischen Schiffen; K) - Mineralwolle (Verwendung in der Schifffahrt; K) - Nichtlineare isolierende Halterungen (E) - Aerogele (E) - Akustischen schwarzen Löchern (E)	Je nach System: Entwicklungsphase (E) oder im kommerziellen Einsatz (k)	Je nach System, Schiffstyp und Geschwindigkeit	Durch den Propeller verursachter Lärm ist erheblich relevanter als Maschinenlärm	Smith & Rigby (2022)
Schalldämmung der Propeller-Kavitation und nicht-kavitierender Propellergeräusche	- Wirbelgeneratoren (K) - Propeller-Nabenabdeckungen (K) - Gezackte Vorder-/Hinterkanten (K) - Winglets (E) - Einspritzung von Wasser/Polymeren (E) - Flexibles Gewinde (E) - Raue Spitzen/Kanten (E)	Je nach System: Entwicklungsphase (E) oder im kommerziellen Einsatz (k)	Je nach System, Schiffstyp und Geschwindigkeit	Effektivität unterscheidet sich je nach System, Schiffstyp und Geschwindigkeit; teils noch in der Entwicklungsphase	Smith & Rigby (2022)

Typ	Funktionsweise	Stand der Entwicklung	Effektivität in der jeweiligen Studie	Nachteile	Quelle
Wartungsmethoden					
Physikalische Technologien zur Wartung und Reparatur	Roboter, Drohnen, autonome Schiffe und Soft-Sensoren für Wartungs- und Reparaturarbeiten	Entwicklungsphase	Senkung der Emissionen durch Verringerung des Schiffsverkehrs, Senkung der Inspektionskosten, Erhöhung der jährlichen Energieproduktion	Möglichkeiten zur Wartung und Reparatur werden noch erforscht und entwickelt	Kabbabe Poleo et al. (2021), Rinaldi et al. (2021), Shafiee et al. (2021), Nordin et al. (2022)
Digitale Technologien zur Wartung und Reparatur	Digital Twins für virtuellen Besuch der OWEA und vorausschauende Instandhaltungsstrategie	Entwicklungsphase: EU-Projekt MooringSense	EU-Projekt MooringSense: Digital Twin des Verankerungssystems, Ziel ist Floating Offshore Wind-Betriebskosten um 10-15 % senken und jährliche Energieproduktion um 2-3 % steigern; ebenfalls Forschung an OWEAs mit Bodenfundamenten	Möglichkeiten zur Wartung und Reparatur werden noch erforscht und entwickelt	Rinaldi et al. (2021), Sivalingam et al. (2018)

4.3.2 Technische Optionen zur Minderung des Kollisionsrisikos von Vögeln

Über das Kollisionsrisiko von Zugvögeln sowie von See- und Rastvögeln mit OWEAs ist bisher noch wenig bekannt, sodass auch technische Optionen, um das Risiko zu senken, noch wenig erforscht sind. Generell gibt es folgende Möglichkeiten, um das Kollisionsrisiko von Vögeln zu reduzieren: (1) Alternative OWP-Designs, (2) angepasste WEA-Designs (inklusive Abschaltung) und (3) angepasste Lichtemissionen von WEAs. Die verschiedenen Optionen werden nach aktuellem Stand in Tabelle 10 mit ihrer Funktionsweise, Effektivität und Nachteilen aufgelistet und im Folgenden erläutert. Einige dieser innovativen Ansätze scheinen vielversprechend zu sein, jedoch fehlen oft noch unabhängige Studien zur Effektivität.

Mithilfe eines **alternativen OWP-Designs** kann der Einsatz von beispielsweise größeren und weniger Turbinen innerhalb eines OWPs dazu führen, das Kollisionsrisiko zu senken (Johnston et al., 2014; Krijgsveld et al., 2009) – inwiefern diese Option jedoch effektiv ist, hängt von den Arten auf der OWP-Fläche und deren Flughöhenverteilung ab und muss daher auf der jeweiligen OWP-Fläche geprüft werden. Der Einsatz akustischer Vergrämungsgeräte könnte zusätzlich Vögel von den Anlagen fernhalten (Dorey et al., 2019), hierbei ist jedoch ein Gewöhnungseffekt der Vögel an die akustischen Emissionen sowie die ungewollte Vertreibung aus Nahrungshabitaten oder aber eine geringe Effektivität der akustischen Vergrämung möglich. Zudem entstehen akustische Emissionen und somit eine sogenannte Lärmverschmutzung: Fallow et al. (2013) nutzten beispielsweise Rufe in einem Frequenzbereich von 8-11 kHz mit einer Elementamplitude von 57 dB bei 8 m Distanz zur Schallquelle. Auch die visuelle Vergrämung durch beispielsweise (ultra-) violettes Licht scheint in ersten Pilotstudien erfolgsversprechend; Baasch et al. (2022) berechneten beispielsweise eine Reduktion der Kollisionen um 88 %. Weitere Forschung sollte die artspezifische Effektivität dieser technischen Option untersuchen.

Auch die Höhe des unteren Rotordurchlaufs kann einen großen Faktor auf die Anzahl kollisionsgefährdeter Vögel haben, da bekannt ist, dass in den unteren Höhenschichten eine höhere Vogelkonzentration auftritt. In einer Studie im OWP „Neart Na Gaoithe“ konnte dieser Zusammenhang gezeigt werden: Wenn der untere Rotordurchlauf vergrößert wurde, also das **WEA-Design** angepasst wurde, wurde das Kollisionsrisiko gesenkt (EDF Renewables & Neart na Gaoithe Offshore Wind, 2012). Basstölpel haben beispielsweise während der aktiven Nahrungssuche eine mittlere Flughöhe von 27 m, weshalb der zulässige Mindestabstand des unteren Rotordurchlaufs an Standorten mit hohem Kollisionsrisiko von 22 auf 30 m über dem Meeresspiegel erhöht wurde (Cleasby et al., 2015). Auch für Arten wie Enten und Möwen kann durch die Vergrößerung des unteren Rotordurchlaufs das Kollisionsrisiko gesenkt werden (Borkenhagen et al., 2018; Dirksen et al., 2007). Der optimale Rotordurchlauf sollte jedoch ortsspezifisch anhand der Flughöhenverteilung analysiert werden, um zu beurteilen, ob durch diese technische Option das Kollisionsrisiko gesenkt werden kann. Außerdem kann die Rotorfläche verringert werden, denn insbesondere die Blattbreite und der Radius des Rotors beeinflussen die Anzahl der vorhergesagten Kollisionen (EDF Renewables & Neart na Gaoithe Offshore Wind, 2012). Es gibt auch Hinweise, dass zumindest für einzelne Arten farbige Muster auf der WEA oder ultra-violett-reflektierende Farbe, sowie angestrahlte WEAs das Kollisionsrisiko senken können (Hoge, 2021; Marques et al., 2014; G. Martin & Banks, 2023). Allerdings ist die Effektivität dieser Maßnahmen derzeit nicht ausreichend belegt, wird aber aktuell in verschiedenen Projekten wie beispielsweise RWEs Onshore-Windpark Eemshaven getestet.

Zudem können einzelne Turbinen bei Erkennung eines hohen Kollisionsrisikos mittels technischer Systeme (Kamera/Radar) **vorübergehend abgeschaltet** werden. Hierzu können Echtzeit-Daten mit beispielsweise (Wärmebild-) Kameras, Radaren oder akustischen Sensoren erhoben werden. Aktuell werden verschiedene Schwellenwerte diskutiert, die eine automatische Abschaltung verursachen. Diese Schwellenwerte orientieren sich hauptsächlich an der

sogenannten Migrationsrate (migration traffic rate, MTR), die aussagt, wie viele Vögel bzw. Vogelechos innerhalb von einer Stunde eine Linie von 1000 m überqueren. In verschiedenen Studien wurde ein Schwellenwert von 500 diskutiert: In allen belgischen OWPs wurde berechnet, dass durch die Anwendung einer solchen Schwelle 761 Singvogelkollisionen bei einem Shutdown für 14 Stunden im Herbst 2019 vermieden wurden (Brabant et al., 2021). Allerdings werden auch andere Schwellenwerte analysiert und diskutiert, beispielsweise eine MTR von 250 oder 750 (Welcker & Vilela, 2019). Zur theoretischen Berechnung von Kollisionszahlen werden Collision Risk Models (CRM) angewendet (z. B. Brabant et al., 2021; Pavat et al., 2023). Wichtiger Faktor im Rahmen dieser Modelle ist die sogenannte Meiderate, die aussagt, wieviel Vögel den Anlagen im Nahbereich auszuweichen können (Micro-Avoidance). Sie liegt in aller Regel zwischen 98 und 99,9 %, wobei schon geringe Änderungen große Auswirkungen auf die Anzahl potentiell kollidierender Vögel hat. Es wird auch diskutiert, die Schwellenwerte in Kombination mit Wetterverhältnissen einzusetzen, da angenommen wird, dass sich die Kollisionsgefahr bei schlechten Wetterverhältnissen (d. h. beispielsweise (1) schlechte Sicht, (2) starker Gegenwind, (3) schlechte Sicht und mäßiger Gegenwind, oder (4) mäßige Sicht und kein Rückenwind) deutlich erhöht. Stellt man den Schwellenwert von 500 MTR nur auf Schlecht-Wettersituationen ab, so konnten Welcker & Vilela (2019) zeigen, dass sich die Abschaltungszeit aller deutschen WEAs (bis 2019) von 268 auf etwa 28 Stunden reduziert. Zudem kann der gesamte OWP mittels Vorhersagen basierend auf Modellierungen abgeschaltet werden, sobald ein hohes Risiko erkannt wird (Lippert et al., 2022). Inwiefern eine verringerte Rotationsgeschwindigkeit die Sichtbarkeit der Turbinenblätter erhöht und somit das Kollisionsrisiko verringert, wird noch erforscht.

Eine **Anpassung der Lichtemissionen von WEAs** durch beispielsweise eine niedrigere Lichtintensität oder blinkende Lichter anstatt Dauerlichtern kann zu einer Senkung des Kollisionsrisikos führen. Auch sollte weißes Licht für die Beleuchtung von Strukturen vermieden werden (Rebke et al., 2019; Syposz et al., 2021). Generell sollten die Lichtemissionen auf ein Minimum beschränkt werden: „Bedarfsgerechte Nachtkennzeichnung“, also die bedarfsgerechte Steuerung der Kennzeichnung durch rote Leuchtfeuer als Luftfahrthindernis mit Hilfe von Transpondern oder Radaren (im englischen ADLS/ im deutschen BNK), scheint bei Onshore-Windparks zu einer Verringerung der Anziehungskraft und somit einer Senkung des Kollisionsrisikos zu führen. Studien für Offshore-Windparks sind jedoch noch ausstehend (Wehkamp et al., 2022). BNK ist Offshore in der Zwölf-Seemeilenzone und in der Zone 1 der AWZ ab Ende 2023 vorgeschrieben[183]; es wird empfohlen, diese Vorschrift bei einer Feststellung der Effektivität aber auch auf die anderen Zonen der AWZ auszuweiten. Die Steuerung der weißlichen/gelblichen Dauerbeleuchtung zur Kennzeichnung der Monopiles als Schifffahrtshindernis durch bedarfsgerechte Nachtkennzeichnung mit Hilfe von Transpondern oder Radaren (im englischen NDLS) ist aktuell noch unerforscht, könnte aber ebenfalls das Kollisionsrisiko senken. Schwierig wird die Umsetzung bei hohem Schiffsverkehr. Zudem kann das Licht durch eine Abschirmung nach unten gelenkt und so seine Sichtbarkeit von oben verhindert werden: Reed et al. (1985) haben durch Abschirmung eine Verringerung der Anziehungskraft um fast 40 % beobachtet. Diese technische Option ist jedoch noch wenig erforscht und es scheint Unterschiede in der Effektivität je nach Mondphase zu geben.

Tabelle 10 fasst diese und weitere mögliche Anpassungen eines OWPs zusammen und weist, wenn bekannt, auf die Effektivität und mögliche Nachteile dieser Methode hin. Es gilt zu beachten, dass die meisten Kollisionsreduzierungsansätze wie beispielsweise Vergrämung gleichzeitig den Barriereeffekt (siehe Abschnitt 4.2.4) und somit die grundlegende Vertreibung aus relevanten Habitaten verstärken können. Hierzu gibt es jedoch aktuell noch keine Studien.

[183] Paragraf 9 Absatz 8 im EEG

Tabelle 10: Technische Optionen zur Verringerung des Kollisionsrisikos für Vögel: Alternatives OWP-Design, alternatives WEA-Design, Abschaltung und angepasste Lichtemissionen von WEAs. Das gängige OWP-Design wurde nicht weiter aufgeführt oder näher betrachtet.

Typ	Funktionsweise	Effektivität	Nachteile	Quelle
OWP-Design				
Einsatz größerer und weniger Turbinen	Windparkdesign aus größeren und weniger Turbinen anstatt kleineren und mehr Turbinen	Abhängig von den Arten auf der OWP-Fläche und deren Flughöhenverteilung	Effektivität sehr variabel	Krijgsveld et al. (2009), Johnston et al. (2014)
Akustische Vergrämung	Aussenden von akustischen Signalen zur Vergrämung der Vögel, insbesondere bei schlechten Lichtverhältnissen und schlechter Sicht	Nicht signifikant nachgewiesen; weitere Studien ausstehend	Gewöhnungseffekt möglich; geringe Effektivität der akustischen Vergrämung möglich; Lärmverschmutzung	Dorey et al. (2019)
Visuelle Vergrämung	Aussenden von visuellen Signalen wie (ultra)violettem Licht zur Vergrämung der Vögel	Baasch et al. (2022) berechneten beispielsweise eine Reduktion der Kollisionen um 88 %; artspezifische Effektivität erwartet	Zusätzliche Lichtverschmutzung; Wissenslücken zur artspezifischen Effektivität	May et al.(2017), Baasch et al. (2022)
WEA-Design				
Verringerung der Rotorfläche (z. B. Blattbreite, Rotorradius)	Durch geringere Blattbreite und geringeren Rotorradius weniger Fläche für potentielle Kollision	Artspezifisch; Studien ausstehend	Senkung des Energieertrags	EDF Renewables & Neart na Gaoithe Offshore Wind (2012), Miao et al. (2019), Shimada (2021)
Vergrößerung der minimalen Rotorhöhe	Abstand zwischen minimaler Höhe der Rotorblätter und Meeresspiegel wird vergrößert, sodass einzelne Seevogelarten unter den Rotorblättern fliegen	Artspezifisch (z. B. geringeres Kollisionsrisiko für Enten, Basstölpel, Möwen)	Hohe Kosten; höheres Kollisionsrisiko für einzelne Arten (z. B. Kraniche)	Dirksen et al. (2007), EDF Renewables & Neart na Gaoithe Offshore Wind (2012),

Typ	Funktionsweise	Effektivität	Nachteile	Quelle
	anstatt auf unterer Höhe der Rotorblätter			Cleasby et al. (2015), Busse (2016), Borkenhagen et al (2018), Miao et al. (2019)
WEA bemalt/angestrahlt mit farbigen Mustern oder ultraviolett-reflektierender Farbe	Sichtbarkeit der Turbinen für Vögel erhöhen	Artspezifisch (keine Option für Geier oder andere Arten, die beim Fliegen ständig nach unten schauen)	Nur effektiv für begrenzte Anzahl an Arten	Marques et al. (2014), Hoge (2021), Martin & Banks (2023), May et al. 2020
Blattlose Windenergieanlagen	Keine rotierenden Rotorblätter und weniger bewegende Teile	Geringerer CO_2-Fußabdruck, weniger Wartungsarbeiten notwendig	Mikrostromerzeugung (etwa 1 KW)	Martin (2016), Demirbas & Andejany (2017), Vazdi (2018), Chowdhury et al. (2022)
Abschaltung				
Vorübergehende Abschaltung der Turbinen bei hohem Kollisionsrisiko (Abschaltung einzelner OWEAs)	Echtzeit-Daten mit beispielsweise Wärmebildkameras, Radaren oder akustischen Sensoren, um hohes Kollisionsrisiko zu erkennen	Bei 500 Vogeldetektionen pro km pro Stunde: in allen belgischen Offshore-Windparks 761 Singvogelkollisionen weniger bei Shutdown für 14 Stunden im Herbst 2019 bzw. in 10 OWPs in der deutschen AWZ 27 % weniger Kollisionen bei Shutdown für etwa 30 Stunden pro Jahr	Senkung des Energieertrags; hohe Kosten (Geräte, Shutdown)	Robinson Willmott et al. (2015), Welcker (2019), Degraer et al. (2021)
Vorübergehende Abschaltung der Turbinen bei hohem Kollisionsrisiko (Abschaltung des gesamten OWPs)	Vorhersagen (Modellierungen), um hohes Kollisionsrisiko zu erkennen	Studien ausstehend	Senkung des Energieertrags; hohe Kosten (Geräte, Shutdown)	Lippert et al. (2022)
Verringerung der Rotationsgeschwindigkeit	Die verringerte Rotationsgeschwindigkeit könnte die Sichtbarkeit der	Studien ausstehend	Senkung des Energieertrags	Harwood & Perrow (2019)

Typ	Funktionsweise	Effektivität	Nachteile	Quelle
	Turbinenblätter erhöhen und somit das Kollisionsrisiko verringern.			
Lichtemissionen				
Anpassungen der Lichtfarbe, -intensität, Blinkfrequenz; Beleuchtungsdauer	Lichtemissionen auf ein Minimum beschränken (ADLS bzw. BNK und NDLS); blinkendes Licht anstatt Dauerlicht, rotes Licht und geringere Lichtintensität empfohlen	Studien ausstehend, inwieweit welche Lichtfarbe, Blinkfrequenz etc. das Kollisionsrisiko von einzelnen Arten mit OWEAs senken	Effektivität nicht ausreichend untersucht	Rebke et al. (2019), Syposz et al. (2021), Wehkamp et al. (2022)
Lichtabschirmung („light shielding“)	Abschirmung, um das Licht nach unten zu lenken und so seine Sichtbarkeit von oben zu verhindern	Wenig erforscht, aber Reed et al. (1985) beobachteten eine Verringerung der Anziehungskraft um fast 40 % durch Abschirmung; Unterschiede in der Effektivität je nach Mondphase	Effektivität nicht ausreichend untersucht	Reed et al. (1985)

4.3.3 Technische Optionen, um negative Auswirkungen auf Lebensräume und benthische Gemeinschaften zu reduzieren

Um die negativen Auswirkungen auf Lebensräume und benthische Gemeinschaften während der Bau-, Betriebs- und Rückbauphase eines OWPs zu reduzieren, werden verschiedene Alternativen der Seekabel(-verlegung) betrachtet: (1) der Seekabeltyp, (2) die Methode zur Seekabelverlegung, (3) der verwendete Korrosionsschutz und (4) Kolkschutz. Tabelle 11 fasst diese Alternativen zusammen und weist, wenn bekannt, auf die Effektivität und mögliche Nachteile dieser Alternativen hin.

Um das entstehende elektromagnetische Feld um ein verlegtes Seekabel und die damit potentielle Temperaturerhöhung zu reduzieren, wird an verschiedenen **Seekabeltypen** mit unterschiedlicher Isolierung geforscht. Boatman (2020) fand beispielsweise heraus, dass eine Metallummantelung das elektromagnetische Feld um das Seekabel deutlich reduzieren kann.

Verschiedene Methoden, um das **Seekabel zu verlegen sowie bei Wartungsarbeiten der Seekabel**, können zu weniger Störung des Meeresbodens führen. Derzeit gibt es hauptsächlich vier Methoden, um Seekabel zu verlegen: (1) Vibrationskabelpflug, (2) Vibrationsschwert, (3) Fräsen und (4) Einspülen ins Sediment. Die Methoden weisen unterschiedlich starke Sedimentstörungen auf, sind jedoch teils nur für bestimmte Sedimentarten einsetzbar (Wolters, 2012). Beim Einspülen und Einpflügen - als Stand der Technik - kann die Bodentopografie nach den Verlegearbeiten schneller wiederhergestellt werden (BERR Department for Business Enterprise & Regulatory Reform, 2008; Rees et al., 2006; Taormina et al., 2018). Beim Einspülen wird unter Druck stehendes Meerwasser unter den Meeresboden geblasen, um die Sedimente entlang der Kabeltrasse zu verflüssigen und dann das Kabel zu verlegen, sodass es unter seinem eigenen Gewicht absinkt. Beim Einpflügen wird mittels eines Pfluges ein V-förmiger Graben aus dem Meeresboden ausgehoben, in dem die Rohrleitung verlegt wird, bevor er mit einem weiteren Pflug zugeschüttet wird.

Im Vergleich zu Galvanic anode cathodic protection (GACP)-Systemen kann ein Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)-System oder Baustahl als alternativer **Korrosionsschutz** eingesetzt werden, was zu geringeren jährlichen chemischen Emissionen (Metalle, organische Verbindungen) führt. Das ICCP-System ist jedoch anfälliger für Umweltschäden und mechanische Schäden durch Dritte und verursacht höhere Kosten durch erhöhten Wartungsaufwand (Kirchgeorg et al., 2018; Price & Figueira, 2017).

Zudem kann die einheimische biologische Vielfalt, der Artenreichtum und die Abundanz durch die entsprechende Wahl des **Kolkschutzes** beeinflusst werden: Beispielsweise können größerer Strukturen als beim herkömmlichen Kolkschutz große Löcher und Spalten schaffen, die großen mobilen Arten angemessenen Unterschlupf bzw. Höhlen bieten. Außerdem können mehr kleinräumige Strukturen als beim herkömmlichen Kolkschutz mehr kleinräumige Löcher und Spalten, aber auch Befestigungs- und Siedlungssubstrat schaffen. Durch die Nachahmung natürlicher (biogener) chemischer Substrateigenschaften kann ebenfalls die Biodiversität gefördert werden. Zudem können Exemplare von Zielarten eingeführt werden, um die Etablierung neuer Populationen um den Kolkschutz herum zu fördern; diese Methode kann die biologische Vielfalt fördern, stellt jedoch ebenfalls einen Eingriff in den natürlichen Lebensraum dar (Lengkeek et al., 2017).

Tabelle 11: Technische Optionen zur Verringerung der negativen Auswirkungen auf Lebensräume und benthische Gemeinschaften: Angepasster Seekabeltyp, (alternative) Verlegemethoden, Korrosionsschutz und Kolkschutz.

Typ	Funktionsweise	Effektivität	Nachteile	Quelle
Seekabeltyp				
Kabeltyp mit ausreichender Isolierung	Beispielsweise Metallummantelung um das Kabel	Minderung des elektromagnetischen Feldes und der Temperatur		Boatman (2020)
Verlegemethode				
Vibrationskabelpflug mit Kettenfahrwerk	Mit dem selbstfahrenden Vibrationspflug werden die bereits im Arbeitsbereich vorher abgelegten Kabel nachträglich ins Sediment eingebracht (post lay burial). Das Kettenfahrzeug nimmt die auf dem Watt (vor allem festeres Sandwatt) liegenden und vorher ausgerichteten Seekabel auf und „pflügt“ diese in einem Arbeitsgang ins Sediment ein.	Anders als beim Herstellen eines Kabelgrabens mit einem Wattbagger oder einer Fräse wird das Sediment nicht völlig umgeschichtet, sondern überwiegend durchschnitten und seitlich verdrängt. Nur in den obersten Schichten fällt das Sediment zusammen und wird durchmischt. Tiefgehende Sedimentstörung durch Vibrationspflug auf im Mittel 0,8 m Breite x Länge der Trasse in m. Oberflächliche Sedimentstörungen durch Begleitbagger zum Ausrichten der Kabel und sonstige begleitende Baggerfahrten innerhalb eines 15 m breiten Arbeitsstreifens (15 m Breite x Länge der Trasse im Watt)	Einsatz nur im Watt- und Flachwasserbereich	Wolters (2012)
Vibrationsschwert an schwimmender Einheit	Bei diesem Verfahren werden die Seekabel bei Hochwasser gleichzeitig verlegt und eingegraben (simultaneous lay and burial-Verfahren).	Der Verlegespalt ist demnach sehr schmal und geringer als beim Vibrationskabelpflug. Tiefgehende Sedimentstörung durch Vibrationsschwert auf im Mittel 0,5 m Breite (Verlegespalt und geringes seitliches Verdrängen, Vibrationen) x Länge der Trasse.	Einsatz nur für Weichbodensedimente (Kies-, Sand-, Misch-, Schlicksediment); bei Niedrigwasser stundenweise auf dem Watt oder im Flachwasser aufliegendes Ponton-Arbeitsschiff	Wolters (2012)

Typ	Funktionsweise	Effektivität	Nachteile	Quelle
		Oberflächliche Eintiefung (flache Grabenmulde) über dem Verlegespalt auf ca. 0,8 m Breite x Länge der Trasse.		
Fräsen	Fräsen schneiden in das Sediment ein und führen demnach zu einer Grabenbildung; das Kabel wird gleichzeitig in den Graben geführt. Der entstandene Kabelgraben muss im Eulitoral, um eine sekundäre Prielbildung zu vermeiden, nachträglich durch einen Wattbagger verfüllt werden.	Einsatz besonders für bindige bis harte Sedimente bzw. Substrate im Eu- und Sublitoral und bei steilen Unterwasserböschungen Tiefgehende Sedimentstörung durch Fräse auf 2,5 m Breite (Kabelgraben) x Länge der Trasse Laterale Sedimentumlagerung, Trübung (bei Einsatz unter Wasser), Deposition im Seitenraum und Überlagerung von natürlich anstehendem Sediment auf 15 m Breite x Länge der Trasse Im Eulitoral: Wiederverfüllung des Kabelgrabens mittels Wattbagger mit Sedimenten aus dem Seitenraumbereich, 15 m Arbeitskorridor x Länge der Trasse	Fräsen führt beiderseitig des Grabens zu unterschiedlich mächtigen Sandablagerungen; tiefgehende Sedimentstörung großflächiger als bei Vibrationskabelpflug und Vibrationskabelschwert; bei Niedrigwasser stundenweise auf dem Watt oder im Flachwasser aufliegendes Ponton-Arbeitsschiff	Wolters (2012)
Einspülen ins Sediment: Spülschwert an Spülschlitten oder TROV	Der Unterwasserschlitten mit dem Spülschwert oder Spülschlitten wird vom Verlegeschiff - oder bei geringen Wassertiefen auch von einem Ponton oder einer Barge - gezogen und das Kabel wird in den vom Spülschwert simultan erzeugten Graben in die entsprechende Tiefe gelegt.	Tiefgehende Sedimentstörung durch Spülschwert auf 0,6 m Breite (Spülgraben) x Länge der Trasse Oberflächliche Sedimentstörung auf 5,53 m x Länge der Trass Laterale Sedimentumlagerung, Trübung, Deposition im Seitenraum und Überlagerung	Das Einspülen eignet sich besonders für sandiges bis schlickiges Sediment, mithin können Seekabel mit diesen Verfahren in allen weichen Sedimenten verlegt werden. Je nach Anteil der feinen Kornfraktionen und der Strömung werden die	

Typ	Funktionsweise	Effektivität	Nachteile	Quelle
		von natürlich anstehendem Sediment auf 3 m Breite beiderseits x Länge der Trass	Feinstsande und Schluffe teils weit verdriftet.	
Einspülen ins Sediment: Vertical Injector (Stehendes Spülschwert)	Über ein „Stehendes Spülschwert“ wird ein Seekabel gelegt und gleichzeitig eingespült (simultaneous lay and burial). Diese Technik und das Vibrationsschwert sind sehr ähnlich mit dem Unterschied, dass das Vibrationsschwert nur mit Vibration und ohne Wasserspüldruck arbeitet.	Tiefgehende Sedimentstörung (Spülgraben) durch Stehendes Spülschwert auf 0,6 m Breite x Länge der Trasse Oberflächliche Sedimentstörung durch Böschungsanpassung und Ausbildung einer Grabenmulde von bis zu 4 m Breite (gesamt) bei 3 m Verlegetiefe, 2 m Breite bei 1,7 m Verlegetiefe. Aufwirbelung von Sediment und Deposition im Seitenraum von nennenswerter Dimension ist eher zu vernachlässigen und wenn entsprechend maximal mit 3 m beiderseits der Grabenmulde anzusetzen.	Sedimentverdriftung	Wolters (2012)
Korrosionsschutz				
Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)-System oder Baustahl als Korrosionsschutz	Anstatt Galvanic anode cathodic protection (GACP)-Systemen	Minderung der jährlichen chemischen Emissionen (Metalle, organische Verbindungen)	ICCP-System anfälliger für Umweltschäden und mechanische Schäden durch Dritte, sowie höhere Kosten durch erhöhten Wartungsaufwand	Price & Figueira (2017), Kirchgeorg et al. (2018)
Kolkschutz				
Hinzufügen größerer Strukturen als beim herkömmlichen Kolkschutz	Ziel: große Löcher und Spalten schaffen, die großen mobilen Arten angemessenen Unterschlupf bzw. Höhlen bieten	Förderung der einheimischen biologischen Vielfalt, des Artenreichtums und der Abundanz; quantitative Effektivität standortspezifisch	Effektivität des Kolkschutzes kann verringert werden	Lengkeek et al. (2017)

Typ	Funktionsweise	Effektivität	Nachteile	Quelle
Hinzufügen von mehr kleinräumigen Strukturen als beim herkömmlichen Kolkschutz	Ziel: mehr kleinräumige Löcher und Spalten, aber auch Befestigungs- und Siedlungssubstrat schaffen	Förderung der einheimischen biologischen Vielfalt, des Artenreichtums und der Abundanz; quantitative Effektivität standortspezifisch	Effektivität des Kolkschutzes kann verringert werden	Lengkeek et al. (2017)
Bereitstellung natürlicher (biogener) chemischer Substrateigenschaften zur Förderung von Arten	Beispiel: Bereitstellung von kalkreichem Substrat wie Beton mit Kalkzusatz oder natürlichem Substrat wie Muschelmaterial	Förderung der einheimischen biologischen Vielfalt, des Artenreichtums und der Abundanz; quantitative Effektivität standortspezifisch	Kosten	Lengkeek et al. (2017)
Aktive Einführung von Exemplaren der Zielarten	Ziel: Etablierung neuer Populationen fördern	Förderung der einheimischen biologischen Vielfalt, des Artenreichtums und der Abundanz; quantitative Effektivität standortspezifisch	Eingriff in den natürlichen Lebensraum	Lengkeek et al. (2017)

4.4 Beschreibung kumulativer Effekte

Wirkfaktoren, welche auf die Meeresumwelt einwirken, können kumulativ mit anderen lokalen, überregionalen und globalen, sowie vergangenen, gegenwärtigen oder potentiellen zukünftigen Wirkfaktoren in Wechselwirkung stehen. Diese Wechselwirkungen müssen bei der Betrachtung von Auswirkungen auf das Ökosystem einer einzelnen Aktivität immer mitbetrachtet werden, da sie singuläre Auswirkungen verstärken oder verringern können (Hegmann et al., 1999). Um die sogenannten kumulativen Effekte beurteilen zu können, benötigt man Informationen darüber, (1) welche Auswirkungen die jeweiligen Wirkfaktoren verursachen, (2) in welchem zeitlichen und räumlichen Ausmaß und mit welcher Häufigkeit die Auswirkungen auftreten, (3) welche Schutzgüter von den Wirkfaktoren betroffen sind, (4) welche anderen Wirkfaktoren die Habitate und Arten beeinflussen, (5) wie unterschiedliche Arten auf verschiedenen Organisationsebenen (z. B. Individuen, Populationen, Arten, Gemeinschaften) reagieren (Clarke Murray et al., 2014; Platteeuw et al., 2017).

Durch den Bau und Betrieb von OWPs wird ein weiterer potentieller Wirkfaktor der Meeresumwelt hinzugefügt und kann zu kumulativen Effekten führen. In Abschnitt 4.2 wird beschrieben, welche Aktivitäten (Bau, Betrieb oder Rückbau von Offshore-Windenergieanlagen) welche Wirkfaktoren verursachen und welche Auswirkungen diese Aktivitäten auf die verschiedenen Schutzgüter haben kann. Um den Schutz, die Erhaltung und die Verbesserung des Zustands der Meeresumwelt mit dem Ausbau von OWPs übereinzubringen, ist in vielen Ländern eine Analyse der kumulativen negativen Auswirkungen während der Genehmigungsverfahren von OWPs vorgeschrieben (Hague et al., 2022; Willsteed et al., 2018). Aktuell gibt es jedoch noch Unsicherheiten über die kumulativen Auswirkungen von OWPs, sowie über die Bewertung dieser (Goodale & Milman, 2016; Guşatu et al., 2021; Masden, 2015; Willsteed et al., 2018).

Der Bau eines einzelnen OWP hat möglicherweise keinen Effekt auf den Bestand und die Verbreitung einer einzelnen Art, der Bau zahlreicher OWPs hingegen kann unterschiedliche und größere Auswirkungen (kumulative Effekte) haben (Goodale & Milman, 2019; Guşatu et al., 2021; Jeffrey & Sedgwick, 2011). Auch die Mehrfachnutzung aus OWE und einer andere Nutzungsform kann zu kumulativen Effekten führen – insbesondere in Gebieten, in denen bereits weitere anthropogene Wirkfaktoren auf das jeweilige Schutzgut (oder die Art) einwirken (siehe Abschnitt 4.1).

Die Modelle „Interim Population Consequences of Disturbance“ (iPCoD) und „Disturbance Effects of Noise on the Harbour Porpoise Population in the North Sea“ (DEPONS) wurden entwickelt, um die potentiellen Auswirkungen von Lärm im Zusammenhang mit der Entwicklung von OWE auf die Schweinswalpopulation zu bewerten (Nabe-Nielsen & Harwood, 2016). Nabe-Nielsen et al. (2011) schlossen in ihrem Populationsmodell „DEPONS“ nicht nur Störungen von bestehenden Windparks ein, sondern auch Lärm von neuen potentiellen Windparks; sie gehen davon aus, dass für das Seegebiet Kattegat insbesondere in Hinblick auf einen verstärkten Ausbau der OWE keine Gefahr für die ansässige Schweinwalpopulation bestehe. Auch der Bau neuer OWPs bei Kriegers Flak und Store Middelgrund wird sich nach deren Modellberechnung voraussichtlich nicht auf die Dynamik der Population auswirken, während der bestehende Schiffsverkehr wahrscheinlich zu einer Verringerung der Populationsgröße von Schweinswalen führt. Die neusten SCANS-Ergebnisse zeigten für den Schweinswal in der Beltsee geringere ermittelte Bestandsgrößen für 2016, 2020 und 2022 als für 1994, 2005 und 2012 (Gilles et al., 2023; Owen et al., 2024).

Was die Auswirkungen des Baus von OWPs auf Vögel betrifft, so besteht ein allgemeiner Konsens darüber, dass ein Verständnis der potentiellen kumulativen Auswirkungen von OWPs auf Vögel unbedingt erforderlich ist, jedoch besteht kein allgemeiner Konsens über einen

bestimmten Ansatz (Leemans & Collier, 2022). Beispielsweise untersuchten Gusatu et al. (2021) mit Hilfe einer ganzheitlichen, kumulativen Methodik die Auswirkungen von 18 verschiedenen Belastungen durch OWPs auf die Lebensräume am Meeresboden sowie auf Referenzarten von Fischen, Seevögeln und marinen Säugetieren in der gesamten Nordsee: Laut den Ergebnissen reagieren die untersuchten Vogelarten (Eissturmvögel, Tordalke und Trottellumme) am empfindlichsten auf Barriereeffekte, Lebensraumverlust und das Risiko des Kontakts mit Treibstoff oder Chemikalien. Piet et al. (2021) hingegen nutzten eine semiquantitative Risikobewertung, um die kumulativen Auswirkungen aller wichtigen menschlichen Aktivitäten in der Nordsee unter verschiedenen Planungsszenarien zu bewerten: Die Studie deutet darauf hin, dass das Risiko von Auswirkungen auf Vögel je nach Konstruktion der Windturbinen oder ihres Standorts erheblich verringert werden kann. Weitere Studien sind nötig, um die kumulativen Effekte genauer quantifizieren zu können.

Angesichts der Ausbauziele von OWE nicht nur in der deutschen AWZ, sondern auch länderübergreifend kommt der Bewertung kumulativer Effekte eine herausragende Bedeutung zu. Einige dieser Bewertungen der kumulativen Auswirkungen verwenden zwar tatsächliche Daten (in der Regel räumliche Verteilungen); oft beruhen die Annahmen jedoch auf Expert Judgement und dementsprechend einem relativen Maß mit Kategorien anstatt absoluten Zahlen (Piet, Tamis, Volwater, et al., 2021). Hier ist weiterer Forschungsbedarf notwendig, um die kumulativen Effekte präziser bewerten zu können.

In den folgenden Kapiteln werden kumulative Effekte wie folgt definiert: Wirkfaktoren, die mit anderen Wirkfaktoren durch räumlichen und/oder zeitlichen Zusammenhang in Wechselwirkung stehen.

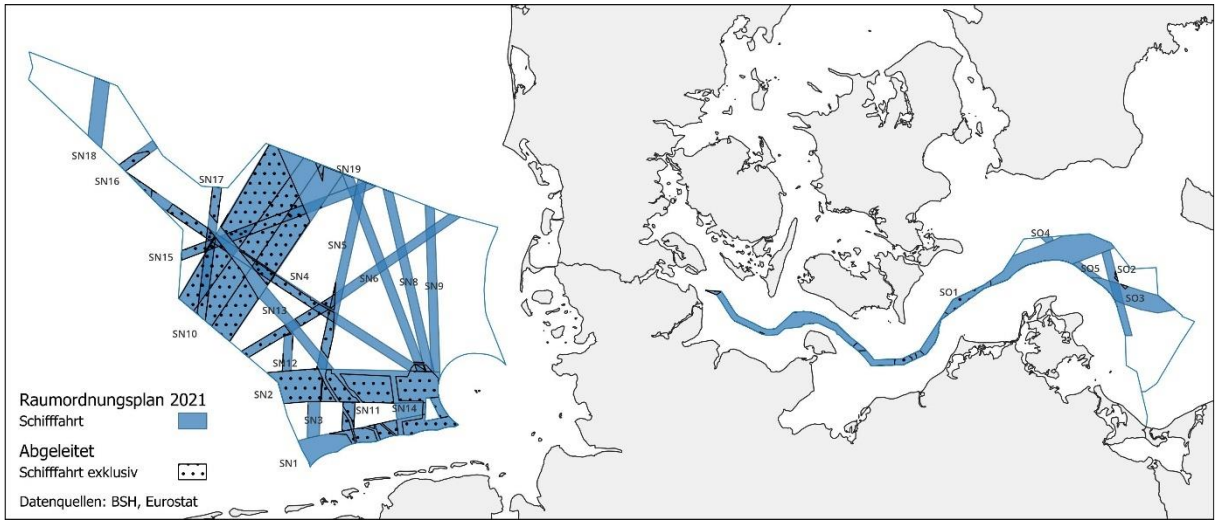
5 Auswahl von Mehrfachnutzungsoptionen

In diesem Abschnitt erfolgt die Analyse unterschiedlicher möglicher Mehrfachnutzungsoptionen, also die Nutzung einer Fläche durch Windenergie auf See mit einer weiteren Nutzungsart. Die Auswahl der Mehrfachnutzungsoptionen basiert auf den Nutzungsarten, für welche im ROP 2021 Festlegungen getroffen werden. Es werden Einschätzungen zu Kombinationen der Windenergie auf See mit den weiteren Nutzungen Schifffahrt, Leitungen, Rohstoffgewinnung, Fischerei, Forschung und Landes- und Bündnisverteidigung getroffen. Die Festlegungen zum Schutz und zur Verbesserung der Meeresumwelt im ROP 2021 waren nicht Bestandteil dieses Vorhabens. Zusätzlich wird die Kombination von Windenergie mit anderen Formen der regenerativen Energieerzeugung betrachtet. Diese Analyse der unterschiedlichen Mehrfachnutzungsoptionen dient als Grundlage für die Auswahl von drei konkreten Beispielen der Mehrfachnutzung, für welche eine vertiefte fallbezogene Analyse in Kapitel 6 bis Kapitel 8 folgt.

5.1 Schifffahrt

Für die Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs legt der ROP 2021 mehrere Vorranggebiete, ein befristetes Vorranggebiet sowie zwei befristete Vorbehaltsgebiete mit einer Gesamtfläche von 16.631 km² (50,4 % der AWZ) in der deutschen AWZ fest. Etwa die Hälfte der Fläche dieser für die Schifffahrt ausgewiesenen Gebiete weist Überschneidungen mit Gebieten für Leitungen, Rohstoffgewinnung, Fischerei, Forschung, Verteidigung sowie Schutz und Verbesserung der Meeresumwelt auf. Es gibt keine Überschneidungen mit Gebieten, die für die Windenergie auf See vorgesehen sind. Insgesamt sind Gebiete mit einer Fläche von 7.844 km² (23,8 % der AWZ) exklusiv für die Nutzung durch die Schifffahrt ausgewiesen.

Abbildung 10: Festlegungen für Schifffahrt im Raumordnungsplan 2021

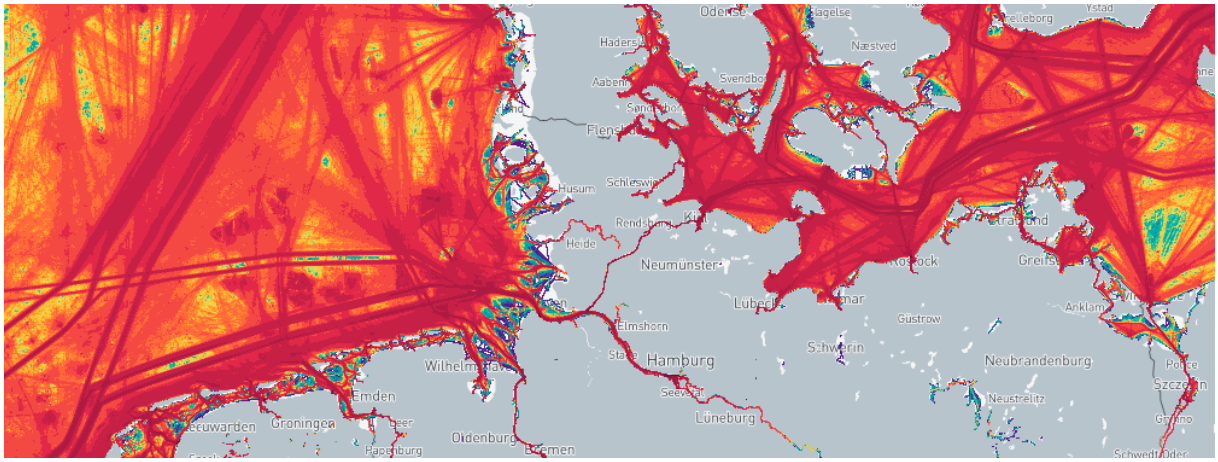


Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Der Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs wird in den Festlegungen des ROP 2021 eine hohe Bedeutung beigemessen. Dies begründet sich mit der grundsätzlichen Freiheit der Schifffahrt, die in der AWZ nach Artikel 58 Absatz 1 SRÜ gilt. Die Bundesrepublik Deutschland muss als Küstenstaat bei der maritimen Raumplanung sicherstellen, dass die Schifffahrtsfreiheit gewährleistet ist, unter anderem darf die Errichtung künstlicher Inseln, Anlagen und Bauwerke (inkl. der sie umgebenden Sicherheitszonen) die Benutzung anerkannter und für die internationale Schifffahrt wichtige Schifffahrtswege nach Artikel 60, Absatz 7 SRÜ nicht behindern. Dabei sieht das SRÜ vor, dass nicht nur die Schifffahrtsrouten, die die

Verkehrsbelange Deutschlands betreffen, durch den ROP 2021 zu beachten sind, auch die Transitverkehre der Anrainerstaaten müssen ermöglicht werden. Entsprechend ist die Windenergienutzung im Bereich der wichtigen nationalen und internationalen Schifffahrtsrouten ausgeschlossen.

Abbildung 11: Schiffsverkehrsdichte in deutscher Nord- und Ostsee im Jahr 2022



Quelle: (Marine Traffic Density Map, 2024)

Für die im hohen Maße exportorientierte deutsche Wirtschaft ist ein funktionierender Schiffsverkehr und eine sichere Anbindung der Seehäfen unerlässlich, da ein Großteil des globalen Handels über den Seeweg erfolgt. In Abbildung 11 heben die gesammelten Automatic Identification System (AIS)-Daten des maritimen Informationsserviceanbieters MarineTraffic für Nord- und Ostsee die Verkehrsdichte der nationalen und internationalen Haupthandelsrouten im Jahr 2022 deutlich hervor.

Um die Bedeutung der Schifffahrtsrouten über die aktuelle Situation hinaus bewerten zu können, gilt es zusätzlich auch die prognostizierten Wachstumsgrößen der Schifffahrt einzubeziehen: zum einen die Entwicklung des maritimen Handelsverkehrs und zum anderen die Entwicklung der Schiffsgrößen. Die United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) prognostiziert für den Zeitraum 2024-2028 ein Wachstum im maritimen Handel von jährlich 2,1-2,2 %(UNCTAD, 2023) . Das weltweite Wachstumspotential lässt sich durch die Lage der international größten und bedeutendsten Häfen sowie wichtiger Handelsnationen auch auf Europa projizieren. Bei wachsendem maritimen Handelsverkehr und vermehrter räumlicher Trennung von Schifffahrtsrouten und anderen Nutzungsarten ergibt sich ein zusätzliches Risiko für Kollisionen von Schiffen mit anderen Schiffen. Zuletzt stieg die Anzahl von Unfällen im Schiffsverkehr in der Ostsee aufgrund menschlichen Fehlverhaltens, sodass eine enge internationale Zusammenarbeit für eine effiziente Gestaltung der räumlichen Aufteilung notwendig ist (Schultz-Zehden et al., 2019).

Aktuell werden Schifffahrtsstraßen der kommerziellen Schifffahrt und Flächen für Windenergie getrennt. Grundsätzlich ist es Schiffen untersagt, in Windparks einzufahren oder sie zu durchqueren, d.h. ein generelles Befahrverbot. Die Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt kann für in Betrieb befindliche Windparks Regeln zur Durchfahrt erlassen. Für mehrere Windparks wurde Schiffen mit einer Rumpflänge von weniger als 24 m die Durchfahrt erlaubt. Allerdings ist dies nur unter Auflage der direkten Durchfahrt, bei guter Sicht und bei Tag gestattet. Diese Auflage richtet sich besonders an Sportfahrzeuge, Segelschiffe und private Kleinfahrzeuge, denen dadurch unter Umständen entstehende längere Fahrtwege erspart werden (WSV, 2022). Weiterhin hat die Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt für einzelne Windparks die

Durchquerung für Schiffe der gewerblichen Fischerei von weniger als 24 m freigegeben, so beispielsweise für die gemeinsame Sicherheitszone um die Offshore-Windparks Nordsee Ost, Meerwind Süd | Ost, sowie die Konverterplattformen HelWin alpha und HelWin beta. Für alle anderen Schiffe gilt generell das Befahrverbot von OWPs und einer umliegenden Sicherheitszone von 500 m. In diese Zone darf kein explizit befähigtes Fahrzeug einfahren, außer der zuvor aufgeführten Ausnahmen gemäß der Windpark-zugehörigen Allgemeinverfügung von der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt. Windparks, die sich in der Installationsphase befinden, gelten als Baustellen und dürfen generell von keiner anderen Partei als dem Betreiber und seinen Erfüllungsgehilfen befahren werden.

Die niederländische Regierung hat im Jahr 2018 eine umfangreiche Risikoanalyse für drei von vier in Betrieb befindlichen Windparks beauftragt, in denen die Zulassung zur Durchfahrt und Ko-Nutzung für Kleinfahrzeuge und Fischereifahrzeuge betrachtet wurde. Die Risikoanalyse führt die Bedenken der Windpark-Betreiber diesbezüglich als Teilergebnis auf. Es werden vor allem der Verlust von Wartungszeiten durch Verstöße und das Risiko von Imageschäden durch Unfälle thematisiert. Für bereits in Betrieb befindliche, bestehende Windparks, in denen ein solcher Transit nicht vorgesehen ist, sind außerdem die damit verbundenen Risiken nicht in die kommerzielle Risikokalkulation aufgenommen und müssten nachträglich bepreist werden (Groenendijk, 2018).

Für Handels- und Containerschiffe stellen Offshore-Windenergieanlagen in erster Linie Hindernisse dar. Das bei schlechten Sichtverhältnissen zur Navigation genutzte Radar kann von Offshore-Windenergieanlagen beeinflusst werden(Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, 2021). Mögliche Beeinträchtigungen der Schiffsradare, bspw. durch Offshore-Windenergieanlagen ausgelöste Reflexionen der elektromagnetischen Strahlung, werden bei der Errichtung der Anlagen untersucht und eventuelle störungshemmende Maßnahmen werden getroffen (Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, 2021). Grundsätzlich sind Offshore-Windenergieanlagen oder Anlagen-Gruppen mit einer funktechnischen Kennzeichnung in Form eines o.g. AIS-Zeichengeräts ausgestattet dennoch sollten auch Kollisionen aufgrund von Systemausfällen oder menschlichen Versagens bedacht werden, bei denen das Schiff steuerlos abdriften und mit einer Offshore-Windenergieanlage kollidieren könnte. Zusätzlich stellen die Anker der Schiffe ein Risiko für Parkleitungen dar, die bei Auswurf, beispielsweise im Falle von Systemausfällen und in Notsituationen, Schäden an den Leitungen durch Mitreißen ebendieser anrichten können.

Der Schifffahrt wird ein großer Flächenanteil der AWZ zugestanden, von dem ein großer Teil exklusiv für die Schifffahrt vorgesehen ist. Hinsichtlich der verfügbaren Flächen für eine Mehrfachnutzung mit der Windenergie auf See wäre das Potential entsprechend groß. Allerdings steht die durch internationale Übereinkommen vorgegebene Verpflichtung zur Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs und die hohe wirtschaftliche Bedeutung der Schifffahrt dem entgegen, sodass im Bereich der wichtigen, alternativlosen Schifffahrtswege die Nutzung von Windenergie derzeit ausgeschlossen ist.

Der Erweiterung des Gebiets N-06 (um die Fläche N-6.8) in der Fortschreibung des FEP 2023 auf den im ROP 2021 ausgewiesenen Schifffahrtsrouten SN6 und SN12 ging eine Bekanntmachung der niederländischen Regierung zur Schließung einer Schifffahrtsroute voraus, entsprechend ergaben sich auch für die deutsche AWZ geänderte Bedarfe. Die Nutzung durch die Schifffahrt auf diesen Routen entfällt künftig, sodass es sich in diesen Gebieten nicht um eine Mehrfachnutzung von Windenergie und Schifffahrt handelt. Des Weiteren wird derzeit im Rahmen der Fortschreibung des FEP 2023 die Festlegung von Gebieten für die Windenergie in den Gebieten der Schifffahrtsrote SN10 geplant. Der ROP 2021 sieht eine Befristung von Bereichen innerhalb des Vorranggebiets SN10 bis zum 31.12.2035 vor. In diesen Bereichen werden gemeinsam mit Dänemark und den Niederlanden verkehrslenkende Maßnahmen geprüft. Diese Maßnahmen könnten

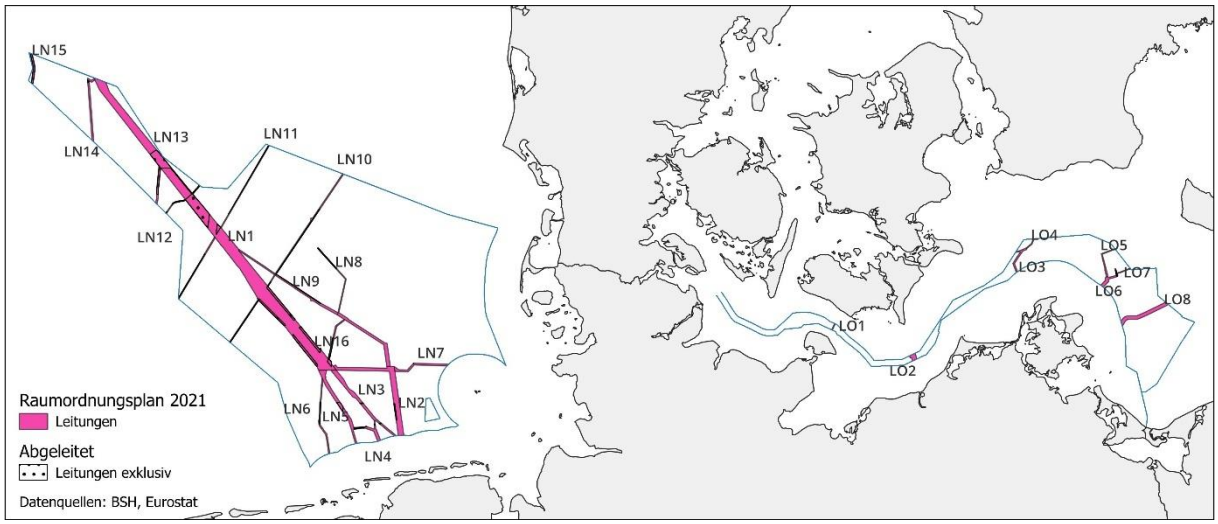
den Flächenbedarf für die Schifffahrt reduzieren. Flächen in der deutschen AWZ, die nicht mehr für die Schifffahrt benötigt werden, könnten für die Windenergie auf See ausgewiesen werden. Die Gebiete SN19 und SO5 werden durch den ROP 2021 als befristete Vorbehaltsgebiete eingestuft. Auch für diese Gebiete soll die Verkehrssituation analysiert und geprüft werden, ob sie für die Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs erforderlich sind.

Insgesamt sind die Belange der beiden Nutzungsarten Schifffahrt und Windenergie aufgrund sicherheitsrelevanter Herausforderungen schwierig zu vereinbaren. Windenergieanlagen erhöhen das Kollisionsrisiko durch ihre Eigenschaft als Hindernis im Falle eines Systemversagens und steuerlosen Schiffes. Weiterhin gefährden mögliche schädigende Ankerwürfe der Schiffe die Unversehrtheit der Parkleitungen. Aufgrund dieser Herausforderungen und des geringen Potentials zur Mehrfachnutzung wird innerhalb des Vorhabens keine vertiefende Analyse einer Mehrfachnutzung von Schifffahrt und Windenergie auf See vorgenommen.

5.2 Leitungen

Für die leitungsgebundene Infrastruktur legt der ROP 2021 Vorbehaltsgebiete mit einer Gesamtfläche von 2.575 km² (7,8 % der AWZ) in der deutschen AWZ fest. Diese Gebiete überschneiden sich größtenteils mit Gebieten für Schifffahrt, Rohstoffgewinnung, Forschung, Verteidigung, Schutz und Verbesserung der Meeresumwelt sowie Windenergie auf See. Es gibt keine Überschneidungen mit dem Gebiet, das für die Fischerei auf Kaisergranat festgelegt ist. Insgesamt sind Gebiete mit einer Fläche von 428 km² (1,3 %) exklusiv für die Nutzung durch Leitungen ausgewiesen.

Abbildung 12: Festlegungen für Leitungen im Raumordnungsplan 2021



Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Der ROP 2021 legt Vorbehaltsgebiete zur Sicherung von Trassenkorridoren für bestehende und zukünftige Leitungen fest. Die parkinternen Verkabelungen innerhalb von Offshore-Windparks werden hiervon nicht erfasst. Neben den Vorbehaltsgebieten für Leitungen legt der ROP 2021 auch Grenzkorridore für Übergänge von der deutschen AWZ in das deutsche Küstenmeer sowie für Übergänge von der deutschen AWZ in die Gewässer der angrenzenden Staaten fest. Durch diese Übergänge sollen Leitungen in das Küstenmeer beziehungsweise in die AWZ der Anrainerstaaten geführt werden.

Die leitungsgebundene Infrastruktur in der deutschen AWZ ist im Wesentlichen den Sektoren Energie- und Telekommunikation zuzuordnen. Sie umfasst stromführende Seekabel,

unterirdische Rohrleitungen sowie Datenkabel für die globale Internetkommunikation. Strom- und Rohrleitungen dienen entweder zur Abfuhr von auf See gewonnener Energie, etwa aus Offshore-Windparks oder aus Gasfeldern, oder zur Übertragung von Strom oder Gas zwischen Ländern durch sogenannten Interkonnektoren. Künftig werden beispielsweise stromführende Seekabel im Zuge des Ausbaus der Offshore-Windenergie weiter an Bedeutung gewinnen.

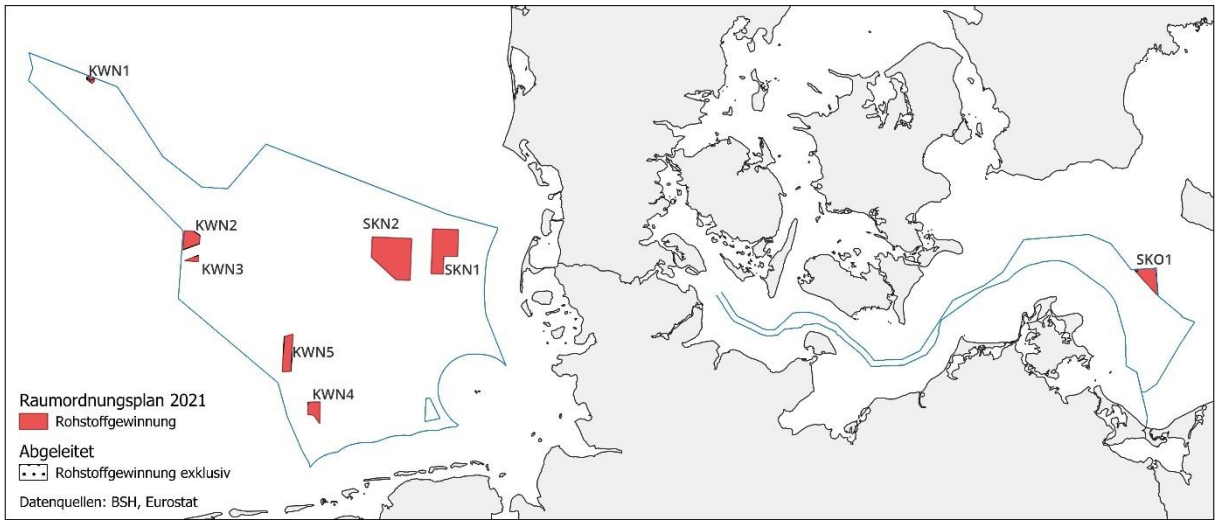
Durch die Festlegungen im ROP 2021 soll ein möglichst guter Schutz der Leitungen erreicht werden, um unter anderem die Abfuhr der durch Offshore-Windparks erzeugten Energie sicherzustellen. Um die Schutzerfordernisse der Strom-, Gas- und Datenkabel mit den Belangen weiterer Nutzungsarten in der deutschen AWZ vereinbaren zu können, sieht der ROP 2021 mehrere Grundsätze für den Verlauf der Leitungen vor. Zum einen sollen Leitungen möglichst gebündelt und parallel zu bestehenden Strukturen geführt werden. Sofern Kreuzungen dadurch nicht gänzlich vermieden werden können, sollen Kreuzungen beispielsweise von wichtigen Schifffahrtsroten auf kürzestem Wege erfolgen. Zum anderen sollen Leitungen mit einer ausreichenden Überdeckung versehen werden, um das Konfliktpotential mit anderen Nutzungen zu minimieren. Insbesondere Ankerwurf und Schleppnetze können Beschädigungen von Leitungen verursachen. Durch eine ausreichende Überdeckung können außerdem das Freispülen der Strom- und Datenkabel sowie die damit einhergehenden Beschädigungen vermieden werden, sodass wiederum Reparaturarbeiten und deren Auswirkungen auf andere Nutzungen reduziert werden können. In Bezug auf die Windenergie auf See sieht der ROP 2021 vor, dass bei der Errichtung von Windenergieanlagen ein ausreichender Sicherheitsabstand zu Rohrleitungen und Seekabeln eingehalten werden soll, um deren Betrieb und Wartung nicht zu beeinträchtigen. Die Festlegung des Abstandes erfolgt unter anderem im FEP 2023, ein Abstand von 500 m ist einzuhalten.

Der leitungsgebundenen Infrastruktur wird im ROP 2021 nur ein kleiner Flächenanteil, der größtenteils mit weiteren Nutzungen belegt ist, zugestanden. Leitungen haben jedoch eine große Bedeutung für die Energieversorgung Deutschlands und mit dem Ausbau der Offshore-Windenergie werden sie künftig weiter an Bedeutung gewinnen. Sie sind daher besonders vor möglichen Beschädigungen zu schützen. Die Vorgaben zur Leitungsführung dienen einerseits dem Schutz der Leitungen und ermöglichen anderseits gleichzeitig, dass die Belange anderer Nutzungsarten möglichst wenig beeinträchtigt werden, zum Beispiel die der Schifffahrt und Fischerei. Die festgelegten Abstände zu Offshore-Windparks dienen der Sicherstellung des Betriebs und ermöglichen Wartungs- und Reparaturarbeiten bei laufendem Betrieb von Offshore-Windparks. Entsprechend lassen sich die Belange der beiden Nutzungsarten Leitungen und Windenergie auf See schwer vereinbaren. Innerhalb des Vorhabens wird keine vertiefende Analyse einer Mehrfachnutzung von Leitungen und Windenergie auf See vorgenommen.

5.3 Rohstoffgewinnung

Für die Rohstoffgewinnung sieht der ROP 2021 mehrere Vorbehaltsgebiete mit einer Gesamtfläche von 1.319 km^2 (4,0 % der AWZ) vor, dabei unterscheidet der ROP 2021 zwischen Vorbehaltsgebieten für „Sand und Kies“ sowie „Kohlenwasserstoffe“. Diese für die Rohstoffgewinnung ausgewiesenen Gebiete überschneiden sich fast vollständig mit Gebieten für Schifffahrt, Leitungen, Forschung, Verteidigung, Schutz und Verbesserung der Meeresumwelt sowie Windenergie aus See. Lediglich mit dem Gebiet für die Fischerei auf Kaisergranat gibt es keine Überschneidungen. Alle Überschneidungen mit den Gebieten für die Windenergie auf See beziehen sich auf die Vorbehaltsgebiete für Kohlenwasserstoffe. Insgesamt sind Gebiete mit einer Fläche von 10 km^2 (0,03 % der AWZ) exklusiv für die Rohstoffgewinnung vorgesehen.

Abbildung 13: Festlegungen für Rohstoffgewinnung im Raumordnungsplan 2021



Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Die Besonderheit bei der Rohstoffgewinnung im Gegensatz zu den weiteren maritimen Nutzungsarten besteht darin, dass Rohstoffvorkommen ortsgebunden, begrenzt und nicht vermehrbar sind. Die Festlegung der Vorbehaltsgebiete für die Rohstoffgewinnung soll der mineralischen Rohstoffsicherung Deutschlands dienen. Die Vorbehaltsgebiete wurden auf Grundlage bereits bestehender bergbaurechtliche Erlaubnisse und Bewilligungen ausgewiesen. Erlaubnisse werden benötigt, um die Suche nach Rohstoffen durchführen zu können und Bewilligungen gewähren das Recht auf die Gewinnung von Bodenschätzen (§ 7 und § 8 Bundesberggesetz). Bergbaurechtliche Erlaubnisse und Bewilligungen für die Suche bzw. den Abbau bergfreier Bodenschätze für die Länder Niedersachsen, Schleswig-Holstein, Hamburg, Bremen sowie den deutschen Festlandsockel der Nordsee und einen Teilbereich des deutschen Festlandsockels der Ostsee gemäß Bundesberggesetz werden durch das Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) erteilt. Für das Land Mecklenburg-Vorpommern und dazugehöriges Küstenmeer und Festlandsockel ist das Bergamt Stralsund zuständig.

Die aktuellen Bewilligungen für den Sand- und Kiesabbau in der AWZ sind in Tabelle 12 aufgeführt. Sie erstrecken sich in die „ewige Teufe“, also theoretisch bis zum Erdmittelpunkt. Maximale Fördermengen sind in der Genehmigung eines entsprechenden Hauptbetriebsplans geregelt.

Tabelle 12: Bewilligungen für Sand- und Kiesabbau in der AWZ [184]

Gebietsbezeichnung (ROP 2021)	Abbaufeld	Rechtsinhaber	Bodenschätze	Laufzeit der Bewilligung
SKN2	BSK 1	BSK Baustoffe und Seekies GmbH	Sand, Kies	14.07.2033
SKN1	OAM III	OAM-DEME Mineralien GmbH	Steine, Kies, Sand (eingeschränkte Fahrten 01.03.-15.05.)	14.05.2051

[184] Vgl. (Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen, 2022) und (Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat & Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, 2021).

Gebietsbezeichnung (ROP 2021)	Abbaufeld	Rechtsinhaber	Bodenschätze	Laufzeit der Bewilligung
SKO1	Adlergrund Nordost	OAM-DEME Mineralien GmbH	Sand, Kies	31.12.2040

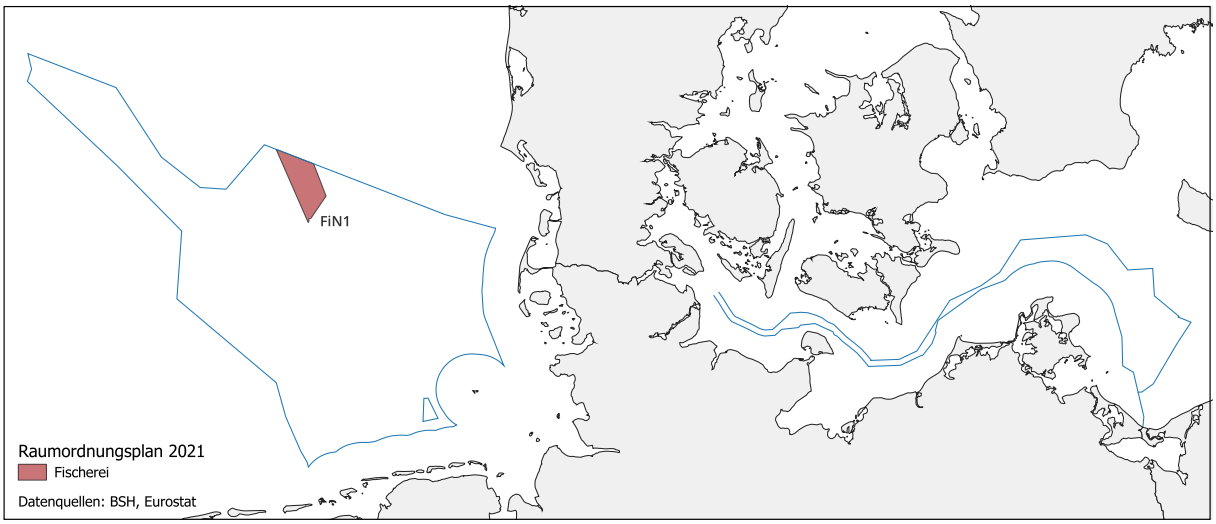
Für die Rohstoffgewinnung von Kohlenwasserstoffen besteht ein Bewilligungsbescheid für das Feld Deutsche Nordsee A6/B4, das als Vorbehaltsgebiet KWN1 im ROP 2021 festgelegt ist. Rechtsinhaber der Bewilligung ist die Wintershall DEA Deutschland GmbH. Die Laufzeit der Bewilligung endet am 31.05.2028. Bis zum Jahr 2020 wurde Erdgas gewonnen, inzwischen wurde der Betrieb der Anlage A6-A eingestellt und die Anlage befindet sich im Rückbau (LBEG, 2024a). Eine weitere Bewilligung zur Aufsuchung und Gewinnung von Kohlenwasserstoffen in der Nordsee wurde im Jahr 2022 erteilt. Die Unternehmen ONE-Dyas, Hansa Hydrocarbons und Neptune Energy Germany erhielten eine Bewilligung im Feld NB3-0004-00 mit einer Laufzeit bis zum 31.12.2042. Das Bewilligungsfeld hat eine Größe von knapp 12 km^2 und liegt vor Borkum unmittelbar an der niederländischen Grenze. Die technische Förderung von Erdgas und Errichtung einer Plattform soll in der niederländischer See erfolgen. Im Rahmen des Projekts GEMS plant ONE-Dyas eine Plattform im Feld N05-A im niederländischen Küstenmeer zur Förderung von Erdgas in den grenzüberschreitenden Feldern der niederländischen und deutschen Nordsee. Die Gasförderplattform soll über ein Seekabel mit Strom aus dem im deutschen Küstenmeer gelegenen Offshore-Windpark Riffgat versorgt werden. Dies würde eine erste Kooperation zwischen der Erdgas- und der Windenergiebranche darstellen.(LBEG, 2024b; ONE-Dyas B.V., 2022).

Hinsichtlich einer Mehrfachnutzung von Sand- und Kiesabbaugebieten und Gebieten zur Förderung von Erdgas mit der Offshore-Windenergie ergeben sich ähnliche Herausforderungen wie bei der Schifffahrt. Beispielsweise müssen Kollisionen von Baggerschiffe für den Sand- und Kiesabbau mit Offshore-Windenergieanlagen vermieden werden. Der reibungslose Betrieb sowohl der Offshore-Windparks als auch der Baggerschiffe muss gewährleistet werden, um die Wirtschaftlichkeit der Projekte zu erhalten und die Meeresumwelt sowie andere Nutzungen nicht zu gefährden. Weitere Gefährdungen können sich dadurch ergeben, dass das bei schlechten Sichtverhältnissen zur Navigation genutzte Radar von Offshore-Windenergieanlagen beeinflusst wird und dass Systemausfälle oder menschliches Versagen auftreten können, bei denen ein Schiff steuerlos abdriftet und mit einer Offshore-Windenergieanlage kollidieren könnte. Die Mehrfachnutzung von Rohstoffgewinnung und Windenergie auf See wird aufgrund der sicherheitsrelevanten Herausforderungen in diesem Vorhaben nicht vertiefend analysiert.

5.4 Fischerei

Für die Fischerei ist im ROP 2021 ein Vorbehaltsgebiet mit 616 km^2 (1,9 % der AWZ) ausgewiesen. Es handelt sich dabei um ein Vorbehaltsgebiet für die Fischerei auf Kaisergranat. Das Gebiet überschneidet sich mit Vorranggebieten für die Schifffahrt und dem zeitlich befristeten Vorbehaltsgebiet für Schweinswale. Es gibt entsprechend keine Überschneidungen mit Gebieten der Windenergie auf See, Leitungen, Rohstoffgewinnung, Forschung und der Verteidigung. Aufgrund der vollständigen Überschneidung mit Gebieten für andere Nutzungen hat die Fischerei keine exklusiv für die Fischerei vorgesehenen Vorbehalts- bzw. Vorranggebiete.

Abbildung 14: Festlegungen für Fischerei im Raumordnungsplan 2021



Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Als Begründung dafür, dass keine weiteren expliziten Festlegungen für die Fischerei erfolgen, wird im ROP 2021 angeführt, dass die Fanggebiete unterjährig je nach Zielart, Fanggerät oder der Fahrzeugherkunft etc. variieren und Festlegungen aus diesem Grund schwierig sind. Fischerei wird in der gesamten Nord- und Ostsee ausgeübt. Laut ROP 2021 ist grundsätzlich vorgesehen, dass Fischereifahrzeuge auf dem Weg zu ihren Fanggründen Offshore-Windparks durchfahren dürfen. Aktive Fischerei ist in Offshore-Windparks und in der Sicherheitszone des Windparks ausgeschlossen. Die passive Fischerei mit Reusen und Körben ist raumordnungsrechtlich außerhalb des Bereichs der Sicherheitszone, in dem sich die Anlagen selbst befinden, möglich.

Für die Fischerei in der deutschen Nord- und Ostsee sind die Kleine Hochseefischerei und die Küstenfischerei von wirtschaftlicher Relevanz. Im Bereich der Kleinen Hochseefischerei sowie der Küstenfischerei waren zusammengenommen Ende 2022 1.238 Kutter und offene Boote rekrutiert (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, 2023a). Die Fahrzeuge unterscheiden sich in Größe, Motorleistung und im Fanggerät. Eingesetzt werden vor allem verschiedene Schleppnetze und unterschiedliche Stellnetz-Typen, z.B. Grundschleppnetze, Baumkurren, pelagischen Schleppnetze und (verankerte) Stellnetze (Bundesamt für Naturschutz, 2024).

Neben der passiven Fischerei in Offshore-Windparks, werden inzwischen marine Aquakulturen, vor allem von Muscheln und Algen, in den Fokus genommen. Im Bereich der marinen Aquakulturen gibt es diverse Fallstudien zur Integration dieser in Offshore-Windparks. Laut ROP 2021 wird über diese Art der Mehrfachnutzung nachgedacht, und ein Rahmen für mögliche zukünftige Vorhaben zur Anlage von marinen Aquakulturen soll gegeben werden. Insbesondere könnte die Nähe mariner Aquakulturen zu vorhandenen Installationen, wie z.B. Fundamenten, eine gute Möglichkeit für Synergien sein, beispielsweise durch Befestigung von Langleinen oder Käfigen. Laut Forschungsprojekten könnten insbesondere küstennahe Standorte, z.B. nördlich Borkum, besonders geeignet für marine Aquakulturen sein.

Erste Erfahrungen mit marinen Aquakulturen wurden in verschiedenen Projekten bereits gesammelt, auf Basis von Buck & Langan (2017) wird im Folgenden ein kurzer Überblick gegeben:

- In Belgien haben Versuche mit Muschelansiedlungen in der offenen Nordsee gezeigt, dass die sehr rauen Bedingungen Herausforderungen mit sich brachten.
  In Verbindung mit den Offshore-Windparks C-Power und Belwind wurden Forschungsprojekte im Bereich der Muschelzucht durchgeführt (European MSP Platform, 2019).

- 2014 untersuchte eine Studie die Möglichkeiten der Muschelzucht in niederländischen Offshore-Windparks. Darin wurden finanzielle Vorteile für beide Seiten gesehen und das Potential auf 100.000 t Muscheln pro Jahr abgeschätzt, was dem Zweifachen der gesamten niederländischen Muschelproduktion entsprechen würde.
  Im niederländischen Windgebiet Borssele ist ein Bereich für marine Aquakultur vorgesehen. Anfang 2022 wurde eine Genehmigung für die Errichtung einer Muschelfarm in diesem Bereich genehmigt. Im Rahmen dieses Pilotprojekts wird diese Mehrfachnutzung erstmals in den Niederlanden konkret angewendet (Noordzeeloket, 2022).
- In Großbritannien wurde bereits im Jahr 2010 eine Muschelproduktion im Windpark North Hoyle eingeführt, diese konnte sich aber nicht nachhaltig etablieren. Weitere Projekte im Bereich der Muschelzucht wurden beispielsweise in den Windparks Gwynt y Môr, North Hoyle, Lynn and Inner Dowsing durchgeführt.

Bezogen auf die deutsche AWZ wird im Bereich der marinen Aquakulturen, insbesondere der Muschelproduktion, Potential gesehen. Miesmuscheln und Austern wurden an Teststandorten in der Nähe der Offshore-Windparkstandorte Nordergründe und Butendiek sowie innerhalb eines Nord-Süd- und eines West-Ost-Korridors durch die AWZ kultiviert (Buck & Langan, 2017). Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie zu marinen Aquakulturen an der Forschungsplattform FINO 3 wurde unter biologischen, technischen und betriebswirtschaftlichen Aspekten das Szenario einer Implementierung von Miesmuscheln an Langleinen als Kultivierungskonzept für diesen Beispiel-Standort vorgeschlagen (Geisler et al., 2018). Bis zu einer möglichen Umsetzung sind allerdings weitere Fragen zu klären.

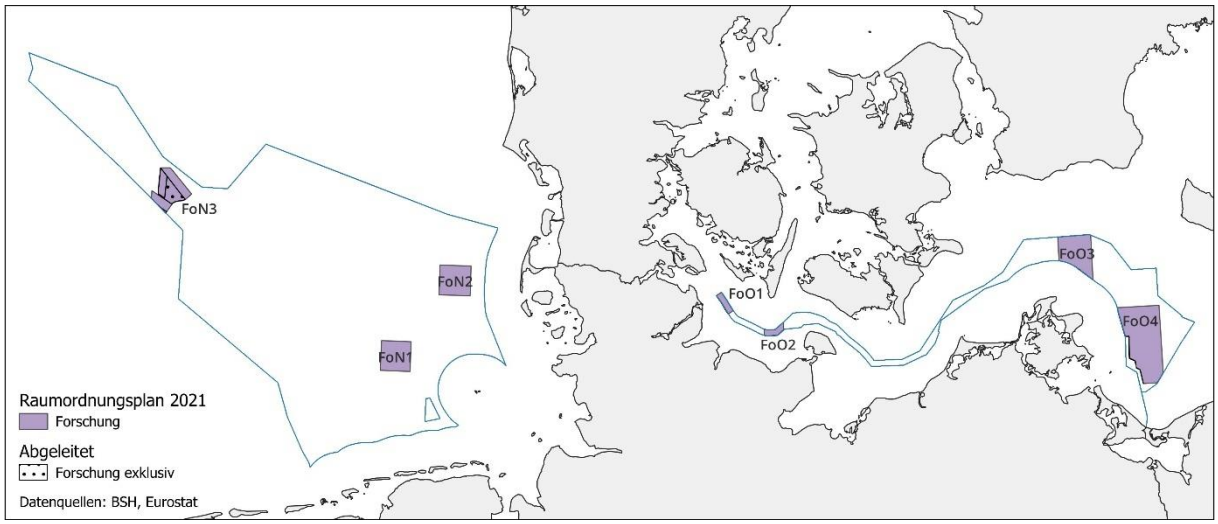
Herausforderungen für eine gemeinsame Nutzung von Offshore-Windparkflächen und Fischerei liegen vor allem in Sicherheitsbedenken und der aktuellen Kompensationsregelungen begründet. Diese aktuellen Regelungen der Bundeskompensationsverordnung sehen vor, dass bei einem Ausschluss der aktiven Fischerei in der Sicherheitszone während der gesamten Betriebsdauer, die Beeinträchtigungen der Schutzgüter Biotope, Boden, Wasser und Luft als kompensiert gelten (§ 15 BKompV) (s. Abschnitt 3.3).

Insgesamt sind zwar bereits verschiedene Ansätze zur Mehrfachnutzung von Windenergie und Fischerei im weitesten Sinne erkennbar, jedoch wird aufgrund der nicht vorhandenen Flächenanteile im ROP 2021, die exklusiv für die Fischerei ausgewiesen sind, keine vertiefende Analyse einer Mehrfachnutzung von Fischerei und Windenergie auf See innerhalb dieses Vorhabens vorgenommen.

5.5 Fischereiforschung

Für die Fischereiforschung sieht der ROP 2021 Vorbehaltsgebiete mit einer Gesamtfläche von 2.575 km² (7,6 % der AWZ) vor, welche sich auf sieben einzelne Flächen aufteilen. Die Gebiete überschneiden sich in Teilen mit fast allen ausgewiesenen Nutzungenarten, entsprechend mit Gebieten der vorrangigen Schifffahrt, Leitungen, Rohstoffgewinnung, Verteidigung, Schutz und Verbesserung der Meeresumwelt sowie Windenergie auf See. Einzig mit dem Gebiet für Fischerei gibt es keine Überschneidung. Die exklusiv für die Forschung vorgesehene Fläche beträgt 121 km² (0,4 % der AWZ).

Abbildung 15: Festlegungen für Forschung im Raumordnungsplan 2021



Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Die Gebietseinteilung entspricht grob den Standarduntersuchungsgebieten („Boxen"), in welchen das Thünen-Institut regelmäßig im Rahmen von Langzeitforschungsreihen, z. B. German Small-Scale Bottom Trawl Survey (GSBTS) und Ostsee-Boxensurvey (BaltBox), Fischereiforschung betreibt und so beispielsweise die Häufigkeit bodenlebender Fischarten ermittelt. Die Ergebnisse fließen in die Bestandserhebung des Internationalen Rates für Meeresforschung (International Council for the Exploration of the Sea: ICES) und das Monitoring für die Europäische Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie ein.

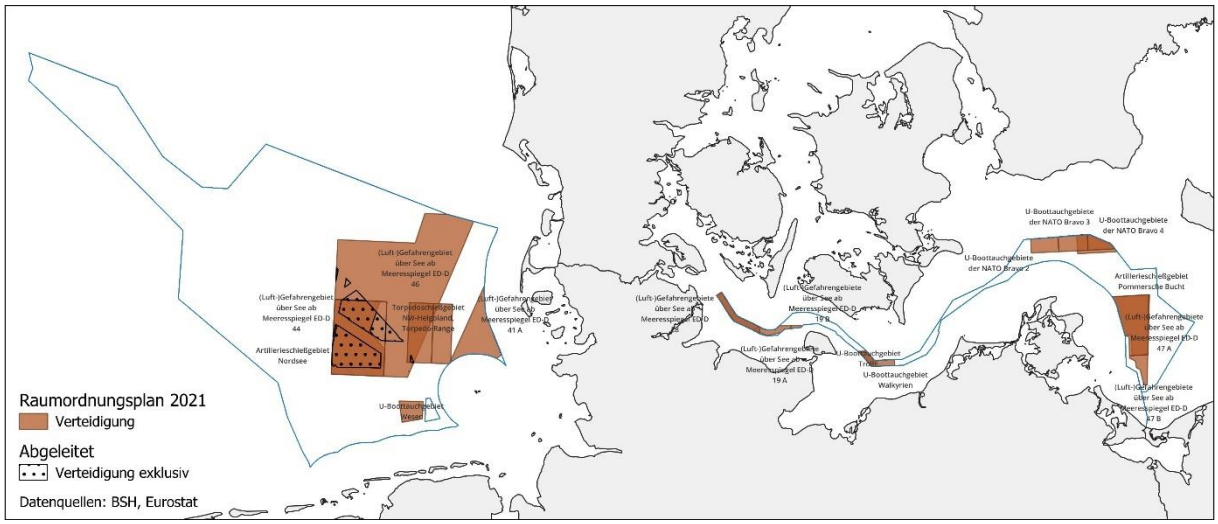
Für die Forschungsgebiete FoN3 und FoO3 in Nord- und Ostsee liegen Überschneidungen mit bedingten Vorbehaltsgebieten und Vorranggebieten für Windenergie auf See gemäß ROP 2021 vor. Sofern auf diesen Gebieten Windparks gebaut werden, soll die wissenschaftliche Fischereiforschung nach dem Raumordnungsplan in bislang üblicher Art und Umfang weiterhin möglich bleiben, was auch die grundberührende Fischereiforschung einschließt.

Die Belange der wissenschaftlichen Fischereiforschung unterscheiden sich von denen der kommerziellen Fischerei. Für die Forschungsaktivitäten ist insbesondere die Weiterführung langjähriger, standardisierter Erhebungen von zentraler Bedeutung (inkl. spezifischer Erhebungsgebiete, -zeiträume und -methodiken). Damit die Durchführung der wissenschaftlichen Fischereiforschung weiterhin gewährleistet werden kann, sind die Belange der Fischereiforschung beispielsweise bei der parkinternen Verkabelung des Windparks und dem Aufstellmuster der Windenergieanlagen zu berücksichtigen. Da der ROP 2021 im Falle der Forschung eine mögliche Mehrfachnutzung mit Windenergie auf See bereits vorsieht, wird diese Mehrfachnutzungsoption im Rahmen des Vorhabens vertieft untersucht.

5.6 Landes- und Bündnisverteidigung

Für die Landes- und Bündnisverteidigung legt der ROP 2021 mehrere Vorbehaltsgebiete mit einer Gesamtfläche von 8.585 km² (26 % der AWZ) in der deutschen AWZ fest. Diese für die Verteidigung ausgewiesenen Gebiete überschneiden sich mit Gebieten für Schifffahrt, Leitungen, Rohstoffgewinnung, Forschung, Schutz und Verbesserung der Meeresumwelt sowie geringfügig mit Windenergie auf See. Lediglich mit dem Gebiet für die Fischerei auf Kaisergranat liegt keine Überschneidung vor. Insgesamt sind Gebiete mit einer Fläche von 1.076 km² (3 % der AWZ) exklusiv für die Verteidigung ausgewiesen.

Abbildung 16: Festlegungen für Landes- und Bündnisverteidigung im Raumordnungsplan 2021



Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Die Nationale Sicherheitsstrategie der Bundesregierung basiert auf dem Konzept der integrierten Sicherheit. Im konkreten Anwendungsfall resultiert Sicherheit aus der Verbindung und Vernetzung von Energieautonomie, Wirtschaftspolitik und militärischer Sicherheit.[185]

Zunächst wird der sicherheitspolitische Hintergrund betrachtet. Die Nord- und Ostsee sind die „Hausmeere" der deutschen Marine. Sowohl ihrem Selbstverständnis nach als auch seitens der Nordatlantische Vertragsorganisation (NATO) besteht die Erwartung, dass die deutsche Marine sich dort an der Wahrung von Sicherheit und Frieden in einer Intensität beteiligt, die der politischen, ökonomischen und militärischen Bedeutung Deutschlands entspricht. Die militärische Bedeutung von Nord- und Ostsee und damit auch die Nutzungsszenarien haben sich über die letzten 30 Jahren mehrfach massiv verändert. Nach der Auflösung der Sowjetunion erreichten die Beziehungen mit Russland einen historischen Beststand und für die Marine besaß die internationale Krisenbewältigung eine zentrale Bedeutung. Seit den 2010er-Jahren haben sich die diplomatischen Beziehungen zu Russland verschlechtert und erreichten mit dem russischen Angriffskrieg auf die Ukraine einen historischen Tiefpunkt. Diese *Zeitenwende* in der europäischen Geschichte findet ihre Entsprechung in einer fundamentalen Neubewertung der sicherheitspolitischen Lage Deutschlands und Europas. Die Möglichkeit eines zwischenstaatlichen militärischen Konflikts, selbst eines „hoch intensiven" Krieges, wird in den Planungen der NATO nicht mehr ausgeschlossen. Korrespondierend hat sich der primäre Aufgabenbereich der Bundeswehr verschoben und liegt heute auf der Landes- und Bündnisverteidigung (LV/BV) und nicht mehr auf der internationalen Krisenbewältigung. Die grundlegende sicherheitspolitische Herausforderung in der Region ist die Sicherung der NATO-Nordflanke, d.h. für die Marine die Ostsee. Doch auch die Nordsee ist von herausragender Bedeutung, da sie für die transatlantische militärische Logistik (Transport von Soldaten und Gerät auf dem Seeweg) zentral ist. Mit dem Fokus auf LV/BV gehen veränderte Szenarien der Nutzung von Nord- und Ostsee durch die deutsche Marine und die Luftwaffe einher. Hierzu gehören perspektivisch auch mehr gemeinsame Manöver mit den neuen NATO-Mitgliedern Schweden und Finnland. Aus Sicht der Marine stellt der ROP 2021 das *operative Minimum* zum Zeitpunkt seiner Erstellung dar. Unter Bedingungen von LV/BV stellt sich das operative Minimum in Zukunft potentiell anders dar. Die Potentiale einer

[185] Auch der Klimawandel besitzt eine sicherheitspolitische Dimension, die für die Nord- und Ostsee im Kontext der vorliegenden Studie jedoch von nachgeordneter Bedeutung ist.

Mehrfachnutzung militärischer Vorbehaltsflächen bedarf daher zwingend einer Kontextualisierung im Rahmen einer sicherheitspolitischen Gesamtbewertung.

In nächsten Schritt wird der Zusammenhang von Energie- und Sicherheitspolitik vor dem Hintergrund der sicherheitspolitischen Neubewertung Russlands nach der Zeitenwende analysiert.

Russland hat als Reaktion auf die europäischen Sanktionen im Zuge des Ukraine-Krieges die Energielieferungen nach Europa als Waffe eingesetzt. Spätestens diese Entwicklung verdeutlicht, dass Energie- und Sicherheitspolitik gemeinsam gedacht werden muss. Energiepolitik, d.h. im vorliegenden Fall die Nutzung und der Ausbau von Offshore-Windenergieanlagen, besitzt eine eminent sicherheitspolitische Dimension. Dies wurde in der "Ostend Declaration on the North Sea as Europe´s Green Power Plant" von neun europäischen Staaten auch betont (Government of the Netherlands, 2023). Vor dem Hintergrund des schmalen deutschen Küstenstreifens besteht jedoch ein Zielkonflikt für Deutschland zwischen den beiden Sicherheitsperspektiven Energiesicherheit und militärischer Sicherheit, insbesondere vor dem Hintergrund des dritten Zieles der Bundesregierung, dem Klimaschutz. Offshore-Windparks sind Teil der kritischen Infrastruktur (KRITIS), insofern ist ihr Schutz eine sicherheitspolitische Aufgabe, die jedoch aufgrund grundgesetzlicher Vorgaben nicht von der Bundeswehr/Marine erbracht werden kann. Ausnahmen erfolgen im Rahmen von Amtshilfe sowie nach militärischen Angriffen durch staatliche Akteure nach § 4 oder § 5 NATO-Vertrag.

Der ROP 2021 sieht für Nord- und Ostsee Flächen für die militärische Nutzung vor. Differenziert werden muss zwischen Auswirkungen einer Mehrfachnutzung im Konfliktfall und in Friedenszeiten. Letztere wird in erster Linie zur Aufrechterhaltung der Einsatzbereitschaft, der Übung an Waffen und Material, sowie unterschiedlich großen Manöver der Marine und ggf. der Luftwaffe genutzt. Speziell ausgewiesen sind Gebiete für Schießübungen, Fliegerschießübungen, Luftgefahrengebiete, Torpedoübungen, Minenjagd und Tauchgebiete für U-Boote (BSH, 2020a).

Aus den unterschiedlichen Nutzungen der Gebiete ergibt sich, dass bei einer möglichen Mehrfachnutzung Unter- und Überwasserübungsgebiete sowie der Luftraum mit ihren jeweiligen spezifischen Herausforderungen für Mehrfachnutzung zu unterscheiden sind (dreidimensionales Gefechtsfeld+ Cyber und Weltraum). Hierbei ist auch die räumliche Nähe der Übungsgebiete zu den Stützpunkten der Marine relevant. Auch wenn die Übungsgebiete in der AWZ teilweise 40 km von der Küste entfernt liegen, verkürzt jeder gefahrene Kilometer den Aufenthalt im Übungsgebiet und damit die Zeit für Manöver und verlängert gleichzeitig die Betriebszeit des Materials. Der leichte Zu- und Abgang vom Übungsgebiet ermöglicht eine unkomplizierte Nutzung auch im Tagesbetrieb. Die Nutzung der Gebiete durch Marine und Luftwaffe erfolgt in schwankender Intensität.

Im nächsten Schritt wird die wirtschaftspolitische Dimension von Sicherheitspolitik betrachtet. Deutschland, die EU und viele Vertreter einer regelbasierten Ordnung (insbesondere die Vereinigten Staaten von Amerika) nutzen die Vernetzung und die (zumeist) ökonomischen Vulnerabilitäten von nicht-demokratischen und nicht-regelorientieren Staaten, um mithilfe von ökonomischen Sanktionen geo-ökonomische Macht zu projizieren. Dieses Instrument wurde „vom Westen" in den vergangenen Jahren zunehmend häufiger dort genutzt (S. Chowdhry et al., 2022). Doch auch der Westen ist vulnerabel gegenüber ökonomischen Sanktionen, wie die sicherheitspolitisch motivierte Energiepolitik Russlands gegenüber der EU und Deutschland im Zuge des Ukrainekrieges verdeutlichte. Deshalb besitzt Energieautonomie – auch umgesetzt durch den Ausbau von Offshore-Windparks – eine eminent sicherheitspolitische Dimension. Als KRITIS sind Offshore-Windparks potentielle Angriffsvektoren für feindliche staatliche wie nicht-staatliche Akteure, sei es kinetisch, hybrid oder rein digital. Deshalb besitzt für einige

Ostseeanrainerstaaten die Vulnerabilität von Offshore-Windparks gegenüber Angriffen feindlicher Staaten entscheidende Bedeutung für Standortentscheidungen. Dies betrifft gegenwärtig insbesondere Estland (das ausschließlich die Westküste für Offshore-Wind nutzen will) als auch Schweden, das über jahrzehntelange Erfahrung in der Verletzung ihrer Hoheitsgewässer durch russische U-Boote verfügt.[186]

Indizien dafür, dass kritische Energie-Infrastruktur als Angriffsvektor hybrider Kriegführung dienen kann, mehren sich nach dem russischen Angriff auf die Ukraine. Dies verdeutlicht erstens die Tatsache, dass die Fernsteuerung mehrerer tausend Windenergieanlagen am 24.02.2022 nach einem russischen Angriff auf ein Satellitennetzwerk ausfiel. Ob es sich um einen Kollateralschaden oder einen gezielten digitalen Angriff handelte, kann nicht mit letzter Sicherheit beantwortet werden. Auffallend ist jedoch, dass – wie WinFuture am 27.04.2022 berichtet – „in der letzten Zeit (…) die großen europäischen und deutschen Betreiber von Windenergieanlagen verstärkt unter Beschuss (stehen). Teils trifft es auch die Zuliefer-Unternehmen. Eine Verbindung mit dem russischen Angriff auf die Ukraine ist wahrscheinlich“ (Kahle, 2022).

Zweitens sind die Angriffe auf Nord Stream 1 und 2 im September 2022 ein sehr ernst zu nehmendes Warnzeichen. Obwohl die Frage nach der Verantwortung für diese Angriffe offiziell noch nicht abschließend geklärt ist, ist unstrittig, dass ein kinetischer Angriff auf Offshore-Windparks, Konverter-Stationen oder stromleitenden Unterseekabel ohne Zweifel möglich ist. Studien zum destruktiven Potential unterschiedlicher Angriffsformen auf Offshore-Windenergieanlagen liegen bereits vor (Mazzuchi, 2019). Steigt der Anteil der Offshore-Windparks an der gesamten Energieproduktion, steigen auch die gesamtgesellschaftlichen und ökonomischen Konsequenzen von Angriffen auf diese KRITIS.

Bereits mit der Annexion der Krim durch Russland im Jahr 2014 veränderte sich die internationale sicherheitspolitische Situation grundlegend. Die Bundeswehr reagierte auf diese und andere Transformationen des internationalen Sicherheitsumfelds mit der Ausarbeitung neuer operativer Leitlinien (OpLL) der Bundeswehr; die NATO mit der Ausarbeitung eines neuen “NATO Strategic Concepts” (2022). Durch den Krieg zwischen Russland und der Ukraine, den Bundeskanzler Scholz als *Zeitenwende* in der europäischen Politik bezeichnet, hat sich auch die sicherheitspolitische Bewertung der Ost- und Nordsee noch einmal verschärft. Die deutsche Marine ist in der Nord- und Ostsee im Rahmen der LV/BV verstärkt aktiv.

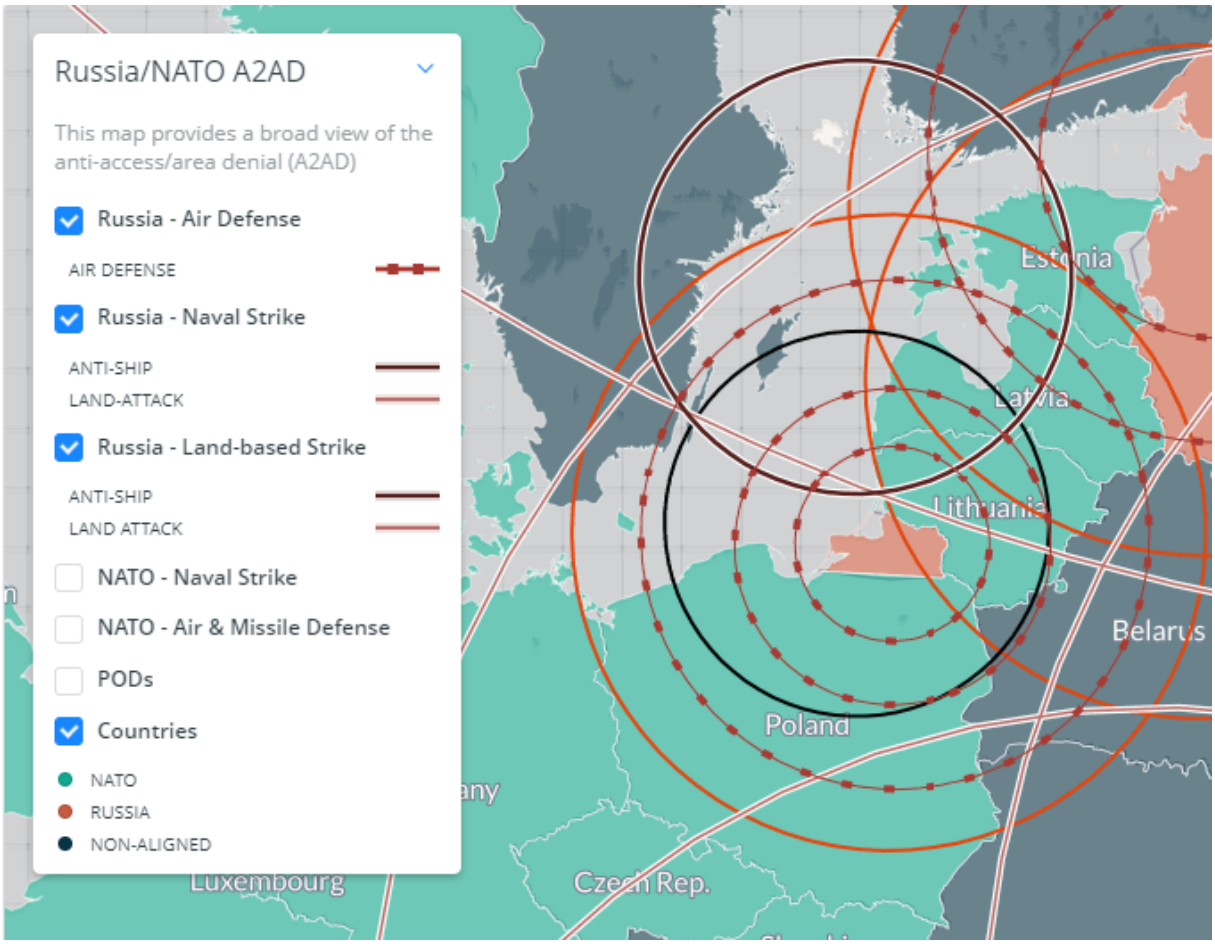
Schon vor der Eskalation des Konflikts wiesen alle strategischen militärischen Dokumente in dieselbe Richtung: Die LV/BV besitzt (wieder) oberste Priorität. Zentraler sicherheitspolitischer Herausforderer ist hierbei Russland. In diesem Kontext gewinnen die Ostsee (primär) und die Nordsee (sekundär) als maritime geopolitische Räume massiv an Bedeutung (NATO-Nordflanke). „Insbesondere die Versorgung der östlichen NATO-Bündnispartner über den Seeweg (Sea Lanes of Communication) […] im Falle eines Konfliktes ist regelmäßig in den Vordergrund gestellt worden.“ (Bredick, 2021) Die Nutzung der maritimen Flächen als Teil der größeren übergreifenden NATO-Nordflanke durch die Marine und Luftwaffe resultiert dabei (auch) aus der Fähigkeitsanalyse, welche die Fähigkeiten der russischen Marine in der Ostsee beschreibt, die „heute mehr als unterstützendes Element einer „geografischen Verteidigungszone“ der Russischen Föderation verstanden (wird)“ (Bredick, 2021). Dies impliziert eine regionale Verteidigungsstrategie, die sich jedoch durchaus auf offensive Mittel stützt, um Staaten und Akteure in der Region abzuschrecken. Russland verfügt über herausragende A2/AD[187] Fähigkeiten in der

[186] Vgl. (Sill Torres et al., 2020), (Pronińska & Księżopolski, 2021) (P. Richards et al., 2021) (Loughney et al., 2021), (Guşatu et al., 2022), (Taminiau & van der Zwaan, 2022).

[187] Anti-Access/Area Denial (A2/AD) ist die Fähigkeit, gegnerischen Einheiten zu Lande, zu Wasser und in der Luft den Zugang und/oder die Bewegungsfreiheit in einem ausgewählten Operationsgebiet mit militärischen Mitteln zu versagen, mindestens aber zu erschweren.

gesamten Ostsee. In diesem Kontext kann die (maritime) sicherheitspolitische Bedeutung des russischen Stützpunkts Kaliningrad kaum überschätzt werden, da sie Russlands modernste A2/AD Zone darstellt (Iskander-M und Iskander-K sind dort stationiert, also fahrzeuggebundene Raketensysteme, die sowohl ballistische Kurzstreckenraketen als auch Marschflugkörper abschießen können).

Abbildung 17: NATO A2AD Environment



Quelle: (Williams, 2017)

In der momentanen Umbruchssituation und geopolitischen Neuordnung des sicherheitspolitischen Raumes Europa entschied sich die Bundesregierung dafür, die Bedeutung der Bundeswehr im Rahmen von LV/BV ebenso zu erhöhen wie die Unabhängigkeit im Energiesektor. Die Sicherung der Offshore-Windenergieanlagen ist wie bereits ausgeführt eine Frage der nationalen Sicherheit – gleichwohl sind hierfür primär die Betreiber zuständig.

Wie vulnerabel die KRITIS ist, veranschaulicht der Angriff auf die Nord Stream 1 und 2. Dieser Angriff konnte erst nachträglich erkannt werden, da das maritime Lagebild Unterwasser gegenwärtig nicht optimal ist. Hier eröffnen sich ggf. Optionen für die Mehrfachnutzung durch Nutzung von stationärem Sonar an Windenergieanlagen oder generell der Nutzung der Sensoren von Offshore-Windenergieanlagen.

Alle genannten Entwicklungen verändern die Potentiale zur Mehrfachnutzung von Flächen für die Energiegewinnung und Verteidigung. Ob die Gleichzeitigkeit der Prioritätserhöhung von LV/BV und Energieautonomie die Mehrfachnutzung erleichtert oder erschwert, kann aktuell noch nicht abschließend bewertet werden. Doch bereits 2020 wurde auf Basis eines Szenario-

Ansatzes argumentiert, dass das Potential für Mehrfachnutzung zwischen Offshore-Windparks und anderen Meeresnutzungen in Deutschland gering sei (Gusatu et al., 2020) sei. Am Beispiel Schottland verdeutlichen die Autoren anhand von Einzelfallentscheidungen, wie minimale Flächengewinne bei hohem Planungsaufwand generiert werden können (Gusatu et al., 2020).[188]

Folgend werden die Chancen und Herausforderungen einer Mehrfachnutzung von Offshore-Windenergie und Verteidigung in einem Literaturüberblick dargestellt. Aufgrund verfassungsrechtlicher Unterschiede besteht nur ein begrenztes Potential Einsichten für Deutschland aus der Analyse der Praxis anderer Ostseeanrainer – insbesondere England, Dänemark, Schweden und Estland – zu generieren. Trotzdem lohnt es sich im Folgenden bei der Literaturrecherche auch Beispiel aus anderen Ländern mit einzubeziehen.

Zusammenfassend gibt es nur wenige wissenschaftliche Publikationen, die die Mehrfachnutzung militärischer Flächen in komparativer Perspektive thematisieren.[189] Es existieren jedoch eine Reihe von Studien, die von Anrainerstaaten der Nordsee und Ostsee in Auftrag gegeben wurden, um die Mehrfachnutzung von militärischen Flächen für Zwecke der Energiegewinnung durch Offshore-Windenergieanlagen zu prüfen. Insbesondere ist hier eine Studie aus England zu nennen (UK Ministry of Defence, 2021). Die Übertragbarkeit der jeweiligen Ergebnisse ist jedoch begrenzt, da die entscheidenden Variablen hierfür die jeweiligen militärischen Nutzungsprofile darstellen. Die größte Herausforderung, die die englische Studie identifizierte, waren militärische Radarbeeinträchtigungen. Herausforderungen, die für die deutsche Marine relevant sind, wie z.B. die Einschränkungen für U-Boote und ihr Sonar, werden in der englischen Studie nicht erwähnt. Die Verdichtung der Nutzung aufgrund des schmalen deutschen Küstenstreifens – insbesondere in der Ostsee – schränkt die Übertragbarkeit weiter ein. Auch unterscheiden sich die Praxis und die rechtliche Rahmung von zivil-militärischer Kooperation in England deutlich von jener in Deutschland.

Sicherheitspolitische Herausforderungen durch die Nähe zu Offshore-Windenergieanlagen haben andere NATO-Mitgliedsstaaten bereits in sicherheitspolitischen Reports[190] untersucht. Etliche Herausforderungen in der Wechselwirkung zwischen militärischer und ziviler Nutzung konnten dabei in den letzten 20 Jahren bereits identifiziert werden, z.B. im Bereich der Seeaufklärung „Radarbeeinträchtigung“ unterschiedlichster Art.[191] Hierzu gehören u.a. „shadowing“, d.h., dass entgegenkommende Objekte aufgrund elektromagnetischer Effekte der Turbinen auf dem Radar nicht mehr erscheinen[192]; „clutter“-Effekte, die aus Reflektieren von Radarwellen an den Rotorblättern resultieren sowie das Erscheinen von „Phantomobjekten“ auf dem Radar. Technische Lösungsansätze finden sich bereits bei (Sergey et al., 2008).[193] Problematisch werden solche Effekte, da maritime Lagebilder schwerer zu erstellen sind und militärische Angriffe später erkennbar wären. Gerade für die von vielen unterschiedlichen Akteuren stark frequentierte Ostsee folgen hieraus *safety- und security*-Herausforderungen. Neben möglichen Störungen der Lagebilder sind Offshore-Windparks auch als KRITIS anzusehen, die potentiell von nicht-staatlichen, terroristischen Gegnern – u.a. durch das Hacking von autonomen Schiffen – aber auch von staatlichen Gegnern angegriffen werden können, auch mit dem Ziel, in LV/BV-

[188] Vgl. weiterführend für ein Framework zur Verbesserung der Ko-Existenz von Windparks und Militärischen Übungsgebieten (Mehdi et al., 2018).

[189] Vgl. (Sill Torres et al., 2020), (Pronińska & Księżopolski, 2021), (P. Richards et al., 2021), (Loughney et al., 2021), (Guşatu et al., 2022), (Taminiau & van der Zwaan, 2022).

[190] u.a. (UK Ministry of Defence, 2021) und (Government of the Netherlands, 2021).

[191] Vgl. mit weiteren Nachweisen (Hollingsworh, 2018).

[192] Vgl. für eine Perspektive des amerikanischen Verteidigungsministeriums Radareffekte und Seeraumüberwachung (Auld et al., 2014).

[193] Vgl. für aktuelle technische Lösungsvorschläge die entsprechende Projektförderung in UK: (Defence and Security Accelerator et al., 2021).

Szenarien den Einsatz der Marine in Randmeeren und Küstengewässern zu erschweren.[194] Auch wird durch die bestehenden Offshore-Windparks der Einsatz von bemannten und unbemannten Unterwasserobjekten durch die Marine erschwert. Die größten Herausforderungen resultieren aufgrund ihrer Größe für U-Boote und deren Sonar. In der Literatur wird darauf verwiesen, dass Übungen der deutschen Marine zwar auch jenseits der AWZ erfolgen können, dass hierdurch jedoch die Stehzeiten des militärischen Personals erhöht werden.

Auch für die Luftwaffe resultieren aus Offshore-Windparks Herausforderungen, die sich partiell mit jener der Marine überschneiden. Hierzu gehört erstens die Qualität der Radarbilder. Die Luftraumüberwachung wird mit der aktuell genutzten Technik verschlechtert, so dass tieffliegende angreifende (Kampf-)Flugzeuge und unbemannte Luftfahrzeuge später identifiziert werden können. Tiefflugmanöver der Luftwaffe werden erschwert – dies gilt insbesondere für Luftkampfszenarien. Aber auch in Friedenszeiten gilt, dass die Bewegung im Luftraum (auch für Hubschrauber) potentiell gefährlicher wird.[195]

Offshore-Windparks sind jedoch auch Objekte des Interesses der Bundeswehr, die mittel- und langfristig die Nutzung nicht-regenerativer Energiequellen (also insbesondere Öl und Gas) reduzieren will und somit zum Kunden der Betreiber der Offshore-Windparks werden kann (Rappuhn & Struck, 2021). Energie- und Versorgungssicherheit sind, unabhängig von jedem Konflikt, wirtschaftspolitisch eine relevante Größe und damit u.a. auch für die Erhaltung der territorialen-Sicherheit der Bundesrepublik und damit für die Bundeswehr relevant.

Ein weiterer relevanter Aspekt, der zur Erhöhung der Sicherheit in der AWZ beitragen kann, ist, dass Offshore-Windparks als permanenter Standort zur Überwachung und Aufklärung des Raumes relevant werden können. Die englische Literatur betont, dass Offshore-Windparks Träger von Sensoren und Drohnen sein können, die für die Erstellung von validen maritimen Lagebildern unter Wasser, über Wasser und im Luftraum einen Beitrag leisten können. Eine aktuelle Studie der britischen Regierung betont, dass einzelne Offshore-Windenergieanlagen mit Radaranlagen versehen oder bestehende, landgestützte Radaranlagen erhöht werden können/sollen, um so die oben skizzierten Defizite zu kompensieren.

Diese Lösung ist jedoch aus mehreren Gründen für Deutschland herausfordernd: Erstens aus Datenschutzgründen, wenn privatwirtschaftliche Sensoren und ihre Daten für militärische Zwecke genutzt würden; zweitens, wenn militärisch sensible Infrastruktur an ziviler Infrastruktur angebracht wird (z.B. wenn militärische Radaranlagen implementiert würden); drittens weil die Übertragung der Sensor- und Radardaten gesichert erfolgen müsste und schließlich, weil die Offshore-Windparks damit zu primären und legitimen militärischen Zielen bei einem Angriff durch staatliche Gegner würden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die gegenwärtig ausgewiesenen Vorbehaltsgebiete aus der Perspektive der Marine und der Luftwaffe das operative Minimum darstellen

[194] Vgl. exemplarisch für Polen (Hac & Szefler, 2018).

[195] Das NATO Energy Security Center of Excellence nennt in einer aktuellen Studie aus dem Jahr 2021 ähnliche Punkte wie jene, die in der Literatur seit fast 20 Jahren bekannt sind: „Among other interests in the blue economy, defence implications are a national priority in most countries; in the absence of other options (such as relocating military training areas), they override all other sectoral interests. The spatial needs and interests of national defence and security at sea are complex, as maritime activities could get in the way of military infrastructure. (…) Wind farms can also affect military operations, for example, turbines can interfere with low-level flight training routes, testing military equipment sensitive to electro-magnetic noise, and with military radar systems. There may also be negative impacts on optical, radio and hydro-acoustic observation and the possibilities of veiling. Maritime activities can interfere with naval training areas, artillery ranges or airbases, in areas that need to be free of obstacles. Obstacles particularly include tall permanent installations such as offshore wind turbines. he military in each country, predominantly (but not exclusively) in the form of air forces, needs access to airspace for primarily two purposes: training and national defence. This includes the surveillance of the airspace above and surrounding territory, including over sea. Wind turbine developments can have a detrimental effect on military operations as military aviation operations are markedly different from civil operations, particularly with respect to operational low flying, and the sensitivity of military communications, navigation and air surveillance facilities. (…)"(NATO ENERGY SECURITY Center of Excellence, n.d., S.44-45).

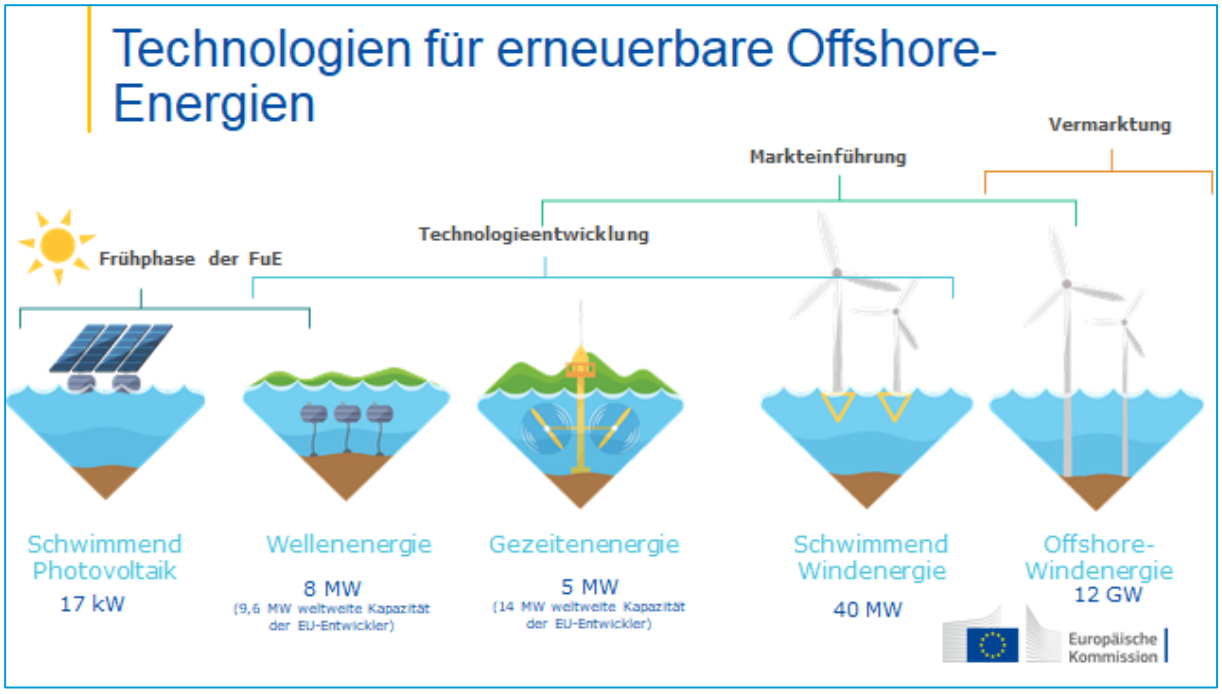
und vor dem Hintergrund der Zeitenwende und der damit verbundenen Fokussierung auf Landes- und Bündnisverteidigung eine Mehrfachnutzung, die über den Status quo hinaus geht, aus militärisch sicherheitspolitischer Perspektive unrealistisch ist. Auch wenn eine Ausweitung der Flächen für Windenergie zu Lasten der Vorbehaltsflächen der Verteidigung die Energiesicherheit stärken würde, wäre dies nur unter Abstrichen an der militärischen Sicherheit möglich, und ist damit nicht vertretbar.

Jedoch ist eine Nutzung der Offshore-Windparks als Träger von Sensorik zu Verbesserung maritimer Lagebilder in ziviler und militärischer Perspektive ist hingegen nicht nur denkbar, sondern sinnvoll und kann so indirekt auch die Energiesicherheit unterstützen.

5.7 Hybride Energieerzeugung

Auf den Meeren kann erneuerbare Energie nicht allein durch Windenergieanlagen erzeugt werden, sondern auch durch andere Formen der erneuerbaren Energieerzeugung. Dazu zählen zum einen sogenannten Meeresenergietechnologien, zu welchen beispielsweise Wellen- und Gezeitenkraftwerke oder auch die thermische Meeresenergieumwandlung gehören. Zum anderen werden der Einsatz schwimmender Photovoltaikanlagen und die Erzeugung von Biokraftstoffen aus Algen als mögliche Zukunftstechnologien diskutiert. Die EU-Strategie zur Nutzung des Potentials der erneuerbaren Offshore-Energien für eine klimaneutrale Zukunft (EK, 2020) formuliert neben dem Ziel, die Offshore-Windenergieleistung bis zum Jahr 2050 auf 300 GW zu erhöhen, das Ziel, die installierte Meeresenergieleistung von aktuell wenigen Megawatt auf 40 GW zu steigern.

Abbildung 18: Technologien für erneuerbare Offshore-Energien



Quelle: (EK, 2020)

Eine Übersicht zu den wesentlichen erneuerbaren Offshore-Energien inklusive deren Entwicklungsstatus bietet Abbildung 18. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Technologien, die in der EU-Strategie genannt werden, erläutert.

Gezeitenkraftwerke nutzen die Energie des Tidenhubs, also des Höhenunterschieds aus Hoch- und Niedrigwasser. Insbesondere eignen sich Standorte an Buchten oder Flussmündungen mit großen Höhenunterschieden zwischen Ebbe und Flut. Es gibt beispielsweise Staudammbauweisen und Strömungsturbinen.

Wellenkraftwerke nutzen die ständige Wellenbewegung zur Stromerzeugung. Die Technologie befindet sich in der frühen Phase der technologischen Entwicklung. Es gibt mehrere Wirkungsansätzen, wie die Wellenenergie genutzt werden kann. Unter anderem gibt es folgende Konzepte: Punktabsorber, Attenuator, oszillierenden Wassersäule und rotierende Masse.

Schwimmende Photovoltaikanlagen werden bereits auf (künstlichen) Binnengewässern eingesetzt, Konzepte für den Einsatz auf dem Meer befinden sich noch in der Entwicklungsphase. Für schwimmende Photovoltaikanlagen werden verschiedene Bauweisen entwickelt. Beispielsweise werden die Paneele auf starren Schwimmkörpern montiert, sodass sie oberhalb der Wasseroberfläche liegen oder sie werden auf einer Membran installiert, die direkt auf der Wasseroberfläche schwimmt, geschützt durch einen umliegenden Schwimmring.

Thermische Meeresenergieumwandlung (Ocean Thermal Energy Conversion: OTEC) und Meereswärmekraftwerke nutzen den Temperaturunterschied zwischen warmem Oberflächenwasser und kaltem Tiefenwasser. Es eignen sich Standorte mit besonders großen Temperaturunterschieden zwischen Tiefen- und Oberflächenwasser, die mindestens 20 Grad betragen sollten.

Die Gewinnung von **Biokraftstoffen aus Algen** befindet sich in einer frühen Entwicklungsphase. Kraftstoffe aus Algen können aus Mikroalgen (mikroskopisch kleine Algen, Phytoplankton) oder Makroalgen (Seetang) gewonnen werden. Der Anbau von Algen in industriellem Maßstab wird noch nicht betrieben, wobei sich bereits mehrere Projekte auf die Machbarkeit fokussieren. Nach dem Anbau und der Ernte auf See, können Algen an Land für verschiedene Verwendungszwecke weiterverarbeitet werden.

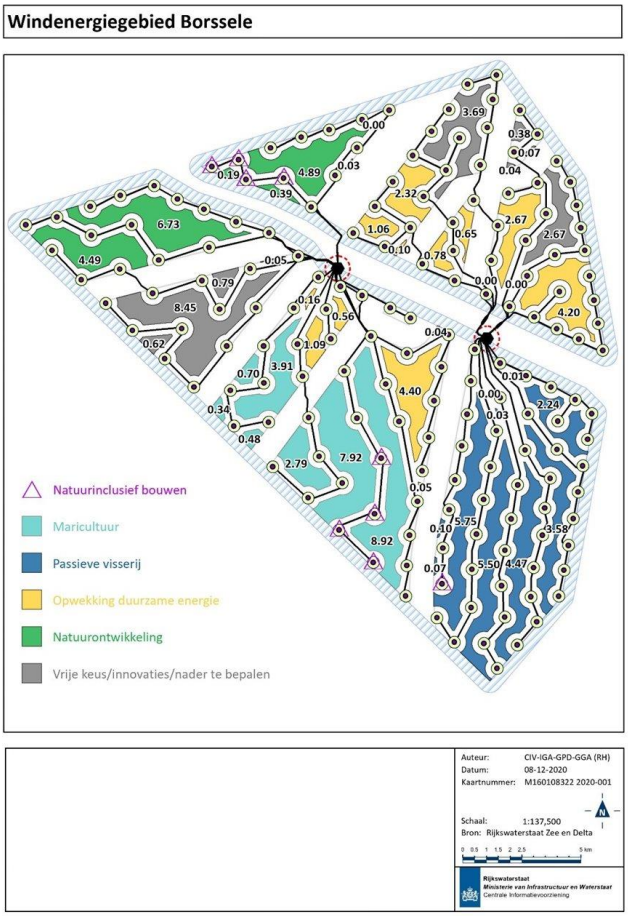
Der ROP 2021 legt keine Flächen für anderen Formen der erneuerbaren Energien als der Windenergie fest. Auch die Fläche für die sogenannten „sonstigen Energiegewinnung“ in der Nordsee, die im FEP 2023 festgelegt ist, befindet sich auf einem im ROP 2021 ausgewiesenen Windenergiegebiet. Entsprechend könnte sich eine mögliche Mehrfachnutzung derart gestalten, dass auf der Fläche des Windparks eine weitere erneuerbare Offshore-Technologie installiert wird. Durch eine solche Mehrfachnutzung könnte der Energieertrag auf der vorhandenen Fläche erhöht werden und es könnten sich darüber hinaus Synergien bei der Nutzung der Infrastruktur und in Bereichen wie Service und Wartung ergeben. Bisher befinden sich die verschiedenen Technologien mehrheitlich noch in dem Status der (frühen) Technologieentwicklung und es liegen wenige Erfahrungswerte aus der Praxis vor. Der ROP 2021 weist zwar keine expliziten Flächen für die hybride Energieerzeugung aus, nichtsdestotrotz konnte dieser Abschnitt aufzeigen, dass es verschiedene Varianten zur Offshore-Energieerzeugung als Mehrfachnutzungsoption existieren. In Kombination mit der Offshore-Windenergie könnten sich daraus zusätzliche Potentiale für die Erzeugung erneuerbarer Energie ergeben, daher wird die hybride Energieerzeugung im Rahmen des Vorhabens für **schwimmenden PV-Anlagen, Wellenkraftwerken und der Anbau von Algen zur Herstellung von Biokraftstoffen** aus Algen in einer vertieften Analyse betrachtet.

5.8 Beispiel: „Flächenpass“ für niederländische Offshore-Windparks

Um die Nutzung der Windparkgebiete für weitere Nutzergruppen zu ermöglichen, wurde in den Niederlanden im Rahmen des „North Sea 2016-2021 Policy Memorandum“ festgelegt, dass Offshore-Windparks künftig für die Mehrfachnutzung mit anderen Nutzungsformen geöffnet werden

sollen. Hierunter wurde die gemeinsame Nutzung der Windparkflächen mit marinen Aquakulturen und auch der passiven Fischerei sowie des Weiteren anderen Formen der erneuerbaren Energiegewinnung und -speicherung sowie Naturschutz verstanden. Beispielsweise wurde für die Windfläche Borssele ein „Flächenpass“ erstellt, der einen Überblick über mögliche Mehrfachnutzungen in einer geeigneten Aufteilung gibt (siehe Abbildung 19).

Abbildung 19: „Flächenpass“ mit Mehrfachnutzungsbereichen für das Windenergiegebiet Borssele



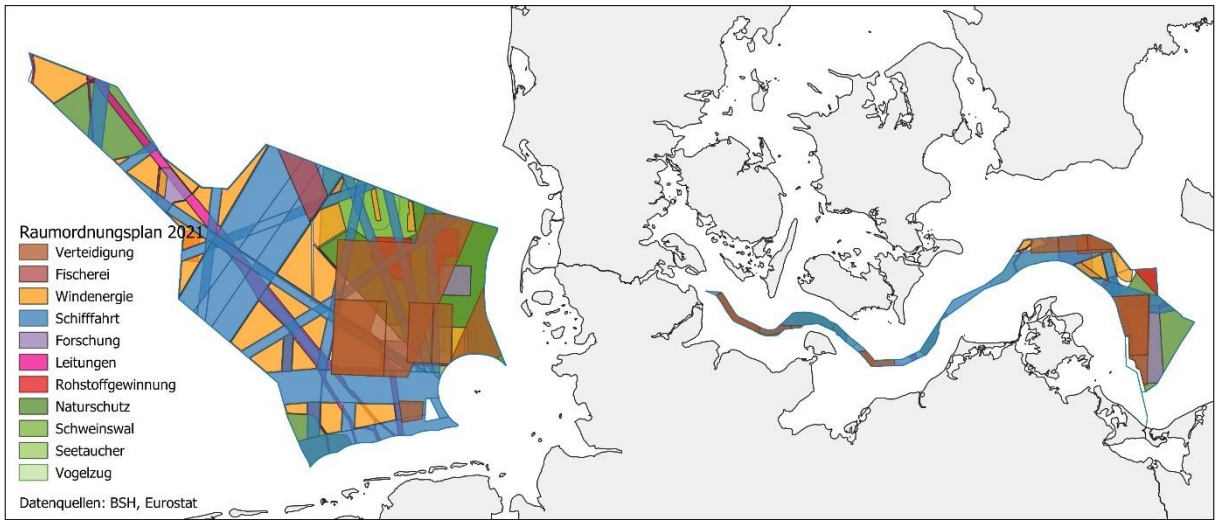
Quelle: (Noordzeeloket, 2022)

Der Flächenpass enthält Bereiche für „Maricultuur” (Marine Aquakultur, z.B. Meeresfrüchte und -algen (hellblau)), „Passieve visserij“ (Passive Fischerei, z.B. Hummerreusen (dunkelblau)), „Opwekking duurzame energie“ (Erzeugung von erneuerbarer Energie, z.B. Solarenergie (gelb)), „Natuurontwikkeling“ (Entwicklung der Natur, z.B. Fischrefugien, künstliche Riffe (grün)) und „Vrije keus/innovaties/nader te bepalen“ (Freie Wahl/Innovation/zu bestimmen (grau)). Der dunkelblaue Flächenbereich wurde für die Mehrfachnutzung mit der passiven Fischerei vorgesehen (Noordzeeloket, 2022). Der Flächenpass soll möglichst mit der Fertigstellung der Windparks veröffentlicht werden, er zeigt die für die gemeinsame Nutzung verfügbaren Flächen an. Flächen für die Durchfahrt von Schiffen, Sicherheitszonen um Anlagen und Kabel stehen nicht zur Verfügung. Nutzer, die ein Projekt in einem der Bereiche für die gemeinsame Nutzung umsetzen wollen, müssen dafür eine Genehmigung bei den niederländischen Behörden einholen.

5.9 Übersicht zur Flächennutzung und Auswahl von Mehrfachnutzungsoptionen für die weitere Analyse

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die unterschiedlichen Nutzungsformen, welche der ROP 2021 festlegt, sowie zusätzlich die hybride Energieerzeugung, beschrieben und erläutert. Es wurden die wesentlichen Chancen und Herausforderungen im Hinblick auf eine Mehrfachnutzung der jeweiligen Nutzungsform mit der Windenergie auf See abgeleitet. Die Abbildung 20 zeigt alle Nutzungsformen des ROP 2021 im Überblick.

Abbildung 20: Übersicht Festlegungen im Raumordnungsplan 2021



Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Unabhängig von einer Einteilung in Vorrang- und Vorbehaltsgebiete, verdeutlicht die Karte, dass nur ein äußerst kleiner Flächenanteil der deutschen AWZ keiner Nutzung im ROP 2021 zuzuordnen ist und dass viele Gebiete mehrfach überplant sind. Die verschiedenen Nutzungsarten überschneiden sich in vielen Fällen gegenseitig. Die für die Windenergie auf See ausgewiesenen Gebiete weisen Überschneidungen mit Gebieten aller weiteren Nutzungsarten auf, außer mit den Gebieten für die Schifffahrt und Fischerei.

Tabelle 13: Flächenüberschneidungen in der AWZ nach dem Raumordnungsplan 2021

Flächenüberschneidungen	Schifffahrt	Windenergie	Leitungen	Rohstoffgewinnung	Fischerei	Forschung	Schutz und Verbesserung der Meeresumwelt	Verteidigung
Schifffahrt	-	nein	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Windenergie	nein	-	ja	ja	nein	ja	ja	ja
Leitungen	ja	ja	-	ja	nein	ja	ja	ja
Rohstoffgewinnung	ja	ja	ja	-	nein	ja	ja	ja

Flächenüberschneidungen	Schifffahrt	Windenergie	Leitungen	Rohstoffgewinnung	Fischerei	Forschung	Schutz und Verbesserung der Meeresumwelt	Verteidigung
Fischerei	ja	nein	nein	nein	-	nein	ja	nein
Forschung	ja	ja	ja	ja	nein	-	ja	ja
Schutz und Verbesserung der Meeresumwelt	ja	ja	ja	ja	ja	ja	-	ja
Verteidigung	ja	ja	ja	ja	nein	ja	ja	-

Der ROP 2021 sieht bereits für ca. 50 % der Flächen in der AWZ eine Mehrfachnutzung durch zwei oder mehr Nutzungsansprüche vor. Eine Übersicht über die Nutzungsformen, ihre Gesamtfläche in km², ihre Anteile an der AWZ, die jeweilige exklusiven Gesamtfläche in km² und ihre exklusiven Anteile an der AWZ stellt nachfolgend Tabelle 14 dar. Die exklusive Fläche einer Nutzung wurde ermittelt, indem in einem ersten Schritt die Festlegungen für einen Nutzungsspruch zusammengefasst wurden. Anschließend wurden alle Bereiche abgezogen, auf welchen Festlegungen für mindestens eine weitere Nutzungsform vorlagen.

Tabelle 14: Nutzungen nach dem Raumordnungsplan 2021

Nutzungsform	Gesamtfläche (km²)	Anteil an AWZ	Davon exklusive Fläche (km²)	exklusiver Anteil an AWZ
Schifffahrt	16.631	50%	7.844	24%
Schutz und Verbesserung der Meeresumwelt	14.549	44%	3.701	11%
Verteidigung	8.585	26%	1.076	3%
Windenergie	5.434	16%	4.410	13%
Leitungen	2.575	8%	428	1%
Forschung	2.527	8%	121	0%
Rohstoffgewinnung	1.319	4%	10	0%
Fischerei	616	2%	0	0%

Die größten Flächen anteilig an der AWZ und zur exklusiven Nutzung sind für die Schifffahrt vorgesehen. Ähnlich große Flächen sind für den Schutz und die Verbesserung der Meeresumwelt beplant. Der exklusive Anteil ist mit 11 % jedoch weniger als halb so groß wie der exklusive Anteil für die Schifffahrt. Der Verteidigung sind ca. ein Viertel der Flächen in der AWZ zuordbar, davon 3 % exklusiv. Den Nutzungsformen Leitungen, Forschung, Rohstoffgewinnung und Fischerei wird insgesamt jeweils ein eher kleiner Flächenanteil an der AWZ und kaum exklusive Flächen zugewiesen. Für weitere erneuerbare Offshore-Energien neben der Offshore-Windenergie gibt es keinerlei Festlegungen im ROP 2021.

Insgesamt weisen die verschiedenen Nutzungsarten sehr unterschiedliche Flächenpotentiale auf. Neben den Unterschieden hinsichtlich der Größe der insgesamt und exklusiv ausgewiesenen Flächenanteile, gibt es Unterschiede bei der Ausweisung von Vorrang- und Vorbehaltsgebiete sowie bei den Überschneidungen mit anderen Nutzungsformen. Darüber hinaus weisen die Nutzungsformen unterschiedliche Herausforderungen und Chancen hinsichtlich einer Mehrfachnutzung mit der Windenergie auf See auf.

Auf Basis der vorangegangenen Analyse werden drei konkrete Beispiele für Mehrfachnutzungen in Kombination mit Windenergie auf See bestimmt: die Landes- und Bündnisverteidigung, die Fischereiforschung und die hybride Energieerzeugung. In der in den Kapiteln 6 bis 8 durchgeführten vertiefenden Analyse werden die drei Mehrfachnutzungsoptionen hinsichtlich spezifischer Fragestellung, möglicher Lösungsansätze und Potentiale untersucht.

Für jede Nutzungsform folgt eine Analyse der Auswirkungen auf die Meeresumwelt, die beispielhaft die Effekte einer Mehrfachnutzung aus OWE und Landes- und Bündnisverteidigung, Fischereiforschung und hybrider Energieerzeugung auf die Meeresumwelt beschreibt. Ziel hierbei ist es,

- die **Wirkfaktoren** jeweils als Einfachnutzung auf die vier Schutzgüter Biotope am Meeresboden, Fische, marine Säugetiere, sowie See- und Küstenvögel in der deutschen AWZ **aufzulisten**,
- die **potentiellen kumulativen Effekte** einer Mehrfachnutzung auf die Meeresumwelt anhand von **internationalen Praxisbeispielen und Forschungsprojekten** zu **beschreiben**,
- die **potentiellen kumulativen Effekte** einer Mehrfachnutzung auf die Meeresumwelt anhand von **Referenzflächen** in der deutschen AWZ zu **beschreiben**, und
- **technische Optionen zur Minderung** negativer Umweltauswirkungen einer Mehrfachnutzung auf die Meeresumwelt zu **bewerten**.

6 Vertiefte Analyse: Mehrfachnutzung Landes- und Bündnisverteidigung und Offshore-Windenergie

Im obigen Abschnitt 5.6 sind die Ergebnisse der Literatursichtung und Hintergründe einer möglichen Mehrfachnutzung der für Verteidigung vorgesehenen Vorbehaltsflächen in der AWZ diskutiert worden. Vertiefend wurden darauf aufbauend leitfadengestützte offene Interviews mit Expert*innen und Interessensvertreter*innen aus der Bundeswehr und dem Bundesministerium der Verteidigung (BMVg) zu Potentialen der Mehrfachnutzung von Vorbehaltsgebieten der Verteidigung für Windenergie geführt. Ergänzt wurde die deutsche Perspektive um die der EU und der NATO. Wie bereits betont, ist aufgrund divergierender Kontextfaktoren ein direkter Übertrag der Erfahrungen aus anderen europäischen Staaten nur eingeschränkt möglich. Gleichwohl kann für mögliche Szenarien der Mehrfachnutzung von NATO-Partnern gelernt werden. Zugleich intensiviert sich der europäische Regelungsraum, sodass der deutsche Diskurs diese Entwicklungen aufgreifen und mitgestalten sollte.

Spezifische Herausforderungen und Untersuchungsfragen

Ziel der Interviews mit deutschen Expert*innen der Bundeswehr war es, ergebnisoffen Chancen und Herausforderungen einer Mehrfachnutzung von Vorbehaltsflächen der Verteidigung für Offshore-Windenergie aus der Binnenperspektive zu identifizieren. Zwischen Februar und Juni des Jahres 2023 wurde eine erste Interviewwelle mit den Expert*innen, zwischen Oktober 2023 und Februar 2024 eine zweite Welle mit weiteren Akteuren durchgeführt.

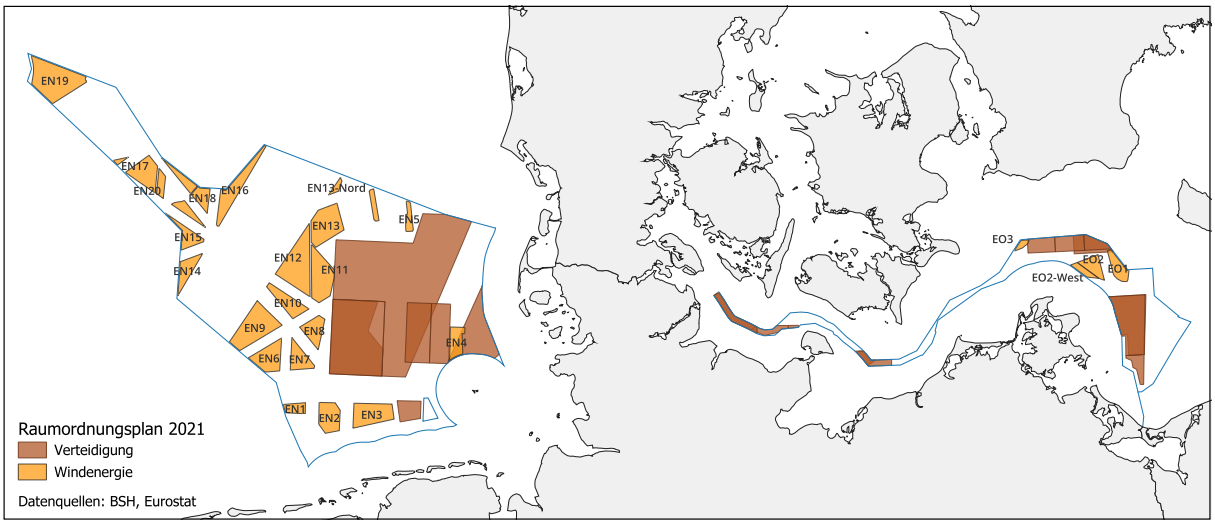
Methodisch wurden leitfadengestützte, halb-offene, qualitative Interviews mit Expert*innen der Bundeswehr geführt, dokumentiert und ausgewertet.[196] Der Leitfragenkatalog ist dem Anhang A.2 zu entnehmen. Die Inhalte der Interviews werden mit Methoden der qualitativen Inhaltsanalyse, insbesondere Methoden der strukturellen Verdichtung, analysiert (Mayring, 2015). Die Ergebnisse wurden den Erkenntnissen der Literaturrecherche kontrastierend gegenübergestellt. Die Interviewpartner*innen der ersten Welle wurden um die Nennung relevanter Expert*innen für eine zweite Interviewwelle gebeten. So konnte eine Netzwerkkarte der relevanten Expert*innen im Bereich Verteidigung erarbeitet werden. Dieses Vorgehen wurde in der ersten Welle fortgesetzt, bis eine Sättigung eintrat und damit das gesamte Feld der relevanten Akteure als Netzwerkkarte bekannt war.[197] Aus dieser Netzwerkkarte wurden Expert*innen identifiziert für eine zweite Welle identifiziert.

Die Expert*innen wurden im Bundesverteidigungsministerium (an den Standtorten Berlin und Bonn), dem Marinekommando, dem Marineunterstützungskommando, bei der Luftwaffe und in NATO-Verbindungsorganisationen identifiziert. In beiden Wellen wurden jeweils vier Personen interviewt. Diese Zahl erscheint auf den ersten Blick niedrig – sie reflektiert jedoch realistisch die Zahl der in diesem thematischen Feld einschlägigen Expert*innen. Die interviewten Expert*innen decken dabei von der operativen und planerischen Ebene der Marine, über Expert*innen mit Detailwissen bis zu einer Person aus der politischen Leitungsebene des BMVg ein breites Spektrum von Expertise ab. Den Gesprächspartner*innen wurde auf Wunsch Anonymität zugesichert. Deshalb werden die Ergebnisse nur in zusammengefasster Übersicht dargestellt und keine direkten Zitate oder auf die Person zurechenbare Aussagen im Bericht genutzt.

[196] Der entwickelte Leitfaden für die Interviews der ersten Interviewwelle umfasste die Fragen eins bis sechs. Im Laufe des Projektes wurde Fragen für die Projektpartner IKEM (A) und BioConsult SH (B) ergänzt. Die Fragen sieben und acht wurden aufgrund der Erfahrungen in der ersten Interviewelle ergänzt.

[197] Eine Darstellung der Netzwerkkarte ist im Rahmen des Projektberichts nicht möglich, da den Interviewteilnehmer*innen Anonymität zugesichert wurde. Aufgrund der überschaubaren Anzahl der in den einzelnen Referaten tätigen Expert*innen wären sie auf Grundlage der Nennung der Teileinheiten identifizierbar. Diese Identifizierbarkeit ist mit der zugesicherten Anonymität in diesem sicherheitspolitisch sensiblen Feld nicht vereinbar.

Abbildung 21: Festlegungen für Landes- und Bündnisverteidigung und Windenergie im Raumordnungsplan 2021



Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

6.1 Ausgangsbedingungen im Hinblick auf die potentielle Mehrfachnutzung

Die Bundeswehr und die Marine besitzen für ihre Vorbehaltsgebiete innerhalb der ausschließlichen Wirtschaftszone in Nord- und Ostsee unterschiedliche Nutzungsszenarien für die LV/BV. Für Mehrfachnutzung ist die entscheidende Frage, wie und mit wem die Flächen noch zusätzlich genutzt werden (können), sodass die Akteure das Ziel Ihrer jeweiligen Flächennutzung realisieren können. Vorab muss betont werden, dass die Bundeswehr im Konfliktfall sämtliche Gebiete der AWZ zu verteidigen hat, d.h. auch Gebiete, für die sie keine vorrangigen Nutzungsrechte besitzt.

Eine kooperative Nutzung der Flächen, im Rahmen der *zivil-militärischen Kooperation*, sollte zum Nutzen aller beteiligten Akteure geregelt werden. Um die Ziele der LV/BV zu realisieren, stellt die Bundeswehr entlang der unterschiedlichen Aspekte Ihres Aufgabenbereichs Ansprüche an die Flächen, die eine Kombination aus Flächengröße, Art der dort zu realisierenden Nutzung, Lage und Beschaffenheit der Räume darstellen. Die spezifischen Anforderungen an die Flächen für Verteidigung in der AWZ leiten sich aus der militärischen Nutzung ab und diese folgen aus dem Ziel der LV/BV und den dafür notwendigen Abschreckungs- und Verteidigungsfähigkeiten. Diese Fähigkeiten müssen hergestellt, immer wieder eingeübt und vorgehalten werden. Dafür werden Flächen benötigt, die in unterschiedlichen Größen und an unterschiedlichen Orten (mit ihren jeweiligen geographischen Kontexten) entlang der deutschen Küste vorhanden sein müssen. Die Anforderungen an diese Flächen werden im Folgenden entlang der Differenzierung *Raum* und *Zeit* spezifiziert.

Der Nutzungsaspekt Raum entwickelt seine Relevanz für das Nutzungsziel der LV/BV über seine Größe und Beschaffenheit. Hinsichtlich der Größe müssen Flächen existieren, die erstens dreidimensionale Gefechtsfeldübungen, auch unter Einbeziehung der weiteren Dimension Cyber und

Weltraum[198], über einen größeren Bereich hinweg möglich machen[199]. Dementsprechend muss das Gebiet für Übungen eine hinreichende Größe aufweisen. Des Weiteren müssen freie (unbebaute) Gebiete existieren, da nur dort die freie Fahrt der Schiffe, U-Boote und Flugzeuge auch für Manöver sichergestellt werden kann. Nur durch Übungen kann im Ernstfall effektiv verteidigt werden. Entsprechend dem Grundsatz, dass Übungen nur dann sinnvoll sind, wenn diese ein realitätsnahes Szenario darstellen, muss dort geübt werden, wo im Ernstfall verteidigt wird. Angesichts der sicherheitspolitischen Lage ist in Zukunft von einer Erhöhung der Manöverhäufigkeit auszugehen.

Viele der militärischen Vorbehaltsgebiete sind drittens auch als Luftübungsgebiete der Luftwaffe und Marinefliegerei ausgewiesen. Wie die Übung „Air Defender" (2023) verdeutlichte, können diese Übungen zu weitreichenden Einschränkungen des Luftverkehrs führen. Auch wenn solche NATO-Großübungen nur alle paar Jahre stattfinden, ist auch wie bei der Marine in Zukunft von einer höheren Manöver- und Übungsdichte der Luftwaffe auszugehen.[200] Gerade Tiefflugmanöver, die mit Schießübungen einhergehen, bedürfen einer freien und unbebauten Fläche. Viertens bedürfen auch Schießübungen der Marine einer unbebauten Fläche, da durch die ballistischen Schussbahnen von traditionellen kinetischen Waffensystemen immer der gesamte dreidimensionale Raum über und unter Wasser frei sein sollte. Diese aufgeführten Anforderungen an die Ausgestaltung der Flächen, auch unter und über dem Wasser und in den Luftraum hinein, begrenzen die Potentiale einer Mehrfachnutzung mit permanent vorhandenen, stationären Akteuren und Nutzungen.

Neben der Größe und Beschaffenheit der Flächen ist die Lage entscheidend. Es ist wichtig, dass die Übungen dort durchgeführt werden, wo im Ernstfall die Landesverteidigung stattfindet (Grundsatz: *Train as you fight*). Somit sind Flächen in Nord- und Ostsee vorzuhalten. Dies hat mehrere Gründe. Erstens weisen diese Flächen geographisch und hydrographisch unterschiedliche Gegebenheiten auf, die auch schon in der Übung berücksichtigt werden müssen.[201] Zweitens muss aus Gründen der politischen Glaubwürdigkeit und der Zugehörigkeit zu Verteidigungsbündnissen auch in den verschiedenen Gebieten der Nord- und Ostsee geübt und eine ständige Präsenz vorgehalten werden. Die NATO-Partner, vor allem im Ostseebereich, erwarten von der deutschen Marine Unterstützung im Rahmen eines zwischenstaatlichen Konflikts. Drittens müssen die Gebiete in der Nähe der Häfen der Marine liegen, um auch in kurzer Zeit erreichbar zu sein. Militärische Anforderungen an Lage, Erreichbarkeit und Verfügbarkeit von Flächen begrenzen das Potential einer Mehrfachnutzung von militärischen Vorbehaltsgebieten.

Um die Gebiete innerhalb der AWZ für die LV/BV zu nutzen und im Bedarfsfall auch zu verteidigen, bedarf es der Kenntnis eines Lagebildes über die maritime Situation über, unter und auf dem Wasser. Stationäre Akteure in Nord- und Ostsee beeinträchtigen die Radaraufklärung und

[198] Neben den Räumen Land, Luft und Wasser, kommt in der Verteidigung zunehmend Weltraum und Cyberraum eine zunehmende Relevanz zu. Im Sinne einer realistischen Übung müssen Kommunikationswege und Angriffsvektoren mit in die Übungen einfließen. Gerade hier kommt dem Weltraum als Träger von Kommunikations- und Aufklärungseinheiten und der Cyberraum als möglichen Angriffsvektor zunehmend Bedeutung zu. Zu bedenken ist hier, dass wie oben bereits ausgeführt, Windenergieanlagen elektromagnetische und physische Interferenzen verursachen, die Navigationssysteme stören und die Kommunikation beeinträchtigen könnten. Dies kann insbesondere im Cyberraum und Weltraum relevant sein, wo Präzision in der Kommunikation und Datenübertragung entscheidend ist.

[199] Zur Verdeutlichung der Ausmaße großer Manöver auf die max. Geschwindigkeit von Fregatten (Fregattenklasse 125: 28 Kn (52 km/h)), die Tauchtiefe und -eigenschaften deutscher U-Boote und die Geschwindigkeit (auch im Tiefflug) deutsche Abfangjäger hingewiesen (Eurofighter: Mach 1,6 (1960 km/h)) verwiesen. Sollen diese drei Einheitentypen im Verbund üben (Kampf der verbundenen Waffen), braucht es ausreichend Platz. Soll auch eine Schießübung durchgeführt werden (die maximale Schussreichweite der Fregattenklasse 125 beträgt ca. 100 km), ist dies zusätzlich zu gewährleisten.

[200] Dass diese zum Schutz der Bevölkerung nicht primär über Land, sondern über dem Wasser stattfinden soll, ist leicht ersichtlich, da dort die Beeinträchtigung der Bevölkerung minimiert werden kann.

[201] Beispielhaft sein hier darauf verwiesen, dass U-Boot-Tauchgänge in der Ostsee unter anderen Gegebenheiten stattfinden als in der Nordsee.

damit die Qualität von maritimen Lagebildern, die auf Radar basieren. Dies wurde bereits in Abschnitt 5.6 in der Literaturstudie dargelegt. In der Praxis existieren Anpassungen, die größtenteils darauf basieren, die Radarfehler, die auch durch stationäre Anlagen entstehen, zu ignorieren oder die Radarobstruktion mittels KI herauszurechnen. In Abschnitt 6.3 wird näher aus den daraus resultierenden Möglichkeiten einer Mehrfachnutzung einzugehen sein.[202]

Nachdem die Anforderung der Bundeswehr näher skizziert wurden, sollen Potentiale für Mehrfachnutzung von Vorbehaltsgebieten für die Verteidigung systematisch identifiziert werden, indem andere Nutzungsformen entlang der Achsen *Zeit* und *Raum* verortet werden. Hierbei wird jeweils zwischen einer räumlich und zeitlich flexiblen oder einer permanenten Nutzung differenziert (vgl. Tabelle 15).

Tabelle 15: Nutzungsakteure und –arten in der AWZ nach Raum/Zeit (eigene Darstellung)

Raum/Zeit	temporär	permanent
flexibel	(1) Tourismus, Schifffahrt, Fischerei, Forschung, Verteidigung	(2)
stationär	(3) Forschung*, Naturschutz*	(4) Offshore-Windenergie, Unterseekabel; Forschung** Rohstoffgewinnung, Naturschutz

Die Zelle (1) umfasst Akteure und Nutzungen, die temporär und flexibel Flächen nutzen, u.a. Tourismus, Schifffahrt und die Fischerei.

Die Zelle (2) hat keine Einträge.

Die Zelle (3) umfasst u.a. räumlich stationäre Forschung*, die nicht durchgängig betrieben wird, sowie Gebiete zum Schutz der Meeresumwelt (Naturschutz*), bei denen nur zu bestimmten Zeiten keine Mehrfachnutzung möglich ist, u.a. während der Aufzuchtphase von Meerestieren.

Die Zelle (4) umfasst Akteure und Nutzungen aufgeführt, die permanent und stationär gebunden sind und damit ihre Flächen nicht flexibel freigeben können. Hierzu gehören u.a. Offshore-Windenergieanlagen und Unterseekabel[203] und drei Messplattformen (FINO)** in der Nähe von Windparks sowie Messbojen.

Zu Beginn des Kapitels wurden die Nutzungsanforderungen entlang der Differenzierung *Raum* und *Zeit* beschreiben, die gegeben sein müssen, sodass der Akteur Bundeswehr das Ziel der LV/BV verwirklichen kann. In der Vierfeldertafel wurden nun die Akteure entsprechend ihrer Anforderungen an die Flächen und Nutzungszeiten (*Raum* und *Zeit*) zur Verwirklichung Ihrer Ziele eingeordnet.

Im Folgenden ist nun zu begründen, wo und wie sich die Anforderungen der Akteure in den einzelnen Feldern mit den Anforderungen der LV/BV in Einklang bringen lassen und wo ggf. eine parallele Erfüllung der Ziele der Akteure auf derselben Fläche nicht möglich ist. Somit wurden alle Zellen auf ihr Potential für Mehrfachnutzung militärischer Vorbehaltsgebiete hin geprüft:

Zelle (1): Da diese Akteure im Bedarfsfall auch flexibel andere Bereiche nutzen können, bestehen nicht nur Potentiale für eine Mehrfachnutzung militärischer Vorbehaltsgebiete, sie wird

[202] Neben einer Ausweitung des Lagebildes, durch die Anbringung von Sensoren an stationären Windenergieanlagen kann auch die Bewaffnung von Konverterstationen, eine Möglichkeit der Mehrfachnutzung von Flächen sein. Konverterstationen bilden ein strategisch höherwertiges Ziel als einzelne Windenergieanlagen. Als größere Station wären Sie baulich, bei entsprechender technischer Vorbereitung, auch als Trägerstation für Luftabwehrgeschütze, beispielsweise des Typs "MANTIS", geeignet.

[203] Sollte es zukünftig möglich werden, Offshore-Windenergieanlagen als mobile Einheiten zu konzipieren, die damit temporär Flächen in der AWZ frei machen können, ist eine Nutzung von Flächen des Militärs für die Windenergie neu zu prüfen. Sie unterliegt jedoch den oben genannten Anforderungen an flexible zeitliche Nutzung.

vielmehr bereits praktiziert. Es existieren etablierte Kommunikationskanäle und Institutionen, über die die Marine die Nutzung ihrer Vorbehaltsgebiete jederzeit verlangen kann. Wobei von Seiten des Vorbehaltsnutzers unterschiedlich kombinierbare Nutzungsszenarien mit den anderen Akteuren vereinbart werden. Es werden in Abstufungen Einschränkungen der Nutzung vereinbart, die praktisch überwacht werden, um eine Mehrfachnutzung zwischen verschiedenen Akteuren auf derselben Fläche zu ermöglichen.

Zelle (2): Entfällt

Zelle (3): Die zeitliche Flexibilität der Nutzung erhöht das Potential von Mehrfachnutzung, im Rahmen aller langfristig geplanten Aktivitäten der Bundeswehr.

Zelle (4): Die Mehrfachnutzung scheint besonders in dieser Zelle eingeschränkt, dies wird im folgenden Abschnitt näher zu betrachten sein. Die Diskussion einer Mehrfachnutzung erfolgt entlang von drei Dimensionen zur Aufrechterhaltung der LV/BV, der Einsatzbereitschaft, der Entfernung und der Verfügbarkeit.

6.2 Einschätzung der derzeitigen Potentiale

Momentan sind die Potentiale der Mehrfachnutzung von Vorbehaltsgebieten für Verteidigung für Windenergie über den Status quo hinaus nicht zu erkennen. Die Bundeswehr hat in der letzten Dekade entlang der verfassungsmäßig verankerten Ziele Ihre Flächenbedarfe ermittelt und das operative Minimum zur Grundlage des Raumordnungsplans von 2021 festgelegt. Die skizzierten empirischen Daten, sowie die sicherheitspolitische Situation legt die Bewertung nahe, dass unterhalb dieses Minimums eine verfassungsmäßig vorgegebene Auftragserfüllung für die Bundeswehr nicht mehr sicher und robust zu gewährleisten ist. Die folgenden drei Dimensionen (Einsatzbereitschaft, Entfernung und Verfügbarkeit) bilden den systemischen Rahmen der bei einer Mehrfachnutzung erhalten bleiben muss um die Ziele der LV/BV zu erreichen.

Die Dimension „Einsatzbereitschaft“ betrifft in Friedenszeiten maßgeblich Übungen in den betreffenden Gebieten. Die permanente Übung und Erhaltung der Einsatzbereitschaft ist eine Grundlage dafür, im Fall der Landes- und Bündnisverteidigung schnell und effektiv einsatzbereit zu sein (Bundesministerium der Verteidigung, 2023). Nur durch Manöver und Schießübungen lassen sich diese Fähigkeiten erhalten. Zwar werden die Flächen für die einzelnen Übungen und Manöver (Schießübungen, Tauchübungen, Torpedoübungen, Minenübungen usw.) nicht permanent genutzt. Jedoch muss für sie eine maximale Flexibilität und Größe gewährleistet sein. Die Flächen in Nord- und Ostsee werden auch genutzt, um dort die Instandsetzungskontrollen von reparierten Waffen und Schiffen ordnungsgemäß sicherzustellen und deren Funktionstauglichkeit für den Einsatz zu zertifizieren. Des Weiteren befinden sich über nahezu sämtlichen Übungsgebieten der Marine in der AWZ auch Übungsgebiete der Luftwaffe. Für die Nutzung im Tiefflug ist eine nicht bebaute Fläche ebenso notwendig wie für Fahrten auf und unter dem Wasser. So sind durch die Anforderungen an die Dimension „Einsatzbereitschaft“ die Potentiale einer Mehrfachnutzung von Vorbehaltsgebieten für Verteidigung begrenzt.

Die Dimension „Entfernung“ manifestiert sich im täglichen Dienst und der Entfernungsverhältnissen der Übungsplätze zu den jeweiligen Häfen der Marine. Mit den drei großen Marinestützpunkten Wilhelmshaven, Kiel und Rostock bilden diese zwei Schwerpunkte jeweils in der Nordsee und in der Ostsee. Das große zusammenhängende Übungsgebiet in der Nordsee dient vor allem dazu, große dreidimensionale (+Cyber, Weltraum) Gefechtsfeldübungen und damit das Gefecht der verbundenen Waffen als Manöver durchzuführen. Die Gebiete in der Ostsee sind etwas kleiner und ermöglichen vorwiegend Instandsetzungskontrollen, Zertifizierung, Tauch- und Schießübungen. Der Zugang zu den Flächen für Verteidigung muss daher in räumlicher Nähe zum jeweiligen Hafen der Marine sichergestellt sein. Dies bedingen u.a. auch

arbeitszeitrechtliche Anforderungen, die auch für das militärische und zivile Personal im Friedens- und Übungsfall gelten. Für langfristige Einsätze, d.h. Besuche in anderen Ländern oder die Teilnahme an internationalen Manövern, gelten für Militärangehörige differenzierte Arbeitszeitregeln, die den Arbeitsalltag an Bord regeln. Für den alltagsnahen Einsatz in küstennahem Gebiet sind Arbeitszeitenregeln auch für Militärangehörige einzuhalten[204]. Denn die Marine muss in Zeiten des Fachkräftemangels auch auf eine Attraktivität des Berufes achten. Momentan sind in der Bundeswehr und speziell der Marine viele Dienstposten unbesetzt (Deutscher Bundestag, 2024). Zur Aufrechterhaltung der LV/BV ist ausreichende Personaldeckung essenziell. Eine ausgeglichene „Work-Life Balance", also die Möglichkeit, die Abende auch zu Hause bei der Familie zu verbringen, erhöht die Attraktivität des Soldat*innenberufes. So sind durch die Anforderungen an die Entfernungsdimension der Gebiete die Potentiale einer Mehrfachnutzung begrenzt.

Die Dimension „Verfügbarkeit" verdeutlicht, neben der Erreichbarkeit der Übungs- und Manöverflächen, die schon in der Entfernungsdimension veranschaulicht wurde, dass Flächennutzung zwischen Flexibilität und Planbarkeit changiert. So sind Manöver, vor allem große und internationale Manöver mit Bündnispartnern, ein geplantes und hochkomplexes Zusammenspiel zwischen einzelnen Einheiten von Marine, Luftwaffe u.a. Große Manöver dauern bis zu mehreren Wochen. Kleinere Einsatzübungen, die im Tages- und Dienstalltag ausgeführt werden, werden meist im Rahmen von 4-8 Stunden veranschlagt. Prinzipiell sind diese Manöver planbar und damit auch den anderen Nutzern der AWZ zu vermitteln. D.h. seitens der anderen Akteure muss eine temporäre Nutzung stattfinden, die sich flexibel für bestimmte Zeiträume eingrenzen lässt.

Die Zertifizierung der Einsatzfähigkeit ist teilweise in planbaren Zeitintervallen durchzuführen. Zertifizierung nach einer Reparatur und der Instandsetzungskontrolle ist hingegen nicht planbar, aber zur Bereithaltung von Kapazitäten notwendig. Die Funktionsfähigkeit der Waffen und der Schiffe muss sichergestellt werden, indem diese entlang bestehender Protokolle überprüft wird. Die Fläche, die für solche Instandsetzungskontrollen notwendig ist, ist abhängig von dem zu testenden Material. Die tatsächliche Nutzfläche im Einzelfall kann somit von der zur Verfügung stehenden Fläche abweichen. Dies bedeutet aber, dass die zeitlich flexible Nutzung der AWZ-Gebiete der Verteidigung sichergestellt werden muss, um die Aufgaben, welche die Bundeswehr in den Gebieten wahrnimmt, jederzeit potentiell auch auf der gesamten Fläche durchgeführt werden kann. So sind durch die Anforderungen an die Dimension „Zeit" die Potentiale einer Mehrfachnutzung begrenzt.

Diese drei Dimensionen sind zu berücksichtigen, wenn es darum geht, Potentiale für Mehrfachnutzung zu identifizieren. Die örtliche Gebundenheit und Permanenz von Offshore-Windenergieanlagen unter, auf und über dem Wasser begrenzt das Potential für eine kombinierte Nutzung mit Vorbehaltsgebieten für die Verteidigung deutlich.

Auf Basis der Auswertung aller Interviews in Verbindung mit den Ergebnissen der Literaturanalyse unter Berücksichtigung der gegenwärtigen geopolitischen Situation, die eine Priorisierung der LV/BV erfordert, kann unter der gegenwärtigen sicherheitspolitischen Lage und der militärischen Priorität auf LV/BV kein Potential einer Mehrfachnutzung von Vorbehaltsgebieten für Verteidigung für Windenergie identifiziert werden.

Eine Neubewertung der Potentiale für eine Mehrfachnutzung von Vorbehaltsgebieten für Verteidigung setzt eine veränderte geopolitische Lage voraus. Hierfür müsste sich insbesondere die Bedrohungseinschätzung, die von Russland ausgeht, verändern. Einschlägig ist hierfür Artikel 5 der Erklärung des NATO-Gipfels von Madrid, 2022: „The Russian Federation is the most significant and direct threat to Allies' security and to peace and stability in the Euro-Atlantic area."

[204] Für das weitere Verständnis und die Zwänge der Arbeitszeitregelungen ist hier einerseits darauf zu verweisen, dass die Verbringung von Zielkörpern für das Übungsschießen durch private Dienstleister geschieht, die dem Arbeitsschutz unterliegen.

Denn hieraus folgt, dass die Anforderungen des Verteidigungsfalls für die Potentialanalyse einschlägig sind.

6.3 Potentialperspektiven einer Mehrfachnutzung

Auf Basis der durchgeführten Analyse und unter Berücksichtigung der derzeitigen geopolitischen Situation, mit Priorität auf die Herstellung und Erhaltung der Kapazitäten für LV/BV, besteht kein Potential einer Mehrfachnutzung von weiteren Vorbehaltsgebieten für Verteidigung für Windenergie. Aber unter Berücksichtigung der nationale Sicherheitsstrategie der Bundesregierung, muss eine erweiterte Perspektive das Konzept der integrierten Sicherheit beinhalten. Im Weiteren werden somit dem Konzept der integrierten Sicherheit folgend drei Potentialperspektiven präsentiert, wie das eingangs skizzierte Spannungsverhältnis zwischen militärischer Sicherheit und Energiesicherheit produktiv überwunden werden könnte. Ziel der Potentialperspektiven ist die Erhöhung der gesamtstaatlichen Sicherheit. Ob hieraus politische Verhandlungspotentiale für eine Mehrfachnutzung von Vorbehaltsgebieten für Verteidigung für Windenergie generiert werden können, ist nicht Gegenstand dieser wissenschaftlichen Analyse.

Die Potentialperspektiven sind wissenschaftlich fundiert und schreiben existierende, insbesondere militärische und technologische, Entwicklungstrends fort. Sie wurden im Rahmen der Interviews thematisiert und auf Kohärenz sowie Plausibilität hin diskutiert.

Die drei Potentialperspektiven sind sukzessive weiter in der Zukunft verortet. Für alle drei Potentialperspektiven gilt, dass die Chancen für eine Mehrfachnutzung sich erhöhen, wenn regelmäßige Dialogforen der interministerialen und der zivil-militärischen Zusammenarbeit etabliert werden.

6.3.1 Potentialperspektive 1: Verbesserung des Lagebildes durch Nutzung von Windenergieanlagen (Mehrnutzen für LV/BV durch Mehrfachnutzung)

Zu Beginn des Kapitels wurden Limitationen einer Mehrfachnutzung von Vorbehaltsgebieten für Verteidigung in Kombination mit Windenergieanlagen ausgeführt. In umgekehrter Richtung besteht in der Nutzung von Windenergieanlagen auf See Potential für die Verbesserung der LV/BV. Die Befunde aus anderen Ländern wurden bereits in Abschnitt 5.6 dargestellt. Speziell für Deutschland konstatiert Daniel Voelsen (2024), dass der militärische Schutz der kritischen Infrastruktur “verbesserte Aufklärung und Abschreckung” ermöglichen kann.

Weiterhin ist das maritime Lagebild optimierungsfähig. Dies hat die erfolgreiche Sabotage von Nordstream 1 und 2 gezeigt. Schlüssel hierfür ist die intensivere Nutzung von Sensordaten. Während Schiffe, die aktuell zur Aufklärung eingesetzt werden, aufgrund der Tatsache, dass sie einen geografisch großen Bereich abdecken müssen, nicht permanent vor Ort sein können, könnte stationär angebrachte Sensorik an Windenergieanlagen das maritime Lagebild und damit auch die Sicherheit der kritischen Infrastruktur in Nord- und Ostsee deutlich verbessern. Dabei ist es *zunächst* nachrangig, ob militärische Sensorik ergänzend oder zivile Sensorik der Betreiber genutzt wird. Von den Betreibern aktuell bereits erhobene Daten können für militärische maritime Lagebilder genutzt werden. Dieses Mehrfachnutzungspotential bedarf einer vorgängigen rechtlichen Regelung durch den parlamentarischen Gesetzgeber, u.a. hinschlich der Weitergabe von Sensordaten, aber auch hinsichtlich der Sicherheitsgesetzgebung auf See (s. Abschnitt 6.4.1). Entsprechende Regelungen existieren bereits teilweise. So steht im FEP 2023 unter Absatz 6.1.4.(e), dass der Bundeswehr die Installation von Sender und Empfangsanlagen auf

Plattformen der Energiegewinnung ermöglicht werden soll.[205] Darüber hinaus scheint für Deutschland eine stärkere technische Abstimmung mit den Windparkbetreibern empfehlenswert, gleichwohl existieren projektbezogene Kooperationen bereits. Über die im FEP 2023 hinaus getroffenen Regelungen bedarf es für den Einsatz militärischer Sensorik und deren Nutzung vor allem einer gesetzlichen Grundlage im Bereich zwischen AWZ und Küste. Hier könnte ggf. ein *Seesicherheitsgesetz* (o.ä. betitelte Dachgesetzgebungen) Kooperation zwischen Verteidigung, Energiewirtschaft und anderen Akteuren des maritimen Sektors ermöglichen und deren Sicherheitsbedarfe über die verschiedenen Eskalationsstufen zwischen Frieden, hybrider Bedrohungen und zwischenstaatlichen Konflikten eindeutig regeln. Durch die erweiterte Nutzung von Sensorik kann die kritische Infrastruktur selbst besser geschützt werden (durch die Betreiber selbst oder andere Akteure) und die Bundeswehr kann diese Daten nutzen, um bessere maritime Lagebilder zu erstellen. Zugleich aber wären Offshore-Windenergieanlagen, die militärische Sensorik tragen, nicht nur kritische Infrastruktur, sondern primäre (legitime) militärische Ziele bzw. Angriffsvektoren im Fall eines Krieges.[206]

International besteht politisch Konsens darüber, dass Offshore-Windparks einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung des maritimen Lagebildes leisten können, indem sie mit Sensoren ausgestattet werden und diese Sensordaten mit dem Militär teilen. Doch gerade in der Ostsee mit einer Vielzahl von Anrainerstaaten stellt sich das Problem des Zusammenführens von Sensordaten. Dies betrifft die technische Spezifikation von (Daten-)Schnittstellen ebenso wie die Anreicherung von Sensordaten mit Metadaten, d.h. die Entwicklung eines gemeinsamen Metadatenformats. In diesem Feld spielt *Belgien* eine Vorreiterrolle. In Belgien wird eine Software genutzt, die der Herstellung von maritimen Lagebildern durch Nutzung von zusammengeführten Sensordaten (also auch Sensordaten von Offshore-Plattformen) dient. Jedes Amt in Belgien kann über diese Software einen Datenzugriff erhalten. Über Metadaten werden Zugriffsrechte nach Klassifikation und Sicherheitsfreigaben gewährt. Es existiert eine API, die anderen Staaten und deren Institutionen den Zugriff auf die Daten ermöglicht, d.h. das hiermit eine potentiell gesamteuropäische Lösung für Sensordatenverarbeitung vorliegt.

Auf NATO-Ebene wurde im Juli 2023 in Vilinius beschlossen, ein "maritimes Zentrum für den Schutz kritischer Unterwasserinfrastruktur am maritimen Hauptquartier der Nato in Northwood, UK" zur Verbesserung des Unter- und Überwasserlagebilds zu gründen, dass die privatwirtschaftliche, öffentliche und Daten der Allianz zusammenführen soll (Swistek, 2024).

Diese Potentialperspektive zeigt Potentiale einer Mehrfachnutzung, die die Gesamtsicherheit Deutschlands im Sinne des Konzepts der integrierten Sicherheit erhöht. Windenergieanlagen werden hierdurch ein Teil der nationalen militärischen Verteidigungsstrategie. Dabei entstehen jedoch unmittelbar *keine* neuen Flächen für Windenergieanlagen, vielleicht jedoch (politische) Verhandlungspotentiale.

6.3.2 Potentialperspektive 2: Stärkung der interministeriellen und zivil-militärische Kooperation

Die Spannung zwischen Energiesicherheit und militärischer Sicherheit im maritimen Feld stellt sich für jeden Anrainerstaat von Nord- und Ostsee. Die Potentiale, partiell sogar die Notwendigkeit, einer Mehrfachnutzung variieren systematisch in Abhängigkeit von Faktoren, die auch in

[205] Flächenentwicklungsplan 2023 unter Absatz 6.1.4.(e): „Der Bundeswehr soll es möglich sein, auf Anlagen zur Energiegewinnung, insbesondere auf Plattformen, feste Einrichtungen wie Sende- und Empfangsanlagen zu installieren und zu betreiben. Dies gilt unter dem Vorbehalt, dass der Betrieb der militärischen Anlagen auf den Anlagen zur Energiegewinnung aus militärischer Sicht zur Landes- und Bündnisverteidigung notwendig ist, und dass dadurch der Betrieb der Anlagen zur Energiegewinnung so wenig wie möglich beeinträchtigt wird."

[206] Siehe dazu auch Abschnitt 6.4.2 dieses Berichts zur rechtlichen Einordnung.

den vorherigen Ausführungen ausgeführt wurden. Hierzu gehören u.a. die rechtlichen Grundlagen, die Geografie, die militärische Nutzungsintensität und –art sowie die Koordination bzw. Kooperation zwischen Politik, Wirtschaft und Militär. Beispiele der interministeriellen Kooperation zur Mehrfachnutzung für Verteidigung und Windenergieanlagen finden sich, wenn auch nicht immer übertragbar, in jenen Ländern, die ausgewiesene Institutionen, Verfahren oder Personen für die Koordination besitzen, u.a. USA, Dänemark und Großbritannien. Die zweite Potentialperspektive beleuchtet solche zivil-militärische Kooperation anhand von zwei Beispielen und regt zur vertieften institutionalisierten Kooperation an. Argumentiert wird, dass durch die Intensivierung der Kooperation Potentiale für Mehrfachnutzung resultieren können. Exemplarische Beispiele sollen dieses Potential im Folgenden verdeutlichen.

Beispiel USA: In den *Vereinigten Staaten von Amerika* existiert das "Military Aviation and Installation Assurance Siting Clearinghouse" das institutionell beim "Office of the Assistant Secretary of Defense for Sustainment" verortet ist (Military Aviation and Installation Assurance Siting Clearinghouse, o. J.). Seine Aufgabe ist es, den "Impact of Energy Development on National Defense Missions" zu evaluieren und Risiken, die aus "Energy Development" für die nationale Sicherheit resultieren, zu überwinden. Dieser Auftrag geht über Offshore-Windenergie hinaus. Die Institution errechnet über Computersimulationen die Auswirkungen z.B. von Windparks auf die Nationale Sicherheit. Auf dieser Basis verhandelt die Institution mit allen Stakeholdern (Militär, Wirtschaft, Zivilpersonen, etc.), um die Risiken für die Nationale Sicherheit zu mitigieren. Sie besitzt keine finale Entscheidungskompetenz, liefert jedoch für alle Stakeholder eine zentrale Anlaufstelle für alle thematisch einschlägigen Fragen und liefert fakten- und simulationsbasierte (politische) Entscheidungsunterstützung.

Die Institution betreibt multidisziplinäre und multi-Stakeholder Forschung, um Risiken, die aus "Energy Development" für die nationale Sicherheit resultieren, zu überwinden. Zugleich bietet sie eine Plattform für multi-Stakeholder Diskussionen, um Potentiale zu heben, die aufgrund von Kooperationsdefiziten zuvor nicht genutzt wurden.

Einige Beispiele, mit denen sie dazu beigetragen hat, das Potential einer Mehrfachnutzung zu erhöhen:

Sie entwickelte zusammen mit der Industrie KI basierte Softwareupdates für Radarsysteme, um die Radarabschattungen von Rotoren herauszurechnen.

- In Abstimmungsrunden im Vorfeld des Baus einer neuen Windenergieanlage auf dem Land haben Windparkbetreibern zugestimmt, in freiwilliger Kooperation die Rotoren bei Überflugübungen zu stoppen. Hierdurch konnte die Akzeptanz für den Bau des Windparks seitens der Air Force generiert werden.
- In Abstimmung mit der Industrie werden neue Sensoren zur Nutzung an den Turbinen entwickelt.
- Zusammen mit der Industrie und dem Militär wurde Stealth-Paint (Tarnanstriche) für die Rotoren entwickelt und angewendet, um die Sicherheit der Turbinen zu erhöhen.
- Zusammenfassend berichten die amerikanischen KollegInnen des "Military Aviation and Installation Assurance Siting Clearinghouse" davon, dass ihre Arbeit maßgeblich dazu beigetragen hat, innerhalb des Militärs die Akzeptanz für Behinderungen bei militärischem Training zu erhöhen, die aus Windenergieanlagen resultiert.

Beispiel Großbritannien: In Großbritannien existiert die „Windfarm Mitigation Task Force" zur Lösung der oben diskutierten Herausforderungen. Die Taskforce wurde durch den Offshore

Wind Sector Deal 2019 ins Leben gerufen und bringt den Offshore Wind Industry Council (O-WIC), The Crown Estate durch sein Offshore Wind Evidence and Change Programm, das Department for Business, Energy and Industrial Strategy (BEIS) und das Ministry of Defence (MOD) zusammen. Das Ziel der Task Force war es, „die Koexistenz von Luftverteidigung und Offshore-Windenergie zu ermöglichen" (Crown, 2021). Auf Basis der Arbeit der Task Force wurde der „Strategy and Implementation Plan" entwickelt, der u.a. eine Minderung der durch Windenergieanlagen verursachten Beeinträchtigung der A2/AD Fähigkeiten durch Kooperation vermindern soll.

Die skizzierten Erfahrungen aus den USA und Großbritannien, sowie wissenschaftliche Analysen für Norwegen und Dänemark legen zusammenfassend nahe, dass die Mehrfachnutzung von Flächen für Windenergie und Militär von unterschiedlichen Faktoren abhängt. Das Spektrum reicht von „weichen" Faktoren wie wechselseitigem Verständnis bis hin zu „harten" Faktoren wie Software, die mithilfe von KI Radarabschattungen herausrechnet. Die skizzierten Erfahrungen legen nahe, dass staatliche Institutionen die Ausbildung dieser Faktoren fazilitieren können. Hierzu scheint die *Institutionalisierung* von Koordinations- und Kooperationsforen für Stakeholder aus unterschiedlichen Domänen. Wichtig ist hierbei vor allem die Fokussierung auf die zivil-militärische Kooperation zum Vorteil von Energiesicherheit und militärischer Sicherheit. Für die „weichen" Faktoren relevant erscheint der politische Wille, auf Augenhöhe zu kooperieren sowie die Ausbildung der korrespondierenden Grundeinstellung.

Die Implementierung einer *staatlichen Institution* analog zum "Military Aviation and Installation Assurance Siting Clearinghouse" oder der „Windfarm Mitigation Task Force" besitzt aus unserer Perspektive Potential, die Mehrfachnutzung von Vorbehaltsgebieten für Verteidigung für Windenergie zu unterstützen. Aufmerksamkeit finden sollte die Tatsache, dass der Erfolg des "Military Aviation and Installation Assurance Siting Clearinghouse" auch auf thematisch einschlägiger Forschungsförderung besteht. Die European Defence Agency (EDA) hat mit „**Symbiosis**" ein solches thematisch einschlägiges Projekt aufgesetzt (European Defence Agency, 2022). Ziel des Projekts ist, Hindernisse für die Entwicklung erneuerbarer Offshore-Energien in Gebieten, die für militärische Zwecke genutzt werden, zu beseitigen. Dazu soll die Koexistenz und die Korrespondenz verbessert und künftige koordinierte Maßnahmen identifiziert werden, um die Potentiale erneuerbarer Offshore-Energien in der EU zu nutzen. Gegenwärtig fokussiert „Symbiosis" auf die KI-gestützte Simulation der negativen Effekte von Windenergieanlagen auf See und deren Mitigierung.

6.3.3 Potentialperspektive 3: Neue Technik, neue Übungsflächen

Die dritte Potentialperspektive fokussiert auf eine langfristige Entwicklung in der Waffentechnik und deren Auswirkungen auf Mehrfachnutzung. In einem Offshore-Windpark kann die Marine auf und unter dem Wasser schlecht manövrieren und wäre im Verteidigungsfall ein leichtes Ziel für jeden Gegner. Manövrierfähigkeit wird jedoch von der Größe der genutzten Plattformen (Uboote, Korvetten, etc.) bestimmt. Die Nutzung von autonomen Systemen („Unmanned or uncrewed surface vehicles" (USVs)) wird aktuell in vielen Marinen diskutiert. Erste USVs sind bereits beauftragt. Die Größe der bereits im Test befindlichen Systeme variiert dabei deutlich: Die Royal Navy testet seit Juli 2022 die 42 m lange „Patrick Blackett" als Testplattform der Royal Navy für autonome Systeme. Die US Navy hat bereits das erste kleinere „Large Unmanned Underwater Vehicle Orca" übernommen und plant für die Zukunft eine "hybrid manned/unmanned fleet" über und unter Wasser (Werner, 2019).

Auch die deutsche Marine spricht sich im „Zielbild für die Marine ab 2035" für USVs aus: „Dafür benötigt die Marine: vor allem eine ausreichende Anzahl schneller, schwer entdeckbarer und

möglichst unbemannter Plattformen über und unter Wasser, um die Reaktionszeit eines Gegners zu unterlaufen“(Inspekteur der Marine, 2023). Für die Zukunft ist also auch in der Ostsee davon auszugehen, dass vermehrt USVs von den Marinen genutzt werden. Ob sich durch deren Einsatz Potential für Mehrfachnutzung von Vorbehaltsgebieten für Verteidigung erhöht, wird vom sogenannten Force Planning beeinflusst. Force Planning ist ein strategischer Prozess, der innerhalb der NATO erfolgt und Ziele auf strategischer Ebene verbindet mit verfügbarem Gerät, technologischen Entwicklungen und (geo-)politischen Rahmenbedingungen. Zur Verdeutlichung dieser Verbindung referieren wir auf die einschlägige Studie des Planungsamts der Bundeswehr aus dem Jahr 2017. Sie differenziert zwischen zwei Funktionen von USVs: „force-multiplier“ und „stand-alone“-Systemen(Planungsamt der Bundeswehr, 2017) . Als „force-multiplier“ würden USVs an der Seite bemannte Schiffen oder U-Boote (hybride Nutzung), als „stand-alone“-Systeme *anstatt* bemannter Systeme genutzt werden.

Die Nutzung von USVs als „stand-alone“ Systeme könnte vor diesem Hintergrund Mehrfachnutzung genau dann unterstützen, wenn sie

- deutlich kleiner sind als aktuell genutzte Systeme (Korvetten, U-Boote, etc.),
- sie *ausschließlich* genutzt werden und keine „Legacy-Systeme“ (bemannte Korvetten, etc.) gleichzeitig zum Einsatz kommen sowie
- die Abstände innerhalb eines Windenergieparks auf See so groß sind, dass die Manövrierfähigkeit der USVs sichergestellt ist.

Die Nutzung von USVs als „force-multiplier“, d.h. die Nutzung im Verbund mit bemannten „Legacy-Systemen“, würde hingegen die Potentiale der Mehrfachnutzung – zumindest aus heutiger Sicht – nicht beeinflussen. Die Auswirkungen von USVs auf Mehrfachnutzung kann jedoch nicht unabhängig von der Nutzungsdauer aktueller Systeme analysiert werden, da Korvetten, Fregatten, U-Boote, etc. kostenintensive Systeme sind, die sich durch lange Entwicklungs- und Nutzungszyklen auszeichnen. Fregatten der Klasse 126 befinden sich aktuell in der Beschaffung und werden daher mit hoher Wahrscheinlichkeit bis in die 2050er-Jahre hinein in Nutzung bleiben.

Damit wird die Frage, ob Typen von Waffen (bemannt/unbemannt) geografisch gebündelt werden können, relevant. Die Frage der Mehrfachnutzung – und damit auch der notwendigen Abstände innerhalb der Windenergieparks auf See – würde von der Fähigkeit beeinflusst werden, USVs geografisch zu bündeln und dort *ausschließlich* zu nutzen. Militärische Technologieentwicklung generiert für den Zeitraum bis ca. 2050 daher isoliert keine neuen Potentiale, sondern nur im Zusammenspiel mit Force Planning, das militärische, sicherheitspolitische und energiepolitische Aspekte verbindet.

6.4 Rechtliche Einordnung: Schutz maritimer kritischer Infrastruktur und militärische Sensorik

Der Ausbau der Windenergie auf See wirft neben der Frage nach der Verfügbarkeit von Flächen und dem konkurrierenden Nutzungsdruck auch die Frage nach dem Schutz von OWEA auf. Im Folgenden soll unter Berücksichtigung des neuen KRITIS-DachG-Entwurfs[207] ein Überblick über die Zuständigkeiten für die Sicherheit maritimer kritischer Infrastruktur gegeben werden. Im Anschluss erfolgt ein rechtlicher Exkurs in militärische Überwachungs- und Sicherheitsmaßnahmen mit Fokus auf die Anbringung militärischer Sensorik.

6.4.1 Schutz maritimer kritischer Infrastruktur

Die Sabotageakte auf die Gaspipelines Nord Stream 1 und 2 sowie das jüngst identifizierte Leck im Balticconnector zwischen Finnland und Estland zeigen auf, dass die Sicherheit der maritimen Infrastruktur potentiell gefährdet ist und diese eines besonderen Schutzes bedarf. Hybride Angriffe gegen maritime kritische Infrastruktur werden von der Bundesregierung aufgrund des Angriffskriegs Russlands gegen die Ukraine zukünftig in Betracht gezogen.[208] In diesem Kontext und auf Grundlage einer „erhöhten Bedrohungslage“[209] stellt sich im Rahmen des Projektkontexts die Frage, welche Regelungen zum Schutz kritischer Infrastruktur in der AWZ bestehen und insbesondere, welche rechtlichen Hürden gegenwärtig, aber auch zukünftig denkbar sind. Besonders berücksichtigt werden soll dabei die rechtliche Kompetenzzuweisung.

Der Begriff der Kritischen Infrastruktur ist auf nationaler Ebene in der 2009 verabschiedeten und aktuell gültigen nationalen Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie)[210] und darüber hinaus bislang ausschließlich im Bereich der Cybersicherheit gesetzlich verankert.

Definition: Kritische Infrastrukturen nach dem BSIG[211]

Kritische Infrastrukturen i.S.d Gesetzes sind Einrichtungen, Anlagen oder Teile davon, die u.a. den Sektoren Energie angehören und von hoher Bedeutung für das Funktionieren des Gemeinwesens sind, weil durch ihren Ausfall oder ihre Beeinträchtigung erhebliche Versorgungsengpässe oder Gefährdungen für die öffentliche Sicherheit[212] eintreten würden, § 2 Abs. 10 BSIG

Außerhalb vom BSIG gibt es eine rechtliche Begriffsverankerung im KRITIS-DachG-Entwurf.[213] Mit diesem Gesetz soll ein einheitlicher Rahmen für den Schutz kritischer Infrastrukturen außerhalb der IT-Sicherheit geschaffen werden. Das KRITIS-DachG soll damit erstmals einheitliche

[207] Entwurf eines Gesetzes zur Umsetzung der Richtlinie (EU) 2022/2557 und zur Stärkung der Resilienz von Betreibern kritischer Anlagen (Dachgesetz zur Stärkung der physischen Resilienz von Betreibern kritischer Anlagen (KRITIS-DachG-E)) vom 21.12.2023.

[208] BT-Drs. 20/4267, S. 3.

[209] BT-Drs. 20/4267, S. 3.

[210] Bundesministerium des Innern, Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie) vom 17.06.2009, abrufbar unter: https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/themen/bevoelkerungsschutz/kritis.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (zuletzt abgerufen am 30.01.2024).

[211] Gesetz über das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI-Gesetz) vom 14. August 2009 (BGBl. I S. 2821), das zuletzt durch Artikel 12 des Gesetzes vom 23. Juni 2021 (BGBl. I S. 1982) geändert worden ist.

[212] Zu der öffentlichen Sicherheit zählen der Schutz der Unverletzlichkeit der objektiven Rechtsordnung, der Schutz der subjektiven Rechte und Rechtsgüter des Einzelnen und der Schutz des Bestandes des Staates und sonstiger Träger öffentlicher Gewalt, ihrer Einrichtungen und Veranstaltungen.

[213] Entwurf eines Gesetzes zur Umsetzung der Richtlinie (EU) 2022/2557 und zur Stärkung der Resilienz von Betreibern kritischer Anlagen (Dachgesetz zur Stärkung der physischen Resilienz von Betreibern kritischer Anlagen (KRITIS-DachG-E)) vom 21.12.2023.

bundesgesetzliche sektorenübergreifende Mindeststandards schaffen.[214] Während die ursprüngliche Entwurfsfassung auch den Begriff der Kritischen Infrastruktur definierte, knüpft der überarbeitete Entwurf an den Begriff der Kritischen Anlage an.[215]

Definition: Anlage gem. § 2 Nr. 2 sowie Kritische Anlage gem. 2 Nr. 3 i.V.m. § 2 Nr. 4 KRITIS-DachG-E

Eine Anlage ist eine Betriebsstätte, sonstige ortsfeste Installation, Maschine, Gerät und sonstige ortsveränderliche technische Installation. Eine kritische Anlage ist eine Anlage, die eine kritische Dienstleistung erbringt. Eine kritische Dienstleistung ist eine Dienstleistung, die eine hohe Bedeutung für das Funktionieren des Gemeinwesens hat, da durch ihren Ausfall oder ihre Beeinträchtigung langfristige Versorgungsengpässe oder Gefährdungen für wirtschaftliche Tätigkeiten, die öffentliche Sicherheit oder Ordnung, die öffentliche Gesundheit, wichtige gesellschaftliche Funktionen oder die Erhaltung der Umwelt eintreten.

Welche Anlagen im Einzelnen kritische Anlagen sind, bestimmt sich nach § 4. Dieser konkretisiert den Anlagenbegriff weiter im Hinblick auf durch Rechtsverordnung nach § 16 KRITIS-DachG-E festgelegte Kriterien. § 4 Abs. 1 KRITIS-DachG-E sieht grundsätzlich Anlagen ab einem zu versorgenden Personenkreis von 500.000 als kritische Anlage an. Auch wenn damit weder im BSIG noch im KRITIS-DachG-E zumindest ausdrücklich maritime Infrastruktur erwähnt wird, können Windenergieanlagen auf See und ihre Nebeneinrichtungen doch unter den Begriff der Kritischen Infrastruktur bzw. der kritischen Anlage fallen. Jedenfalls spielen sie eine entscheidende Rolle für die Versorgung der Bevölkerung mit Energie und gewinnen mit Blick auf die ambitionierten Ausbauziele des WindSeeG auch unter wirtschaftlichen Aspekten zunehmend an Relevanz.[216]

Auf dieser Grundlage ergeben sich vor allem nach dem KRITIS-DachG-E weitere Pflichten auf privater wie auf staatlicher Seite.

6.4.1.1 Verantwortlichkeit des Anlagenbetreibers

Der **Anlagenbetreiber** ist eigenverantwortlich für den Schutz seiner kritischen Anlage zuständig. Dies gilt in Bezug auf etwaige Betriebsrisiken, die von der Anlage selbst ausgehen.[217] Aber auch Risiken, die die Anlage unmittelbar gefährden können, beispielsweise Sabotageakte, fallen in den Zuständigkeitsbereich des Anlagenbetreibers.[218] Der eigenverantwortliche Schutz durch den Anlagenbetreiber soll schon allein aus praktischen Erwägungen vordergründig greifen, weil der Bundespolizei die Kapazitäten fehlen, alle Anlagen hinreichend zu schützen. Hierzu werden dem zuständigen Anlagenbetreiber verschiedene Handlungsempfehlungen an die Hand gegeben,

[214] Entwurf eines Gesetzes zur Umsetzung der CER-Richtlinie und zur Stärkung der Resilienz kritischer Anlagen (KRITIS-Dachgesetz – KRITIS-DachG), S. 3.

[215] Entwurf eines Gesetzes zur Umsetzung der CER-Richtlinie und zur Stärkung des Resilienz kritischer Anlagen (KRITIS-Dachgesetz – KRITIS-DachG) vom 28.07.2023.

[216] 2023 betrug der Energieträgeranteil von Offshore-Wind an der Gesamterzeugung 5,24 % von 56,03 % Energieerzeugung aus erneuerbaren Energien insgesamt, s. BNetzA, Energiemarkt aktuell, Der Strommarkt im Jahr 2023, abrufbar unter: https://www.smard.de/page/home/topic-article/444/211756, zuletzt abgerufen am 13.06.2024). Das entspricht einer Leistung von 8,5 GW, s. Deutsche Windguard, Status des Offshore-Windenergieausbaus in Deutschland, 2023, S. 3, abrufbar unter: https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/06-zahlen-und-fakten/Status_des_Offshore-Windenergieausbaus_Jahr_2023.pdf). Im ersten Quartal 2024 betrug der Anteil von Offshore-Wind bereits 7,23 % von insgesamt 58,60 % Gesamtenergieerzeugung aus erneuerbarer Energie, s. BNetzA, Der Strommarkt im 1. Quartal 2024, Höhere Einspeisung durch Erneuerbare, abrufbar unter: https://www.smard.de/page/home/topic-article/211784/213182 (zuletzt abgerufen am 13.06.2024). § 1 Abs. 2 WindSeeG sieht bis zum Jahr eine installierte Leistung von mindestens 30 GW vor, sodass sich der Anteil weiter erhöhen wird.

[217] Vgl. § 77 WindSeeG.

[218] BT-Drs. 20/4267, S. 6 f.; s. auch (Bundeswehr, 2023)

u.a. durch das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe.[219] Im Übrigen sieht auch das sich noch im Referentenentwurf befindende KRITIS-DachG übergreifende Maßnahmen für kritische Anlagen vor, die im Sinne des „All-Gefahren-Ansatzes"[220] Naturkatastrophen oder vom Menschen verursachte, unbeabsichtigte oder vorsätzliche Gefährdungen berücksichtigen. Hierunter fallen also auch potentiell hybride Angriffe.

Gem. § 6 Abs. 1 des aktualisierten KRITIS-DachG-E besteht eine Verpflichtung des Betreibers, seine Anlage spätestens drei Monate, nachdem er erstmals oder erneut als Betreiber kritischer Anlagen gilt, registrieren zu lassen. Danach erfolgt eine nationale Risikoanalyse und – bewertung durch das zuständige Bundesministerium und Landesministerium, § 8 KRITIS-DachG-E. Daneben ist auch der Betreiber verpflichtet, eine Risikoanalyse und -bewertung gem. § 9 KRITIS-DachG-E vorzunehmen. Das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe wird dabei ermächtigt sowohl für die Analyse von staatlicher als auch für die von Betreiberseite Mindestanforderungen festzulegen. Zusätzlich sieht der neue § 10 KRITIS-DachG-E zum Schutz kritischer Anlagen u.a. vor, dass Betreiber nach Ablauf von 10 Monaten nach der Registrierung auf die identifizierten Risiken für ihre Anlagen mit passgenauen Maßnahmen auf technischer, sicherheitsbezogener und organisatorischer Ebene reagieren und diese in Resilienzplänen darstellen. Der neue Entwurf zählt nun auch beispielhaft konkrete Resilienzmaßnahmen auf.

Konkretere auf maritime kritische Anlagen oder auf die AWZ bezogene Maßnahmen sind in dem KRITIS-DachG-Entwurf bisher nicht enthalten.

6.4.1.2 Verantwortlichkeit der Sicherheitsbehörden

Die **Verantwortlichkeit der Sicherheitsbehörden** greift dann, wenn eine konkrete Gefährdung kritischer Infrastruktur vorliegt. Die Kompetenz liegt dann bei der zuständigen Sicherheitsbehörde. Mangels einer einheitlichen maritimen Gefahrenabwehr gibt es hier verschiedene Organisationen auf Landes- und Bundesebene, die die maritime Infrastruktur schützen und in den unterschiedlichen Anwendungsfällen praktisch tätig werden sollen. Für den Zuständigkeitsbereich gilt, dass sich die föderale Kompetenzverteilung ohne weiteren Zuordnungsakt grds. in der AWZ fortsetzt. Soweit nach der Kompetenzverteilung des Grundgesetzes in der AWZ die Länder zuständig sind, ist eine Aufteilung dieser Zuständigkeit zwischen den Ländern nicht vorgesehen, sondern von den Ländern zu vereinbaren.[221]

Einer der Hauptakteure für die maritime Sicherheit als allgemeine Gefahrenabwehr ist die **Bundespolizei**. Ihre Zuständigkeit ergibt sich gem. § 6 i.V.m. § 12 Abs. 1 Nr. 6 BpolG für die Aufgaben auf dem Gebiet der Strafverfolgung außerhalb des deutschen Küstenmeers nach dem Völkerrecht. Völkerrechtliche Grundlage ist Art. 60 Abs. 1b i.V.m. Art. 56 SRÜ, Art. 60 Abs. 2 SRÜ. Für Anlagen in der AWZ gewährt das SRÜ dem Küstenstaat ausschließliche Hoheitsbefugnisse, einschließlich derjenigen in Bezug auf Sicherheitsgesetze. Die Bundespolizei See überwacht die AWZ regelmäßig und bezieht mobile und stationäre maritime KRITIS in die operative Planung ihrer Präsenzmaßnahmen auf See ein.[222]

§ 5 Abs. 1 BKAG regelt die Zuständigkeit des **Bundeskriminalamtes** für die Abwehr von Gefahren des internationalen Terrorismus. Die Aufgaben beschränken sich auf länderübergreifende

[219] BT-Drs. 20/4267, S. 6 f.

[220] (Bundesministerium des Innern und für Heimat, 2023), S. 1.

[221] BT-Drs. 18/3353, S. 2.

[222] (Walter, 2023)

Gefahren, bei fehlender Zuständigkeit der Länder oder für den Fall des Vorliegens eines Übernahmeersuchen einer Landesbehörde.

Die **Wasserschutzpolizei** ist zuständig für die Ermittlung von Straftaten wie Wasserverunreinigungen, auf Anforderung eines Küstenlandes für Einsatzaufgaben und Analyse, Bewertung und Steuerung von Infos im Bereich der maritimen Sicherheit.

Die Hauptzuständigkeit des durch eine gemeinsame Bund-Küstenländer-Vereinbarung[223] geschaffenen **Havariekommandos** liegt in der Bewältigung von komplexen Schadenslagen. Nach § 1 Abs. 4 der Bund-Länder-Vereinbarung liegt eine solche u.a. vor, wenn Sachgüter von bedeutendem Wert gefährdet sind oder eine Störung bereits eingetreten ist und zur Beseitigung dieser Gefahrenlage die Mittel und Kräfte des täglichen Dienstes nicht ausreichen oder eine einheitliche Führung mehrerer Aufgabenträger erforderlich ist.

Hinzu kommt das **Maritime Sicherheitszentrum des Bundes und der Länder in Cuxhaven/Gemeinsames Lagezentrum See (GLZ-See)**, das wiederum aus verschiedenen Partnern besteht. Hierzu gehören die Deutsche Marine, die Bundespolizei, das Havariekommando[224], die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, der Zoll, die Wasserschutzpolizei sowie die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung. Gem. § 3 Abs. 1 Nr. 1 der Verwaltungsvereinbarung für ein Maritimes Sicherheitszentrum erstreckt sich das Einsatzgebiet des GLZ-See auch auf die AWZ. Zu den Aufgaben gehören u.a. die umfassende und unverzügliche Bereitstellung relevanter Daten und Informationen, die Erstellung gemeinsamer Lagebilder, die gemeinsame Bewertung der Lage, die gegenseitige Beratung und Unterstützung, die logistische Unterstützung der Vollzugs- und Einsatzkräfte, die Sicherstellung eines effektiven Einsatzes verfügbarer personeller und sachlicher Ressourcen der Partner durch eine optimale Einsatzkoordinierung, die Zusammenarbeit mit den Lagezentren anderer Behörden und Stellen sowie die Mitwirkung bei der Vorbereitung sowie Durchführung und Auswertung gemeinsamer Übungen. Auch wird eine effiziente Seeraumüberwachung u.a. durch eigene Einsatzfahrzeuge der Partner auf See und aus der Luft durch das GLZ-See sichergestellt. Neben der Zusammenstellung eines Lagebildes liefert das Havariekommando eine tägliche Ereignismeldung für das GLZ-See auf Grundlage aller Daten und Informationen.[225]

Die **Deutsche Marine** hingegen ist gem. Art. 87a GG[226] zuständig im Verteidigungs- oder Spannungsfall[227] oder im Rahmen ihrer durch die NATO übertragenen und übernommenen Aufgaben. Zur Verbesserung des maritimen Lagebildes ordnete die NATO beispielsweise verstärkte Seeraumüberwachungsmaßnahmen in Atlantik sowie der Nord- und Ostsee an. Die Deutsche Marine führt diese Überwachung mit wiederkehrenden Flügen von Seefernaufklärern durch und beteiligt sich mit Booten und Schiffen an der Very High Readiness Joint Task Force Maritime.[228] Auf nationalgesetzlicher Ebene gibt es für den Bereich der maritimen Sicherheit bislang (noch) keine gesetzliche Grundlage, die eine Einbindung der Streitkräfte darüber hinaus zur Unterstützung polizeilicher Aufgaben festschreibt (anders beispielsweise im § 13 Abs. 1

[223] Bund-Länder-Vereinbarung über die Errichtung eines Havariekommandos, BAnz. 2003, S. 1170 f.

[224] Das Havariekommando ist eine Organisation des Bundes und der Küstenländer für das Notfallmanagement auf Nord- und Ostsee und ist vor allem zuständig für die Bewältigung Großschadenslagen auf See.

[225] (Maritimes Sicherheitszentrum des Bundes und der Küstenländer, 2018)

[226] Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland vom 23.5.1949 (BGBl. S. 1), das zuletzt durch Artikel 1 G. vom 19.12.2022 (BGBl. I S. 2478) geändert worden ist.

[227] Gem. Art. 115a GG liegt der Verteidigungsfall vor, wenn festgestellt wird, dass das Bundesgebiet mit Waffengewalt angegriffen wird oder ein solcher Angriff unmittelbar droht. In dem Fall ist auch eine Aufgabenübertragung zur Unterstützung polizeilicher Maßnahmen möglich, Art. 87a Abs. 3 GG.

[228] BT-Drs. 20/4758, 12.

Luftsicherheitsgesetz[229]). Zu den sektorenübergreifenden Regelungen des KRITIS-DachG könnten daher zukünftig solche Änderungen in einem neu zu schaffenden *Seesicherheitsgesetz* hinzutreten, um vor allem solche Sondersituationen zu beherrschen, in denen die benötigten Mittel die vorhandenen Mittel der Polizei übersteigt und die Mittel der Bundeswehr mangels Kompetenz derzeit nicht eingesetzt werden dürfen.[230] Fraglich ist jedoch selbst dann, ob hierdurch ausreichend Mittel zur Verfügung stehen würden, um tausende Kilometer an Unterwasserinfrastruktur zu bewachen.

6.4.1.3 Maritime Sicherheit auf internationaler Ebene

Darüber hinaus ist seit 2014 die EU-Strategie für Maritime Sicherheit und ihr Aktionsplan in Kraft, die letztmalig Anfang 2023 aktualisiert wurden. Sie sollen einen umfassenden Rahmen bieten, um auf sicherheitspolitische Herausforderungen auf See zu reagieren und auch abschreckend zu wirken, insbesondere wurde hier eine engere Zusammenarbeit zwischen zivilen und militärischen Behörden angeregt.[231] Hierbei soll ein regionaler Überwachungsplan für Unterwasserinfrastruktur und Offshore-Energieanlagen erstell werden.[232]

Auf internationaler Ebene gibt es im Übrigen die **NATO-Koordinierungszelle zum Schutz kritischer Unterwasserinfrastruktur**, die seit Februar 2023 besteht. In der Absicht, das Monitoring in Nord- und Ostsee durch verschiedene Sensoren so dicht zu gestalten, dass ein Angriff auf die Infrastruktur einem etwaigen Angreifer nachgewiesen werden kann, sollen potentielle hybride Kriegsführungen abgeschreckt werden. Vordergründig möchte die NATO internationalen Konsens für die maritime Sicherheit schaffen und dazu die verschiedenen nationalen Akteure vernetzen, um auf dieser Basis ein allgemeingültiges maritimes Sicherheitskonzept zu erschaffen.[233] Insofern überschneiden sich die NATO-Ziele im Wesentlichen mit denen der EU.

6.4.2 Aktueller Rechtsrahmen für das Anbringen militärischer Sensorik an Windenergieanlagen auf See: Pflichten des Betreibers nach dem WindSeeG und dem FEP

Im Kontext der Nutzung von Windenergieanlagen auf See und deren möglichen Nutzung zur verbesserten Erstellung eines Lagebildes stellt sich die Frage, wie sich die Betreiberpflichten und -rechte insbesondere in Bezug auf die Anbringung und Verwendung von Sensoren gestalten. Ebenso von Interesse ist die Klärung der Rechte und Pflichten im Hinblick auf die Erhebung und den Austausch von erhobenen Daten zwischen den Anlagenbetreibern und der Bundeswehr.

Das Gesetz sieht bezogen auf militärische Sensoren verschiedene Verpflichtungen des Anlagenbetreibers vor. Gemäß § 77 Abs. 3 Nr. 2 WindSeeG[234] bzw. 6.1.4. (d) des FEP 2023[235] sind **Verantwortliche Personen (VP)** dazu verpflichtet, an geeigneten **Eckpositionen des OWP Sonartransponder** zu installieren. Diese Sonartransponder dienen U-Booten dazu, die OWP als

[229] Luftsicherheitsgesetz vom 11.1.2005 (BGBl. I S. 78), das zuletzt durch Artikel 1 G. vom 22.4.2020 (BGBl. I S. 840) geändert worden ist.

[230] Walter: Der Schutz der maritimen Kritischen Infrastruktur nach den Anschlägen auf die Nord-Stream-Pipelines, NordÖR 2023, 302; Die geführten Interviews (im Rahmen der Landes- und Bündnisverteidigung) lassen ebenfalls den Wunsch nach einem Seesicherheitsgesetz erkennen. Dieses soll vor allem eine einheitliche verbindliche Zuständigkeitsregelung für die Übergangsgebiete von Küstenmeer zu AWZ trifft.

[231] (Europäische Kommission, 2023)

[232] Council Conclusions on the Revised EU Maritime Security Strategy (EUMSS) and its Action Plan vom 24.10.2023, 14280/23.

[233] (Tiedke, 2023)

[234] "Windenergie-auf-See-Gesetz vom 13. Oktober 2016 (BGBl. I S. 2258, 2310), das zuletzt durch Artikel 14 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist.

[235] (BSH, 2023b)

Hindernis im und unter Wasser mittels akustischer Signale zu erkennen und detektieren. Die technischen Anforderungen sind mit der Bundeswehr abzustimmen.

Der Begriff der VP ist in § 78 Abs. 1 WindSeeG definiert.

Definition: Verantwortliche Personen (VP)

Die verantwortlichen Personen im Sinne des § 78 Abs. 1 WindSeeG sind insbesondere der Adressat des Planfeststellungsbeschlusses oder der Plangenehmigung, der Betreiber der Anlage und die zur Leitung oder Beaufsichtigung des Betriebs bestellten Personen.

Eine weitere Pflicht der VP liegt darin, dass sie der Bundeswehr gemäß 6.1.4. e) des FEP 2023[236] sowie 6.4 (e) des Vorentwurfs zur Fortschreibung des FEP 2023[237] die Installation und den Betrieb von technischen Anlagen zu ermöglichen hat. Diese Sensoren werden ausdrücklich des Wortlauts durch die Bundeswehr betrieben und auch ausschließlich durch diese verwendet. Ein Datenaustausch ist an dieser Stelle also nicht erforderlich. Der Betrieb der militärischen Sende- und Empfangsanlagen steht unter dem Vorbehalt, dass er aus militärischer Sicht zur Landes- und Bündnisverteidigung notwendig ist. Außerdem soll durch die Anbringung der Betrieb der EE-Anlagen so wenig wie möglich eingeschränkt werden. Welche Daten diese technischen Anlagen letztlich aufzeichnen (dürfen), ist im FEP nicht weiter festgelegt.

Den VP obliegt darüber hinaus ganz grundsätzlich die **Seeraumbeobachtung** gemäß der einschlägigen WindSeeV (z.B. § 18 3. WindSeeV[238]).[239] Danach hat der Anlagenbetreiber Maßnahmen zur Kollisionsvermeidung zu treffen. Der Umfang der Seeraumbeobachtung ist separat in der Durchführungsrichtlinie „Seeraumbeobachtung Offshore-Windparks“[240] geregelt. Die Seeraumbeobachtung dient dem Schutz des Personals und des Objekts, der Koordinierung von Baustellen- und Wartungsverkehr und außerdem ganz allgemein dem Kollisionsschutz. Die Seeraumbeobachtung ist damit von der **Seeraumüberwachung** abzugrenzen, denn letztere ist ein Instrument der Maritimen Verkehrssicherung und der Gefahrenabwehr und damit eine hoheitliche Aufgabe, § 1 Seeaufgabengesetz (SeeAufgG)[241].

Seeraumbeobachtung und Seeraumüberwachung

Seeraumbeobachtung ist die gezielte Überwachung eines begrenzten Gebietes des Seeraumes durch die privaten Betreiber eines OWP und soll die WEA selbst und das Personal auf der Anlage schützen sowie Kollisionsrisiken verhindern.

Seeraumüberwachung hingegen ist eine hoheitliche Aufgabe, die die umfassende Sicherung und Überwachung eines Seegebiets zum Ziel hat und in erster Linie der Maritimen Verkehrssicherung und Gefahrenabwehr dient.[242]

[236] (BSH, 2023b)

[237] (BSH, 2023e)

[238] Dritte Windenergie-auf-See-Verordnung vom 5. Januar 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 8).

[239] Siehe dazu § 15 EEV i.V.m § 12 Abs. 5 S. 6 WindSeeG wonach das Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur zum Erlass einer Verordnung legitimiert ist.

[240] (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2014)

[241] Seeaufgabengesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Juni 2016 (BGBl. I S. 1489), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 14. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 73) geändert worden ist.

[242] (Sellmann & kleine Holthaus, 2015, S. 50)

Die Seeraumbeobachtung erfolgt automatisiert und bemisst sich nach den individuell vorliegenden Begebenheiten wie Seegebiet, Verkehrsfrequenz und Risikobewertung, s. 3.2.2 der Durchführungsrichtlinie „Seeraumbeobachtung Offshore-Windpark".

Die Durchführungsrichtlinie „Seeraumbeobachtung Offshore-Windpark" regelt in 3.5 Datenschutz und Datensicherheit. Demnach hat der OWP-Betreiber sicherzustellen, dass kein Unbefugter (Dritter) Zugriff auf die Funktionen und Daten der Seeraumbeobachtung hat. Grundsätzlich sind demnach die durch ihn erhobenen Daten ausschließlich zum Zwecke der Seeraumbeobachtung zu verwenden. Allerdings ist der Anlagenbetreiber dazu verpflichtet, mögliche Gefahren von außen den Verkehrszentralen zu melden, damit diese wiederum die erforderlichen Maßnahmen zur Gefahrenabwehr einleiten können. Außerdem sieht die Durchführungsrichtlinie eine manuelle Seeraumbeobachtung des Betreibers vor, wenn in dem jeweiligen Gebiet keine Maritime Verkehrssicherung besteht, vgl. 4.1.

Weitere Verpflichtungen sieht das sich noch im Entwurfsstadium befindende KRITIS-DachG vor. Hiernach ist der Betreiber einer kritischen Anlage zur unverzüglichen Meldung von Vorfällen verpflichtet, § 12 Abs. 1 KRITIS-DachG-E. Meldepflichtig sind Vorfälle, die die Erbringung kritischer Dienstleistungen erheblich stören oder erheblich stören könnten. Empfänger soll eine vom Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe und Bundesamt für Sicherheit und Informationstechnik einzurichtende Meldestelle sein. Die Meldung muss erst innerhalb von 24 h erfolgen, § 12 Abs. 3. Eine Weiterleitung erfolgt dann an die jeweilig zuständigen Behörden des Bundes und der Länder über das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, § 12 Abs. 8. Zu den bereits aufgezeigten Resilienzmaßnahmen der Betreiber kritischer Anlagen zählen im Übrigen auch Instrumente und Verfahren für die Überwachung der Umgebung und der Einsatz von Detektionsgeräten, § 10 Abs. 2 Nr. 2 b) und c) KRITIS-DachG-E als Maßnahmen für einen angemessenen physischen Schutz der Räumlichkeiten bzw. der Infrastruktur. Beachtlich ist, dass das Gesetz hier ausdrücklich von einer Überwachung, nicht von einer Beobachtung spricht. Das KRITIS-DachG setzt die in Art. 13 Abs. 1b) vorgesehene Verpflichtung der EU Resilienz RL[243] in nationales Recht um.

Eine rechtliche Grundlage dafür, dass der Anlagenbetreiber die Daten von ihren Sensoren unmittelbar mit der Bundeswehr teilen, besteht nicht.

In diesem Kontext soll hervorgehoben werden, dass sich der OWP durch die Anbringung militärischer Ausrüstung wie Sende- und Empfangsanlagen ggf. als legitimes Angriffsziel qualifiziert, vgl. dazu Art 52 Abs. 2 des Zusatzprotokolls vom 8. Juni 1977 zu den Genfer Abkommen vom 12 August 1949 über den Schutz der Opfer internationaler bewaffneter Konflikte (Protokoll I).[244] Mit Blick auf die Chancen und Herausforderungen von Mehrfachnutzung in der deutschen AWZ ist hier jedenfalls eine intensive Abwägung vorzunehmen, die dem Schutz maritimer kritischer Infrastruktur gerecht wird.

6.4.3 Fazit

Im Hinblick auf den Schutz kritischer Infrastruktur bzw. kritischer Anlagen in der AWZ zeigt sich, dass zahlreiche Organisationen sowohl auf internationaler als auch auf Bundes- und Landesebene beteiligt sind. Ein unübersichtliches Regelungsregime und eine fehlende einheitliche Küstenwache führen allerdings zu einem Wust an Kompetenzen. Die grundsätzliche Pflicht der

[243] Richtlinie (EU) 2022/2557 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Dezember 2022 über die Resilienz kritischer Einrichtungen und zur Aufhebung der Richtlinie 2008/114/EG des Rates.

[244] Wortlaut: „Angriffe sind streng auf militärische Ziele zu beschränken. Soweit es sich um Objekte handelt, gelten als militärische Ziele nur solche Objekte, die auf Grund ihrer Beschaffenheit, ihres Standorts, ihrer Zweckbestimmung oder ihrer Verwendung wirksam zu militärischen Handlungen beitragen und deren gänzliche oder teilweise Zerstörung, deren Inbesitznahme oder Neutralisierung unter den in dem betreffenden Zeitpunkt gegebenen Umständen einen eindeutigen militärischen Vorteil darstellt."

Betreiber, die eigenen Anlagen zu schützen, stellt die Verantwortlichen vor praktische Hindernisse. Bei Sabotageakten in der Unterwasserinfrastruktur kommt es daher auf einen umfassenden Schutz an, der in seiner Gänze – wenn überhaupt – nur von staatlicher Seite geleistet werden kann. Selbstverständlich müssen private Betreiber hierbei einbezogen werden, um eine notwendige Koordinierung und effektive Zusammenarbeit mit staatlichen Stellen zu ermöglichen und auf dieser Basis ein lückenloses Konzept zum Schutz maritimer kritischer Infrastruktur zu entwickeln und umzusetzen. Hier ist eine aufeinander abgestimmte Zusammenarbeit und Kommunikation wichtig. Der KRITIS-DachG-Entwurf stellt hierfür bereits die ersten Weichen. Die aktualisierte Entwurfsfassung stellt jedenfalls einen systematischen Rahmen zum Schutz kritischer Anlagen bereit, der auch maritime kritische Infrastruktur umfasst, wenngleich konkrete auf die AWZ bezogene Maßnahmen fehlen. Auch ein zukünftiges Seesicherheitsgesetz würde Abhilfe schaffen, um einerseits die fehlenden Kapazitäten und Mittel der Bundespolizei mit denen der Deutschen Marine aufzustocken, andererseits der Forderung nach einem einheitlichen, rechtsverbindlichen Zuständigkeitsregime nachzukommen.

Die VP von WEA auf See, Plattformen und sonstigen EE-Anlagen sind dazu verpflichtet Sonartransponder an geeigneten Eckpositionen zu installieren (vgl. § 77 Abs. 3 Nr. 2 WindSeeG) und diese hinsichtlich der Funktionalität an den Anforderungen der Bundeswehr anzupassen. Auch soll es der Bundeswehr möglich sein, auf EE-Anlagen Sende- und Empfangsanlagen zu installieren und zu betreiben, s. 6.4. (e) des FEP 2023. Zugriff auf die dadurch empfangenen Daten hat in dem Fall ausschließlich die Bundeswehr.

Die durch die verpflichtende Seeraumbeobachtung erhobenen Daten der VP der Anlagen hingegen dürfen nur an die nach der Durchführungsverordnung „Seeraumbeobachtung Offshore-Windpark“ zuständigen Empfänger, die zuständige Verkehrszentrale, gelangen. Eine Verpflichtung zur unmittelbaren Weiterleitung der Daten an die Bundeswehr ist nicht ersichtlich und wird auch nicht angereizt. Die klare Kompetenzverteilung zwischen Seeraumbeobachtung durch die VP und Seeraumüberwachung durch die Sicherheitsbehörden unterstreicht dies. Beachtlich ist, dass der KRITIS-DachG-E diese Unterscheidung zwischen Seeraumbeobachtung und -überwachung nicht trifft.

Weitere Rechtsgrundlagen für einen Datenaustausch zwischen den VP einer Anlage und der Bundeswehr sind nicht ersichtlich. Eine konkrete Ermächtigungsgrundlage für die Bundeswehr, unmittelbar auf erhobene Daten von Windenergieanlagen auf See zugreifen zu dürfen, würde – unabhängig vom Potential – einen verpflichtenden Anreiz schaffen, der zur Sicherheit maritimer kritischer Anlagen beitragen könnte.[245]

6.5 Analyse Meeresumwelt

Dieser Abschnitt beschreibt die zusätzlichen Wirkfaktoren durch Landes- und Bündnisverteidigung (Abschnitt 6.5.1), die potentiellen kumulativen Effekte bei einer Mehrfachnutzung mit OWE anhand von internationalen Praxisbeispielen und Forschungsprojekten (Abschnitt 6.5.2) sowie anhand einer Referenzfläche in der deutschen AWZ (mittig in der Nordsee; Abschnitt 6.5.3), und technische Optionen zur Minderung negativer Umweltauswirkungen einer Mehrfachnutzung (Abschnitt 6.5.4).

[245] Eine umfassende Prüfung zur Frage, ob die Windenergieanlage dadurch zu einem legitimen Angriffsziel würde, erfolgt an dieser Stelle nicht.

6.5.1 Potentielle Wirkfaktoren der Nutzungsform „LV/BV“ als Einfachnutzung auf die Meeresumwelt

Durch die Landes- und Bündnisverteidigung wirken Einflussfaktoren auf die Meeresumwelt über, auf und unter Wasser, verursacht durch Luftverkehr, Schiffsverkehr und U-Bootverkehr. Im folgenden Text werden die Kategorien näher beschrieben und in Tabelle 16 für die vier Schutzgüter, die im Rahmen des vorliegenden Berichts näher betrachtet werden, aufgelistet.

Bei der maximalen Nutzung (Manöver) treten alle drei Kategorien auf; bei der minimalen Nutzung tritt keine der Kategorien auf, stattdessen wird die Fläche nur für zukünftige Übungen freigehalten (S. Dumm, persönliche Kommunikation, 15. Februar 2024). Zu den genauen Tätigkeiten der Landes- und Bündnisverteidigung werden aus sicherheitspolitischen Gründen allerdings keine Daten veröffentlicht – beispielsweise weder zur Häufigkeit von Schiffsverkehr oder den akustischen Eigenschaften von militärischem Sonar noch zum Bewuchsschutz von Militärschiffen oder spezifischen Umgang mit Ballastwasser. Dadurch können die Wirkfaktoren durch Landes- und Bündnisverteidigung nur beschrieben und nicht quantifiziert werden.

- **Schiffsverkehr einschließlich U-Booten:** Der Schiffsverkehr zur Landes- und Bündnisverteidigung einschließlich U-Booten verursacht ähnliche Wirkfaktoren wie Schiffsverkehr im Allgemeinen oder der durch Bau- und Wartungsfahrten von OWPs verursachte Schiffsverkehr: Es können invasive und pathogene Arten eingeschleppt werden und es kommt zu einem Eintrag von Dauerschall und chemischen Emissionen; zudem können Meerestiere mit Schiffen kollidieren (z. B. Junge et al., 2022). Die möglichen Auswirkungen von Schiffsverkehr auf die marine Umwelt sind in Abschnitt 4.1 und 4.2 näher beschrieben. Der zivile Schiffsverkehr fährt jedoch weltweit durchschnittlich zwischen 13 und 25 Knoten schnell[246], während Fregatten der Bundeswehr mehr als 29 Knoten erreichen können. Wenn Fregatten mit mittlerer Geschwindigkeit fahren, sind die akustischen Emissionen nur gering, um sich möglichst gut zu tarnen (S. Dumm, persönliche Kommunikation, 15. Februar 2024). Bei höheren Geschwindigkeiten nehmen zum einen die akustischen Emissionen zu und zum anderen steigt das Risiko, dass Meerestiere mit Schiffen kollidieren (Leaper, 2019). Zusätzlich kann es bei Schiffsverkehr zur Landes- und Bündnisverteidigung zum Eintrag von Impulsschall durch militärische Sonareinsätze kommen, die aufgrund ihres impulshaften Charakters und der hohen Frequenzen zu möglichen Vertreibungs- und im Nahbereich zu möglicherweise Verletzungsgefahren insbesondere für Schweinswale führen könnten. Auch wenn Robben den Bereich besten Hörens bei tieferen Frequenzen haben und dadurch weniger gestört werden, können sie beispielsweise aus wichtigen Nahrungsgebieten verscheucht werden (Andersson & Johannson, 2016). Der zusätzliche Eintrag von Dauer- und Impulsschall durch die Landes- und Bündnisverteidigung tritt zwar nur temporär auf, allerdings kann sich der Schall auf einer räumlichen Skala von mehreren bis mehreren Dutzend Kilometern ausbreiten; die negative Auswirkung hängt von der Häufigkeit und Dauer des Eintrags von Dauer- und Impulsschall ab.
- **Luftverkehr:** Der Luftverkehr zur Landes- und Bündnisverteidigung besteht aus verschiedenen Fahrzeugen, von Hubschraubern bis hin zu Kampfflugzeugen und führt zu einem zusätzlichen Eintrag von (Luft)Schall; mit dem Luftverkehr können See- und Rastvögel kollidieren sowie artspezifisch und Flugobjektspezifisch über unterschiedliche räumliche Distanzen vertrieben werden(Junge et al., 2022; Uhlfelder, 2013). Dieser Wirkfaktor tritt temporär und auf einer räumlichen Skala von mehreren hundert Metern bis zu

[246] Zum Vergleich: Massengutfrachter 13 bis 15 Knoten; Tanker 13 bis 17 Knoten; Ro-Ro-Schiffe 16 bis 22 Knoten; Containerschiff 16 bis 24 Knoten; Kreuzfahrtschiff 20 bis 25 Knoten

mehreren Hundert Kilometern auf; die negative Auswirkung hängt von der Häufigkeit und Dauer ab.

Tabelle 16: Wirkfaktoren während Bau, Betrieb und Rückbau von Offshore-Windenergieanlagen auf einzelne Schutzgüter, die für die deutsche AWZ große Relevanz besitzen, sowie zusätzliche Wirkfaktoren durch Landes- und Bündnisverteidigung

Schutzgut	Kategorie	Wirkfaktoren durch OWE	Wirkfaktoren durch Landes- und Bündnisverteidigung	Quellen beider Wirkfaktoren
Biotope am Meeresboden	Lebensraumveränderung	Sedimentaufwirbelung bei Errichtung, Betrieb und Rückbau der WEAs		Schultze et al. (2020)
	Lebensraumveränderung	Eintrag invasiver Arten	Eintrag invasiver Arten	Büttger et al. (2008), Jensen et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Vibration der WEAs		Vicen-Bueno et al. (2013), Djath et al. (2018), van Berkel et al. (2020), Lloret et al. (2022)
	Lebensraumveränderung	Veränderung der Hydrographie		Vicen-Bueno et al. (2013), Djath et al. (2018), Daewel et al. (2022), Lloret et al. (2022), Christiansen et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Elektrische Magnetfelder, Temperaturerhöhung durch Kabel		Taormina et al. (2018), Hutchinson et al. (2021)
	Lebensraumveränderung	Versiegelung		Krone et al. (2017)
	Lebensraumveränderung	Künstliche Riffe = Änderung von Habitat + Artzusammensetzung		Glarou et al. (2020), Rezaei et al. (2023)
	Fischerei	Reserve effect: Ausschluss der Fischerei im OWP und der aktiven Fischerei in 500 m Radius um OWP		Coates et al. (2016), Bastardie et al. (2020), Hintzen et al. (2021)
	Chemische Emissionen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Kirchgeorg et al. (2018), Lloret et al. (2022)
Fische	Lebensraumveränderung	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Chapman et al. (2021), Jensen et al. (2023)

Schutzgut	Kategorie	Wirkfaktoren durch OWE	Wirkfaktoren durch Landes- und Bündnisverteidigung	Quellen beider Wirkfaktoren
	Lebensraumveränderung	Elektrische Magnetfelder durch Kabel		Taormina et al. (2018), Hermans et al. (2024)
	Lebensraumveränderung	Künstliche Riffe = Änderung von Habitat + Artzusammensetzung		Glarou et al. (2020), Rezaei et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Floating OWE: Primäres und sekundäres Verfangen		Maxwell et at. (2022)
	Fischerei	Reserve effect: Ausschluss der Fischerei im OWP und der aktiven Fischerei in 500 m Radius um OWP		Bigné et al. (2019), Halouani et al. (2020), Hintzen et al. (2021)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Schiffsverkehr	Schiffsverkehr & Luftverkehr	Putland et al. (2017, 2018), Kuehne et al. (2020)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Rammungen	Einsatz von Sonaren	Mooney et al. (2020)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Betriebsgeräusche		Wahlberg & Westerberg (2005), Bellmann et al. (2023)
	Chemische Emissionen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Kirchgeorg et al. (2018), Lloret et al. (2022)
Marine Säugetiere	Lebensraumveränderung	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Sonne et al. (2020), Jensen et al. (2023), Stokholm et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Elektrische Magnetfelder durch Kabel		Taormina et al. (2018)
	Lebensraumveränderung	Floating OWE: Primäres und sekundäres Verfangen		Benjamins et al. (2014), Maxwell et at. (2022)
	Fischerei	Reserve effect: Ausschluss der Fischerei im OWP und der aktiven Fischerei in 500 m Radius um OWP		Moan et al. (2020), Kindt-Larsen et al. (2023)

Schutzgut	Kategorie	Wirkfaktoren durch OWE	Wirkfaktoren durch Landes- und Bündnisverteidigung	Quellen beider Wirkfaktoren
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Schiffsverkehr	Schiffsverkehr & Luftverkehr	Dyndo et al. (2015), Putland et al. (2017), Wisniewska et al. (2018), Kuehne et al. (2020)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Rammungen	Einsatz von Sonaren	Brandt et al. (2018)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Betriebsgeräusche		Tougaard et al. (2009, 2020), Bellmann et al. (2023)
	Chemische Emissionen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Kirchgeorg et al. (2018), Lloret et al. (2022)
	Störung/ Kollisionsrisiko	Schiffsverkehr	Schiffsverkehr	Benhemma-Le Gall (2023)
See- und Rastvögel	Lebensraumveränderung	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Sonne et al. (2020), Jensen et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Elektrische Magnetfelder durch Kabel		Taormina et al. (2018)
	Lebensraumveränderung	Floating OWE: Primäres und sekundäres Verfangen		Maxwell et at. (2022)
	Fischerei	Reserve effect: Ausschluss der Fischerei im OWP und der aktiven Fischerei in 500 m Radius um OWP		Daunt et al. (2008), Searle et al. (2023)
	Akustische Emissionen	Schiffsverkehr	Schiffsverkehr & Luftverkehr	Mooney et al. (2019), Kuehne et al. (2020), Jalkanen et al. (2022)
	Akustische Emissionen	Rammungen	Einsatz von Sonaren	Mooney et al. (2019), Bellmann et al. (2023)
	Akustische Emissionen	Betriebsgeräusche		Mooney et al. (2019), Bellmann et al. (2023)

Schutzgut	Kategorie	Wirkfaktoren durch OWE	Wirkfaktoren durch Landes- und Bündnisverteidigung	Quellen beider Wirkfaktoren
	Chemische Emissionen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Kirchgeorg et al. (2018), Lloret et al. (2022)
	Störung/ Kollisionsrisiko	Schiffsverkehr	Schiffsverkehr	Coleman et al. (2022)
	Störung/ Kollisionsrisiko	Kollisionsrisiko mit Rotorblättern	Kollisionsrisiko mit Luftverkehr	Hüppop et al. (2006), Uhlfelder (2013), Brabant et al. (2015), Ronconi et al. (2015)
	Störung/ Kollisionsrisiko	Vertreibungswirkung/ Barriere-Effekt durch OWP	Vertreibungswirkung	Fox & Krag Petersen (2019), Vilela et al. (2021), Garthe et al. (2023)

6.5.2 Potentielle kumulative Effekte von OWE und der Nutzungsform „LV/BV“ als Mehrfachnutzung auf die Meeresumwelt

Verglichen mit einer Einfachnutzung durch OWE (Abschnitt 4.2) bzw. einer Einfachnutzung durch Landes- und Bündnisverteidigung (Abschnitt 6.5.1) sind folgende kumulative Effekte (siehe Definition in Abschnitt 4.4) bei einer Mehrfachnutzung aus OWE und Landes- und Bündnisverteidigung möglich:

- Eintrag von **pathogenen und invasiven Arten**: Durch den Schiffsverkehr während der Bau- und Wartungsarbeiten von OWPs sowie den Schiffsverkehr durch die Landes- und Bündnisverteidigung erhöht sich das Aufkommen an Schiffen und damit auch das Risiko, dass pathogene Arten und invasive Arten eingetragen werden. Allerdings wird der zusätzliche Eintrag aufgrund der Vorbelastung durch den allgemeinen Schiffsverkehr wie auch durch den OWE-assoziierten Schiffsverkehr als kaum messbar eingeschätzt, sodass keine kumulativen Effekte erwartet werden. Sollte sich jedoch beispielsweise der Bewuchsschutz zwischen zivilen Schiffen und militärischen Schiffen erheblich unterscheiden, muss der Wirkfaktor möglicherweise anders bewertet werden.

- (Erhöhter) Eintrag **akustischer Emissionen**: Durch den Schiffsverkehr während der Bau- und Wartungsarbeiten von OWPs, die Betriebsgeräusche von OWEAs sowie den Schiffsverkehr durch die Landes- und Bündnisverteidigung kommt es zum Eintrag von Dauerschall. Militärische Schiffe sind jedoch nicht dauerhaft im Bereich eines OWPs im Einsatz, sodass keine kumulativen Effekte hinsichtlich Dauerschall erwartet werden. Da über die akustischen Emissionen von militärischen Schiffsverkehr jedoch wenig bekannt ist in Bezug auf beispielsweise die Häufigkeit und Dauer des Eintrags sowie akustische Charakteristika, muss der Wirkfaktor jedoch möglicherweise anders bewertet werden. Zudem wird während der Rammungen von OWEA-Fundamenten sowie während des Einsatzes von militärischen Sonargeräten oder Schiffen mit aktivem Sonar Impulsschall eingetragen. Wenn Rammarbeiten zeitgleich mit militärischem Sonar in näherer Umgebung (d. h. überschneidenden Wirkungsradien der beiden Nutzungsformen) durchgeführt bzw. eingesetzt werden, könnte es zur Überlagerung verschiedener Störbereiche kommen. Wenn Rammarbeiten und militärisches Sonar kurzzeitig hintereinander (z. B. in aufeinanderfolgenden Monaten, aber auch jährlich während aufeinanderfolgender Paarungszeiten) im gleichen Gebiet durchgeführt bzw. eingesetzt werden, sind ebenfalls kumulative Effekte möglich. Auch sind kumulative Effekte bezüglich einer Kombination aus Dauer- und Impulsschall (beispielsweise Schiffsverkehr und dominierende akustische Emissionen durch Sonar) möglich, sodass ein Einsatz entsprechender Mitigationsmaßnahmen zu prüfen ist.

- Eintrag **chemischer Emissionen**: Während der Bau-, Betriebs- und Rückbauphase von OWPs, sowie während des Schiffsverkehrs und U-Boot-Aktivitäten können chemische Emissionen freigesetzt werden. Allerdings wird der zusätzliche Eintrag während des Normalbetriebs aufgrund der Vorbelastung durch den allgemeinen Eintrag von Abwasser, Düngemittel, Müll und schädlichen Substanzen in die Meere als kaum messbar eingeschätzt (ausgenommen sind Unfälle), sodass keine kumulativen Effekte erwartet werden.

- **Vertreibungswirkung**: Der Luftverkehr zur Landes- und Bündnisverteidigung kann zwar See- und Rastvögel stören, die Reichweite der Vertreibungswirkung und des Barriere-Effekts durch OWE wird für einige Arten allerdings als deutlich größer eingeschätzt. Zum Beispiel weisen störempfindliche Arten wie Pracht- und Sterntaucher Meideradien von über 10 km zur äußeren Windparkgrenze auf (Dierschke et al., 2016; Garthe et al., 2018, 2023; Heinänen et al., 2020; Mendel et al., 2019; Vilela et al., 2020). Statt

kumulativer Effekte wird daher bei diesen Arten erwartet, dass die Reichweite der Vertreibung bei einer Mehrfachnutzung mit der Landes- und Bündnisverteidigung überwiegend vom OWP und dessen Wirkfaktoren abhängt. Je größer die Reichweite der Vertreibung durch OWE als Einfachnutzung für die einzelnen Vogelarten ist, desto geringer ist der kumulative Effekt der Vertreibung bei einer Mehrfachnutzung anzusehen. Das bedeutet umgekehrt, dass für Arten mit schwacher Meidung zum OWP oder gar Anziehung zum OWP erwartet wird, dass die Reichweite der Vertreibung vor allem vom Luftverkehr der Landes- und Bündnisverteidigung abhängt.

- **Kollisionsrisiko**: Marine Säugetiere, sowie See- und Rastvögel können mit den Schiffen kollidieren. Trotz des erhöhten Schiffsverkehrs bei einer Mehrfachnutzung mit der Landes- und Bündnisverteidigung werden keine kumulativen Effekte erwartet, denn die Fregatten der Bundeswehr können zwar schneller als der zivile Schiffsverkehr fahren, sodass das Kollisionsrisiko steigt, jedoch fahren die Fregatten auch teils nur mit mittlerer Geschwindigkeit, um sich möglichst gut zu tarnen. Zudem können See- und Rastvögel mit dem Luftverkehr der Landes- und Bündnisverteidigung kollidieren. Generell wird das Kollisionsrisiko mit den OWEAs zu kollidieren jedoch als deutlich größer eingeschätzt.

Insgesamt werden bei einer Mehrfachnutzung aus OWE und Landes- und Bündnisverteidigung nur kumulative Effekte bei Rammarbeiten und militärischem Sonar (in zeitlichem und räumlichem Zusammenhang) für möglich gehalten. Dementsprechend wurden mögliche kumulative Effekte dieser Mehrfachnutzung bisher in keinem Forschungsprojekt betrachtet, in keinem Praxisbeispiel durchgeführt und ist derzeit auch nicht in Planung. Da kumulative Effekte nur bei Rammarbeiten und militärischem Sonar (in zeitlichem und räumlichem Zusammenhang; d. h. beispielsweise überschneidende Wirkungsbereiche) für möglich gehalten werden, wird auch kein Forschungsprojekt als nötig erachtet; stattdessen wird eine Modellierung der Störbereiche durch die verschiedenen Schallquellen als ausreichend angesehen.

6.5.3 Potentielle kumulative Umwelteffekte auf einer Referenzfläche durch die Mehrfachnutzung mit „LV/BV“

Bezüglich der Umweltverträglichkeit durch die Mehrfachnutzung aus OWE sowie Landes- und Bündnisverteidigung werden im Folgenden die möglichen kumulativen Effekte aus Abschnitt 6.5.2 auf eine Referenzfläche übertragen: Hierzu wird eine Fläche der deutschen AWZ mittig in der Nordsee als Referenzfläche angenommen, welches in etwa Zone 2 und Zone 3 mit den Flächen EN6 bis EN13 entspricht (siehe Abschnitt A.5.1). Zusammenfassend hat die Referenzfläche laut Umweltbericht zum FEP (BSH, 2021a) eine erhöhte Bedeutung für die **grabende Bodenmegafauna, gefährdete Fischarten** (Sternrochen *Amblyraja radiata* und Zwergdorsch *Trisopterus minutus*), **Seetaucher** auf einzelnen Flächen in Zone 2, sowie **Zugvögel**. Auch wenn die Referenzfläche laut Umweltbericht zum FEP keine erhöhte Bedeutung für den **Schweinswal** hat, ist die Individuendichte in dem Gebiet vergleichsweise hoch, sodass der Schweinswal ebenfalls in einer Gesamtbetrachtung berücksichtigt werden muss (Geelhoed et al., 2023).

Insgesamt werden bei einer Mehrfachnutzung aus OWE und Landes- und Bündnisverteidigung nur kumulative Effekte bei Rammarbeiten und militärischem Sonar (in zeitlichem und räumlichem Zusammenhang; d. h. beispielsweise überschneidende Wirkungsbereiche) erwartet.

- (Erhöhter) Eintrag **akustischer Emissionen**: Wenn Rammarbeiten und der Einsatz militärischer Sonargeräte (in zeitlichem und räumlichem Zusammenhang) durchgeführt werden, müssen mögliche kumulative Effekte geprüft werden. Hier könnte es bei einer Mehrfachnutzung zur Überlagerung der einzelnen Störbereiche als bei einer Einfachnutzung kommen, sodass kumulative Effekte möglich sind. Auch sind kumulative Effekte bezüglich einer Kombination aus Dauer- und Impulsschall (beispielsweise Schiffsverkehr und

dominierende akustische Emissionen durch Sonar) möglich, sodass ein Einsatz entsprechender Mitigationsmaßnahmen zu prüfen ist. Die Referenzfläche hat eine erhöhte Bedeutung für gefährdete Fischarten (BSH, 2021a), welche durch den Eintrag von Impulsschall gestört und verletzt werden können. Für Schweinswale hat die Referenzfläche nur eine mittlere Bedeutung (BSH, 2021a), allerdings eine hohe Individuendichte (Geelhoed et al., 2023). Sie nutzen die Gebiete EN6 bis EN12 zum Durchqueren, Aufenthalt und als Nahrungsgrund (BSH, 2021a), könnten aber bei Eintrag akustischer Emissionen auf umliegende Gebiete mit einer potentiell ähnlichen Nahrungsverfügbarkeit ausweichen (Carlström et al., 2002). Zudem sollten technische Optionen geprüft werden, um die akustischen Emissionen insbesondere für den Schweinswal und die gefährdeten Fischarten auf der Referenzfläche gering zu halten (siehe Abschnitt 4.3.1). Die Intensität der kumulativen Effekte hängt von der Dauer und Häufigkeit sowie akustischen Charakteristika ab. Da kaum Daten zur Frequenz und zum Schalldruckpegel von militärischem Sonar veröffentlich werden und die kumulativen Effekte unter anderem vom räumlichen Abstand der Schallquellen (Entfernung zwischen Sonareinsatz und Rammung) sowie zeitlichem Abstand zwischen den Schallquellen abhängen, sollten die kumulativen Effekte im Einzelfall genauer quantifiziert werden.

6.5.4 Bewertung technischer Optionen zur Minderung negativer Umweltwirkungen durch Mehrfachnutzung mit „LV/BV“

Es werden die üblichen technischen Optionen wie bei einer Einfachnutzung von OWE (beispielsweise Lärmminderungssysteme bei der Rammung der OWEA-Fundamente) empfohlen. Hinsichtlich kumulativer Effekte durch gleichzeitige Nutzung einer Fläche für Landes- und Bündnisverteidigung werden folgende technische Optionen zur Minderung negativer Umweltwirkungen durch Mehrfachnutzung empfohlen:

- (Erhöhter) Eintrag **akustischer Emissionen**: Da das Gebiet für Schweinswale eine mittlere Bedeutung und für gefährdete Fischarten eine überdurchschnittliche Bedeutung hat (BSH, 2021a), sollten akustische Emissionen möglichst gering gehalten werden. Beispielsweise haben einige Sonargeräte bereits eine sog. „Ramp-up“-Funktion integriert, sodass akustische Emissionen in den ersten 5 bis 10 min graduell ansteigen. Zudem können sogenannte „Soft Start“-Protokolle vorgeschrieben werden, sodass beispielsweise die Rammenergie in den ersten 10 bis 20 min graduell ansteigen muss. Zudem gibt es verschiedene technische Optionen, um die akustischen Emissionen durch Schiffsverkehr zu verringern (siehe Abschnitt 4.3.1). Für weitere Optionen zur Reduzierung der akustischen Emissionen wären nähere Angaben zu den akustischen Emissionen der Landes- und Bündnisverteidigung hilfreich. Zudem wird zur Senkung der akustischen Emissionen durch eine Mehrfachnutzung und dadurch erhöhten Eintrag von Impulsschall ein Managementplan für den Einsatz von militärischem Sonar sowie Rammarbeiten empfohlen (zeitliche und räumliche Regulierung), um Störungsradien und -zeiträume möglichst gering zu halten.

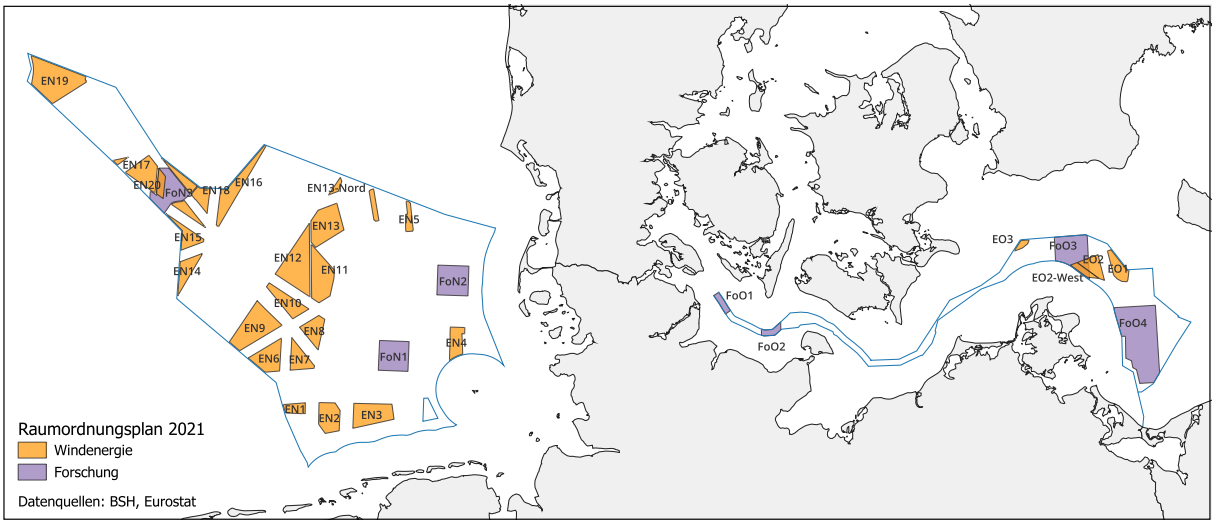
7 Vertiefte Analyse: Mehrfachnutzung Fischereiforschung und Offshore-Windenergie

Neben der Landes- und Bündnisverteidigung wird die Kombination von Windenergie auf See und Fischereiforschung im Folgenden näher betrachtet. Die vertiefte Analyse stützt sich auf die Ergebnisse aus Literaturrecherchen und Interviews mit Expertinnen und Experten. Die Interviews wurden im Zeitraum Juni bis Oktober 2023 durchgeführt. Die Interviews wurden vor allem mit Unternehmen, aber auch mit Forschungseinrichtungen und Verbänden geführt. Die Anzahl der durchgeführten Interviews beläuft sich auf 16. Anhand von Leitfragen, welche dem Anhang A.3 entnehmbar sind, wurde zunächst allgemein und anschließend nach den spezifischen Chancen und Herausforderungen von Mehrfachnutzungen mit Offshore-Windenergie in Kombination mit der Fischereiforschung und weiteren EE-Anlagen in Deutschland befragt. Die Ergebnisse sind im folgenden Kapitel in aggregierter Form und ergebnisorientiert ausformuliert.

7.1 Ausgangsbedingungen im Hinblick auf die potentielle Mehrfachnutzung

Die Ziele der Fischereiwissenschaft liegen in der Entwicklung von Kenntnissen für die nachhaltige Bewirtschaftung lebender Meeresressourcen im Hinblick auf Fischarten, Fanggebiete, -schiffe, -geräte,-techniken und -quoten. Hierzu werden Fische und Fischererzeugnisse auf verschiedenen Stufen der Produktionsketten untersucht, schonende Fangmethoden entwickelt und getestet (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, 2023b). Für zwei für die Forschung vorgesehene Gebiete in Nord- und Ostsee ist im ROP 2021 eine Mehrfachnutzung mit der Windenergie auf See vorgesehen: Die beiden Vorbehaltsgebiete FoN3 und FoO3 überschneiden sich mit bedingten Vorbehaltsgebieten und Vorranggebieten für die Windenergie auf See. Abbildung 22 zeigt die räumliche Festlegung der Gebiete für die Forschung sowie die Windenergie auf See gemäß ROP 2021.

Abbildung 22: Festlegungen für Forschung und Windenergie im Raumordnungsplan 2021



Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Die Fischereiforschung in der deutschen AWZ wird insbesondere vom Thünen-Institut (Johann Heinrich von Thünen-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei) durchgeführt. Es berät das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), dem die Fischereipolitik angegliedert ist, im Hinblick auf den Forschungsbereich „Fisch“ und im Rahmen der Überwachung der Umweltradioaktivität nach Strahlenschutzgesetz. Neben dem Thünen-Institut sind weitere Einrichtungen mit Schwerpunktaufgaben betraut. Die Ergebnisse

der Fischereiforschung gehen zudem in Bestandserhebungen des Internationalen Rates für Meeresforschung (International Council for the Exploration of the Sea: ICES) ein. Der ICES ist ein unabhängiges Netzwerk und zwischenstaatliche Organisation, der Erkenntnisse über den Zustand und die nachhaltige Nutzung der Meere sammelt sowie die Beiträge zum internationalen Grundschleppnetzsurveys (International Bottom Trawl Survey: IBTS, Baltic International Trawl Survey: BITS) koordiniert (ICES, 2023). Weiterhin werden die Daten im Rahmen des Monitorings über die Umsetzung der Europäischen Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL 2008/56/EG) verwendet. Die Richtlinie gibt einen einheitlichen Ordnungsrahmen für den Umweltzustand der Meeresgewässer der EU-Mitgliedsstaaten und beinhaltet Vorgaben zum entsprechenden Überwachungsprogramm (Art. 11 MSRL 2008/56/EG). Damit dienen die Ergebnisse der Fischereiforschung nicht nur dem gesellschaftlichen und politischen Interesse auf nationaler Ebene, sondern müssen auf Grundlage von internationalen Verpflichtungen erhoben werden.

In den Untersuchungsgebieten sollen unabhängige Bestandsuntersuchungen der Fischbestände durchgeführt werden. Hierfür werden folgende Methoden eingesetzt (Thünen-Institut, 2023b):

- hydroakustische Untersuchungsmethoden, die neben hochaufgelösten und flächendeckenden Verteilungsmustern Häufigkeitsindizes liefern
- automatisierte und autonome stationäre und mobile (sog. AUVs) Messplattformen
- satellitenbasierten Fernerkundungsmethoden
- Grundschleppnetzsurveys

Die Beprobung der Gebiete mithilfe von Grundschleppnetzen erfolgt üblicherweise zur immer gleichen Jahreszeit zweimal jährlich und nach standardisierten Verfahren. Der Fokus wird auf zeitliche und räumliche Veränderungen von der Verteilung und relativen Häufigkeiten von Fischen und Fischgemeinschaften sowie auf biologische Parameter (z.B. Länge, Gewicht, Alter, Geschlechterverteilung, Fruchtbarkeit) gelegt.

- Grundschleppnetzsurveys in der Nordsee (International Bottom Trawl Survey - IBTS)

  Im Zeitfenster Januar bis Februar (IBTS Q1) ist konkret die Bestimmung der Verteilung und der relativen Häufigkeit der Jungfische der wichtigsten kommerziell genutzten Fischarten und die Bestimmung der Häufigkeit und der Verteilung der späten Heringslarven das Ziel. Im Zeitfenster von Juli bis August (IBTS Q3) werden Daten für die Bestandabschätzungen der Zielarten Schellfisch, Kabeljau, Seelachs, Wittling, Stintdorsch, Hering, Sprotte, Makrele und Scholle in der Nordsee und im Skagerrak gesammelt (Thünen-Institut, 2023a).

- Grundschleppnetzsurveys in der Ostsee (Baltic International Trawl Survey - BITS)

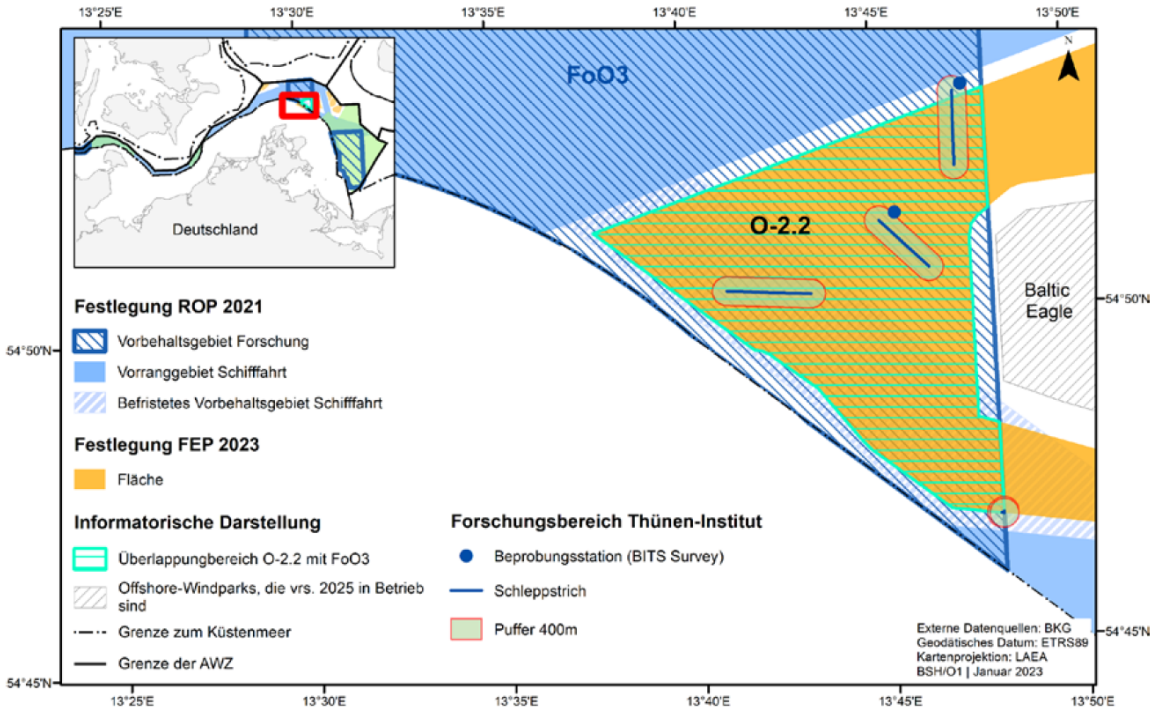
  Der Ostsee-Survey BITS liefert Daten zum Zustand der Bodenfischarten Dorsch, Flunder, Scholle, Kliesche und Steinbutt in der westlichen Ostsee. Die Erhebungen werden zweimal jährlich im ersten und vierten Quartal durchgeführt und durch den ICES koordiniert. Der Cod in the Baltic Survey (CoBalt), eine Serie von Forschungsreisen im Rahmen der BITSs, die seit dem Jahr 1992 durchgeführt wird, trägt zur Bestimmung der Reife und Fruchtbarkeit des Dorschs in der westlichen und der östlichen Ostsee bei. Der Ostsee-Boxensurvey (BaltBox) im Juni, bei dem die Beprobung nach BITS-Standard durchgeführt wird, dient dem langfristigen Monitoring der Biodiversität der bodenlebenden Fischartengemeinschaft und der Erfassung ihrer natürlichen Variabilität vor der deutschen Ostseeküste (Thünen-Institut, 2023c).

Die Datenerhebungen im Rahmen der ICES- und MSRL-Überwachungsprogramme basieren auf langjährigen, standardisierten Forschungsreihen (z.B. Nordsee-IBTS seit den 1960er Jahren), um die zeitlichen und räumlichen Veränderungen zu dokumentieren und Aussagen über zukünftige

Entwicklungen treffen zu können. Bei der Fischereiforschung handelt es sich entsprechend um eine bereits seit mehreren Jahrzehnten bestehende Nutzung, die zumeist temporär zu bestimmen Zeitpunkten in bestimmten räumlichen Gebieten in Nord- und Ostsee stattfindet.

Insgesamt überschneiden sich zwei Vorbehaltsgebiete für Forschung mit Flächen für die Offshore-Windenergie: FoO3 mit O-2.2 (Gebiete EO2-West und EO2 im ROP 2021) und FoN3 mit N-20 (Gebiet EN20 im ROP 2021). Für beide Nutzungen ist damit eine Mehrfachnutzung im ROP 2021 vorgesehen. Die Ausgestaltung der Mehrfachnutzung von Flächen für Fischereiforschung und Windenergie auf See wurde mit der Veröffentlichung des FEP 2023 für die Forschungsaktivitäten auf der für Windenergie festgelegten Fläche O-2.2 in der Ostsee konkretisiert (s. Abbildung 23).

Abbildung 23: Darstellung Forschungsaktivitäten im Überlappungsbereich der Windenergie-Fläche O-2.2 mit dem Vorbehaltsgebiet Forschung FoO3



Quelle: (BSH, 2023b)

Der FEP 2023 gibt vor, dass die Meeresforschung in gleichem Maße wie bisher möglich sein muss, sodass die beiden betroffenen Nutzer sich austauschen müssen, damit die Belange der Forschungsinstitutionen möglichst frühzeitig in der Planung des Windparks berücksichtigt werden können. Dazu zählt insbesondere die Befahrbarkeit des Windparks durch Forschungsschiffe, die Grundschleppnetzfänge durchführen. Der FEP 2023 sieht zur Berücksichtigung freizuhaltende Schleppstriche vor, die mit einem Sicherheitsabstand von mindestens 400 m in die Planung des Windparks einfließen müssen. Damit die Grundschleppnetzfänge durchgeführt werden können, müssen die entsprechenden Bereiche dauerhaft ohne Hindernisse befahrbar sein. Der Windparkbetreiber muss die Belange der Forschung in die Gestaltung des Windparks integrieren, insbesondere bei der Planung des Aufstellmusters der Windenergieanlagen und bei der Innerparkverkabelung. Auf welche Art und Weise und in welchem Umfang die Kommunikation zwischen Windparkbetreiber und Forschungsinstitutionen ablaufen muss, wird im FEP 2023 nicht geregelt, die betroffenen Nutzer sollen sich eigenverantwortlich austauschen.

Erste Berührungspunkte mit Untersuchungen mittels Baumkurre während der Betriebsphase eines Windparks haben Betreiber bestehender Windparks beispielweise bereits im Rahmen der

Umweltuntersuchungen nach dem Standartuntersuchungskonzept (StUK4) des BSH. Das Standartuntersuchungskonzept des BSH sieht Monitorings zu den Schutzgütern Benthos und Fische mittels Baumkurre im ersten, dritten und fünften Jahr der Betriebsphase eines Windparks vor (BSH, 2013).

Trotz der Festlegungen im FEP 2023 bezüglich der Anforderungen der Fischereiforschung auf Fläche O-2.2, die der Windpark beachten muss, stellen sich weitere Fragen hinsichtlich der konkreten Ausgestaltung der Mehrfachnutzung. Dazu gehören Unklarheiten über Haftungsschäden, Risikoabsicherung, Kommunikationsaufwand, Aktivitätseinschränkungen und rechtliche Bindungen, allerdings auch Fragen hinsichtlich der Wechselwirkung beider Akteure in den jeweiligen Phasen des Offshore-Windparks. Installation und Betrieb eines Offshore-Windparks könnten Einfluss auf etwaige Mess- und Forschungsergebnisse haben. Vorteilhaft ist damit die Gewinnung zusätzlicher Daten über den Einfluss von Offshore-Windparks auf die Meeresumwelt. Auf der anderen Seite wiederum basieren langjährige Messreihen nach Bebauung der Fläche mit Windenergieanlagen auf abweichenden Ausgangsbedingungen, wodurch deren Interpretation erschwert wird.

Dass die Fläche O-2.2 durch die Mehrfachnutzung mit der Fischereiforschung an Attraktivität für die Windenergiebranche verloren hat, konnte innerhalb dieser Untersuchung nicht festgestellt werden. Die Fläche wurde zum 1. Juni 2023 als nicht zentral voruntersuchte Fläche mit einer Leistung in Höhe von 1 GW und dem Inbetriebnahmejahr 2030 durch die Bundesnetzagentur ausgeschrieben. Aufgrund mehrerer 0-Cent-Gebote wurde das sogenannte dynamische Gebotsverfahren Ende Juni 2023 begonnen. Aus der Tatsache, dass für die Fläche mehrere 0-Cent-Gebote eingegangen sind, lässt sich ableiten, dass die vorgesehene Mehrfachnutzung mit der Fischereiforschung das Interesse der Bieter nicht wesentlich geschmälert hat. Die Ergebnisse des Gebotsverfahren und entsprechend der bezuschlagte Projektentwickler wurden im Juli 2023 von der Bundesnetzagentur bekannt gegeben. Den Zuschlag für die Fläche O-2.2 erhielt die Bieterin Baltic Sea OFW O2-2 GmbH & Co. KG (TotalEnergies) zu einem Gebotswert von 2,07 Mio. Euro/MW bzw. 2,07 Mrd. Euro für die Fläche O-2.2.

7.2 Einschätzung der Potentiale

Um das zusätzliche Flächen-, Gesamtleistungs- und Ertragspotential einschätzen zu können, welches durch die Mehrfachnutzung von Offshore-Windenergie und Fischereiforschung in der Nord- und Ostsee erreicht werden kann, wird zunächst ein exemplarisches Windparklayout für die Fläche O-2.2 unter Berücksichtigung der Festlegungen gemäß FEP 2023 erstellt. Mithilfe verschiedener Szenarien wird überprüft, ob die Festlegungen für die Fischereiforschung im FEP 2023 Einfluss auf die Anordnung der Windenergieanlagen in einem exemplarischen Windparklayout haben. Somit kann abgeleitet werden, ob eine annähernd freie Windparkplanung im Hinblick auf die Nutzung der Fläche durchgeführt werden kann und ob eine Übertragbarkeit auf weitere Flächen möglich ist.

7.2.1 Überprüfung des Einflusses der Bedarfe für die Fischereiforschung auf der Fläche O-2.2

Die Fläche O-2.2 für die Offshore-Windenergie umfasst gemäß FEP 2023 insgesamt 102 km². Die Fläche FoO3 umfasst gemäß ROP 2021 insgesamt 414 km². Die beiden Flächen überlappen sich in einem Bereich von ca. 66 km². In diesem Überlappungsbereich sind gemäß FEP 2023 drei Schleppstriche mit einer Länge von ca. 1,9-2,4 km und einem Pufferabstand von 400 m sowie drei Beprobungsstationen zu beachten. Diese für die Fischereiforschung zwingend notwendigen Bereiche nehmen ca. 6,6 % der gesamten Windfläche O-2.2 ein. Anhand der Daten aus dem GeoSeaPortal des BSH zu den verschiedenen Flächen und bestehender/geplanter Infrastruktur (Konverterstandort, Datenkabel, Exportkabel) wurde ein schematisches Windparklayout mir

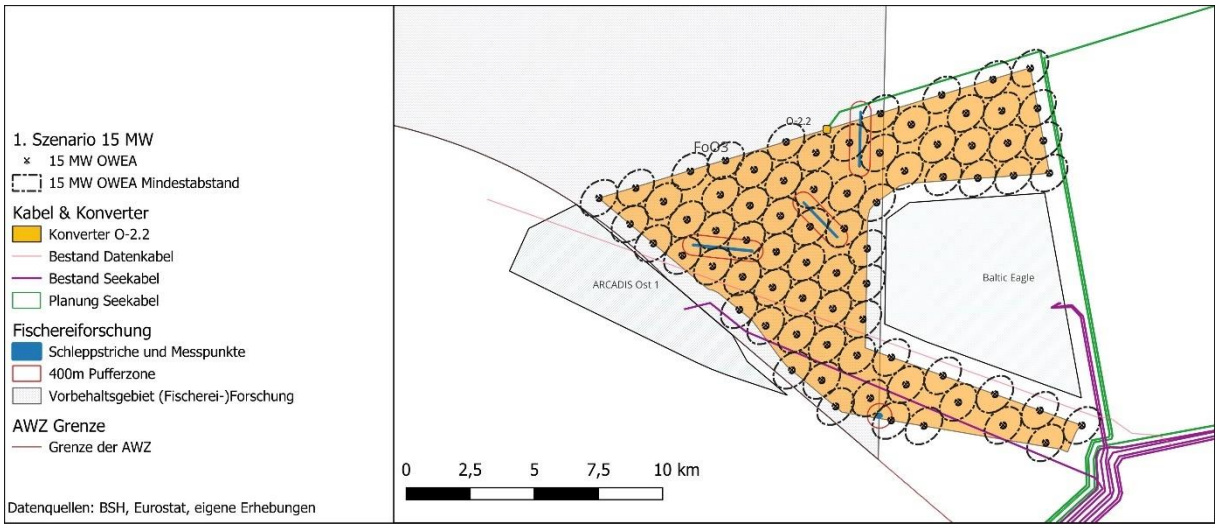
drei unterschiedlichen Windenergieanlagen erstellt. Die Windenergieanlagen wiesen folgende Konfigurationen auf:

Tabelle 17: Übersicht Szenarien und Annahmen exemplarisches Windparklayout O-2.2

Szenarien	Anlagenleistung (MW)	Rotordurchmesser (m)	Abstand zwischen OWEA in Hauptwindrichtung (m)	Abstand zwischen OWEA in Nebenwindrichtung (m)
Szenario 1	15	236	1.652	1.180
Szenario 2	18	260	1.820	1.300
Szenario 3	22	290	2.030	1.450

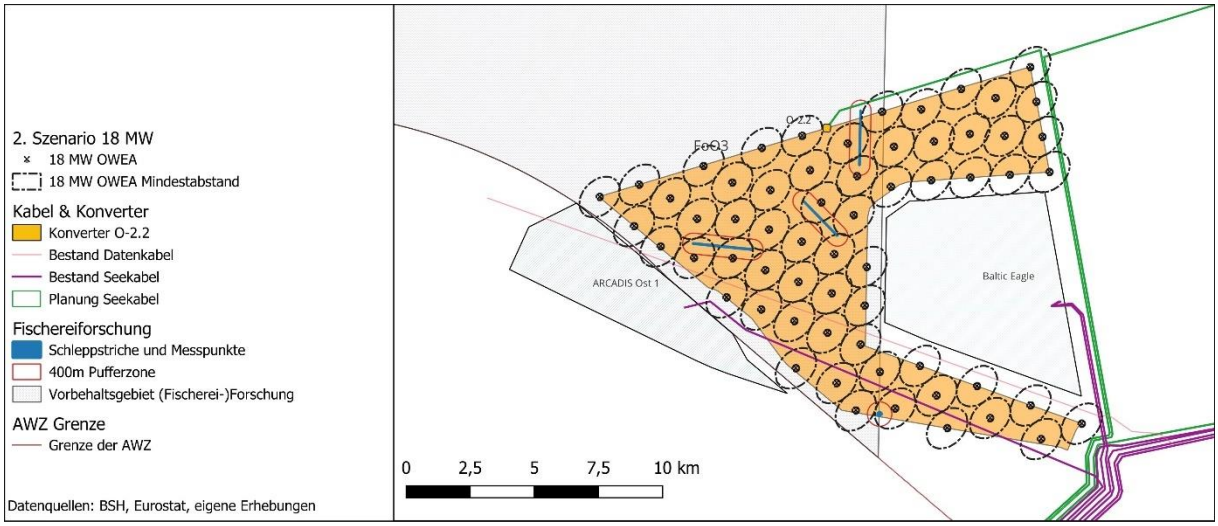
Die Anlagen innerhalb des Windparks wurden in allen drei Szenarien möglichst mit einem Abstand des siebenfachen Rotordurchmessers in Hauptwindrichtung und des fünffachen Rotordurchmessers in Nebenwindrichtung platziert. Diese Annahmen werden als gängige Praxis in der Offshore-Branche zur initialen Abschätzung eines möglichen Windparklayouts unter Verwendung eines möglichst optimalen Abstands der Windenergieanlagen benutzt. In allen drei Szenarien beläuft sich der Abstand der Windenergieanlage zum geplanten Konverter auf 1.000 m, zum Datenkabel auf 500 m und zum Exportkabel auf 500 m. Diese Abstände gelten jeweils ab Mittelpunkt der Windenergieanlage. Das Windparklayout sollte möglichst eine installierte Gesamtleistung in Höhe von mindestens 1 GW bis zu maximal 1,1 GW (1 GW gemäß FEP 2023 + 10 % Overplanting) ermöglichen.

Abbildung 24: Exemplarisches Windparklayout O-2.2 mit OWEA 15 MW



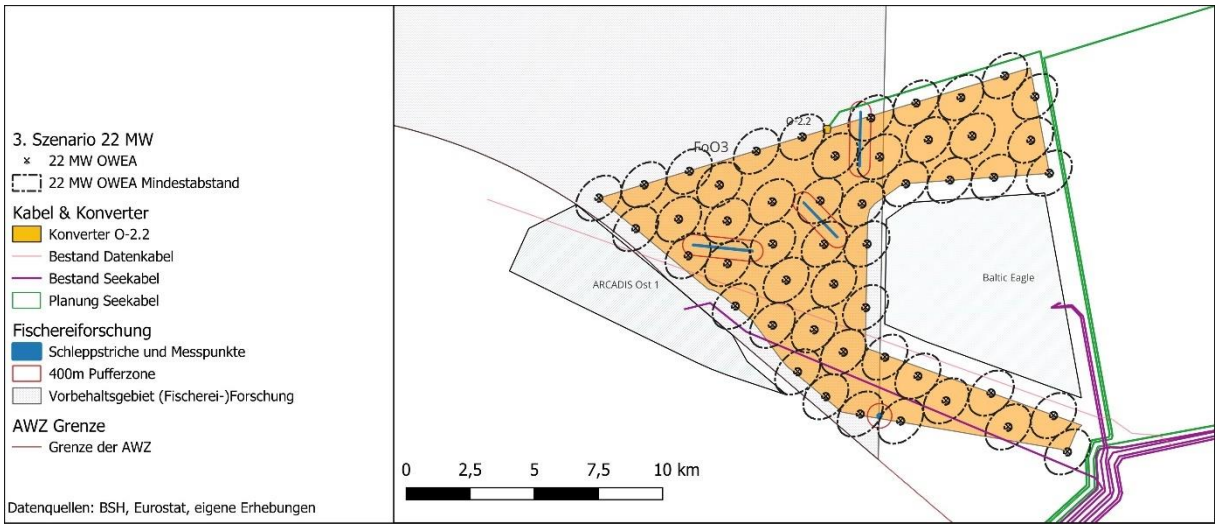
Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Abbildung 25: Exemplarisches Windparklayout O-2.2 mit OWEA 18 MW



Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Abbildung 26: Exemplarisches Windparklayout O-2.2 mit OWEA 22 MW



Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Die exemplarischen Windparklayouts in allen drei Szenarien (Abbildung 24 – Abbildung 26) zeigen, dass auf der Fläche O-2.2 unter der Berücksichtigung der Bedarfe für die Fischereiforschung sowie der zuvor aufgeführten Abstände das Windparklayout lediglich in geringem Maße angepasst werden musste, damit die Schleppstiche inklusive Pufferabstand für die Fischereiforschung freigehalten werden konnten. Es waren nur geringfügige Anpassung im Aufstellmuster der Windenergieanlagen notwendig, da ausreichend große Abstände zwischen den Windenergieanlagen mit großem Rotordurchmesser vorgesehen sind. Tabelle 18 zeigt eine Übersicht der Ergebnisse hinsichtlich Anlagenanzahl und installierte Gesamtleistung.

Tabelle 18: Übersicht Ergebnisse für exemplarisches Windparklayout O-2.2

Szenarien	Anlagentyp	Anlagenanzahl	Installierte Gesamtleistung
Szenario 1	15 MW mit 236 m Rotordurchmesser	73 WEA	1,1 GW

Szenarien	Anlagentyp	Anlagenanzahl	Installierte Gesamtleistung
Szenario 2	18 MW mit 260 m Rotor-durchmesser	63 WEA	1,1 GW
Szenario 3	22 MW mit 290 m Rotor-durchmesser	49 WEA	1,1 GW

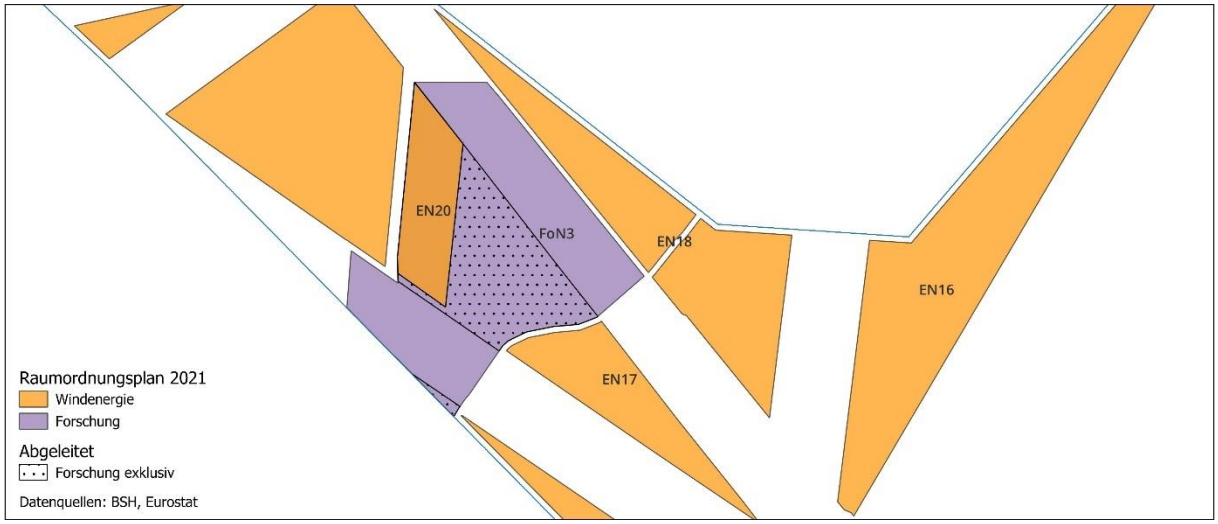
Es wird deutlich, dass die installierte Gesamtleistung in allen Beispielfällen 1,1 GW beträgt – das heißt, es sind auf Basis dieser Ergebnisse im Falle einer Mehrfachnutzung mit der Fischereiforschung keine Reduzierungen bei der zu erwartenden installierbaren Gesamtleistung auf einer gegebenen Fläche zu erwarten. Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens werden aus der installierbaren Leistung in der deutschen AWZ Rückschlüsse auf Ertragspotentiale gezogen. Es konnte gezeigt werden, dass hierbei die Einbeziehung von Flächen, die gleichzeitig für die Fischereiforschung genutzt werden, ohne Einschränkungen in Bezug auf die erwartbare Leistung erfolgen kann. Somit kann das veränderte Gesamtpotential, dass sich durch eine zusätzlich zur Mehrfachnutzung verfügbaren Fläche ergibt, auf Basis der in Kapitel 2 verwendeten Herangehensweise und durch Ergänzung der dortigen Abschätzungen um entsprechende weitere Flächenpotentiale eingeschätzt werden.

Neben dem Aufstellmuster der Windenergieanlagen muss die Windparkplanung auch die Belange der Fischereiforschung bei der Planung der Innerparkverkabelung berücksichtigen. Seekabel werden zum Schutz im Meeresboden verlegt, sodass eine Überdeckung besteht. Durch die Grundschleppnetzfänge im Rahmen der Fischereiforschung besteht das Risiko, dass Kabel beschädigt werden. Kabelschäden wiederum können hohe Kosten für Ertragsausfälle und Reparaturen nach sich ziehen. Um dieses Risiko möglichst zu minimieren, könnten die Kabel in ausreichender Tiefe im Meeresboden verlegt, deren Überdeckung stets überwacht werden oder außerhalb der Schleppstriche verlegt werden.

7.2.2 Berechnung des zusätzlichen Potentials in der Nordsee

In der Nordsee ist für die Windfläche N-20 (Gebiet EN20 im ROP 2021) eine Mehrfachnutzung mit der Fischereiforschung, ähnlich wie auf der Fläche O-2.2 vorgesehen. Das Flächen-, Gesamtleistungs- und Ertragspotential des Gebiets EN20 ist in die Potentialanalyse in Kapitel 2 eingegangen. Zusätzliche Potentiale für die Offshore-Windenergie könnte die Mehrfachnutzung des exklusiven Teils der Fischereiforschungsfläche FoN3 bieten, welcher in der folgenden Abbildung 27 als gepunktete Fläche dargestellt ist.

Abbildung 27: Zusätzliches Potential durch Mehrfachnutzung auf der Fläche FoN3 (exklusiver Flächenanteil) in der Nordsee



Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Der exklusive Teil der Fischereiforschungsfläche FoN3 ist mit einer korrigierten Fläche von 151 km² in die Potentialanalyse eingegangen. Es wird davon ausgegangen, dass die Anforderungen der Fischereiforschung sehr geringen Einfluss auf die mögliche Windparkplanung haben, wie im vorangegangenen Absatz zur Fläche O-2.2 abgeleitet. Unter dieser Annahme wären 6,6 % der Exklusivfläche von FoN3 für Aktivitäten der Fischereiforschung durch den Windpark freizuhalten. In der Realität kann das Verhältnis von Windenergiefläche und freizuhaltenden Korridoren für Forschungsaktivitäten abweichen.

Die gesamte korrigierte Fläche der Nordsee, unter Einbezug der Vorrang- und Vorbehaltsgebiete für Windenergie (ohne bedingte Gebiete) kann unter Einbezug dieser Exklusivfläche für Fischereiforschung um **2,54 %** erweitert werden. Die **Windparkleistung steigert sich proportional.** Die absoluten Werte sind in der folgenden Tabelle 19 für die verschiedenen Leistungsdichten dargestellt.

Tabelle 19: Leistungs- und Ertragspotential für die AWZ der Nordsee inkl. der Exklusivfläche für Fischereiforschung (ohne sonstige Verluste)

Leistungsdichte in MW/km²		8	9	10	11
Korrigierte Windparkfläche gemäß ROP 2021 inkl. der Exklusivfläche für Fischereiforschung in km² (korrigierte Windparkfläche gemäß ROP 2021 (vgl. Tabelle 6) + korrigierte Exklusivfläche für Fischereiforschung)		5.941 (5.790 + 151)	5.941 (5.790 + 151)	5.941 (5.790 + 151)	5.941 (5.790 + 151)
Netzanschlussleistung in GW		47,5	53,5	59,4	65,4
Windparkleistung in GW		47,5	53,5	59,4	65,4
Windparkleistung inkl. Overplanting in GW		52,3	58,8	65,4	71,9

Leistungsdichte in MW/km²		8	9	10	11
		Ertragspotential in TWh/a (prozentuale Veränderung im Vergleich zu Tabelle 6)			
Spezifische Flächenleistung in W/m²	300	173 (+2,21%)	186 (+2,17%)	199 (+2,14%)	211 (+2,13%)
	333	169 (+2,20%)	182 (+2,19%)	195 (+2,15%)	207 (+2,12%)
	367	165 (+2,22%	179 (+2,18%)	191 (+2,17%)	203 (+2,14%)
	400	161 (+2,24%)	175 (+2,20%)	187 (+2,16%)	199 (+2,15%)
	433	158 (+2,22%)	171 (+2,21%)	184 (+2,18%)	195 (+2,14%)

Der Energieertrag kann im Verhältnis zur ursprünglichen Ertragsanalyse in Abschnitt 2.3.4 (Tabelle 6) um rund 2 % gesteigert werden, sodass ein Stromertrag von bis zu 211 TWh/a (bei einer spezifischen Flächenleistung von 300 W/m^2 und 11 MW/km^2 Leistungsdichte) erzeugt würde. Bei der Nutzung des Overplanting würden sich zusätzliche Potentiale in gleichem Steigerungsverhältnis ergeben. Insgesamt ließe sich unter der Annahme, dass die Fischereiforschung in einem vergleichbaren Umfang wie auf der Windfläche O-2.2 stattfindet, das Flächen-, Gesamtleistungs- und Ertragspotential für die Offshore-Windenergie somit durch die Mehrfachnutzung von Offshore-Windenergie und Fischereiforschung auf dem exklusiven Teil der Fischereiforschungsfläche FoN3 leicht erhöhen.

7.3 Rechtliche Einordnung: Maßnahmen zur Vereinbarkeit von Fischereiforschung im Windgebiet O-2.2

Um die verschiedenen Nutzungen innerhalb der AWZ in Einklang zu bringen, hält die Raumplanung den Raumordnungsplan bereit. Der Flächenentwicklungsplan konkretisiert die Festlegungen des Raumordnungsplans. Seine Zulässigkeit richtet sich nach den Erfordernissen der Raumordnung. Hierbei dürfen insbesondere die Belange des § 5 Abs. 3 WindSeeG nicht entgegenstehen.[247]

7.3.1 Erfordernis eines eigenverantwortlichen Austausches der Nutzungen

Sowohl im aktuell gültigen FEP 2023 als auch im Vorentwurf des FEP vom 1. September 2023 ist festgehalten, dass in den im ROP 2021 ausgewiesenen Vorbehaltsgebieten im Rahmen der Gemeinsamen EU-Fischereipolitik und nach standardisierten Methoden, regelmäßig hoheitliche Forschungstätigkeiten stattfinden, welche zu der jährlich international durchgeführten Zustandsbewertung der Fischbestände beitragen. Eine wissenschaftliche Meeresforschung muss danach in Art und in dem bisher erfolgten Umfang in den Bereichen der Mehrfachnutzung weiterhin ermöglicht werden. **Ein eigenverantwortlicher Austausch zwischen den betroffenen Nutzern soll demnach zwingend erforderlich sein.** Dazu sollen die Belange der forschenden Einrichtungen möglichst frühzeitig während der Konzeptionierung des OWP-Vorhabens bzw. der Netzanbindung sowie bei den nachgelagerten Planungs- und Entscheidungsebenen Berücksichtigung finden.[248] Zusätzlich bestimmen der aktuell gültige FEP 2023 sowie der neue

[247] S. hierzu Abschnitt 3.2.1.

[248] (BSH, 2023b, S. 36.); (BSH, 2023e, S. 69 f.)

Vorentwurf des FEP, dass dem Thünen Institut Forschungsaktivitäten außerhalb der im ROP 2021 ausgewiesenen Vorbehaltsgebiete für Forschung – soweit dies mit den Belangen der Windenergie auf See vereinbar ist – ermöglicht werden sollen.[249]

Das Projektkonsortium hat sich aufgrund der Festlegung im FEP die Frage gestellt, ob – und wenn ja, wie – die bilaterale Einigung zwischen Windparkbetreiber und Forschungsinstitut in dem Vorranggebiet Wind O-2.2 genehmigungsrechtlich festgelegt ist.[250] Weiterhin sollen Rechtsschutzmöglichkeiten untersucht werden. Konkret soll untersucht werden, welche der beiden Nutzungen im Streitfall Vorrang genießt sowie in wessen Zuständigkeit die Letztentscheidungsbefugnis in einem solchen Fall fällt.

Eine Verpflichtung zur bilateralen Einigung zwischen Windparkbetreiber und Forschungsinstitut – wie im FEP festgelegt – existiert im weiteren Genehmigungs- oder Planfeststellungsverfahren nicht. Das BSH hat als zuständige Raumordnungsbehörde jedoch stets die Möglichkeit im Rahmen ihrer pflichtgemäßen Ermessensausübung eine etwaige Nebenstimmung mit der Erteilung der Genehmigung bzw. Planfeststellung zu erlassen, § 66 Abs. 3 S. 2 WindSeeG i.V.m. § 36 Abs. 2 und 3 VwVfG. Durch eine Nebenbestimmung kann dem Windparkbetreiber auch die Verpflichtung auferlegt werden, bilaterale Vereinbarungen mit Forschungsinstituten zu treffen. Dies stellt eine einzelfallabhängige Maßnahme dar.

7.3.2 Rechtsschutzmöglichkeiten

Da die Festlegungen des FEP gem. § 6 Abs. 9 S. 2 WindSeeG für die Planfeststellungs- und Genehmigungsverfahren nach den Bestimmungen des Teils 4 des WindSeeG und nach den Bestimmungen des SeeAnlG und der SeeAnlV verbindlich sind, kommt bei Unstimmigkeiten zwischen den festgelegten Nutzungen eine rechtliche Überprüfung des FEP in Betracht.[251] Gem. § 6 Abs. 9 S. 1 WindSeeG ist der FEP jedoch nicht selbstständig gerichtlich überprüfbar. Hintergrund ist, dass der FEP nur die Vorstufe zur Voruntersuchung (§§ 9 ff.), zur Ausschreibung (§§ 16 ff.) und zum Zulassungsverfahren (§§ 45 ff.) bildet.[252] Es findet aber eine Behörden- und Öffentlichkeitsbeteiligung entsprechend § 6 Abs. 5 WindSeeG statt.[253] Die Bedingungen für die Beteiligung richten sich nach den Bestimmungen des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG).[254]

Als Grundlage für den FEP dient der ROP der AWZ, der als Anlage der AWZROV als Rechtsverordnung erlassen wurde. Im Falle von Unstimmigkeiten zwischen den festgelegten Nutzungen gilt nach der Raumordnung grds., dass der Nutzung Vorrang eingeräumt wird, die als Vorranggebiet im ROP festgelegt ist. Ein Vorranggebiet schließt nicht vereinbare Nutzungen innerhalb eines Gebietes aus, § 7 Abs. 3 Nr. 1 ROG. Als Ziel der Raumordnung stellt ein Vorranggebiet verbindliche Vorgaben in Form von abschließend abgewogenen, zeichnerischen Festlegungen im ROP dar, § 3 Abs. 1 Nr. 2 ROG. Einem Vorranggebiet Windenergie gebührt also im Konfliktfall der Vorrang gegenüber einer anderen Nutzung, beispielsweise der (Fischerei-)Forschung, für die kein Vorranggebiet festgelegt ist.

[249] (BSH, 2023b, S. 36.) (BSH, 2023e, S. 69 f.)

[250] S. hierzu die Abbildung 23 in Abschnitt 7.1.

[251] Gem. § 8 Abs. 4 S. 2 WindSeeG ist § 6 WindSeeG entsprechend anzuwenden.

[252] (Kerth in: F. J. Säcker & Steffens, 2022, Rn. 22.)

[253] Im Übrigen hat das BSH die wesentlichen Inhalte des Vorentwurfs am 02.11.2023 präsentiert, um Betroffenen die Möglichkeit zur Äußerung zu geben und so schon frühzeitig den Austausch mit und zwischen den verschiedenen Akteuren zu fördern, s. ; das BSH wird im weiteren Verfahren einen Entwurf für die Fortschreibung des FEP ausarbeiten, woran sich eine erneute Behörden- und Öffentlichkeitsarbeit anschließt, vgl. § 6 Abs. 2 ff. WindSeeG.

[254] Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung in der Fassung der Bekanntmachung vom 18. März 2021 (BGBl. I S. 540), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist.

Darüber hinaus kann im Streitfall ein Zielabweichungsverfahren nach § 19 Abs. 1 i.V.m. § 6 Abs. 2 ROG die Bindungswirkung der Ziele der Raumordnung durchbrechen.[255] Das Zielabweichungsverfahren stellt ein schlichtes Verwaltungsverfahren dar, das sowohl tatsächlich als auch rechtlich voll gerichtlich überprüfbar ist. Hierzu bedarf es einer wirksamen Zielfestlegung, also der Festlegung eines Vorranggebietes. Zudem muss sich das fragliche Vorhaben im Widerspruch zu einem Ziel der Raumordnung befinden.

Da es sich bei dem ROP für die AWZ um einen Raumordnungsplan nach § 17 Abs. 1 ROG handelt, entscheidet nach erfolgter **Antrag**stellung auf **Zielabweichung** das BSH als zuständige oberste Raumordnungsbehörde.

Neben dem Zielabweichungsverfahren hält das Raumordnungsrecht weitere Maßnahmen im Konfliktfall bzw. bei Unstimmigkeiten bereit. Gemäß § 20 ROG können raumbedeutsame Planungen und Maßnahmen in der AWZ vorläufig untersagt werden, wenn Ziele der Raumordnung diesen entgegenstehen.[256] Zu den Untersagungsgegenständen der vorläufigen Untersagung gehören neben den raumbedeutsamen Planungen und Maßnahmen nach § 3 Abs. 1 Nr. 6 auch die Entscheidungen über die Zulässigkeit der raumbedeutsamen Planungen und Maßnahmen.[257] Auch der FEP unterliegt gem. § 5 Abs. 3 S. 2 Nr. 1 WindSeeG der Zielbindung nach § 4 Abs. 1 ROG und kann somit Gegenstand einer vorläufigen raumordnerischen Untersagung sein.[258] Der FEP und die Entscheidung über die Zulässigkeit eines FEP können demnach gem. § 20 i.V.m § 12 Abs. 2 ROG befristet untersagt werden, wenn sich ein ROP in Aufstellung befindet und wenn zu befürchten ist, dass der FEP die Verwirklichung der vorgesehenen Ziele der Raumordnung unmöglich machen oder wesentlich erschweren würde.

7.3.3 Fazit

Bezogen auf die Vereinbarkeit von **Fischereiforschung** mit der Windenergie auf See im Windgebiet O.2-2 lässt sich zusammenfassend festhalten, dass im FEP eine bilaterale Absprache zwischen Windparkbetreiber und Forschungsinstitut festgelegt wurde. Im weiteren Genehmigungs- und Planfeststellungsverfahren existiert keine Verpflichtung zur bilateralen Einigung zwischen Windparkbetreiber und Forschungsinstitut. Das BSH hat als zuständige Raumordnungsbehörde jedoch stets die Möglichkeit nach pflichtgemäßem Ermessen eine etwaige Nebenstimmung mit der Erteilung der Genehmigung bzw. Planfeststellung zu erlassen, § 66 Abs. 3 S. 2 WindSeeG i.V.m. § 36 Abs. 2 und 3 VwVfG. Durch eine Nebenbestimmung kann dem Windparkbetreiber grds. auch die Verpflichtung auferlegt werden, konkrete bilaterale Vereinbarungen mit Forschungsinstituten zu treffen.

Die Verpflichtung des FEP einen eigenverantwortlichen Austausch zwischen den Nutzungen durchzuführen, zeigt auf, dass der Plangeber die Herausforderungen der Mehrfachnutzung erkannt hat und aktiv zu einer (potentiellen) Konfliktminimierung beitragen will. Hierdurch wird eine Mehrfachnutzung von Flächen nicht nur angereizt, sondern vom Plangeber ersichtlich vorausgesetzt. Wiederkehrend ist auch hier mangels weitergehender Regelung mit Rechtsunsicherheit in Bezug darauf zu rechnen, wie ein Nebeneinander von Nutzungen bei Unstimmigkeiten im konkreten Einzelfall auszugestalten ist. Das Raumordnungsrecht bietet Rechtsschutzmöglichkeiten, wie ein Zielabweichungsverfahren durchzuführen oder eine vorläufige Untersagung anzuordnen. Mit Blick auf die angestrebte Zielerreichung von mindestens 30 GW installierter Leistung bis zum Jahr 2030 sind dabei schnelle Entscheidungen wünschenswert. Im Konflikt

[255] (Kment et al., 2019, § 19, Rn, 61.)

[256] § 20 ROG verweist dabei auf § 12 Abs. 2 und 3 ROG mit der Maßgabe, dass für die Untersagung das Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen zuständig ist.

[257] (Kment et al., 2019, § 19, Rn, 4.)

[258] (Kment et al., 2019, § 19, Rn, 12.)

muss hier jedenfalls der Windenergieanlage auf See Vorrang gebühren, da es sich bei O-2.2 um ein Vorranggebiet für Windenergie handelt.[259]

Um die verschiedenen Nutzungen innerhalb der AWZ in Einklang zu bringen, hält die Raumplanung den Raumordnungsplan bereit. Der Flächenentwicklungsplan konkretisiert die Festlegungen des Raumordnungsplans. Seine Zulässigkeit richtet sich nach den Erfordernissen der Raumordnung. Hierbei dürfen insbesondere die Belange des § 5 Abs. 3 WindSeeG nicht entgegenstehen.[260]

7.4 Analyse Meeresumwelt

Dieser Abschnitt beschreibt die zusätzlichen Wirkfaktoren auf die Meeresumwelt durch Fischereiforschung (Abschnitt 7.4.1), die potentiellen kumulativen Effekte bei einer Mehrfachnutzung mit OWE anhand von internationalen Praxisbeispielen und Forschungsprojekten (Abschnitt 7.4.2) sowie anhand einer Referenzfläche in der deutschen AWZ (ausgeschriebene Fläche in der Ostsee; Abschnitt 7.4.3), und technische Optionen zur Minderung negativer Umweltauswirkungen einer Mehrfachnutzung (Abschnitt 7.4.4).

7.4.1 Potentielle Wirkfaktoren der Nutzungsform „Fischereiforschung“ als Einfachnutzung auf die Meeresumwelt

Von der Fischereiforschung gehen ähnliche Wirkfaktoren aus wie von der kommerziellen Fischerei, jedoch unterscheiden sich die beiden Nutzungsformen in ihrer Intensität: Fischereiforschung findet in einem erheblich geringeren Umfang als kommerzielle Fischerei statt. Durch die Fischereiforschung entstehen akustische Emissionen (verursacht durch hydroakustische Untersuchungsmethoden, Messplattformen und Schiffsverkehr) und Biotope am Meeresboden können durch Grundschleppnetzsurveys beeinflusst werden. Im folgenden Text werden diese Kategorien näher beschrieben und in Tabelle 20 für die vier Schutzgüter aufgelistet.

- **Schiffsverkehr**: Der Schiffsverkehr zur Fischerei und Fischereiforschung verursacht ähnliche Wirkfaktoren wie der Schiffsverkehr im Allgemeinen oder der erhöhte Schiffsverkehr während der Bau- und Wartungsfahrten von OWPs: Beispielsweise können invasive Arten, pathogene Arten, Dauerschall und chemische Emissionen eingetragen werden, sowie Schutzgüter gestört werden und Individuen mit den Schiffen kollidieren (Junge et al., 2022). Derartige Auswirkungen sind bereits in Abschnitt 4.1 und 4.2 näher beschrieben. Verglichen mit kommerzieller Fischerei sind die Intensität von Fischereiforschung und somit auch vom Schiffsverkehr jedoch gering.
- **Fischerei**: Wie bereits in Abschnitt 4.1 beschrieben, kann insbesondere Grundnetzfischerei zum Verlust von Meeresboden-Lebensräumen, zur Trübung des Wassers und zur Störung oder Beschädigung der benthischen Fauna führen (de Groot, 1984). Zudem werden Individuen der Zielarten, aber auch Nicht-Zielarten oder untermaßige Exemplare der Zielarten als Beifang gefischt (Pons et al., 2022; Senko et al., 2022). Dadurch verringert sich die Nahrungsgrundlage für andere Fischarten, See- und Rastvögel, sowie marine Säugetiere. Zudem können sich Fische, See- und Rastvögel, sowie marine Säugetiere während der Grundschleppnetzsurveys in Netzen verfangen und ertrinken (Polet & Depestele, 2010). Verglichen mit kommerzieller Fischerei ist die Intensität von Fischereiforschung jedoch gering und es werden nur ausgewählte Fangmethoden eingesetzt (u. a. hydroakustische Untersuchungsmethoden und Grundschleppnetzsurveys).

[259] Für eine tiefergehende Analyse zum Verhältnis der einzelnen Gebietstypen untereinander s. Abschnitt 3.1.2. ff.

[260] S. hierzu Abschnitt 3.2.1.

- **Akustische Emissionen durch Forschung**: Für die Fischereiforschung werden beispielsweise AUVs eingesetzt, um hydroakustische Untersuchungen durchzuführen, welche akustische Emissionen verursachen. Hydroakustische Untersuchungen werden beispielsweise mit Fächerecholoten (vom Schiff oder AUS aus) durchgeführt, die Frequenzen zwischen 12 kHz und 700 kHz abdecken können. Aktuell werden jedoch nur Fächerecholoten mit schmaler Bandbreite (Schmalband, d. h. 18 kHz bis 333 kHz) für die Fischereiforschung verwendet (Jech et al., 2021). Der zusätzliche Schalleintrag fällt in den Bereich des besten Hörvermögens von Schweinswalen; für Fische mit einem tieferfrequenten Hörbereich werden Fächerecholoten hingegen als zuverlässige Technik für die qualitative und quantitative Beobachtung eingesetzt. Verglichen mit kommerzieller Fischerei sind die Intensität von Fischereiforschung und somit auch die akustischen Emissionen durch Forschung jedoch gering.

Tabelle 20: Wirkfaktoren während Bau, Betrieb und Rückbau von Offshore-Windenergieanlagen auf einzelne Schutzgüter, die für die deutsche AWZ große Relevanz besitzen, sowie zusätzliche Wirkfaktoren durch Fischereiforschung

Schutzgut	Kategorie	Wirkfaktoren durch OWE	Wirkfaktoren durch Fischereiforschung	Quellen beider Wirkfaktoren
Biotope am Meeresboden	Lebensraumveränderung	Sedimentaufwirbelung bei Errichtung, Betrieb und Rückbau der WEAs	Trübung des Wassers	Schultze et al. (2020)
	Lebensraumveränderung	Eintrag invasiver Arten	Eintrag invasiver Arten	Büttger et al. (2008), Jensen et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Vibration der WEAs		Vicen-Bueno et al. (2013), Djath et al. (2018), van Berkel et al. (2020), Lloret et al. (2022)
	Lebensraumveränderung	Veränderung der Hydrographie		Vicen-Bueno et al. (2013), Djath et al. (2018), Daewel et al. (2022), Lloret et al. (2022), Christiansen et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Elektrische Magnetfelder, Temperaturerhöhung durch Kabel		Taormina et al. (2018), Hutchinson et al. (2021)
	Lebensraumveränderung	Versiegelung		Krone et al. (2017)
	Lebensraumveränderung	Künstliche Riffe = Änderung von Habitat + Artzusammensetzung		Glarou et al. (2020), Rezaei et al. (2023)
	Fischerei	Reserve effect: Ausschluss der Fischerei im OWP und der aktiven Fischerei in 500 m Radius um OWP	Verlust von Meeresboden-Lebensräumen	Coates et al. (2016), Bastardie et al. (2020), Hintzen et al. (2021)
	Fischerei		Störung/Beschädigung der benthischen Fauna	de Groot (1984)
	Chemische Emissionen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Kirchgeorg et al. (2018), Lloret et al. (2022)

Schutzgut	Kategorie	Wirkfaktoren durch OWE	Wirkfaktoren durch Fischereiforschung	Quellen beider Wirkfaktoren
Fische	Lebensraumveränderung	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Chapman et al. (2021), Jensen et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Elektrische Magnetfelder durch Kabel		Taormina et al. (2018), Hermans et al. (2024)
	Lebensraumveränderung	Künstliche Riffe = Änderung von Habitat + Artzusammensetzung		Glarou et al. (2020), Rezaei et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Floating OWE: Primäres und sekundäres Verfangen	Primäres Verfangen	Polet & Depestele (2010), Maxwell et at. (2022)
	Fischerei	Reserve effect: Ausschluss der Fischerei im OWP und der aktiven Fischerei in 500 m Radius um OWP	Entnahme von Individuen	Bigné et al. (2019), Halouani et al. (2020), Hintzen et al. (2021)
	Fischerei		Verringerte Nahrungsverfügbarkeit	Edebohls et al. (2020)
	Fischerei		Beifang	Pons et al. (2022), Senko et al. (2022)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Schiffsverkehr	Schiffsverkehr	Putland et al. (2017, 2018)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Rammungen		Mooney et al. (2020)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Betriebsgeräusche	Hydroakustische Untersuchungsmethoden, AUVs	Wahlberg & Westerberg (2005), Kok et al.(2021), Bellmann et al. (2023)
	Chemische Emissionen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Kirchgeorg et al. (2018), Lloret et al. (2022)
Marine Säugetiere	Lebensraumveränderung	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Sonne et al. (2020), Jensen et al. (2023), Stokholm et al. (2023)

Schutzgut	Kategorie	Wirkfaktoren durch OWE	Wirkfaktoren durch Fischereiforschung	Quellen beider Wirkfaktoren
	Lebensraumveränderung	Elektrische Magnetfelder durch Kabel		Taormina et al. (2018)
	Lebensraumveränderung	Floating OWE: Primäres und sekundäres Verfangen		Benjamins et al. (2014), Maxwell et at. (2022)
	Fischerei	Reserve effect: Ausschluss der Fischerei im OWP und der aktiven Fischerei in 500 m Radius um OWP	Verringerte Nahrungsverfügbarkeit	Moan et al. (2020), Kindt-Larsen et al. (2023)
	Fischerei		Beifang	
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Schiffsverkehr	Schiffsverkehr	Dyndo et al. (2015), Putland et al. (2017), Wisniewska et al. (2018)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Rammungen		Brandt et al. (2018)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Betriebsgeräusche	Hydroakustische Untersuchungsmethoden, AUVs	Tougaard et al. (2009, 2020), Vaghese et al. (2020), Bellmann et al. (2023)
	Chemische Emissionen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Kirchgeorg et al. (2018), Lloret et al. (2022)
	Störung/ Kollisionsrisiko	Schiffsverkehr	Schiffsverkehr	Benhemma-Le Gall (2023)
See- und Rastvögel	Lebensraumveränderung	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Sonne et al. (2020), Jensen et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Elektrische Magnetfelder durch Kabel		Taormina et al. (2018)
	Lebensraumveränderung	Floating OWE: Primäres und sekundäres Verfangen		Maxwell et at. (2022)

Schutzgut	Kategorie	Wirkfaktoren durch OWE	Wirkfaktoren durch Fischereiforschung	Quellen beider Wirkfaktoren
	Fischerei	Reserve effect: Ausschluss der Fischerei im OWP und der aktiven Fischerei in 500 m Radius um OWP	Verringerte Nahrungsverfügbarkeit	Daunt et al. (2008), Searle et al. (2023)
	Fischerei		Beifang	
	Akustische Emissionen	Schiffsverkehr	Schiffsverkehr	Mooney et al. (2019), Jalkanen et al. (2022)
	Akustische Emissionen	Rammungen		Mooney et al. (2019), Bellmann et al. (2023)
	Akustische Emissionen	Betriebsgeräusche	Hydroakustische Untersuchungsmethoden, AUVs	Mooney et al. (2019), Bellmann et al. (2023)
	Chemische Emissionen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Kirchgeorg et al. (2018), Lloret et al. (2022)
	Störung/ Kollisionsrisiko	Schiffsverkehr	Schiffsverkehr	Coleman et al. (2022)
	Störung/ Kollisionsrisiko	Kollisionsrisiko mit Rotorblättern		Hüppop et al. (2006), Uhlfelder (2013), Brabant et al. (2015), Ronconi et al. (2015), Benjamins et al. (2020)
	Störung/ Kollisionsrisiko	Vertreibungswirkung/ Barriere-Effekt durch OWP		Fox & Krag Petersen (2019), Vilela et al. (2021), Garthe et al. (2023)

7.4.2 Potentielle kumulative Effekte von OWE und der Nutzungsform „Fischereiforschung“ als Mehrfachnutzung auf die Meeresumwelt

Verglichen mit einer Einfachnutzung durch OWE (Abschnitt 4.2) bzw. einer Einfachnutzung durch Fischereiforschung (Abschnitt 7.4.1) sind folgende kumulativen Effekte (siehe Definition in Abschnitt 4.4) bei einer Mehrfachnutzung aus OWE und Fischereiforschung möglich:

- Eintrag von **pathogenen und invasiven Arten**: Durch den Schiffsverkehr während der Bau- und Wartungsarbeiten von OWPs sowie den Schiffsverkehr durch die Fischereiforschung erhöht sich das Aufkommen an Schiffen und damit auch das Risiko, dass pathogene Arten und invasive Arten eingetragen werden. Verglichen mit kommerzieller Fischerei ist die Intensität von Fischereiforschung jedoch gering, sodass keine kumulativen Effekte erwartet werden.

- **Lebensraumveränderungen**: Bei OWPs verändert sich der Lebensraum durch die Versiegelung und Überbauung und somit der Entstehung einer künstlichen Riffstruktur („Artifical reef effect“), Sedimentaufwirbelung beim Bau, Betrieb und Rückbau eines OWPs, die Vibration der WEAs, Veränderungen der Hydrographie und elektrische Magnetfelder sowie Temperaturerhöhung um die stromführenden Kabel (siehe Abschnitt 4.2). Bei der Fischereiforschung kann insbesondere die Grundnetzfischerei zum Verlust von Meeresboden-Lebensräumen, zur Trübung des Wassers und zur Störung oder Beschädigung der benthischen Fauna führen (de Groot, 1984), wie in Abschnitt 4.1 beschrieben. Aufgrund der Intensität von Fischereiforschung ist die Lebensraumveränderung durch OWE jedoch als deutlich weitreichender anzusehen. Statt kumulativer Effekte wird daher erwartet, dass bei einer Mehrfachnutzung die Veränderung des Lebensraums größtenteils vom OWP abhängt und die zusätzliche Lebensraumveränderung durch Fischereiforschung kaum messbar ist.

- Verringerter **„Reserve effect“:** Durch den in der deutschen AWZ aus Sicherheitsgründen festgelegten Ausschluss der Fischerei innerhalb des Windparks und der aktiven Fischerei in einem 500 m Radius um einen OWP herum findet innerhalb des Windparks und in seiner nächsten Umgebung keine Fischerei statt (siehe Abschnitt 4.2). Der Fischereiausschluss kann zu einer größeren Artenvielfalt, Artengleichmäßigkeit, Abundanz, Gleichmäßigkeit im Geschlechtsverhältnis, Körpergröße und Lebenserwartung von Fischen führen (Bergström et al., 2023; Berkström et al., 2021; Eklöf et al., 2023; Florin et al., 2013; Halouani et al., 2020; Howarth, 2012; Roach et al., 2018; Röckmann et al., 2007; Rufener et al., 2023; Rybicki et al., 2021; Sala & Giakoumi, 2018; Simons et al., 2015; Sköld et al., 2022). Dadurch wiederum kann sich die Nahrungsverfügbarkeit für höhere trophische Ebenen (Fische, Vögel und Meeressäuger) erhöhen (Reserve effect); jedoch ist der „Reserve effect“ noch wenig erforscht und der Effekt des Fischereiausschlusses wurde nicht in allen Fällen als signifikant eingestuft, sondern hängt von verschiedenen Wirkfaktoren ab (siehe Abschnitt 4.2.2). Bei einer Mehrfachnutzung mit Fischereiforschung kann sich dieser positive Effekt durch OWE erheblich verringern, denn es wird erwartet, dass bei Grundschleppnetzsurveys ähnlich wie bei Grundschleppnetzfischerei (wenn auch in deutlich geringerer Intensität) Individuen der Zielarten, sowie Nicht-Zielarten oder untermaßige Exemplare der Zielarten als Beifang aus dem Ökosystem entnommen werden (Pons et al., 2022; Senko et al., 2022). Durch die Kumulation beider Nutzungsformen (OWE und Fischereiforschung) kann der positive Effekt der OWPs je nach Intensität der Fischereiforschung möglicherweise deutlich reduziert werden.

- Eintrag **akustischer Emissionen**: Die Fischereiforschung generiert zusätzliche Schallemissionen durch ihre Forschungsschiffe, sowie durch den Einsatz hydroakustischer Untersuchungsmethoden. Beispielsweise werden Fächerecholoten mit schmaler Bandbreite[261] für die Fischereiforschung verwendet, dessen Schalleintrag in den Bereich des besten Hörvermögens von Schweinswalen fällt; für Fische mit einem tieferfrequenten Bereich des besten Hörens werden Fächerecholoten hingegen als zuverlässige Technik für die qualitative und quantitative Beobachtung eingesetzt. In OWPs wird der kontinuierliche Hintergrundschall der großen Schifffahrtsstraßen durch den Dauerschall der Betriebsgeräusche der Windturbinen sowie zusätzlichen Schiffsverkehr während Bau- und Wartungsarbeiten von OWPs ergänzt; auf Grund der geringen Intensität der Fischereiforschung werden jedoch keine kumulativen Effekte erwartet.

- Eintrag **chemischer Emissionen**: Während der Bau-, Betriebs- und Rückbauphase von OWPs, sowie während des Schiffsverkehrs der Fischereiforschung können chemische Emissionen freigesetzt werden. Die Emissionsmenge hängt von der Intensität der Fischereiforschung ab, welche als gering im Vergleich zu kommerzieller Fischerei eingeschätzt wird; daher werden keine kumulativen Effekte erwartet (ausgenommen sind Unfälle).

- **Vertreibungswirkung:** Der Schiffsverkehr durch die Fischereiforschung kann zwar See- und Rastvögel, Fische und marine Säugetiere stören, die Reichweite und Dauer der Vertreibungswirkung und des Barriere-Effekts durch OWE wird allerdings für Arten wie Seetaucher als deutlich größer eingeschätzt. Es wird in diesen Fällen erwartet, dass die Reichweite der Vertreibung bei einer Mehrfachnutzung mit Fischereiforschung größtenteils vom OWP und dessen Wirkfaktoren abhängt. Im Gegensatz dazu werden andere Arten wie beispielsweise Kormorane vom OWP stark angezogen, aber meiden Schifffahrtzeuge (Clyde et al., 2012). Auf Grund der Intensität der Fischereiforschung wird in diesen Fällen bei einer Mehrfachnutzung erwartet, dass die Reichweite der Vertreibung vor allem vom Schiffsverkehr der Fischereiforschung abhängt.

- Risiko zur **Kollision**: Marine Säugetiere, sowie See- und Rastvögel können mit den Schiffen kollidieren. Sollten der vermutete „Reserve effect“ und/oder der „Artifical reef effect“ der OWE bei einer Mehrfachnutzung zu einer höheren Dichte der aquatischen Fauna als bei einer Einfachnutzung durch Fischereiforschung führen, dann könnten mehr Fische, See- und Rastvögel, sowie marine Säugetiere mit Schiffen kollidieren. Trotz des erhöhten Schiffsverkehrs bei einer Mehrfachnutzung werden keine kumulativen Effekte erwartet, denn das Risiko ist generell als gering anzunehmen und die Intensität der Fischereiforschung ist verglichen mit kommerzieller Fischerei gering.

- Risiko zum **Verfangen**: Fische, See- und Rastvögel, sowie marine Säugetiere können sich während der Grundschleppnetzsurveys in Netzen verfangen und ertrinken (Polet & Depestele, 2010). Sollten der vermutete „Reserve effect“ und/oder der „Artifical reef effect“ der OWE eine Anziehungskraft auf Fische, marine Säugetiere sowie See- und Rastvögel ausüben, sodass die Reichweite der Vertreibung gesenkt wird, erhöht sich die Anzahl an Beifang verglichen mit einer Einfachnutzung durch Fischereiforschung. Durch die Intensität von Fischereiforschung verglichen mit Fischerei und die eingesetzten Fangmethoden bei der Fischereiforschung werden jedoch keine kumulativen Effekte erwartet.

Insgesamt werden bei einer Mehrfachnutzung aus OWE und Fischereiforschung nur kumulative Effekte hinsichtlich der Verringerung eines möglichen „Reserve effects“ je nach Intensität der

[261] bspw. 18 kHz bis 333 kHz (Jech et al., 2021)

Fischereiforschung für möglich gehalten. Mögliche kumulative Effekte dieser Mehrfachnutzung wurden bisher in keinem Forschungsprojekt betrachtet, in keinem Praxisbeispiel durchgeführt und ist derzeit auch nicht in Planung. Da nur begrenzt kumulative Effekte erwartet werden, wird auch kein Forschungsprojekt als nötig erachtet. Jedoch gibt es bereits einige Beispiele zur Mehrfachnutzung aus OWE und kommerzieller Fischerei (Tabelle 21), dessen Auswirkungen auf die Meeresumwelt übertragbar auf Fischereiforschung sind, jedoch mit erheblich verringerter Intensität der Wirkfaktoren.

In Großbritannien findet kommerzielle Fischerei des Europäischen Hummers im OWP „Westermost Rough“ statt und in den Niederlanden ist kommerzielle Fischerei abgesehen von Grundschleppnetzfischerei innerhalb von OWPs erlaubt. Zudem wurden im Forschungsprojekt „MUSES“ (2016-2018) die Auswirkungen auf die Meeresumwelt in zwei Fallbeispielen untersucht:

- In Deutschland wurde die potentielle Mehrfachnutzung von OWE und jeglicher Fangmethode der Fischerei untersucht. Die Auswirkungen auf die Meeresumwelt haben Schupp & Buck (2017) insgesamt als **mittelmäßig negativ** bewertet. Dieser Aussage widersprechen jedoch vielen anderen Studien: Froese et al. (2021) untersuchten beispielsweise die Nutzung und den Zustand von 119 Beständen, die von 20 Ländern im Nordostatlantik befischt werden. Im Jahr 2018 waren noch etwa 40 % der Bestände überfischt, etwa 34 % der Bestände befanden sich außerhalb sicherer biologischer Grenzen und etwa 68 % der Bestände waren zu klein, um den höchstmöglichen Dauerertrag zu erzielen (Froese et al., 2021). Als negativen Aspekt listete Schupp & Buck (2017) in dem Fallbeispiel auf, dass durch die Zulassung der Fischerei innerhalb der OWPs beispielsweise der Schiffslärm, Fischereidruck und Druck auf das benthische Ökosystem zunehmen (verglichen mit der aktuellen Regelung zum Ausschluss der Fischerei in OWPs und der aktiven Fischerei in einem 500 m Radius um einen Windpark herum).
- In Großbritannien wurde die potentielle Mehrfachnutzung von OWPs mit festen Fundamenten sowie kommerzieller Fischerei (mobile und stationäre Fanggeräte) untersucht. Die Auswirkungen auf die Meeresumwelt hat Kafas (2017) insgesamt als **gering positiv** bewertet. Positiv bewertet wurden bei diesem Fallbeispiel (a) die Ertragserhöhung und der Beitrag zur Ernährungssicherheit, (b) künstliche Riffe durch Schaffung geschützter Lebensräume für Meeresarten, sowie (c) die Schaffung geschützter Räume zur Aufzucht und geschützter Gebiete als Beitrag zum strategischen Fischereimanagement als Meeresschutzgebiete. Zu den negativen Aspekten gehörten (a) Lärmauswirkungen auf empfindliche Lebensstadien kommerzieller Bestände, (b) Auswirkungen auf die Umwelt und die Fischbestände in angrenzenden Gebieten im Fall einer lokalen Verlagerung, (b) Auswirkungen elektromagnetischer Felder auf Muscheln, sowie (c) Auswirkungen auf die Vermehrung und Umsiedlung von Muschelbeständen während und nach der Bauphase aufgrund von Sedimentaufwirbelungen; (d) zudem können sich geschlossene Gebiete auf die Räuber-Beute-Interaktionen auswirken, was unerwünschte Auswirkungen auf die kommerziellen Bestände haben kann.

Zudem lief ein weiteres Forschungsprojekt zur Mehrfachnutzung aus OWE und kommerzieller Fischerei, welches jedoch nicht die Effekte auf die Meeresumwelt untersucht hat:

- „MULTI-FRAME“ (2020-2023) mit dem Fallbeispiel „OWE und kommerzielle Fischerei“ in Schweden, sowie mit dem Fallbeispiel „OWE und kommerzielle Fischerei“ in den USA (Schwerpunkte der Forschung: Benennung sozioökonomischer, kultureller und ökologischer Auswirkungen der Mehrfachnutzung ohne Bewertung).

Tabelle 21: Forschungsprojekte und Praxisbeispiele der drei identifizierten beispielhaften Nutzungsformen als Mehrfachnutzung kombiniert mit OWE. Falls es Informationen zu den Effekten auf die Meeresumwelt bei dem jeweiligen Projekt gibt, werden diese hier ebenfalls angegeben.

Mehrfachnutzung aus OWE +	Land	Umsetzung	Phase	Effekt auf Meeresumwelt: Chance oder Risiko	Quelle, welche den Effekt auf die Meeresumwelt bewertet hat
Fischerei	Deutschland	Fallbeispiel „OWE und kommerzielle Fischerei“ im Forschungsprojekt „MUSES“	abgeschlossen	mittelmäßig negativ	Schupp & Buck (2017)
	Frankreich	Fallbeispiel „OWE und Fischerei/Aquakultur“ im Forschungsprojekt „MULTI-FRAME“	abgeschlossen	nicht untersucht	
	Großbritannien	Fallbeispiel „OWE und kommerzielle Fischerei“ im Forschungsprojekt „MUSES“	abgeschlossen	gering positiv	Kafas (2017)
	Großbritannien	kommerzielle Fischerei von Europäischem Hummer in OWP „Westermost Rough“	in Betrieb		
	Niederlande	kommerzielle Fischerei abgesehen von Grundschleppnetzfischerei innerhalb OWPs	in Betrieb		
	Schweden	Fallbeispiel „OWE und kommerzielle Fischerei“ im Forschungsprojekt „MULTI-FRAME“	abgeschlossen	nicht untersucht	
	USA	Fallbeispiel „OWE und kommerzielle Fischerei“ im Forschungsprojekt „MULTI-FRAME“	abgeschlossen	nicht untersucht	
Hybride Energieerzeugung (Photovoltaik)	Belgien	Forschungsprojekt „EU-SCORES“ für Mehrfachnutzung aus Offshore-Photovoltaik-Systeme und im Boden befestigter OWP	derzeit laufend		
	China	2 PV-Anlagen mit insgesamt 0,5 MW an Transformator einer OWEA in Shandong angeschlossen	in Betrieb		
	Griechenland	Pilotanlage (Kombination von Wind, Wellen und Photovoltaik mit Aquakultur) im Forschungsprojekt „MUSICA“	derzeit laufend		

Mehrfachnutzung aus OWE +	Land	Umsetzung	Phase	Effekt auf Meeresumwelt: Chance oder Risiko	Quelle, welche den Effekt auf die Meeresumwelt bewertet hat
	Griechenland	„Ocean Hybrid Platform“ (Kombination von Wind, Wellen und Photovoltaik)	abgeschlossen	nicht untersucht	
	Niederlande	PV-Anlage mit min. 0,5 MW in OWP „Hollandse Kust Noord“	in Planung		
	Niederlande	PV-Anlage in OWP „Hollandse Kust West VII“	in Planung		
Hybride Energieerzeugung (Wellenenergie)	Deutschland	Pilotanlage für Wellenenergiewerk im Modellmaßstab in unmittelbarer Nähe zur Forschungsplattform FINO 3 und zum OWP „DanTysk“	abgeschlossen	nicht untersucht	
	Europa	Forschungsprojekt „ORECCA“ für Mehrfachnutzung aus Offshore-Wind-, Wellen- und Gezeitenenergie	abgeschlossen	nicht untersucht	
	Griechenland	OWPs und Offshore-Wellenenergiesysteme	in Planung		
	Griechenland	Pilotanlage (Kombination von Wind, Wellen und Photovoltaik mit Aquakultur) im Forschungsprojekt „MUSICA“	abgeschlossen	nicht untersucht	
	Griechenland	„Ocean Hybrid Platform“ (Kombination von Wind, Wellen und Photovoltaik)	abgeschlossen	nicht untersucht	
	Portugal	Forschungsprojekt „EU-SCORES“ für Mehrfachnutzung aus Wellenenergieanlagen und schwimmender OWP	derzeit laufend		
Hybride Energieerzeugung (Biokraftstoff aus Algen)	Belgien	Pilotanlage (Austernaquakultur und Algenzucht) im OWP im Forschungsprojekt „UNITED“	abgeschlossen	nicht untersucht	
	Belgien	Fallbeispiel „OWE und Aquakultur (Miesmuschel-/Austernaquakultur und Algenzucht)“ im Forschungsprojekt „ULTFARMS“ (OWP Belwind)	derzeit laufend		

Mehrfachnutzung aus OWE +	Land	Umsetzung	Phase	Effekt auf Meeresumwelt: Chance oder Risiko	Quelle, welche den Effekt auf die Meeresumwelt bewertet hat
	Dänemark	Fallbeispiel „OWE und Aquakultur“ im Forschungsprojekt „MUSES“	abgeschlossen	neutral	Karlson et al. (2017)
	Dänemark	Fallbeispiel „OWE und Aquakultur“ im Forschungsprojekt „ULTFARMS“ (OWP Samsø South)	derzeit laufend		
	Dänemark	Fallbeispiel „OWE und Aquakultur“ im Forschungsprojekt „ULTFARMS“ (OWP Anholt)	derzeit laufend		
	Dänemark	Pilotprojekt „OWE und Algenzucht/Muschelaquakultur“ im OWP Krigers Flak	derzeit laufend		
	Deutschland	Fallbeispiel „OWE und Aquakultur“ im Forschungsprojekt „MUSES“	abgeschlossen	mittelmäßig positiv	Schupp & Buck (2017)
	Deutschland	Pilotanlage in Nordsee (Miesmuschelaquakultur und Algenzucht) im OWP im Forschungsprojekt „UNITED“	abgeschlossen	nicht untersucht	
	Deutschland	Fallbeispiel „OWE und Aquakultur (Miesmuschelaquakultur und Algenzucht)“ im Forschungsprojekt „ULTFARMS“ (Fortsetzung von Pilotanlage im Forschungsprojekt „UNITED“ bei der FINO 3 Plattform)	derzeit laufend		
	Deutschland	Fallbeispiel „OWE und Algenzucht“ im Forschungsprojekt „ULTFARMS“ (FINO 2 Plattform)	derzeit laufend		
	Frankreich	Fallbeispiel „OWE und Fischerei/Aquakultur“ im Forschungsprojekt „MULTI-FRAME“	abgeschlossen	nicht untersucht	
	Griechenland	Pilotanlage (Kombination von Wind, Wellen und Photovoltaik mit Aquakultur) im Forschungsprojekt „MUSICA“	derzeit laufend		
	Niederlande	Fallbeispiel „OWE und Muschelaquakultur“ im Forschungsprojekt „ULTFARMS“ (OWP Borssele III)	derzeit laufend		
	Niederlande	Algenzucht im Projekt „North Sea Farm 1“ innerhalb OWP	in Planung		

Mehrfachnutzung aus OWE +	Land	Umsetzung	Phase	Effekt auf Meeresumwelt: Chance oder Risiko	Quelle, welche den Effekt auf die Meeresumwelt bewertet hat
	Schweden	Fallbeispiel „OWE und Aquakultur“ im Forschungsprojekt „MUSES“	abgeschlossen	mittelmäßig positiv	Franzén et al. (2017)

7.4.3 Potentielle kumulative Umwelteffekte auf einer Referenzfläche durch die Mehrfachnutzung mit „Fischereiforschung“

Bezüglich der Umweltverträglichkeit durch die Mehrfachnutzung aus OWE und Fischereiforschung werden im Folgenden die allgemeinen kumulativen Effekte aus Abschnitt 7.4.2 auf eine Referenzfläche übertragen: Hierzu wird die Überschneidung aus OWE und Fischereiforschung laut FEP 2023 auf der Fläche EO2 in der deutschen AWZ der Ostsee als Referenzfläche angenommen (siehe Abschnitt A.5.2). Zusammenfassend hat die Referenzfläche laut Umweltbericht zum FEP (BSH, 2021b) eine erhöhte Bedeutung für **Schweinswale** und einige **Zugvogelarten** (ziehende Wasservögel und nachtziehende Landvögel).

Insgesamt werden bei einer Mehrfachnutzung aus OWE und Fischereiforschung nur kumulative Effekte hinsichtlich der Verringerung eines möglichen „Reserve effects“ je nach Intensität der Fischereiforschung erwartet.

- Verringerter **„Reserve effect“**: Durch die Mehrfachnutzung auf OWE und Fischereiforschung wird Fischerei nicht mehr innerhalb des OWPs sowie aktive Fischerei nicht mehr in einem Radius von 500 m um den OWP ausgeschlossen, sondern verglichen mit kommerzieller Fischerei in einer erheblich geringeren Intensität durchgeführt. Der Fischereiausschluss kann zu einer größeren Artenvielfalt, Artengleichmäßigkeit, Abundanz, Gleichmäßigkeit im Geschlechtsverhältnis, Körpergröße und Lebenserwartung von Fischen führen kann (Bergström et al., 2023; Berkström et al., 2021; Eklöf et al., 2023; Florin et al., 2013; Halouani et al., 2020; Howarth, 2012; Roach et al., 2018; Röckmann et al., 2007; Rufener et al., 2023; Rybicki et al., 2021; Sala & Giakoumi, 2018; Simons et al., 2015; Sköld et al., 2022). Dadurch wiederum kann sich die Nahrungsverfügbarkeit für höhere trophische Ebenen (Fische, Vögel und Meeressäuger) erhöhen (Reserve effect); jedoch ist der „Reserve effect“ noch wenig erforscht und der Effekt des Fischereiausschlusses wurde nicht in allen Fällen als signifikant eingestuft, sondern hängt von verschiedenen Wirkfaktoren ab (siehe Abschnitt 4.2.2). Inwiefern der vermutete „Reserve effect“ bei einer Mehrfachnutzung durch OWE und Fischereiforschung (d. h. deutlich geringere Intensität als kommerzielle Fischerei und nur ausgewählte Fangmethoden) beeinflusst wird, ist ebenfalls unklar. Die Referenzfläche hat hinsichtlich der Seltenheit und der Gefährdung nur eine durchschnittliche Bedeutung für die Fischfauna (BSH, 2021b); allerdings hat die Referenzfläche laut Umweltbericht zum FEP (BSH, 2021b) eine erhöhte Bedeutung für Schweinswale und einige Zugvogelarten (ziehende Wasservögel und nachtziehende Landvögel), deren Nahrungsgrundlage sich durch einen vermuteten „Reserve effect“ erhöhen würde – bei einer Mehrfachnutzung aus OWE und Fischereiforschung kann die Intensität des vermuteten „Reserve effects“ jedoch geringer ausfallen als bei einer Einfachnutzung durch OWE. Fischereiforschung findet jedoch in einem wesentlich geringeren Umfang als Fischerei statt und es werden nur ausgewählte Fangmethoden eingesetzt. Die Intensität der Fischerei bzw. Fischereiforschung wäre in diesem Fall entscheidend für die Intensität des „Reserve effects“.

Zur genaueren Quantifizierung der kumulativen Effekte sind Informationen zur Intensität der Fischereiforschung nötig.

7.4.4 Bewertung technischer Optionen zur Minderung negativer Umweltwirkungen durch Mehrfachnutzung mit „Fischereiforschung“

Hinsichtlich kumulativer Effekte durch gleichzeitige Nutzung einer Fläche für Fischereiforschung werden folgende technische Optionen zur Minderung negativer Umweltwirkungen durch Mehrfachnutzung durch Fischereiforschung empfohlen:

- Verringerter **„Reserve effect“**: Zusammengefasst hat Fischerei(-forschung) hauptsächlich die folgenden Auswirkungen (d. h. wichtigste Auswirkungen auf räumlicher Skala, zeitlicher Skala und auf Populationsebene): (a) Störung von benthischen Habitaten, (b) Entnahme von Individuen (Ziel-Arten), und (c) Beifang. Hinsichtlich Beifang während der Grundschleppnetzsurveys bei einer Mehrfachnutzung aus OWE und Fischereiforschung bestehen verschiedene technische Möglichkeiten: (1) Ausschlussvorrichtungen (physische Barrieren, die verhindern, dass sich Nicht-Zielarten im Netz verfangen, und die sie durch eine Fluchtöffnung aus dem Netz leiten); (2) Auto-Trawling-Systeme (Netzüberwachungssysteme, die sicherstellen, dass der Eingang des Netzes jederzeit offen bleibt); (3) akustische Vergrämung mit Hilfe von Pingern, die akustische Signale aussenden, um Nicht-Zielarten aus der unmittelbaren Nähe von Fanggeräten zu vergrämen, sowie mit Hilfe von Echolot-Reflexion; (4) olfaktorische Vergrämung, bei der Gerüche zur Vergrämung von Nicht-Zielarten führen sollen; (5) visuelle Vergrämung durch Lichtsignale; und (6) elektrosensorische Vergrämung, bei der Seltenerdmagnete, Ferritmagnete und elektropositive "Mischmetalle" zur Vergrämung und somit zur Senkung der Beifangrate von Plattenkiemern führen sollen (Baker & Hamilton, 2014; Løkkeborg, 2011; Lucas & Berggren, 2023). Zudem sollte ein Managementplan die Intensität der Fischereiforschung regulieren, damit der die positiven Effekte von einem Fischereiausschluss hinsichtlich benthischer Habitate bzw. einer Reduzierung der Fischerei hinsichtlich Entnahme von Individuen (Ziel-Arten) eintreten können (z. B. in Bezug auf die Biotope am Meeresboden oder den vermuteten „Reserve effect“). Beispielsweise können wie auf der Vorbehaltsfläche Forschung O 2-2 nur kleine Bereiche zur Forschungsfischerei freigegeben werden, Fangmengen können begrenzt, minimalinvasive Methoden der Datenerhebung eingesetzt werden und es kann zeitliche Einschränkungen geben.

8 Vertiefte Analyse: Hybride Energieerzeugung

Als dritte Mehrfachnutzungsoption wird im folgenden Abschnitt die hybride Energieerzeugung untersucht. Die vertiefte Analyse stützt sich auf die Ergebnisse aus Literaturrecherchen und Interviews mit Experten*innen. Es wurden insgesamt 16 Interviews im Zeitraum Juni bis Oktober 2023 durchgeführt. Befragt wurden vor allem Unternehmen, aber auch Forschungseinrichtungen und Verbände. Die befragten Akteure stammten aus Deutschland und dem europäischen Ausland. Anhand von Leitfragen, die dem Anhang A.4 zu entnehmen sind, wurde zunächst allgemein und anschließend nach den spezifischen Chancen und Herausforderungen von Mehrfachnutzungen mit Offshore-Windenergie in Kombination mit weiteren EE-Anlagen in Deutschland befragt. Die Ergebnisse sind im folgenden Kapitel in aggregierter Form und ergebnisorientiert ausformuliert.

Die Analyse im Bereich der hybriden Energieerzeugung untergliedert sich in vier Unterabschnitte. Zunächst wird jeweils eine Technologie zur Nutzung der Meeresenergie betrachtet: die Solarenergie, die Wellenenergie sowie der Algenanbau (Abschnitte 8.1.1, 8.1.2 und 8.1.3). Nach der Betrachtung der drei einzelnen Nutzungsoptionen wird im Anschluss die Frage der hybriden Energieerzeugung unter Berücksichtigung der Kombination mit der Windenergie auf See (Abschnitt 8.3) untersucht. Es werden die verschiedenen Schnittstellen und Ausgestaltungsmöglichkeiten von Mehrfachnutzungskonzepten erläutert. Im Anschluss erfolgt in Abschnitt 8.4 die juristische Einordnung des aktuellen Regelungsregimes und Netzanbindung(skapazitäten) von Windenergie auf See mit hybrider Energieerzeugung. Zuletzt erfolgt in Abschnitt 8.5 die Analyse der Auswirkungen auf die Meeresumwelt.

8.1 Potentielle Energieerzeugungsformen zur Mehrfachnutzung mit Offshore-Windenergie

Im Folgenden werden die drei für dieses Vorhaben relevanten Technologien für die Mehrfachnutzungsoptionen der hybriden Energieerzeugung einzeln erläutert. Die hierbei teils namentlich genannten Unternehmen/Anbieter derartiger Konzepte sind als verdeutlichende Beispiele zu verstehen und geben keinen vollumfänglichen Überblick. Ziel ist es, hierdurch ein grundlegendes Verständnis für die unterschiedlichen Technologien zu schaffen.

8.1.1 Schwimmende PV-Anlagen

Die Solarenergie hat sich in Deutschland als wichtige Technologie im Rahmen der Energiewende etabliert. Seit Beginn der 2000er Jahre steigen in Deutschland die installierte Gesamtleistung von Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) sowie der Anteil des durch PV-Anlagen erzeugten Stroms an. Im Jahr 2023 wurde eine installierte Gesamtleistung in Höhe von 81 GW verzeichnet und etwa 12 % der deutschen Stromerzeugung wurden durch PV-Anlagen gedeckt (Wirth, 2024). Der gesetzlich verankerte Ausbaupfad für die Solarenergie im EEG 2023 sieht eine weitere Steigerung auf 400 GW bis zum Jahr 2040 vor. Mit dem verstärkten Ausbau der Solarenergie entwickelte sich die Technologie stetig weiter, so konnten die Kosten für PV-Module massiv reduziert und die Effizienz der PV-Module verbessert werden. Aufgrund des hohen Platzbedarfs und der spezifischen Standortanforderungen haben sich in den letzten Jahren alternative Konzepte zu den klassischen Installationen auf Hausdächern und Freiflächen entwickelt, beispielsweise Konzepte zur Nutzung von Häuserfassaden und Konzepte für die kombinierte Nutzung landwirtschaftlicher Flächen zur Pflanzenproduktion (Agri-PV).

Neben den Konzepten zur Nutzung von Landflächen werden seit wenigen Jahren zunehmend auch Konzepte zur Nutzung von Gewässern entwickelt, die Schwimmende Photovoltaik oder Floating-PV (FPV). In Deutschland wurden seit 2019 erste Projekte umgesetzt, im Fokus stehen

vor allem künstliche Gewässer wie Braunkohle-Tagebauseen, Kiesgruben und Stauseen. Die weltweit installierte Leistung schwimmender PV-Anlagen erreichte zum Jahresende 2020 etwa 2,6 GW. Der Großteil der installierten Leistung befindet sich in Asien, vor allem in China. In Europa sind vor allem in den Niederlanden FPV-Projekte realisiert worden (Ramasamy & Margolis, 2021). Die Anwendungen schwimmender PV-Anlagen beschränken sich jedoch nicht nur auf stehende Binnengewässer, sondern auch erste Konzepte für die Anwendung auf dem Meer wurden bereits entwickelt. Auf politischer Ebene fanden schwimmende Offshore-PV-Anlagen Eingang in die „Strategie zur Nutzung des Potentials der erneuerbaren Offshore-Energie für eine klimaneutrale Zukunft“ der Europäischen Kommission (EK, 2020) oder auch in die „Esbjerg-Erklärung“ der Regierungen Belgiens, Dänemarks, Deutschlands und der Niederlande. In der Esbjerg-Erklärung einigten sich die Energieminister darauf, die Technologien für Photovoltaik in Offshore-Windparks zu beobachten und Hindernisse abzubauen, um den Ausbau der Technologie weiter voranzubringen und Offshore-PV-Anlagen als sinnvolle Ergänzung zu Offshore-Windparks zu ermöglichen (The Esbjerg Offshore Wind Declaration, 2022). Im April 2023 kündigte der niederländische Klima- und Energieminister ein eigenes Ausbauziel für die Solarenergie auf See an, demnach will die niederländische Regierung bis 2030 3 GW realisieren (Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, 2023), die niederländischen Ausschreibungen für Offshore-Windflächen enthalten bereits teilweise qualitative Kriterien hinsichtlich des Beitrags zur Integration der Windenergie in das niederländische Energiesystem. Für die Implementierung von schwimmenden PV-Anlagen erhalten bietende Unternehmen Punkte, z.B. Ausschreibung der Windfläche IJmuiden Ver Beta: Punkte für 10-50 MW Solarleistung (Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, 2024).

Die Technologie der schwimmenden PV-Anlagen auf See (Offshore Floating Photovoltaik, OFPV). befindet sich im Entwicklungsstadium, die kommerzielle Marktreife wurde noch nicht erreicht. Die Anwendung der an Land etablierten Technologie bringt auf See neue Herausforderungen mit sich, denen die schwimmenden PV-Anlagen dauerhaft standhalten müssen:

- Eine große Herausforderung sind die harschen Bedingungen auf See. Die Strukturen sind bei Stürmen und hohem Seegang **großen Lasten** durch Wind und Wellenschlag ausgeliefert. Sie müssen entsprechend robust konzipiert werden. Dies geht oftmals mit vermehrtem Materialaufwand einher, der sich wirtschaftlich im erhöhten Projektaufwand widerspiegelt. (s. z.B. Jia et al., 2024). Die Entwickler stehen damit vor der Herausforderung ein robustes Konzept zu entwickeln, das wirtschaftlich tragbar ist.

- Der **Salzgehalt des Wassers** und die Auswirkungen der Gischt oder des Überspülens der PV-Module und anschließend zurückbleibender Salzrückstände und anderer Partikel sind ebenfalls mit Unsicherheiten behaftete Faktoren, insbesondere im Hinblick auf Effizienz der Energieerzeugung. Entwickler von schwimmenden PV-Anlagen sammeln mit Pilotanlagen erste Erfahrungen, sodass es noch keine etablierten Betriebskonzepte für die notwendige Reinigung der PV-Module gibt. Es wird davon ausgegangen, dass eine Reinigung nach den Sturmsaisons im Frühjahr und vor dem Sommer für einen optimalen Energieertrag sinnvoll sind. Eine Reinigung kann ebenfalls durch Verschmutzung von **Vogelkot** notwendig werden, da davon auszugehen ist, dass Seevögel die Anlagen als Rastplätze nutzen werden. Eine Reinigung der PV-Module könnte manuell und nach Bedarf erfolgen oder durch automatisierte Lösungen.

- Neben den Seevögeln, die die schwimmenden PV-Anlagen als Rastplatz nutzen könnten, könnten sich auch weitere Tiere, wie zum Beispiel Robben, auf den Strukturen der PV-Anlage niederlassen. Derartige Interaktionen mit der Tierwelt könnten eine Herausforderung für die Stabilität der Strukturen darstellen.

- Wie alle im Meerwasser ruhenden Gegenstände wird auch bei den Strukturen den schwimmenden PV-Anlagen von einem **Bewuchs mit Biomasse** ausgegangen. Der Umfang des Bewuchses ist abhängig von der genutzten Beschichtung und eingesetzten Bewuchsschutzmitteln. Entwickler berücksichtigen den Bewuchs in der Konzeptionierung der Anlagen. Aus wirtschaftlicher und umweltfachlicher Sicht ist ein Vermeiden von Wartungen der Strukturen, die im Wasser liegen, sinnvoll. Schiffe und Boote müssen regelmäßig gereinigt und mit Bewuchsschutzmitteln beschichtet werden. Eine regelmäßige Entfernung des Bewuchses und erneute Anwendung von Bewuchsschutzmitteln planen die Entwickler der PV-Anlagen derzeit nicht.
- Die herausfordernden Bedingungen auf See könnten jedoch auch einen wichtigen Vorteil im Gegensatz zu den Bedingungen an Land mit sich bringen. Die Stromerzeugung durch schwimmende PV-Anlagen auf See könnte aufgrund des Kühleffekts des Wassers effizienter ausfallen, sodass sich die Stromerzeugung erhöhen könnte (s. z. B. (Dörenkämper et al., 2021).

Unter anderem diese Aspekte müssen in der zukünftigen Entwicklung der schwimmenden PV-Anlagen auf See weiter untersucht und entwickelt werden. Wie bereits in Abschnitt 5.7 erläutert, existieren für schwimmende PV-Anlagen auf dem Meer verschiedene Konzepte. Allen gemeinsam ist der grundsätzliche Aufbau aus den PV-Modulen, einer Unterstruktur sowie einer Verankerung im Meeresboden. Unterschiedliche Konzepte werden jeweils durch verschiedene Unternehmen entwickelt. Sie unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich ihrer Unterkonstruktion und lassen sich in drei Kategorien einteilen: Konzepte mit einer erhöhten Plattform, Konzepte mit einem Ponton und Konzepte mit einer Membran. Die in den folgenden Abschnitten exemplarisch vorgestellten Anlagenkonzepte zeigen, dass es verschiedene Ansätze gibt, um den Herausforderungen auf See zu begegnen (s. dazu auch Ghosh, 2023). Neben der Erprobung der Konzepte für die schwimmenden PV-Anlagen selbst steht auch die Erprobung von hybriden Konzepten in Wind-Solar-Projekten im Fokus.

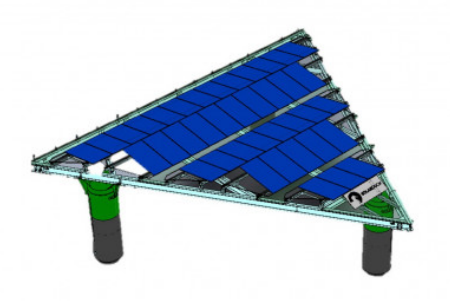
8.1.1.1 Erhöhte-Plattform-Konzept

Das Erhöhte-Plattform-Konzept zeichnet sich dadurch aus, dass eine mit PV-Modulen ausgestattete Plattform auf einer Struktur platziert und von schwimmenden Elementen getragen wird, die mit Leinen oder Ketten am Meeresboden verankert sind. Die Plattform und die Module befinden sich erhöht über der Wasseroberfläche und die Wellen können sich unter der Struktur bewegen. Das Konzept vermeidet den direkten Kontakt zwischen Meerwasser und PV-Modulen.

Beispielsweise verfolgt das Unternehmen SolarDuck ein Konzept mit einer erhöhten Plattform, die die Form eines Dreiecks hat. Einzelne Plattformen lassen sie modular um weitere Plattformen ergänzen. Das Unternehmen kündigte eine Pilotanlage „Merganser“ mit einer Gesamtleistung von ca. 0,5 MW in Zusammenarbeit mit RWE an. Die Anlage soll aus sechs miteinander verbundenen Plattformen mit einem Durchmesser von insgesamt 65 m bestehen. Die Anlage ist für die extremen Sturmbedingungen in der Nordsee mit einer maximalen Wellenhöhe von 13,5 m ausgelegt und soll auf einer Testfläche 12 km vor der Küste von Den Haag in den Niederlanden installiert werden. Die Installation ist für den Sommer 2023 geplant und die Pilotphase soll zwei bis drei Jahre dauern, um das Konzept weiterzuentwickeln (SolarDuck, 2023a). Im Februar 2024 wurde von der Installation von zwei der insgesamt sechs Plattformen berichtet ((Skopljak, 2024). Außerdem planen SolarDuck und RWE die Installation eines Offshore- Solarprojekts mit 5 MW als Teil des Offshore-Windparks Hollandse Kust West VII (OranjeWind) mit 760 MW etwa 53 km vor der niederländischen Küste mit Inbetriebnahme in 2026 (MarineForum, 2024). Anfang 2024 wurde darüber hinaus ein großes Hybrid-Wind-Solar-Projekt in Italien angekündigt, es sollen schwimmende Windenergieanlagen mit einer installierten Leistung von insgesamt

420 MW und schwimmende PV-Anlagen von SolarDuck mit insgesamt 120 MW installierte werden. Das Projekt soll im Jahr 2028 im Golf von Tarent in Betrieb gehen (SolarDuck, 2024).

Abbildung 28: Konzept SolarDuck



Quelle: (SolarDuck, 2023b)

8.1.1.2 Ponton-Konzept

Das Ponton-Konzept basiert auf der Nutzung schwimmender Pontons. Die Pontons sind schwimmende Unterkonstruktionen, die zu einer massiven modularen Struktur gekoppelt sind. Die gesamte schwimmende Struktur ist mit Leinen oder Ketten am Meeresboden verankert. Auf den Pontons sind die PV-Module montiert, diese sind entsprechend relativ nahe an der Wasseroberfläche angebracht und das Meerwasser kann die PV-Module überspülen.

Dieses Konzept wird beispielsweise von dem Unternehmen Oceans of Energy verfolgt. Das Unternehmen testet im „North Sea 1“ Projekt seit 2019 seine Pilotanlage mit bis zu 50 kW in der niederländischen Nordsee zunächst im küstennahen Bereich, weniger als 1 km von der Küste entfernt. Die Plattform wurde seither auf 12 km Küstenentfernung verlegt und soll im Rahmen des “North Sea 2” Projekts auf 1 MW weiterentwickelt, werden. Für das Jahr 2025 ist eine Installation einer schwimmenden PV-Anlage im Offshore-Windpark Hollandse Kust Noord, der durch CrossWind Ende 2023 etwa 19 km vor der niederländischen Küste mit 760 MW in Betrieb genommen wurde, geplant (Oceans of Energy, 2023).

Abbildung 29: Konzept Oceans of Energy

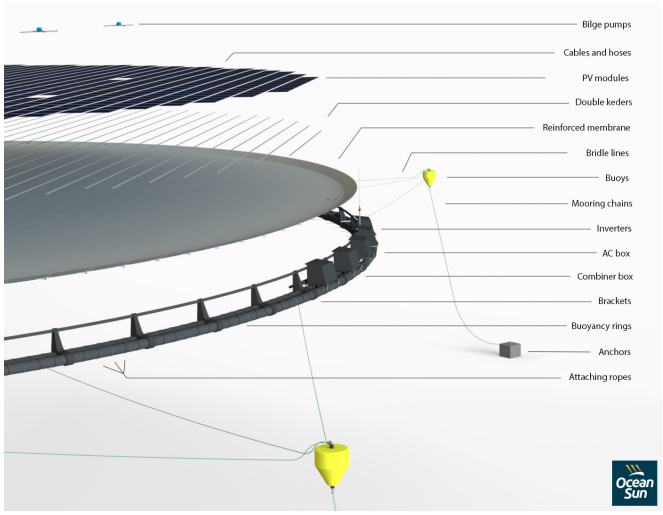
Quelle: (Oceans of Energy, 2022)

8.1.1.3 Membran-Konzept

Das Membran-Konzept besteht im Wesentlichen aus einer Membran, auf der die PV-Module montiert sind, sodass sich die PV-Module nah auf der Wasseroberfläche befinden. Die meist kreisrunde Membran wird außen mit einem schwimmenden Ring vertäut und mit Leinen oder Ketten am Meeresboden verankert.

Dieses Konzept wird beispielsweise durch das Unternehmen OceanSun verfolgt. Die Produkte von OceanSun haben einen Durchmesser von 50-75 m und weisen eine installierte Leistung von 280-650 kW auf. Sie sind mit einer Pumpe versehen, die Regen- und Spritzwasser von der Membran entfernen soll. In einem Forschungsprojekt in Kooperation mit der SPIC bei Haiyang im Gelben Meer vor der chinesischen Küste wurden zwei Membranen, die zusammen eine installierte Leistung von 0,5 MW aufweisen an einen Windpark angeschlossen. Die Membranen wurden Ende 2022 installiert und im Jahr 2023 wieder entfernt, die Erkenntnisse dieses Tests sollen in die Weiterentwicklung der Produkte von Ocean Sun fließen (Ocean Sun AS, 2024).

Abbildung 30: Konzept Ocean Sun



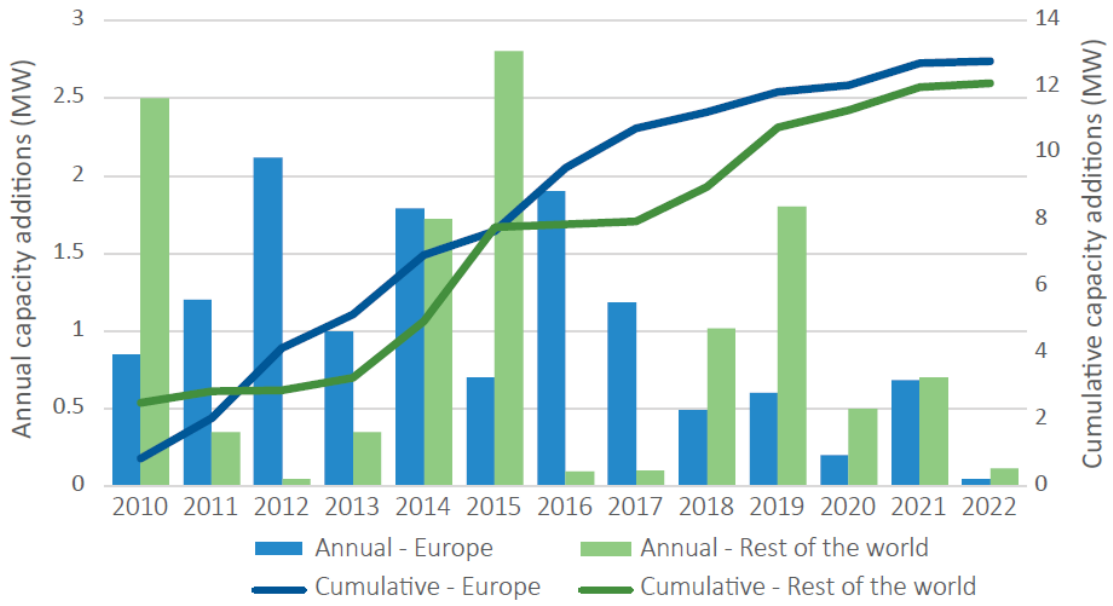
Quelle: (Ocean Sun AS, 2023)

8.1.2 Wellenenergie

Wellenenergiekraftwerke (Wave Energy Converter) können heranrollenden die Bewegungsenergie von Meereswellen in Abhängigkeit von Wellenhöhe und Wellenperiode in elektrische Energie umwandeln. Obgleich Wellenenergie saisonalen Gegebenheiten folgt, kann sie als zuverlässige und vorhersehbare Energiequelle definiert werden.

In Europa wurde zuletzt im Jahr 2016 vor allem zwischen 2010 und 2017 relevante Zubauaktivitäten im Bereich der Wellenenergie verzeichnet, hierbei wurde nur 2012 die 2 MW-Marke leicht überschritten. Darüber hinaus gab es außerhalb von Europa in den Jahren 2010 und 2015 Zuwächse oberhalb von 2 MW pro Jahr, wie in der folgenden Abbildung 31 dargestellt wird.

Abbildung 31: Weltweit installierte Wellenenergiekapazität



Quelle: (Ocean Energy Europe, 2023)

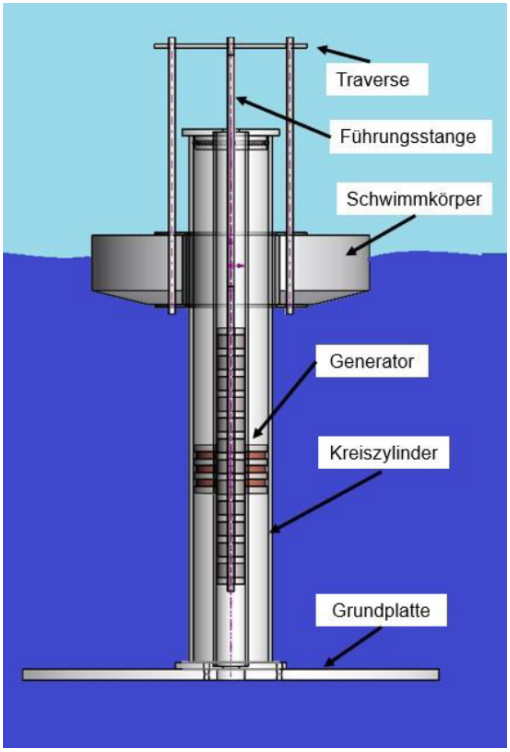
In der näheren Vergangenheit ist ein rückläufiger Trend erkennbar, sodass im Jahr 2022 kaum Anlagen zugebaut wurden. Insgesamt wurden seit dem Jahr 2010 ca. 150 Wellenkraftwerke mit einer Gesamtleistung von ca. 13 MW in Europa installiert. In der restlichen Welt wurde seit dem Jahr 2010 eine Kapazität von ca. 12,3 MW aus Wellenergie in Betrieb genommen. Kaum eine dieser Anlagen wird kommerziell betrieben, da es sich hauptsächlich um Prototypen und Demonstratoren handelt, die zu Forschungszwecken oder als Testpiloten installiert wurden. Insgesamt hat sich bisher keine Technologie für Wellenkraftwerke durchgesetzt, sodass es kein von Entwicklern präferiertes Konzept gibt (Tapoglou et al., 2022).

Technisch besteht bei der Konstruktion von Wellenkraftwerken die größte **Herausforderung** darin, eine starke **Robustheit** für die Umweltbedingungen auf See mit einer möglichst leichten und materialsparenden Bauweise zu kombinieren. Wellenkraftwerke müssen den rauen Bedingungen auf See standhalten können, wobei eine Verstärkung der Konstruktion und ein robuster Aufbau gleichzeitig die Materialintensität und damit verbundene Kosten erhöht. Entwickler von Wellenkraftwerken geben an, dass mehrere Ausführungen und standortspezifische Designs ihrer Konzepte geplant sind, wodurch ermöglicht werden soll, dass, je nach Umgebung, die passende Struktur im geeigneten Preis-Leistungs-Verhältnis eingesetzt werden kann. Innerhalb der vorliegenden Studie konnten die in den nachfolgenden Abschnitten dargestellten Technologien zur Erzeugung von Strom aus Wellenergie als vielversprechend für eine mögliche Kombination mit Windenergie auf See identifiziert werden. Sie befinden sich im fortgeschrittenen Realisierungsstatus, weisen erhöhte Technologie-Reifegrade vor, und die im Rahmen dieser Analyse befragten Entwickler und Experten der Branche räumten die Möglichkeit der Kombination mit Windenergie auf See ein. Weitere Konzepte für Wellenkraftwerke, die in Küstennähe betrieben oder als feste Bauwerke errichtet werden, sind nicht Gegenstand der vorliegenden Analyse.

8.1.2.1 Punktabsorber

Punktabsorber erzeugen Energie, indem ein beweglicher Schwimmkörper relativ zu einem Fixpunkt durch die Wellenbewegung angehoben und wieder abgesenkt wird. Dabei können die Wellenbewegungen von allen Seiten in Energie umgewandelt werden.

Abbildung 32: Funktionsprinzip eines Punktabsorbers



Quelle: (Keindorf (FH Kiel), 2023)

Die Form der Leistungsgewinnung kann beispielhaft mit einem Lineargenerator durchgeführt werden, welcher kinetische Energie in elektrische Energie mittels Bewegung eines leitfähigen Materials in einem magnetischen Feld umwandelt.

Der im Project HiWave-5 eingesetzte Punktabsorber des Unternehmens CorPower hat einen kommerziellen Reifegrad erreicht. Der Punktabsorber hat einen Durchmesser von 9 m und ist 18 m hoch. Das Gewicht beziffert das Unternehmen auf 70 t. Das Wellenkraftwerk hat eine Nennleistung von 300 kW und kann bei Wellen mit einer Höhe von 0,25 m bis 8 m bei Wassertiefen ab 40 m eingesetzt werden. Der Demonstrator wurde im September 2023 4 km vor der Küste Portugals an das Stromnetz angeschlossen. Bis 2025 sind Testdurchläufe verschiedener Betriebsmodi geplant (CorPower Ocean, 2023). Die Fachhochschule Kiel erarbeitet beispielsweise aktuell einen Prototypen mit einer Leistung von 32 kW, der modular auf bis zu 128 kW erweitert werden könnte. Die Funktionsweise ist in Abbildung 32 ersichtlich. Die Stabboje ist 11,5 m hoch, bis zu 2,6 m breit und wiegt ca. 8,2 t. Die Anlage wurde auf ihre Funktion im maßstabsgetreuen Modell geprüft, jedoch noch nicht unter realen Bedingungen getestet. Als Teststandort ist ein Standort bei der Forschungsplattform FINO 3 angedacht, die 80 km westlich von Sylt steht (Keindorf (FH Kiel), 2023).

8.1.2.2 Attenuatoren

Attenuatoren wandeln mithilfe von hydraulischen Systemen in den Gelenken und Verbindungen zwischen den verschiedenen Schwimmkörpern relative Bewegung in elektrische Energie um.

Abbildung 33: Konzept Mocean Energy Blue X im European Marine Energy Centre EMEC

Quelle: (Ocean Energy Systems, 2023)

Attenuatoren werden umgangssprachlich als „Seeschlange“ bezeichnet. Sie können aus mehreren Gliedern, verbunden mit mehreren Gelenken, bestehen und ähneln einer Schlange, die an der Wasseroberfläche durch das Wasser gleitet. Die Wirkungsweise und das Konzept sind seit über 20 Jahren Teil der Forschung. Seither wurde das Konzept stark weiterentwickelt, wie beispielsweise durch das Unternehmen „Mocean Energy“. Deren Anlage „Blue Horizon“ soll zu einem späteren Zeitpunkt im kommerziellen Einsatz bis zu 250 kW erzeugen können. Das Kraftwerk soll über 40 m lang werden und 400 t wiegen. Die Testphase mit einer einjährigen Laufzeit und Netzanbindung sind für das Jahr 2025 im European Marine Energy Centre (EMEC) geplant. Der Prototyp „Blue X“ wird zum Zeitpunkt des Vorhabens vor der Küste von Schottland getestet (Endeavor Business Media, 2024). Der Prototyp kann bis zu 30 kW erzeugen, ist 20 m lang und operiert bei einer maximalen Wellenhöhe von 2,3 m (Mocean Energy, 2021).

8.1.2.3 Oszillierende Wassersäule

Bei dem Prinzip der oszillierenden Wassersäule wird ein hohler, teilweise im Wasser stehender Raum mit Öffnung zur Welleneingangsbewegung geflutet. Die Wellenbewegung komprimiert und dekomprimiert die Luft im Hohlraum, die dadurch wiederum durch eine kleine Öffnung einen Luftstrom generiert und eine Turbine zur Stromerzeugung antreibt.

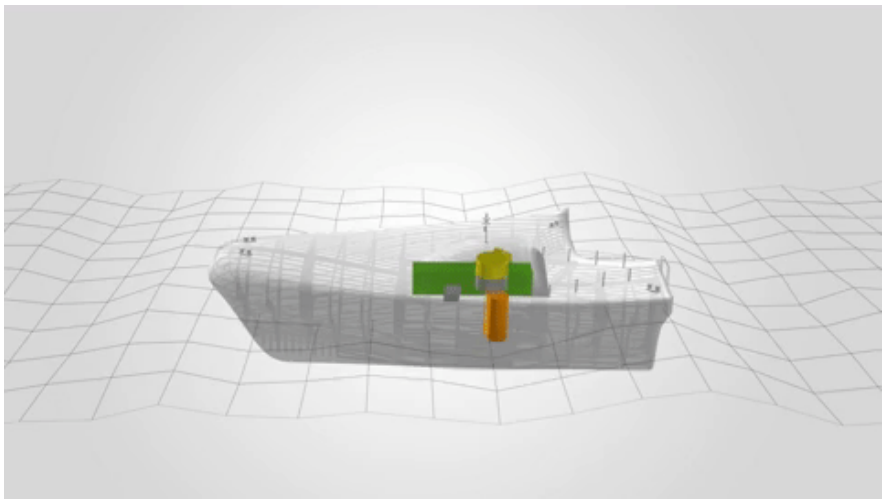
Im Projekt WEDUSEA, welches im Jahr 2022 startete und bis 2026 durchgeführt wird, wird die Kommerzialisierung eines schwimmenden Wellenkraftwerks, welches auf dem Prinzip der oszillierenden Wassersäule fungiert, verfolgt. Das Unternehmen OceanEnergy hat ein Konzept unter dem Namen OE35 entwickelt. Es handelt sich um den Nachfolger des Systems OE12, welches im Maßstab 1:4 in Irland getestet wurde. Er soll in der nächsten Phase an zwei Standorten, vor Hawaii und vor Schottland, mit jeweils 1 MW umgesetzt werden, um den Einsatz eines leistungsstarken Wellenkraftwerkes unter realen Standortbedingungen zu testen. Dabei werden Performance und Zuverlässigkeit untersucht. Die Struktur ist 35 m lang, hat 10 m Tiefgang und wiegt 700 t. (WEDUSEA, 2023 und WEDUSEA, 2022)

8.1.2.4 Rotierende Masse

Bei dem Konzept der rotierenden Masse ist im Inneren einer schwimmenden Hülle eine exzentrische Masse an einer zentralen Welle angebracht. Das schwingende Gewicht wird durch eintreffenden Meereswellen in Bewegung gesetzt und wandelt mit einem Generator die Wellenenergie

in elektrische Energie um. Jede Meereswelle drückt das Gewicht in die parallele Richtung. Ab einem bestimmten Winkel richtet sich die gekippte schwimmende Hülle auf, der Auftriebskörper stabilisiert sich und das Gewicht rotiert an der zentralen Welle in die Ausgangsposition zurück.

Abbildung 34: Technische Zeichnung des Penguin von Holvi Oy



Quelle: (Holvi Oy, o. J.)

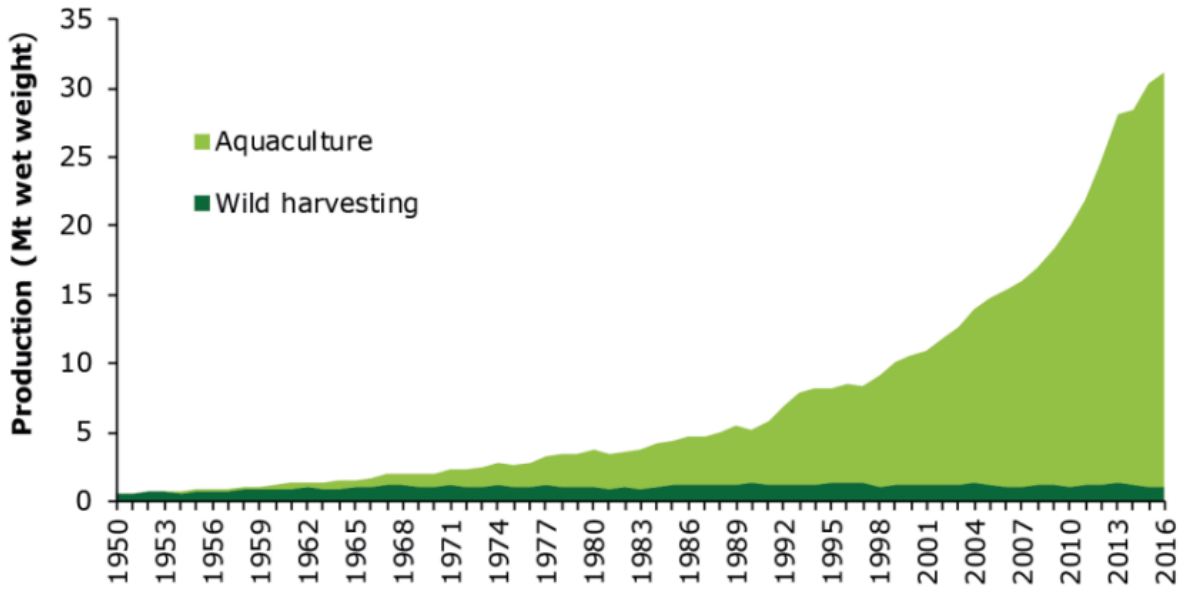
Das Unternehmen „Holvi Oy“ provoziert beispielsweise mit einer gewollt asymmetrischen Form starke Bewegungen des Hüllkörpers und steigert dadurch die Effektivität der Anlage. Abbildung 34 bildet das Konzept ab: Die Masse (in orange) rotiert um eine zentrale Welle, die mit dem Generator (in gelb) verbunden ist. Das Projekt wurde im Jahr 2021 auf der EMEC in Biscay marine energy platform (BiMEP)-Testfläche in ca. 2 sm Entfernung zur Küste für mehrere Monate getestet. Der Demonstrator war 44 m lang und wurde mit einer Kapazität von 0,6 MW eingeschätzt. Das Unternehmen beabsichtigt das Wellenkraftwerk, welches unter dem Namen „Penguin“ vermarktet wird, in mehreren Größen anzubieten, sodass es in Regionen mit mittleren bis hohen Wellen eingesetzt werden kann (Holvi Oy, o. J.).

8.1.3 Algenanbau zur Gewinnung von Biokraftstoffen

Biokraftstoffe aus Algen werden in der „Strategie zur Nutzung des Potentials der erneuerbaren Offshore-Energie für eine klimaneutrale Zukunft“ der Europäischen Kommission ebenfalls als vielversprechende Technologie angesehen, obgleich sich diese in einem frühen Entwicklungsstadium befindet (EK, 2020).

Prinzipiell wird zwischen Mikroalgen (mikroskopisch kleine Algen, Phytoplankton) und Makroalgen (Seetang) unterschieden. Der Anbau von Algen für die Gewinnung von Biokraftstoffen ist eine sehr neue Entwicklung, sodass Erträge des aktuellen Anbaus primär für die Lebensmittel- oder Kosmetikindustrie bestimmt sind (Araújo et al., 2021). Für den Anbau von Makroalgen auf See existieren bereits einige Projekte und die weltweite Produktion von Makroalgen aus Aquakulturen hat in den letzten Jahren zugenommen, wie in folgender Abbildung 35 dargestellt.

Abbildung 35: Globale Produktion von Biomasse aus Makroalgen

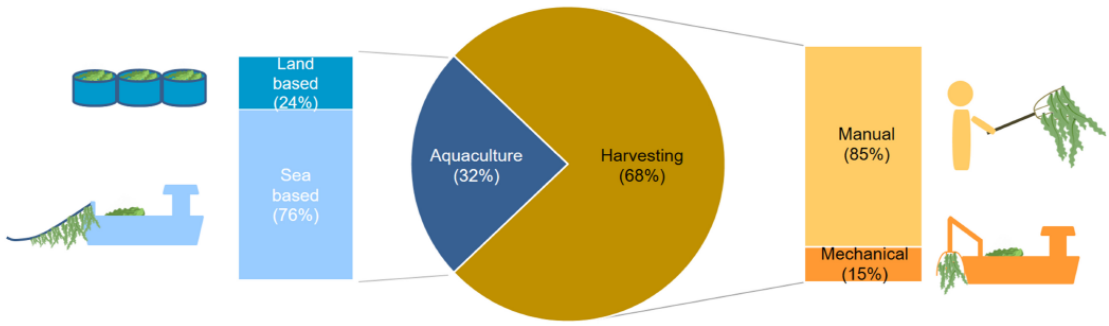


Quelle: (Joint Research Centre (JRC) for the European Commission's Knowledge Centre for Bioeconomy, 2019)

Weltweit wurden im Jahr 2016 32 Mt Biomasse aus Makroalgen produziert. Besonders in Indonesien wurde die Makroalgenproduktion in Aquakulturen seit Mitte der 2000er vervielfacht. In der EU wurden im gleichen Jahr 0,093 Mt, in Norwegen und auf Island 0,187 Mt Biomasse aus Makroalgen produziert. Dies entspricht 0,28 % und 0,57 % der globalen Produktion.

Die Makroalgenzucht in Aquakulturen wird in der EU von 32 % der Unternehmen eingesetzt, die sich auf die Produktion von Makroalgen spezialisiert haben. 68 % der Unternehmen in der EU ernten Makroalgen mit manuellen Erntetechniken und mit der Hand. Abbildung 36 zeigt die Verteilung der Erntemethoden in Europa im Jahr 2021.

Abbildung 36: Makroalgen-Produktionsmethoden in Europa (Anteil nach der Anzahl der Unternehmen, die diese Methoden anwenden)



Quelle: (Araújo et al., 2021)

Aquakulturen im Offshore-Bereich bergen durch die Entfernung zur Küste Nachteile hinsichtlich der Kontrollfähigkeit des Anbaus. Die Anbaufirma hat wenige Möglichkeiten, den Anbau aus der Ferne zu kontrollieren und zu steuern, sodass Ausfälle durch gerissene Leinen o.ä. verzögert festgestellt werden können. Weiterhin sind Algen in der Offshore-Kultivierung in keiner überwachten Umgebung, sodass das Risiko von Krankheiten gesteigert ist. Dementgegen steht die höhere Flächenverfügbarkeit auf See, sodass eine Hochskalierung des Anbaus besser umsetzbar

ist als auf vergleichbaren Flächen an Land oder in Küstennähe. Die meisten Aquakulturen für den Anbau von Makroalgen auf See befinden sich weltweit aktuell in küstennahen Gewässern oder Flachwasserbereichen (Araújo et al., 2021).

In der Nordsee könnte der Anbau von Zuckertang, einer Braunalgenart, zukünftig eine größere Rolle spielen. Zuckertang ist eine in Deutschland heimische Algenart, die im Winter heranwächst und im Frühling geerntet werden kann. Das Projekt „**UNITED**" hat erste Piloten für die Untersuchung der möglichen Kombination von Windenergie auf See und die Kultivierung von Seetang getestet (UNITED, o. J.). Die Erkenntnisse werden in das Folgeprojekt „**ULTFARMS**" übertragen, welches auf die Erhöhung der Produktionskapazitäten und entsprechender Anbautechniken für den kommerziellen Einsatz untersucht (ULTFARMS, 2023). Als Anbautechniken wurden im Projekt „UNITED" Konzepte mit einer Langleine und einem Netzaufbau eingesetzt. Interviewpartner innerhalb dieser Untersuchung gaben an, dass der Anbau mit Netzen mehr Biomasse förderte und im Hinblick auf die Erträge ergiebiger zu sein scheinen. Der Anbau werde mit hoher Wahrscheinlichkeit in absehbarer Zukunft nicht für die Gewinnung von Kraftstoffen aus Algen dienen, sondern weiterhin vorrangig in der Lebensmittel- und Chemieindustrie, sowie Pharma- und Futtermittelindustrie eingesetzt werden, sodass im Folgenden keine Bewertung des Ertragspotentials für die Gewinnung von Biokraftstoffen vorgenommen wird.

Nach Betrachtung der einzelnen Nutzungsoptionen erfolgt im folgenden Abschnitt die Berücksichtigung der Belange der Offshore-Windenergie. Die Technologien der Solar- und Wellenenergie auf See sind Formen der Erneuerbaren Energieerzeugung, deren technologische Entwicklung weniger weit vorangeschritten ist als die der Windenergie auf See. Wie in den voran gegangen Abschnitten 8.1.1 und 8.1.2 erläutert, befinden sich die Technologien noch in der Entwicklung. Entsprechend gering sind aus diesem Grund auch die praktischen Erfahrungswerte im Hinblick auf Mehrfachnutzungskonzepte mit der Windenergie auf See. Dies gilt ebenso für die marine Algenzucht (für Energieerzeugung).

8.2 Ausgangsbedingungen im Hinblick auf die potentielle Mehrfachnutzung

Grundsätzlich bietet die Ausgestaltung von Mehrfachnutzungskonzepten mit Offshore-Windenergie und weiteren erneuerbaren Energien eine Vielzahl an Möglichkeiten und Kombinationen, welche Synergien erzeugen können. Mögliche Schnittstellen sind in verschiedenen Bereichen entlang des gesamten Lebenszyklus der Projekte (z.B. Infrastrukturnutzungen, Planungsprozesse, usw.) denkbar. Die einzelnen Schnittstellen bergen verschiedene Chancen und Herausforderungen, die nachfolgend erläutert werden. Die Erläuterungen beziehen sich dabei auf alle drei in den vorangegangenen Abschnitten behandelten Nutzungsoptionen, da sich die übergeordneten Schnittstellen in vielen Fällen ähneln. Grundlage für nachfolgenden Erläuterungen sind die Experteninterviews mit Akteuren der jeweiligen Branche.

- Fläche

  Die gemeinsame Nutzung einer Fläche durch zwei unterschiedliche Nutzungsformen stellt die Grundbedingung für eine Mehrfachnutzung dar. In der deutschen AWZ sind große Gebiete für Windenergie aus See ausgewiesen. Die Größe der Gebiete und Flächen hat deutlich zugenommen, in der diesjährigen Ausschreibung sind Projektflächen von bis zu 200 km^2 ausgeschrieben. Mit der voranschreitenden Anlagenentwicklung nimmt auch der Platz zwischen den einzelnen Windenergieanlagen innerhalb eines Windenergieprojekts zu, der Abstand der Windenergieanlagen zueinander beträgt etwa den 5- bis 7-fachen Rotordurchmesser. Aus diesem Grund wäre das Flächenangebot für zusätzliche Anlagen wie in den vorangegangenen Abschnitten dargestellt zwischen den Windenergieanlagen grundsätzlich

ausreichend, denn sowohl PV- und Wellenergieanlagen als auch Einrichtungen für die Algenzucht benötigen Flächen auf und unter der Wasseroberfläche in einem begrenzten Umfang.

- Infrastruktur (Gründung)

Um Windenergieanlagen auf See zu fixieren, werden diese in Deutschland überwiegend mit massiven Monopiles fest und dauerhaft im Meeresboden verankert. Im Gegensatz dazu sind schwimmende PV- und Wellenenergieanlagen mit weitaus weniger aufwändig zu installierender Verankerung am Meeresboden fixiert. Die Anlagen könnten während der Projektdauer bei Bedarf ausgetauscht oder im Nachhinein an einen anderen Standort gebracht werden. Grundsätzlich könnten PV- und Wellenenergieanlagen sowie Anlagen zur Algenzucht innerhalb der Windparks in die Flächen zwischen den Windenergieanlagen platziert werden.

Die Verankerung von PV- und Wellenenergieanlagen und Anlagen zur Algenzucht kann ähnlich gestaltet werden. Es muss sichergestellt werden, dass die Anlagen sich nicht losreißen und abdriften. Die Verankerung ist standortspezifisch und hängt von den Bodenverhältnissen ab. Prinzipiell können standortfeste Verankerungen (beispielsweise Schraub- oder Pfahlverankungen) oder nicht stationäre Anker (beispielsweise Klumpengewichte „Clump Weights“ oder Wurfanker) eingesetzt werden. Akteure aus dem Bereich der Meeresenergie sehen hier entsprechend unterschiedliche Möglichkeiten zur Befestigung. Dabei wird das zusätzliche Gewicht aufgrund des erwartbaren Bewuchses mit Biomasse an den Ankerleinen oder -ketten ebenfalls berücksichtigt. Die Befestigung soll im Rahmen der Wartungen gemonitort und bei Bedarf gereinigt oder ersetzt werden. Die Verankerungen im Meeresboden für die PV-, Wellenenergie- und Algenzuchtanlagen müssten in einem ausreichenden Sicherheitsabstand zu der Innerparkverkabelung des Windparks platziert werden, welcher mit dem Windparkbetreiber abzustimmen ist.

- Infrastruktur (Netzanbindung)

Für die Gestaltung des Netzanschlusses von PV- und Wellenenergieanlagen sind unterschiedliche Lösungen denkbar. Die Solar- und Wellenkraftwerke könnten an eine Windenergieanlage, die Innerparkverkabelung oder an die Konverterplattform des Windparks angeschlossen werden. Bei Anschluss an die Innerparkverkabelung muss beispielsweise die Spannung der Innerparkverkabelung des Windparks mittels Transformation erreicht werden (künftig 66 kV Standard, perspektivisch 132 kV). Im Hinblick auf die Optimierung der Auslastung der Netzanbindung bedarf es genauerer Untersuchungen bezüglich der Dimensionierung der PV- und Wellenenergieanlagen. Die Regelungen im FEP sehen vor, dass die installierte Leistung auf der Windenergiefläche die zugewiesene Kapazität der Netzanbindung um 10 % („Overplanting“) überschreiten darf, ohne dass ein zusätzlicher Nachweis zur Einhaltung des 2 K-Kriteriums erbracht werden muss.

- Schiffs- und Hafenkapazitäten

Aufgrund ähnlicher Belange der Akteure könnten sich Synergien im Bereich der Nutzung von einzusetzenden Schiffen und benötigten Hafenflächen ergeben. Nach der Vormontage der PV- und Wellenenergieanlagen an Land sind (Hochsee-)Schlepper und keine speziellen Installationsschiffe oder -ausrüstung notwendig, im Gegensatz zur Installation von Windenergieanlagen. In diesem spezialisierten Segment des Schiffsmarktes würden die PV- und Wellenenergieanlagen damit keine zusätzlichen Kapazitäten nachfragen. Mobilisierungs- und Demobilisierungskosten für Flächen und Wartungsschiffe könnten durch ein gemeinsames Projekt geteilt werden. Neben Schiffskapazitäten könnten Flächen in Häfen, insbesondere während der Betriebsphase, ebenfalls projektgemeinschaftlich genutzt werden.

- Planung

  In der Planungsphase eines Windparks in Kombination mit PV-, Wellenenergie- und Algenzuchtanlagen könnten große Synergien erzeugt werden, denn die Akteure können Planungsprozesse gemeinsam durchführen. Unter anderem könnten die Kosten und Aufwände für die Voruntersuchungen der Flächen auf See geteilt werden und die Genehmigungsverfahren gemeinsam durchlaufen werden. Experten*innen befürchten jedoch weiterhin, dass sich die Planungsprozesse durch die verschiedenen Technologien komplizierter und langwieriger gestalten könnten. Ansätze wie der niederländische Flächenpass (s. Abschnitt 5.8), der mögliche Bereiche für Mehrfachnutzungen innerhalb der Windparks ausweist, könnten einen stringenten Prozess ermöglichen.

- Personal

  Mehrfachnutzungskonzepte könnten auch Synergien im Bereich der Personalressourcen schaffen. Planungsmanagement, Projektmanagement und Installationsmanagement können in der frühen Phase gebündelt werden. In spätere Phasen und in der Betriebsphase der Projekte können Monitoring- und Wartungsaufgaben gemeinsam effizienter und ressourcenschonend geplant und umgesetzt werden.

Die Anzahl und Ausgestaltung der aufgeführten Schnittstellen in möglichen Mehrfachnutzungskonzepten hängt insbesondere von zwei wesentlichen Einflussfaktoren ab:

- Zeitpunkt des Beginns der Mehrfachnutzung: Die Integration einer zweiten Nutzungsform in einen bestehenden Windpark wird von Experten*innen als schwieriger betrachtet. Die Strukturen sind bereits geschaffen, Konzepte aufgebaut und eine Implementierung von PV-, Wellenenergie- und Algenzuchtanlagen als zusätzlicher Akteur bringt neue Risiken in den bestehenden Windpark, die vorher nicht einkalkuliert wurden. Es ist davon auszugehen, dass mehr Synergien geschaffen werden können, wenn ein Mehrfachnutzungskonzept direkt zu Beginn der Windparkentwicklung ein- und mitgeplant wird.
- Akteursstruktur: Die Implementierung eines Mehrfachnutzungskonzept scheint wahrscheinlicher und mit mehr Synergien verbunden, wenn nicht zwei getrennte, sondern lediglich eine Projektgesellschaft sowohl die Windenergie als auch die zusätzliche Nutzungsformen plant und betreibt.

Insgesamt können Mehrfachnutzungskonzepte der hybriden Energieerzeugung und die damit verbundene stärkere Nutzung einer Fläche dazu führen, das andere Akteure die Fläche erschwert oder gar nicht mehr nutzen können, beispielsweise könnte die Durchfahrt für Schiffe der passiven Fischerei, (Fischerei-)Forschung und Verteidigung erschwert werden. Der Kommunikationsaufwand und das Unfall- und Kollisionsrisiko könnten sich durch die Mehrfachnutzung erhöhen bzw. sind durch geeignete Regelungen zu adressieren.

8.3 Einschätzung der Potentiale

Im Folgenden erfolgt eine Einschätzung zu den Potentialen eine hybriden Energieerzeugung zwischen Windenergie auf See und einer weiteren Erzeugungsform. Hierzu werden zunächst einige grundlegende Voraussetzungen und Annahmen vorgestellt, die als Grundlage der in Abschnitt 8.3.1 erfolgenden Abschätzung der Ertragspotentiale dienen.

Die Analyse in Abschnitt 8.1 hat einerseits ergeben, dass bisher noch wenig Erfahrungswerte aus der Praxis für hybride Energiekonzepte aus Offshore-Wind und Floating-PV/Wellenenergie vorliegen. Es hat sich noch kein Ansatz/Konzept etabliert, das sich auf alle Windparks übertragen

ließe. Vielmehr scheinen derzeit viele verschiedene Konzepte denkbar. Andererseits hat die vertiefte Analyse auch ergeben, dass die hybride Auslegung von Offshore-Flächen im Hinblick auf die Energieerzeugung zwei Hauptpotentiale bietet: Die höhere Ausnutzung der bestehenden Windflächen und die verbesserte Auslastung der Netzanbindung mit einer verstetigten Einspeisung. Letzteres gewinnt nochmals an Bedeutung, seitdem ein verbessertes Verständnis über die Auswirkungen großräumiger Abschattung auf zukünftige Offshore-Winderträge und die dadurch zu erwartenden verminderten Volllaststunden besteht.

Unstrittig ist, dass sich in hybriden Konzepten die unterjährigen Einspeiseschwankungen reduzieren lassen. Für das Beispiel eines Hybridparks mit Windenergie und PV besteht eine Antikorrelation zwischen dem zur Verfügung stehenden Windpotential und der Sonneneinstrahlung, wodurch sich ein gleichmäßigeres Einspeiseverhalten im Vergleich zu einem technologiespezifischen Park ergibt. Die Auslegung kann hierbei grundsätzlich dem Ziel

- einer maximalen Leistungsdichte auf einer zur Verfügung stehenden Fläche oder
- einer möglichst optimalen Ausnutzung einer zur Verfügung stehenden Anbindungsleistung folgen.

Eine große Rolle bei der Entscheidung für die genaue Auslegung eines Hybridparks spielen zudem natürlich ökonomische Gesichtspunkte, das Projekt wird hinsichtlich seiner Kosten und des Ertrags sowie der in Kauf zu nehmenden Abregelungen aufgrund von der begrenzten Netzanbindung optimiert. Grundsätzlich ist darauf hinzuweisen, dass sich die rechtlichen Rahmenbedingungen zur Ermöglichung von Hybridpark-Konstellationen auf See verändern müssten (s. Abschnitt 8.4). Aus technischer Sicht erscheinen diese machbar, auch wenn die praktischen Erfahrungen bisher begrenzt sind. Hinsichtlich der Netzanbindung zusätzlicher EE-Anlagen sind verschiedene Varianten denkbar:

- Anschluss der zusätzlichen EE-Anlagen an die Konverterstation des Windparks
- Anschluss der zusätzlichen EE-Anlagen an die Innerparkverkabelung
- Anschluss der zusätzlichen EE-Anlagen an die Windenergieanlagen

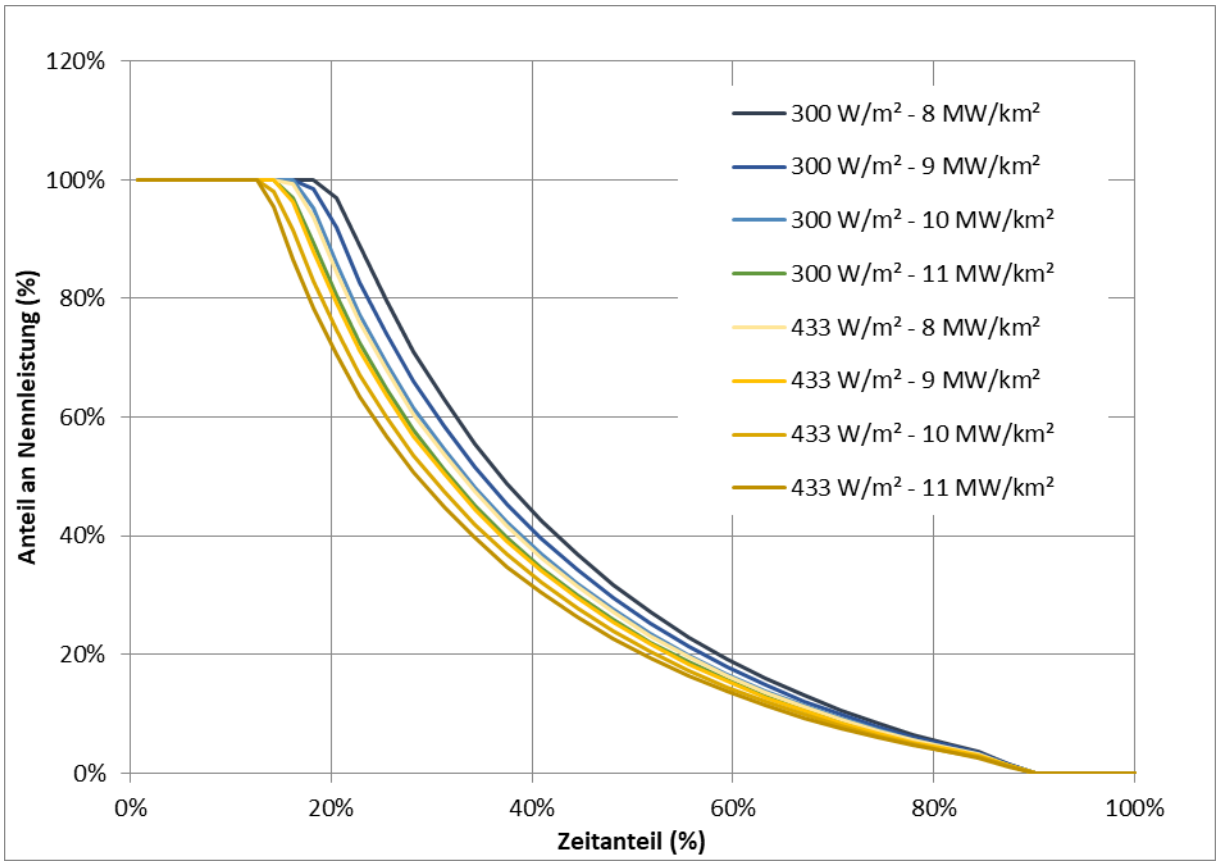
In allen Varianten werden die EE-Anlagen mit einer eigenen Verankerung am Meeresboden installiert und entsprechende Sicherheitsabstände um die Windenergieanlagen, EE-Anlagen und Konverterstationen sind einzuhalten. Darüber hinaus müssen die zusätzlichen EE-Anlagen die entsprechende Spannungsebene der Windparks (z.B. 66 kV) einhalten, sodass Transformatoren und Wechselrichter (möglichst direkt auf der EE-Anlage) notwendig sind. Technisch sind diese Anforderungen grundsätzlich lösbar, projektspezifisch müsste die jeweils wirtschaftlichste Variante für den Anschluss der EE-Anlagen gefunden werden.

Im Hinblick auf die Auslastung der vorhandenen Netzanbindungssysteme wurden zunächst die Leistungsdauerlinien der Offshore-Windenergie untersucht. Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens wurden auf Basis des KEBA-Modells die Ertragspotentiale verschiedener Ausbau- und Auslegungsvarianten der Windenergie auf See unter Berücksichtigung zu erwartender großräumiger Abschattungsverluste eingeschätzt (Kapitel 2). Aus den Ergebnissen wurden Leistungsdauerlinien generiert, die generelle Aussagen über die durchschnittliche Auslastung der Windparks in der jeweiligen Auslegungsvariante ermöglichen. Diese zeigen, dass je nach Auslegung die Offshore-Windenergieanlagen zu 80-86 % des Jahres im Teillastbereich produzieren. Vergleicht man unterschiedliche Auslegungsvarianten, so kann ein Park

- bei gleicher Leistungsdichte und Anlagenanzahl mit einer geringeren spezifischen Flächenleistung höhere Volllaststunden und einen optimierten Teillastbetrieb erreichen.
- bei gleicher spezifischer Flächenleistung der Anlagen und geringerer Leistungsdichte einen sehr ähnlichen Effekt erzielen.

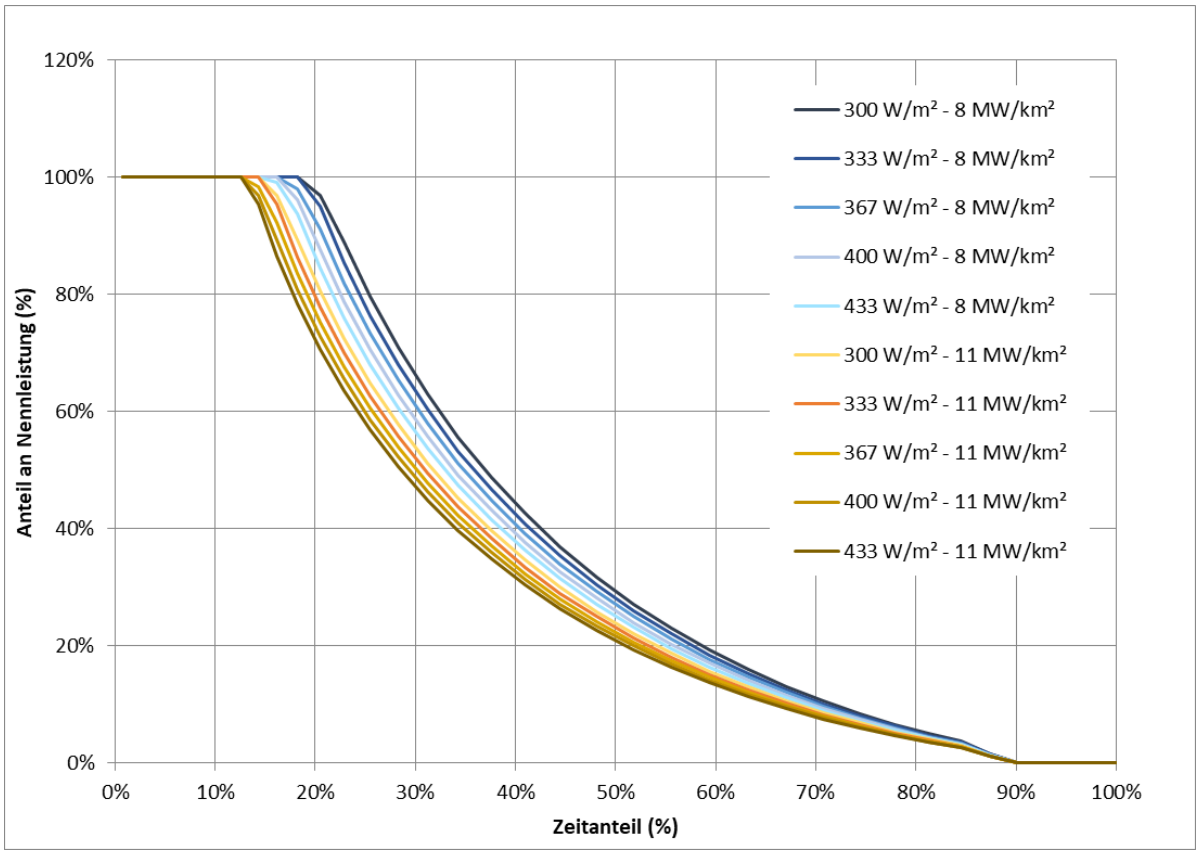
Dies zeigen die für verschiedene Auslegungsvarianten erstellten Leistungsdauerlinien (Abbildung 37 und Abbildung 38) Es werden hier immer jene Varianten verglichen, die die Gesamt-Spannweite aufzeigen.

Abbildung 37: Leistungsdauerlinien Offshore-Windenergie für Variationen der Leistungsdichte



Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Abbildung 38: Leistungsdauerlinien Offshore-Windenergie für Variationen der spezifischen Flächenleistung



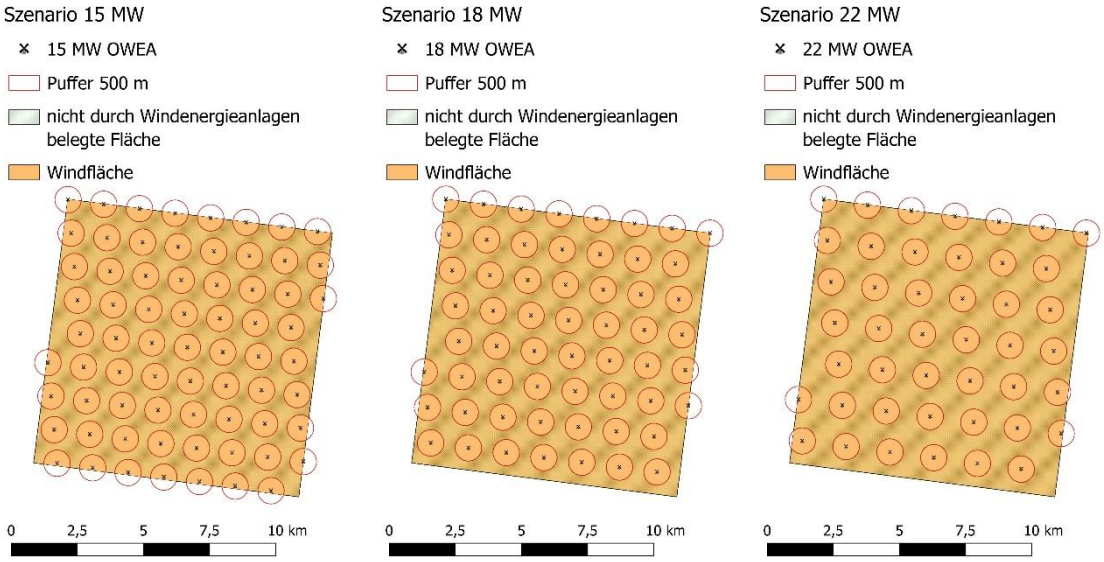
Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Das bedeutet auch, dass zu 80-86 % der Zeit eine zusätzliche Einspeisung durch PV- oder Wellenenergie-Anlagen erfolgen könnte. Da beispielsweise PV-Anlangen nur bei Sonneneinstrahlung Erträge generieren, können diese grundsätzlich in etwa 50 % der Zeit arbeiten (mit unterschiedlichen Energiemengen, je nach Einstrahlung). Diese Strommengen können zusätzlich eingespeist werden, wenn zu diesen Zeiten keine Volleinspeisung der Windenergieanlagen erfolgt. Dabei unterstützen verschiedene Tools beim Monitoring des Einspeiseverhalten der Anlagen sowie bei der Steuerung der Anlagen.

Neben der Betrachtung der Netzkapazitäten ist die Größe der nutzbaren Flächen für die hybride Energieerzeugung in einem Windpark zu betrachten. Bisher ist nicht bekannt, wie genau Hybridparks in der deutschen AWZ aufgebaut sein werden. Entsprechend werden im Folgenden Beispiel-Konstellationen hergeleitet, anhand derer zentrale Zusammenhänge im Hinblick auf Ertragspotentiale und voraussichtlich abzuregelnde Strommengen gezeigt werden können, die sich aus unterschiedlichen Anteilen von Windenergie- und PV- oder Wellenenergie-Anlagen ergeben. Zur Ableitung des Potentials zur Installation von PV- oder Wellenenergie-Anlagen in einem Offshore-Windpark, wurden zunächst auf einer Beispiel-Windparkfläche mit einer Größe von 100 km^2 exemplarische Windparklayouts mit verschiedenen Anlagen mit unterschiedlicher Nennleistung generiert. Die Flächengröße orientiert sich hierbei an Flächen in Zone 3 der AWZ, die ab 2030 in die Umsetzung gehen sollen. Diese Flächen sollen über 2 GW-Plattformen ans Netz angeschlossen werden, laut FEP 2023 werden die einzelnen Flächen zwischen 500 und 2.000 MW installierter Leistung haben. Dies wird auch im vorliegenden Beispiel mit 1.000 MW

installierter Leistung so angenommen. Abbildung 39 stellt die Ergebnisse dar. Eine detaillierte Darstellung ist dem Anhang A.6 entnehmbar.

Abbildung 39: Szenarien für eine Flächenanalyse für hybride Energieerzeugung auf einer generischen Windparkfläche (100km²)



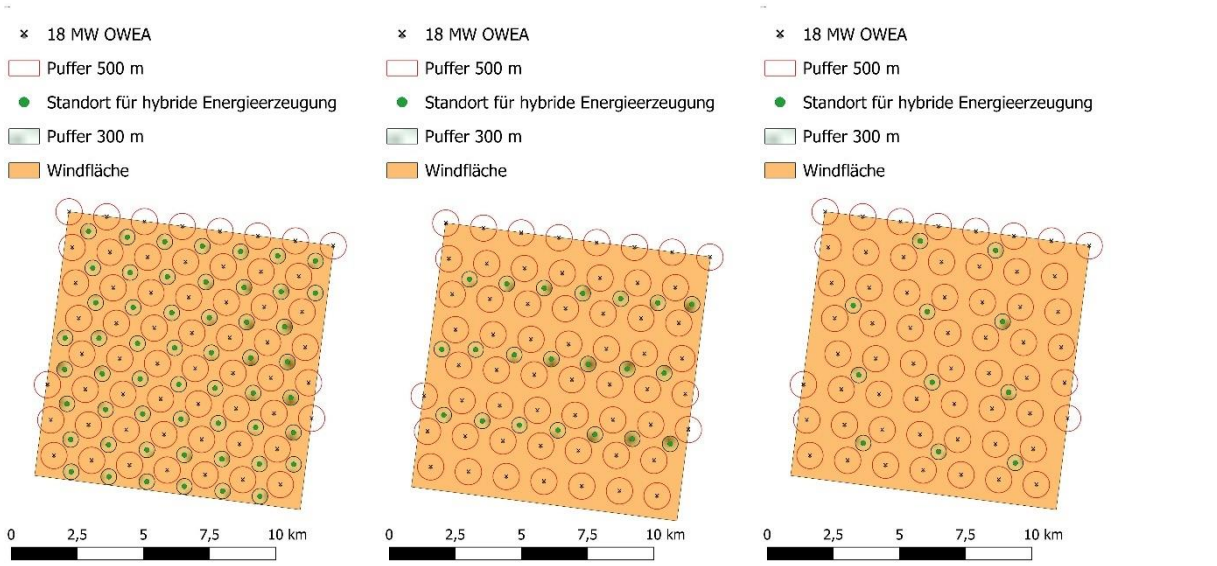
Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Es wurde berücksichtigt, dass nach Expertenmeinungen in einem Abstand von 500 m um die Windenergieanlagen voraussichtlich keine PV- oder Wellenenergieanlagen platziert werden können. Dieser Abstand wurde angegeben, da Schiffe in nächster Nähe problemlos für Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten, Großkomponententausch oder Rettungsaktivitäten manövrieren können müssen. Ein Abstand von 500 m kann als großräumige Pufferzone angesehen werden, da Schiffe, die für den Tausch von Großkomponenten eingesetzt werden können, in absehbarer Zeit, nicht länger oder breiter als ca. 250 m sein werden.

In Abbildung 40 wird deutlich, dass unter Einsatz zukünftiger Windenergieanlagen mit größeren Rotordurchmessern und entsprechend größeren Abständen zwischen den Windenergieanlagen zunehmende Anteile der Gesamtfläche frei von Bebauung bleiben. In Anhang A.6 sind ergänzend zu Abbildung 40 exemplarisch einzelne Abstände zwischen den Anlagen zur Verdeutlichung der Dimensionen dargestellt. Beispielsweise beträgt im Szenario mit 15 MW OWEA der Abstand zur nächstgelegenen Windenergieanlage in Hauptwindrichtung ca. 1.650 m, für eine 22 MW OWEA beträgt der Abstand ca. 2.000 m. Allerdings sind die freibleibenden Flächen zwischen den Offshore-Windenergieanlagen nicht gänzlich als Flächen für hybride Energieerzeugung nutzbar, da sowohl Windenergieanlagen als auch weitere EE-Anlagen zugänglich sein müssen und entsprechende Korridore für die (Wartungs-)Schiffe freigehalten werden müssen. Am Standort der EE-Anlage muss gewährleistet sein, dass die Anlage selbst (ca. 200 m), eine Zone für die Ankerleinen oder -ketten (ca. 150 m) und eine zusätzliche Sicherheitszone (ca. 50 m) platziert werden können. Zur Berücksichtigung all dieser Bedarfe wurde ein Puffer von 300 m um einen möglichen Standort für EE-Anlagen eingeführt. (vgl. Schneider et al., 2023). Im Folgenden werden mögliche Beispiel-Layouts von Hybridwindparks entworfen, die eine unterschiedliche Nutzungsintensität vorsehen, die durch unterschiedliche Annahmen hinsichtlich notwendiger Schifffahrtskorridore definiert sind (Abbildung 40 zeigt dies am Beispiel eines Windparks mit 18 MW-

Anlagen). Es wird zwischen einer maximalen, mittleren und minimalen Flächenausnutzung unterschieden. Je höher die Flächenausnutzung ist, desto weniger großzügig sind die Durchfahrtsmöglichkeiten für Schiffe. Bei maximaler Flächenausnutzung können die meisten EE-Anlagen platziert werden, aber es bleibt kein großzügiger Durchfahrtskorridor frei. Bei mittlerer Flächenausnutzung ist die Anzahl an platzierbaren EE-Anlagen bereits deutlich eingeschränkt, aber es bleiben parallel verlaufende breite Durchfahrtswege frei. Bei minimaler Flächenausnutzung können Schiffe die EE-Anlagen von allen Seiten frei anfahren und die meisten Durchfahrtswege bleiben vollständig frei. In jedem der Layouts wurde berücksichtigt, dass eine Anfahrt an die Offshore-Windenergieanlagen und auch an weitere EE-Anlagen für Wartungs-, Prüf- und Reparatureinsätze gewährleistet ist.

Abbildung 40: Mögliche Standorte für hybride Energieerzeugung in einem generischen Windpark bei unterschiedlicher Flächenausnutzungen (OWEA 18MW)



Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Anhand der im Anhang A.7 gezeigten Fallbeispiele, die auch die Nutzung von 15 MW- und alternativ 22 MW-Anlagen abbilden, wird verdeutlicht, welchen Einfluss die Berücksichtigung von unterschiedlichen Anlagentechnologien und Schifffahrtskorridoren auf die Anzahl von installierbaren zusätzlichen EE-Anlagen hat. Für die aufgeführten Szenarien ergeben sich die in der folgenden Tabelle 22 gelisteten Anzahlen an Standortmöglichkeiten für zusätzliche EE-Anlagen in den betrachteten Windpark-Konstellationen.

Tabelle 22: Anzahl möglicher Standorte für zusätzliche EE-Anlagen in einem generischen Windpark

Szenario	Anzahl möglicher Standorte bei maximale Flächenausnutzung	Anzahl möglicher Standorte bei mittlerer Flächenausnutzung	Anzahl möglicher Standorte bei minimaler Flächenausnutzung
15 MW	57	22	12
18 MW	54	21	11
22 MW	111	70	11

Im Folgenden wird anhand des Beispiels von Floating PV-Anlagen in einem Offshore-Windpark betrachtet, welches Ertragspotential sich in den oben gezeigten Beispiel-Konstellationen für derartige Hybridparks ergeben könnte und wie die Einspeisungen miteinander korrespondieren.

8.3.1 Ertragspotential für Windenergie auf See und Solarenergie

Die oben gezeigten möglichen Standortkonstellationen für hybride Energieerzeugung in einem generischen Windpark bei unterschiedlichen Windenergieanlagentechnologien und Flächenausnutzungen werden im Folgenden genutzt, um anhand von Einspeise-Simulationen Rückschlüsse im Hinblick auf die korrespondierende Erzeugungsstruktur der Windenergie- und PV-Anlagen und die Höhe der zu erwartenden Abregelungen, die aus der limitierten Netzkapazität (im vorliegenden Beispiel 1.000 MW) resultieren, zu ziehen. Hierfür wurden für die Offshore-Windenergie Daten der Forschungsstation FINO 1 verwendet und für die PV SARAH2 Satellitendaten, die durch das „PV GIS Information System" der europäischen Kommission bereitgestellt werden.[262] Es wurde das Referenzjahr 2006 verwendet und für beide Technologien mit Stundenmittelwerten gerechnet.

Die Berechnungen wurden für die bereits in Tabelle 22 gezeigten neun Fallkonstellationen durchgeführt. Jeder potentielle Standort für zusätzliche EE-Anlagen wurde hierbei mit PV-Modulen mit einer Leistung von jeweils etwa 9 MW bestückt. Diese Anlagengröße ergibt sich aus der räumlich möglichen Größe unter Berücksichtigung entsprechender Pufferabstände und wird zudem durch ähnliche Annahmen einer weiteren wissenschaftlichen Analyse gestützt (Schneider et al., 2023).

Die Abschätzung der Einspeisung für die unterschiedlichen Offshore-Windparkauslegungen (Anlagentechnologie mit 15, 18 und 22 MW) erfolgte unter Verwendung der Systematik des KEBA-Modells, um Annahmen zum Einfluss der großräumigen Abschattung zwischen Offshore-Windenergieanlagen in der deutschen AWZ berücksichtigen zu können. Zudem wurden für die Windenergie Verfügbarkeitsverluste von 5 % unterstellt, analog zu einer aktuellen wissenschaftlichen Analyse, die sich mit den Stromgestehungskosten von Offshore-Windenergieanlagen beschäftigt. (Leonard Krampe et al., 2023)

Die potentielle PV-Einspeisung wird dem „PV GIS Information System“ der europäischen Kommission entnommen, hierbei wird die Verwendung der kristalline Siliziumtechnologie unterstellt und Verfügbarkeitsverluste von 14 % angenommen. Diese entsprechen der Plattform zufolge einem realistischen Wert für PV-Freiflächenanlagen an Land. Da die Erkenntnisse zu Verfügbarkeitsverlusten aufgrund von beispielweise Vogelkot und Versalzung bei PV-Modulen auf See noch begrenzt sind und eine Reihe weiterer Unsicherheiten bestehen, wird der Wert für die vorliegenden Berechnungen beibehalten. Es wurde zudem überprüft, dass die Berechnungen sehr wenig sensibel auf eine Variation dieser Annahme reagieren.

Die folgende Tabelle 23 zeigt eine Übersicht der im Rahmen der Simulationen ermittelten Ergebnisse für die betrachteten Fallkonstellationen.

[262] Räumliche Auflösung der Daten: 0.05° x 0.05° (~ 5 km), die Daten beinhalten Europa, Afrika, Großteile Asiens und Teile Südamerikas. (*PVGIS User Manual - European Commission*, 2024)

Tabelle 23: Fallbeispiele für Hybrid-Erzeugung – Gesamtertrag und Abregelungen (Bezugsjahr 2006)

Technologie	15 MW Windenergieanlagen			18 MW Windenergieanlagen			22 MW Windenergieanlagen		
Flächenauslastung	Maximal	Mittel	Minimal	Maximal	Mittel	Minimal	Maximal	Mittel	Minimal
WE-Kapazität (MW)	1.035	1.035	1.035	1.008	1.008	1.008	968	968	968
PV-Kapazität (MW)	519	200	109	491	191	100	1.010	637	100
PV-Leistung im Verhältnis zur WE-Leistung (%)	50	19	11	49	19	10	104	66	10
Errechneter Gesamtertrag 2006 (GWh)	4.093	3.882	3.790	3.947	3.642	3.550	4.417	4.038	3.493
Ertragssteigerung Hybrid-Auslegung (%)	13,3	5,1	2,9	13,0	5,4	2,9	26,6	17,6	3,0
Abgeregelter PV-Ertrag (GWh)	52,7	14,6	5,6	38,0	6,8	1,4	122,5	48,5	0,002
Anteil Abregelung am potentiellen Gesamtertrag (%)	1,29	0,38	0,15	0,96	0,19	0,04	2,77	1,2	0,00
Anteil Abregelung am potentiellen PV-Ertrag (%)	10,0	7,2	5,0	7,6	3,5	1,3	11,9	7,5	0,0

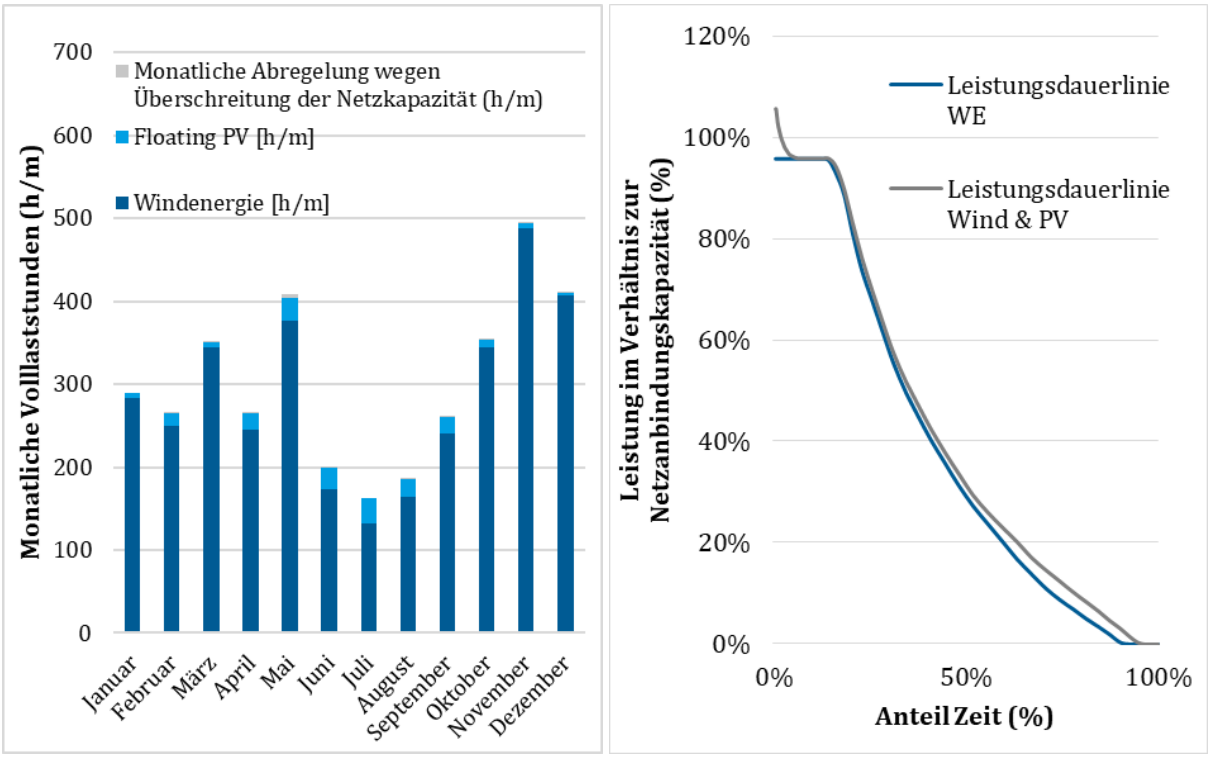
Das heißt, anhand der generischen Beispielwindparkkonstellationen (unter Verwendung dreier unterschiedlicher Anlagentechnologien auf einer Fläche von 100 km^2) und der sich hierfür ergebenden Standortmöglichkeiten für eine weitere EE-Erzeugung wurde insbesondere untersucht, welche Ertragspotentiale und Abregelungsnotwendigkeiten sich bei begrenzter Netzanbindungskapazität für jeden dieser Fälle ergeben. Die Ertragssteigerungen, die sich durch die hybride Bebauung im Vergleich zu einem reinen OWP erreichen lassen, liegen in den Beispielfällen zwischen rund 3 und 27 %. Wenn die installierte PV-Leistung etwa der Hälfte der Windparkleistung entspricht (Fälle mit einem Anteil von 49 % und 50 %), werden Ertragssteigerungen um 13 % errechnet; entspricht sie einem Fünftel der Windparkleistung, liegen die Steigerungen bei rund 5 %. Die Abregelungsverluste, die sich ergeben, liegen zwischen 0 % und 3 % des Gesamtertrags des Hybrid-Parks. Der Wert von ca. 3 % Abregelung ergibt sich für den Beispielfall, in dem die installierte PV-Leistung etwa der Windenergieleistung entspricht. Liegt diese nur bei 49 % bzw. 50 % der Windparkleistung, werden Abregelungsverluste in Höhe von ca. 1 % errechnet. Beträgt der PV-Anteil ca. 20 % der Windparkleistung, bewegen sich die Abregelungsverluste unter 1 %. Falls ein PV-Zubau abweichend davon nur in einer Größenordnung des Overplantings (max. 10 % der Windparkleistung) erfolgen sollte, sind die Verluste entsprechend noch geringer und tendenziell vernachlässigbar. Wird allein die Situation des PV-Parks betrachtet, ist der Anteil des potentiellen PV-Ertrags, der abgeregelt werden müsste, naturgemäß größer und liegt in den Beispielfällen mit mittlerer Flächenausnutzung je nach Technologieauslegung des Windparks zwischen 4 % und 8 %.

Eine ähnliche Untersuchung zu den Auswirkungen von Hybrid-Parks auf die Netzanbindungsauslastung nahmen Golroodbari et al. (2021) für einen Standort in der niederländischen Nordsee (Borssele I+II) vor. Allerdings ist es in dem dort betrachteten Fall so, dass die Netzanbindungskapazität die Windparkleistung um rund 7 % unterschreitet. Aufgrund dessen lastet der Windpark die Netzanbindung bereits besser aus, womit zu erwarten ist, dass die Abregelungsverluste bei der PV etwas höher sind. Für den Fall einer PV-Kapazität in Höhe von etwa der Hälfte der Windparkleistung wurde beispielsweise durch Golroodbari et al. (2021) errechnet, dass die Abregelungsverluste im Bereich der PV rund 2,3 % von dem eingespeisten

Gesamtertrag betragen. Dies ist 1 Prozentpunkt mehr, als in Tabelle 23 für ein vergleichbares Fallbeispiel berechnet wurde, in dem die Netzanbindungsleistung der Windparkleistung entspricht, womit der Ergebnisvergleich den Erwartungen entspricht.

Die in Tabelle 23 dargestellten Ergebnisse lassen sich grafisch aufbereiten, was im Folgenden für den Fall der 18 MW-Windenergieanlagentechnologie bei einer mittleren Flächenauslastung durch zusätzliche PV-Anlagen geschieht. Zunächst wird in Abbildung 41 gezeigt, wie sich die monatliche Einspeisung verändert sowie welche Veränderung die Leistungsdauerlinie im Vergleich zu einem reinen Offshore-Windpark erfährt.

Abbildung 41: Monatliche Einspeisung eines Beispiel-Hybridparks (1.008 MW Windenergie und 191 MW PV-Leistung) und sich ergebende Leistungsdauerlinie im Vergleich zu einem reinen Offshore-Windpark (Bezugsjahr 2006)

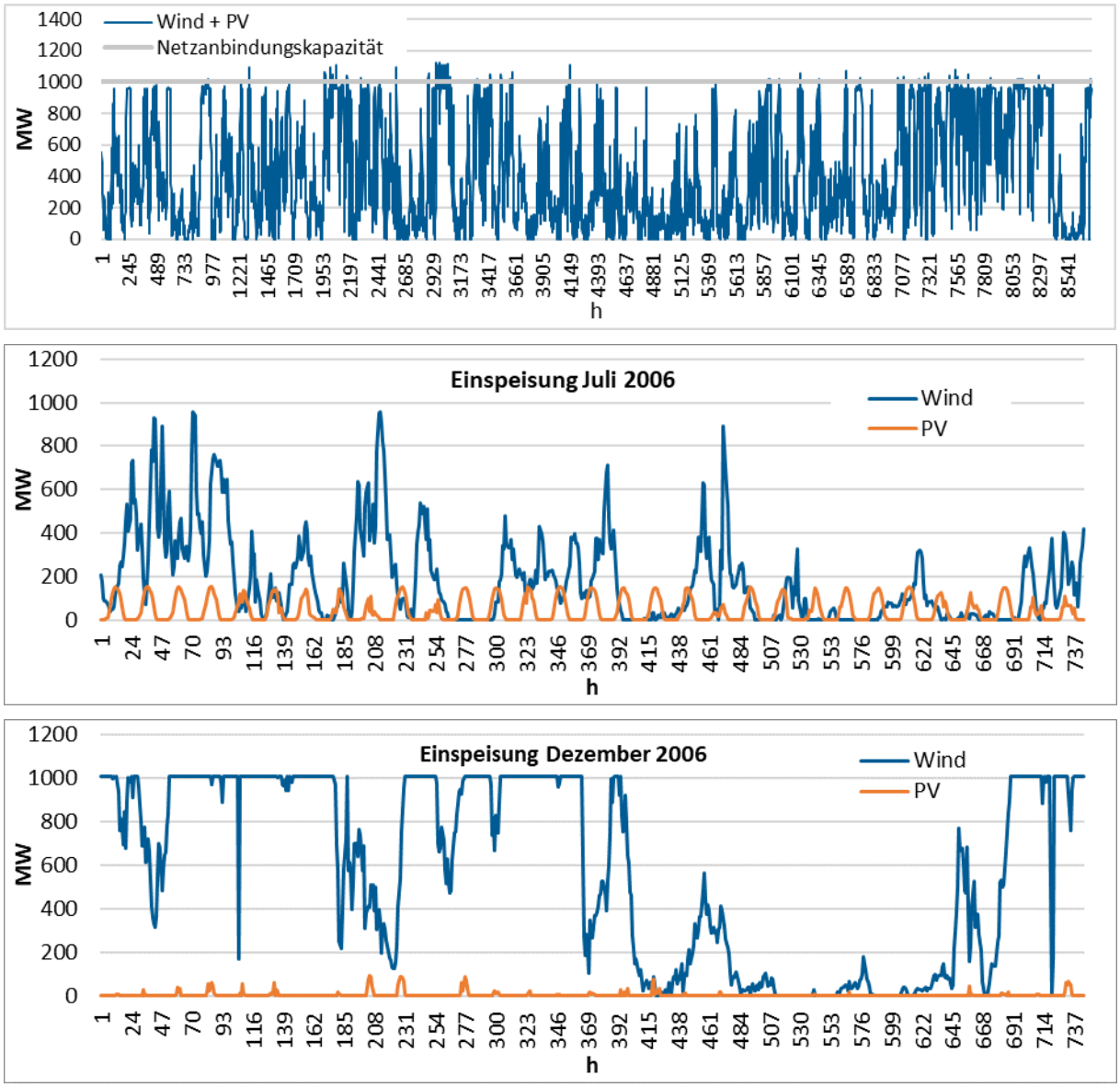


Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Es wird deutlich, dass vor allem in den Frühjahr- und Sommermonaten, wenn die Windenergie-Erzeugung in der Regel geringer als im Herbst und Winter ist (im Beispiel-Jahr 2006 bildet der Mai eine Ausnahme), die monatlichen Erträge und damit die Auslastung der Netzanbindung gesteigert werden kann. Die Leistungsdauerlinie zeigt, dass sich die Auslastung im Teillastbereich spürbar verbessert und sich die oberhalb von 100 % Netzanbindungskapazität bewegenden Eintrittsfälle auf einem sehr geringen Niveau bewegen (in 6 % der Jahresstunden treten diese auf).

Ergänzend dazu wird in Abbildung 42 ein Blick auf den Einspeiseverlauf übers Jahr sowie in einzelnen Beispielmonaten in stündlicher Auslösung gezeigt.

Abbildung 42: Einspeiseverlauf für einen Beispiel-Hybridpark (1.008 MW Windenergie und 191 MW PV-Leistung) übers Jahr und im Vergleich zur Netzanbindungskapazität sowie detaillierter am Beispiel der Monate Juli und Dezember (Bezugsjahr 2006)



Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Es konnte gezeigt werden, dass sich die Erzeugungsstrukturen von Offshore-Windenergie- und PV-Anlagen gut ergänzen und dass bei einer niedrigen bis moderaten Ergänzung eines Offshore-Windparks durch PV nur sehr geringfügige Abregelungen für die PV zu erwarten sind (unter 1,5 % des eingespeisten Gesamtertrags des Hybridparks). Somit können durch eine solche Konstellation die Netzanbindung besser ausgelastet und zusätzliche Erträge generiert werden, beispielsweise betragen diese bei einer installierten PV-Leistung in Höhe von einem Fünftel der Windenergieleistung rund 5 %.

8.3.2 Ertragspotential für Windenergie auf See und Wellenenergie

Für die Ableitung des Potentials aus Wellenenergie und der Umwandlung ihrer kinetischen in elektrische Energie wird zunächst die nutzbare Energie der Wellen ermittelt. Wellen entstehen einerseits durch den lokal überstreifenden Wind, der die Oberfläche des Wassers durch seine

Stärke, Dauer und Anlaufstrecke formt und andererseits aus Schwellwellen (oder Dünung), die bereits aus ihrem Entstehungsgebiet ausgelaufen sind. Für die Potentialermittlung müssen die vorherrschenden Bedingungen der Meeresumgebung bewertet werden. Im Wesentlichen sind die Wellenlänge und die Wellenhöhe die ausschlaggebenden Faktoren. Für die Anwendung der allgemein gängigen linearen Wellentheorie werden weitere Parameter, wie die Dichte des Wassers und Erdbeschleunigung, verallgemeinert.

Als Wellenhöhe und das Maß für die Stärke des Seegangs wird H_{m0} herangezogen. H_{m0} ist die spektralbasierte Berechnung der signifikanten Wellenhöhe. Ebenfalls genutzt werden kann die signifikante Wellenhöhe H_S, welche als die mittlere Wellenhöhe (Trog bis Scheitel) des höchsten Drittels der Wellen $H_{1/3}$ definiert ist.

Die relevante Wellenlänge bzw. die relevante zwischen den Wellen gemessene Zeit T ist die spektralbasierte Berechnung der mittleren Wellenperiode. Dabei wird eine Welle von der mittleren Wasserlinie über den Trog und darauffolgenden Scheitel bis zur nächsten mittleren Wasserlinie gemessen.

Für die Potentialberechnung in dieser Untersuchung wurde die folgende Formel herangezogen:

$$P = \frac{1}{32\pi} * g^2 * p * {H_{m0}}^2 * T_{m02}$$

Dabei gilt:

P = Wellenenergie/m

g = Erdbeschleunigung (10 m/s^2)

p = Dichte des Wassers (1025kg/m^3)

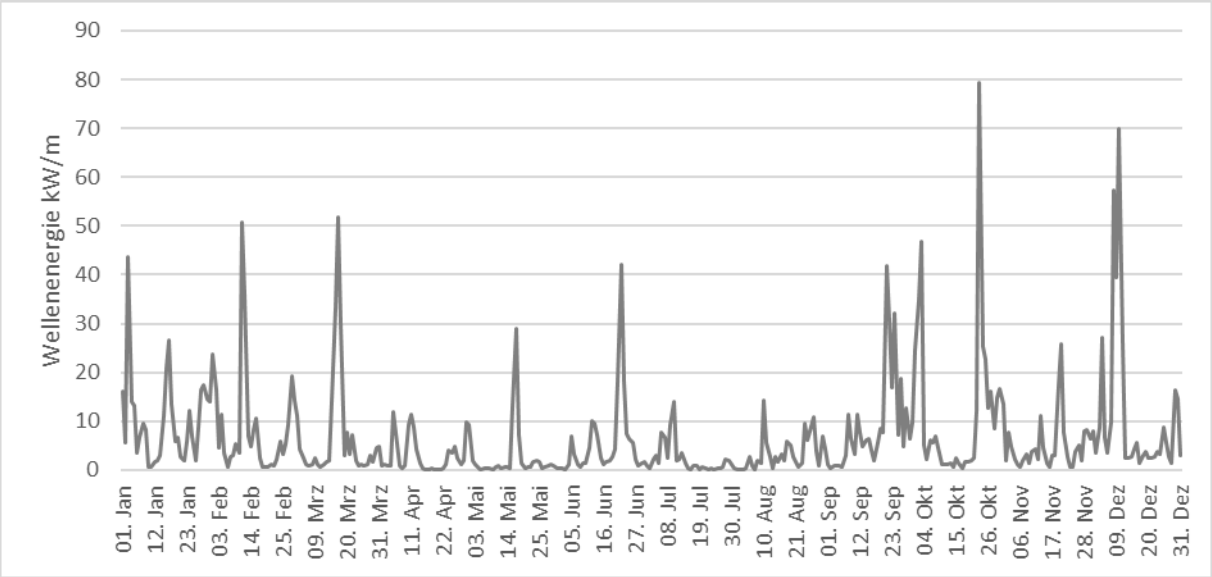
H_{m0} = Mittelwert der signifikanten Wellenhöhe (m)

T_{m02} = Mittlere Periode unter Verwendung der spektralen Momente der Ordnung 0 und 2 (s)

Die Wellenhöhe spielt für die Berechnung der Wellenenergie aufgrund der Potenzierung eine signifikante Rolle. Bei der doppelten durchschnittlichen Wellenhöhe entsteht nahezu die vierfache kinetische Energie bei gleichbleibender Wellenperiode.

Für den Standort FINO 1 wurden auf Basis der in situ Messungen, welche im Seegangsportal des BSH verfügbar sind, die Tagesmittelwerte der Wellenergie des Jahres 2018 mithilfe der o.g. Formel abgeleitet. Die Ergebnisse werden in der folgenden Abbildung 43 dargestellt.

Abbildung 43: Tagesmittelwerte der Wellenenergie am Standort FINO 1 im Jahr 2018



Quelle: eigene Darstellung nach (BSH, 2023c), Deutsche WindGuard GmbH

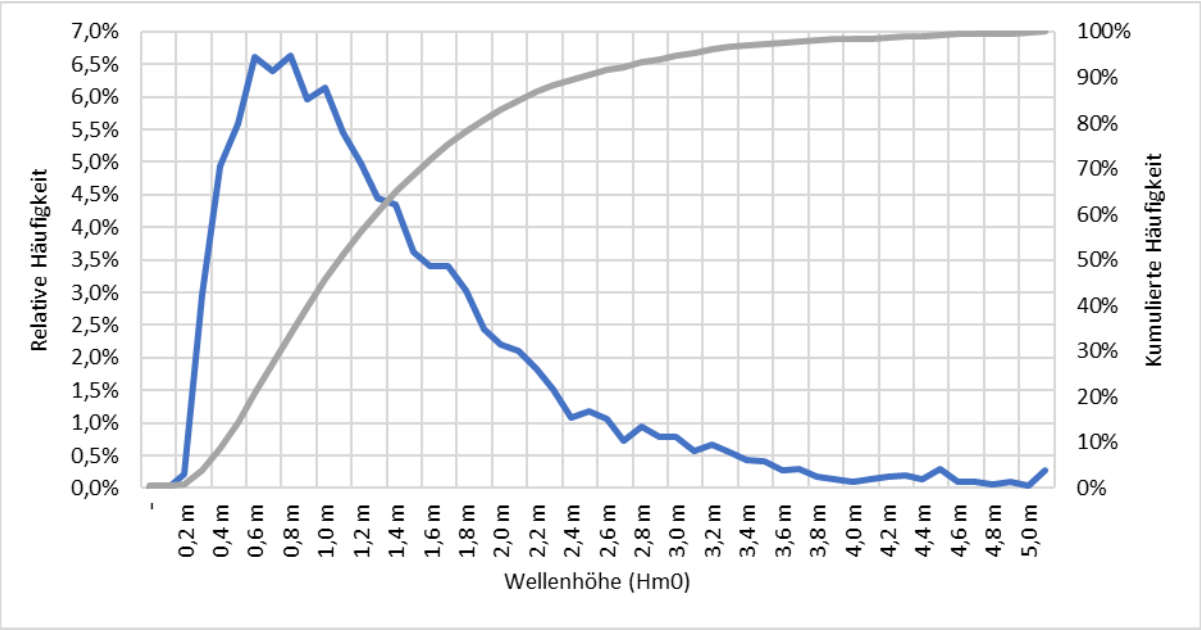
Im Jahresmittel ergibt sich eine Wellenenergie von 6,7 kW/m. Deutlich erkennbar sind die erhöhten Potentiale im Frühjahr und Herbst. Die saisonalen Stürme erhöhen die Wellenenergie, da die Wellenhöhe gesteigert wird und der Wind die Wellen aufschiebt. Im Sommer führen die Wellen dagegen wenig Energie (Mai bis August). Studien benennen 7 kW/m als für die Ertragsermittlung relevante Kenngröße, ab der eine Standortuntersuchung als sinnvoll erachtet werden kann, jedoch wurden die Technologien mittlerweile weiterentwickelt und der Wirkungsgrad erhöht (Bosserelle et al., 2015). Da sich der Standort FINO 1 nahe der Küste befindet, handelt es sich bei den in der Abbildung 43 abgebildeten Größen um konservative Werte, die sich erhöhen, je weiter sich ein zukünftiger Standort von der Küstenlinie entfernt. Die höchste Wellenenergie wird für die Ostküsten Irlands und des Vereinigten Königreichs mit bis zu 100 kW/m auch im näheren Küstenbereich prognostiziert. Die Nordsee weist ein mittleres Energiepotential von 20 kW/m bis 40 kW/m auf. Das Potential in der deutschen AWZ liegt dabei bei maximal 30 kW/m (De Rijcke et al., 2023).

Interviewpartner*innen schätzen für aktuelle Projekte das größte Potential und optimale Stromerträge für Wellenhöhen von über 3,0 m und einer Wellenperiode von mindestens 7 s ein. Dies entspricht einer Wellenenergie von mindestens 30 kW/m. Wellenkraftwerke sind demnach technisch noch nicht für Standorte in der AWZ mit durchschnittlich niedriger Wellenhöhe ausgelegt. Die Notwendigkeit der technischen Weiterentwicklung für den Einsatz in der AWZ gilt insbesondere für die folgenden Themenbereiche:

1. Optimierungen im Bereich der Geometrie: Die **Geometrie des Wellenkraftwerks** muss auf die regionalen Gegebenheiten abgestimmt sein, sodass der optimale Output unter Berücksichtigung der standortsspezifischen Wellenkonstellation aus regulären und irregulären Wellen erzielt werden kann (Guo & Ringwood, 2021) .
2. Optimierungen des **power-takeoff-Systems**: Einerseits unregelmäßige, starke Krafteinwirkungen und andererseits sehr geringe Belastungsmuster stellen hohe Ansprüche an die Effizienz des Energiewandlers, der bei einem möglichst großen Spektrum an Bewegungen Energie erzeugen soll. Bisherige power-takeoff-Systeme sind für hohe Geschwindigkeiten und geringe Krafteinwirkungen ausgelegt, aber bei Wellen sind die Kräfte hoch und die Geschwindigkeiten niedrig, wodurch die Effizienz des Systems beeinträchtigt wird (Al Shami et al., 2018).

Zukünftig optimierte Wellenkraftwerke, die bei weniger hohen Wellen optimale Erträge liefern, müssten entsprechend der in Abbildung 44 dargestellten Häufigkeitsverteilung optimiert werden.

Abbildung 44: Häufigkeitsverteilung der Wellenhöhen (Hm0) im Jahr 2018 am Standort FINO 1



Quelle: eigene Darstellung nach (BSH, 2023c), Deutsche WindGuard GmbH

Die Häufigkeitsverteilung veranschaulicht, dass in 85 % der Zeit die Wellenhöhe unter 2,0 m beträgt und in 50 % der Zeit unter 1,1 m beträgt. Häufig treten Wellen mit einer Höhe von 0,6 m bis 1 m auf. Wellen mit einer Höhe von 3,0 m oder höher wurden dagegen nur in ca. 6 % der Zeit gemessen, sodass sich die aktuellen Technologien nicht übertragen lassen.

Interviewpartner*innen gaben oftmals 1 MW als zukünftig installierbare Nennleistung für Wellenkraftwerke an. Bei Übertragung dieser Anlagenleistung unter der Annahme, dass Wellenkraftwerke zukünftig durch technische Entwicklung in der AWZ optimale Erträge liefern können, ließe sich im generischen Windpark (Abschnitt 8.3) eine Gesamtleistung gemäß Tabelle 24 installieren, wobei pro Standort ein Wellenkraftwerk mit 1 MW kalkuliert wurde.

Tabelle 24: Installierbare Gesamtleistung aus Wellenenergie (1 MW) in einem generischen Windpark (100 km²)

Technologie	15 MW Windenergieanlagen			18 MW Windenergieanlagen			22 MW Windenergieanlagen		
Flächenauslastung	Maximal	Mittel	Minimal	Maximal	Mittel	Minimal	Maximal	Mittel	Minimal
WE-Kapazität (MW)	1.035	1.035	1.035	1.008	1.008	1.008	968	968	968
Kapazität Wellenkraftwerke (MW)	57	22	12	54	21	11	111	70	11
Leistung Wellenkraftwerke im Verhältnis zur WE-Leistung (%)	5,5%	2,1%	1,2%	5,4%	2,1%	1,1%	11,5%	7,2%	1,1%

Maximal könnte in dem Beispielfall, der eine Installation von 22 MW Offshore-Windenergieanlagen vorsieht, bis zu 110 MW Gesamtleistung aus Wellenenergie auf der generischen Windpark-Fläche installiert werden. Die entspricht 11 % der Windparkleistung. Bei minimaler Flächenausnutzung lässt sich bei allen Szenarien eine ähnliche Gesamtleistung installieren. Diese würde 1 % - 2 % der Windparkleistung entsprechen.

Bezüglich der zu erwartenden Ertragspotentiale wäre eine fundierte Abschätzung erst möglich, wenn konkrete Technologieoptionen für die in der Nordsee vorherrschenden Bedingungen (vergleichsweise geringe Wellenhöhen) vorliegen. Es lassen sich aber im Hinblick auf zu erwartende Erträge bereits folgende Faktoren benennen, die auf eine vergleichende Betrachtung von Wellenenergie und PV abzielen:

- Aufgrund der Korrelation von Wind und Wellenbewegungen kann davon ausgegangen werden, dass beide Technologien grundsätzlich ein ähnliches Einspeiseverhalten zeigen werden. Experten*innen gaben in diesem Bezug an, dass Wellen tendenziell nachläufig der aufschiebend wirkenden Winde entstehen, sodass der überströmende Wind vor den Wellen auf die Windenergieanlage bzw. den Windpark trifft. Dies beschreibt einen leichten Zeitversatz, aber eine weitgehende Antikorrelation der Einspeisung, wie im Fall von Windenergie und PV, ist nicht vorhanden.
- Zwar können sich hinsichtlich des Platzbedarfs je MW installierter Leistung aus Wellenkraftwerken noch Weiterentwicklungen ergeben, aber bereits aus heutiger Sicht ist deutlich, dass die auf der generischen Fläche installierbare Kapazität zur Nutzung der Wellenenergie geringer sein wird als im Fall einer Nutzung mit PV-Anlagen.

Auf Basis des heutigen Technologiestands kann keine fundierte Aussage über die Höhe zusätzlicher Energieertragspotentiale getroffen werden. Gleichwohl kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die Potentiale im Vergleich zu den für schwimmende PV-Anlagen errechneten Ertragswerte, auch unter Berücksichtigung der Technologieentwicklung von Wellenkraftwerken, geringer sein werden.

8.4 Rechtliche Einordnung: Regelungsregime und Netzanbindung(skapazität) von Windenergie auf See mit anderen EE-Anlagen (hybride Energieerzeugung)

Dieser Abschnitt soll einen Überblick über das Rechtsregime für die Mehrfachnutzung von Windenergie auf See mit anderen EE-Anlagen bieten. Näher untersucht werden Wellenkraftwerke, Floating-PV-Anlagen sowie die Biokraftstofferzeugung aus Algen. Nicht betrachtet werden Kombinationen von Windenergie mit Elektrolyseuren zur Herstellung von Wasserstoff. Zunächst wird kurz die raumordnungsrechtliche Ebene beleuchtet. Dann wird auf den neuen Testfeldbegriff eingegangen und seine Potentiale für Mehrfachnutzungen untersucht. Abschließend wird das Genehmigungsregime untersucht. Hierbei werden im Anwendungsbereich des WindSeeG insbesondere die sonstigen Energiegewinnungsbereiche einer näheren Betrachtung unterzogen.

Daran anknüpfend soll betrachtet werden, welcher Rechtsrahmen für die Netzanbindungskapazitäten von anderen EE-Anlagen gilt.

8.4.1 Raumordnungs- und Fachplanungsrecht für Mehrfachnutzung von Windenergie und anderen EE-Anlagen

Ein gekoppeltes oder anderweitig zusammenhängendes Planungs- bzw. Genehmigungsregime für Mehrfachnutzungen ist im WindSeeG oder ROG nicht ausdrücklich vorgesehen. Auf raumordnungsrechtlicher Ebene könnten Festlegungen nach § 17 Abs. 1 Nr. 2 ROG „zu weiteren wirtschaftlichen Nutzungen" erfolgen, wie in gegenwärtiger Praxis mit Windenergie. So könnten eigene Bereiche im Raumordnungsplan für Wellenkraftwerke, Floating PV-Anlagen und der Biokraftstofferzeugung aus Algen festgelegt werden, z.B. als Vorrang- oder Vorbehaltsgebiet für sonstige Energieerzeugungsanlagen auf See. Dies wäre auch entsprechend den Ausführungen oben[263] überschneidend mit Vorbehalts- oder Vorrangflächen der Windenergie denkbar.[264] Dabei gilt, dass bei überschneidenden Vorbehaltsgebieten beide Nutzungen als Abwägungsdirektive in nachfolgenden Behördenentscheidungen berücksichtigt werden müssen, aber auch überwunden werden können und dadurch das flexibelste Steuerungselement darstellen. Im Falle einander überschneidender Vorrang- und Vorbehaltsgebiete wird die vorrangige Nutzung des Vorranggebiets abgesichert. Die Nutzung des Vorbehaltsgebiets fließt als Abwägungsbelang in nachfolgende Behördenentscheidungen ein und ermöglicht dem Plangeber vorzugeben, welche Nutzung Vorrang haben soll. Einander überschneidende Vorranggebiete hingegen können nur zulässig sein, wenn die Nutzungen der jeweiligen Gebiete neutral zueinanderstehen und sich nicht gegenseitig ausschließen. Der Anwendungsbereich für ein praktisches Nebeneinander verschiedener Nutzungen, die jeweils Vorrang genießen, ist denkbar eng, denn dies erfordert zumindest das Einhalten gewisser Abstände und wird durch die jeweilige Größe des Gebiets maßgeblich mitbestimmt und ggf. schon dadurch ausgeschlossen.

Darüber hinaus könnten zu solchen EE-Anlagen auch im Rahmen der Festsetzungen zu Windenergie beispielsweise als Grundsatz der Raumordnung Vorgaben gemacht werden. Grundsätzlich sind entsprechende Festsetzungen für EE-Anlagen im ROP möglich. Im ROP 2021 gibt es bisher keine Festsetzungen zu anderen EE-Nutzungen als Windenergie. Einzig zu „sonstigen Energiegewinnungsbereichen", die jedoch nicht als gesonderte Gebiete im ROP 2021 festgesetzt wurden.[265] Durch den geltenden FEP 2023 wurde ein bestehender „sonstiger Energiegewinnungsbereich" als SEN-1 in der Nordsee der AWZ vergrößert. Weitere Festlegungen sind nicht erfolgt, um die Ziele des Gesetzgebers im Hinblick auf den Ausbau von WEA auf See nicht zu gefährden und insbesondere bereits bestehende Nutzungskonflikte nicht weiter zu verschärfen. Auch in dem laufenden Verfahren zur Fortschreibung des FEP ist kein weiterer sonstiger Energiegewinnungsbereich in Planung.[266]

8.4.2 Mehrfachnutzung unter dem neuen Testfeldbegriff

Eine Ausnahme von dem grundsätzlich getrennten Planungs- und Genehmigungsregime von unterschiedlichen Erzeugungsanlagen bilden die neuen Testfelder. Der Testfeld-Begriff wurde in §3 Nr. 9 WindSeeG novelliert.

Definition: Testfelder

Bereiche in der AWZ und im Küstenmeer, in denen im räumlichen Zusammenhang Pilotwindenergieanlagen auf See, Windenergieanlagen auf See oder sonstige Energiegewinnungsanlagen, die an

[263] S. Abschnitt 3.1.2. ff.

[264] Eine Pflicht zur Festlegung im ROP besteht nicht. Aufgrund ihrer Rechtsfolgen bietet eine Festlegung aber Planungssicherheit für die Errichtung von weiteren EE-Anlagen.

[265] (S. Anlage, BSH, 2021c, schriftliche Festsetzung zu 2.2. AWZROVAnl.)

[266] (BSH, 2023b, S. 31.); (BSH, 2023e, S. 40.)

das Netz angeschlossen werden und bei denen Innovationen erprobt werden sollen, errichtet werden sollen und die gemeinsam über eine Testfeld-Anbindungsleitung angebunden werden sollen.

Pilotwindenergieanlagen auf See sind in § 3 Nr. 6 WindSeeG definiert.

Definition: Pilotwindenergieanlagen auf See

Die jeweils **ersten drei** Windenergieanlagen auf See eines Typs, mit denen nachweislich eine wesentliche, weit über den Stand der Technik hinausgehende Innovation erprobt wird; die Innovation kann insbesondere die Generatorleistung, den Rotordurchmesser, die Nabenhöhe, den Turmtypen oder die Gründungsstruktur betreffen.

Auf den Testfeldern soll also eine gleichzeitige Nutzung von unterschiedlichen Energieerzeugungen - mit der Einschränkung, dass dabei Innovationen erprobt werden sollen - ermöglicht werden. Mit Innovationen sind neuartige Konzepte im Bereich der Anlagen und Gründungen gemeint. Die Testfelder sollen einen wesentlichen Beitrag zur Stärkung der internationalen Wettbewerbsposition deutscher Hersteller bieten. Auch sollen hier weitere Untersuchungen, z.B. von Forschungsinstitutionen zu Auswirkungen auf Natur und Umwelt ausgestaltet werden können.[267] Diese Ausgestaltung und Nutzung der Testfelder bietet grundsätzlich Potential für Pilotprojekte der Mehrfachnutzung von Windenergie auf See mit anderen EE-Nutzungen, die unter den Anlagenbegriff des WindSeeG fallen.

Testfelder können nach § 5 Abs. 2 Nr. 1a „küstennah“, d.h. vorrangig im Küstenmeer und in der AWZ voraussichtlich nur in Zone 1[268], und außerhalb von Gebieten im FEP festgelegt werden. Damit erfahren diese Anlagen ein gemeinsames Planungsregime durch die Ausweisung eines abgrenzbaren Testfeldes im FEP.[269] Der gültige FEP 2023 hat ein Testfeld im Küstenmeer vor Warnemünde festgelegt, dessen Inbetriebnahme allerdings frühestens ab dem Jahr 2032 erfolgen soll und unter der Bedingung steht, dass das Land Mecklenburg-Vorpommern Bedarf an der Testfeldanbindungsleitung anmeldet.[270] Eine Festlegung in der AWZ ist nach dem aktuellen Stand nicht erfolgt.

Das Potential von Testfeldern beschränkt sich auf Erprobungszwecke. Zum aktuellen Zeitpunkt bietet das Testfeld daher nur ein begrenztes Potential für die Mehrfachnutzung von Windenergie auf See mit anderen, zur Erprobung dienenden EE-Anlagen.

8.4.3 Genehmigungsregime für andere EE-Anlagen auf See als Windenergieanlagen

Für die Errichtung von Anlagen in der AWZ existiert neben dem WindSeeG auch das Genehmigungsregime des SeeAnlG.[271] Das SeeAnlG regelt generell die Errichtung von Anlagen in der AWZ, während das WindSeeG als spezielle Regelung nur für bestimmte Anlagentypen das Genehmigungs- und insbesondere auch Förderregime bereithält.[272] Auch wenn das WindSeeG als speziellere Regelung grundsätzlich dem SeeAnlG in seiner Anwendbarkeit vorgeht, soll dieser Abschnitt zumindest kurz die überschneidenden Anlagenbegriffe aufzeigen. Die Überschneidung wird anhand der konkret zu betrachtenden EE-Anlagen im Folgenden verdeutlicht.

[267] BT Drs. 19/9027, S. 24.

[268] BT-Drs. 19/9027, S. 25.

[269] Das Planfeststellungs- und Plangenehmigungsverfahren richtet sich für Testfelder nach § 95 WindSeeG.

[270] (BSH, 2023b, S. 51.)

[271] Seeanlagengesetz vom 13. Oktober 2016 (BGBl. I S. 2258, 2348), das zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 3. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2682) geändert worden ist.

[272] Siehe § 1 Abs. 1 Nr. 1, Abs. 2 Nr. 3 SeeAnlG i.V.m. § 2 WindSeeG.

8.4.3.1 Wellenkraftwerke

Nach dem SeeAnlG unterfallen Anlagen, die aus Wasser Energie erzeugen, dem SeeAnlG, gem. § 1 Abs. 1, 2 Nr. 1 SeeAnlG, nur, sofern sie keine Einrichtung i.S.d. § 44 a.F./§ 65 n.F. WindSeeG darstellen, § 1 Abs. 2 Nr. 3 SeeAnlG. Es ist daher in einem nächsten Schritt zu prüfen, ob es sich bei einem Wellenkraftwerk um eine Einrichtung nach dem WindSeeG handelt.

8.4.3.1.1 Anwendbarkeit WindSeeG/SeeAnlG

Definition: Einrichtung i.S.d. WindSeeG

Eine Einrichtung nach § 44 a.F. WindSeeG liegt im Bereich der ausschließlichen Wirtschaftszone vor, wenn es sich um die Errichtung, den Betrieb und die Änderung von Windenergieanlagen auf See, sonstigen Energiegewinnungsanlagen sowie Offshore-Anbindungsleitungen, Anlagen zur Übertragung von Strom aus Windenergieanlagen auf See und Anlagen zur Übertragung von anderen Energieträgern aus Windenergieanlagen auf See handelt. Außerdem sind auch **sonstige Energiegewinnungsanlagen** jeweils einschließlich der zur Errichtung und zum Betrieb der Anlagen erforderlichen technischen und baulichen Nebeneinrichtungen von dem Einrichtungsbegriff des WindSeeG erfasst, § 65 Abs. 1 Nr. 1 WindSeeG n.F.

Um in den Anwendungsbereich des WindSeeG zu gelangen, müsste das Wellenkraftwerk demnach gem. § 44 WindSeeG a.F. als sonstige Energiegewinnungsanlage qualifiziert werden.

Definition: sonstige Energiegewinnungsanlage

Anlagen zur Erzeugung von Strom auf See aus **anderen** erneuerbaren Energien als Wind, insbesondere aus Wasserkraft einschließlich der Wellen-, Gezeiten-, Salzgradienten- und Strömungsenergie, oder zur Erzeugung anderer Energieträger, insbesondere Gas, oder anderer Energieformen, insbesondere thermischer Energie, § 3 Nr. 7 WindSeeG.

Der Gesetzgeber wählte hier eine sehr offene Definition, um künftigen technischen Innovationen Raum zu bieten.[273] Von dem Begriff der sonstigen Energiegewinnungsanlagen sollen vor allem Elektrolyseure umfasst sein.[274]

Die Wellenkraftwerke sind Anlagen zur Erzeugung von Strom auf See aus Wasserkraft. Sie erzeugen Strom aus Wellenenergie und fallen damit unter den Begriff der sonstigen Energiegewinnungsanlage i.S.d. WindSeeG.

Zusätzlich unterfallen die Wellenkraftwerke ihrem Wortlaut nach dem Anlagenbegriff des SeeAnlG.

Definition: Anlage nach dem SeeAnlG

Der Anlagenbegriff des SeeAnlG umfasst alle festen oder nicht nur zu einem kurzfristigen Zweck **schwimmend befestigten** baulichen oder technischen Einrichtungen, einschließlich Bauwerke und künstlicher Inseln, sowie die jeweils für die Errichtung und den Betrieb erforderlichen Nebeneinrichtungen, die der **Erzeugung** und Übertragung von **Energie aus Wasse**r oder Strömung sowie

[273] BT-Drs. 19/5523, 124.

[274] (S. Anlage BSH, 2021c, schriftliche Festsetzung zu 2.2. AWZROVAnl, in der der Plangeber ausdrücklich von Wasserstoffproduktion spricht, sowie das Design der SoEnergieV.)

anderen wirtschaftlichen Zwecken dienen, solange sie keine Einrichtungen nach dem WindSeeG sind.[275]

Sie werden in § 1 Abs. 2 Nr. 1 SeeAnlG ausdrücklich als Anlage genannt, deren Errichtung, Betrieb und Änderung dem Anwendungsbereich des SeeAnlG unterfallen soll. Zugleich **geht** das **WindSeeG** dem SeeAnlG **als spezielleres Gesetz** im Anwendungsbereich **vor**, sodass hier trotz überschneidender Begrifflichkeiten aufgrund der Spezialität folglich von einer **Anwendbarkeit des WindSeeG ausgegangen wird**.

Als Einrichtungen, die dem Begriff der „sonstige Energiegewinnungsanlage" grundsätzlich unterfallen, sind die Wellenkraftwerke dem WindSeeG vorbehalten. Für sonstige Energiegewinnungsanlagen in sonstigen Energiegewinnungsbereichen (und Testfeldern) gibt das WindSeeG ein stringentes, ausdrückliches Planungs- und Genehmigungsregime vor.[276] Die hierfür geltenden Voraussetzungen sollen im Folgenden untersucht werden.

8.4.3.1.2 Planungs- und Genehmigungsregime für sonstige Energiegewinnungsanlagen in sonstigen Energiegewinnungsbereichen und im Testfeld

Wellenkraftwerke sind als sonstige Energiegewinnungsanlage i.S.d. § 3 Nr. 7 WindSeeG in sonstigen Energiegewinnungsbereichen (ohne Netzanschluss) oder im Testfeld (mit Netzanschluss) genehmigungsfähig, §§ 5 Abs. 2, 2a, 65 Abs. 1, 92 WindSeeG.

Definition: sonstige Energiegewinnungsbereiche

Bereiche außerhalb von Gebieten, auf denen Windenergieanlagen auf See und sonstige Energiegewinnungsanlagen, die jeweils nicht an das Netz angeschlossen werden, in räumlichem Zusammenhang errichtet werden können, § 3 Nr. 8 WindSeeG.

Die sonstigen Energiegewinnungsbereiche sollen Raum zur Erprobung von innovativen Konzepten zur Energiegewinnung bieten. Davon erfasst sind Konstellationen, in denen der von der Windenergieanlage erzeugte Strom unmittelbar genutzt wird, z.B. zur Erzeugung von Wasserstoff, die Windenergieanlage also direkt an einen Elektrolyseur angeschlossen ist.[277] Im Gegensatz zu den Testfeldern sind die sonstigen Energiegewinnungsbereiche nicht an das Netz angeschlossen.

Um das Potential der sonstigen Energiegewinnungsanlagen in sonstigen Energiegewinnungsbereichen für die Mehrfachnutzung von Windenergie auf See mit anderen EE-Anlagen, herauszuarbeiten, muss im Folgenden daher unterschieden werden, ob die sonstige Energiegewinnungsanlage an das Netz angeschlossen werden soll oder nicht.

Für sonstige Energiegewinnungsanlagen, die **nicht an das Netz angeschlossen** werden sollen, soll der Plangeber im FEP sonstige Energiegewinnungsbereiche nach § 5 Abs. 2a WindSeeG festlegen.

Die sonstigen Energiegewinnungsbereiche können nur außerhalb von den Gebieten für Windenergie festgelegt werden. Dies ergibt sich aus der eindeutigen Definition der sonstigen Energiegewinnungsbereiche („Bereiche außerhalb von Gebieten") sowie der Formulierung in § 5 Abs. 2a WindSeeG („außerhalb von Gebieten"). Darüber hinaus schließt die Definition eine Mehrfachnutzung von sonstigen Energiegewinnungsanlagen, die nicht an das Netz angeschlossen werden mit

[275] § 1 Abs. 2 Nr. 1-3 SeeAnlG.

[276] Nach § 65 WindSeeG beziehen sich die Bestimmungen aus Teil 4 – und damit die Vorgaben zum Planfeststellungs- und Plangenehmigungsverfahren nach dem WindSeeG - auch auf die sonstigen Energiegewinnungsanlagen.

[277] BT-Drs. 19/5523, S. 124 f.

noch zu errichtenden Windenergieanlagen, die an das Netz angeschlossen werden sollen, aus. Die sonstigen Energiegewinnungsbereiche sind nur vorgesehen für Energiegewinnungsanlagen, die nicht an das Netz angeschlossen werden, und für Windenergieanlagen auf See, die nicht an das Netz angeschlossen werden und die daher auch nicht an einer Ausschreibung teilnehmen dürfen.[278] Die **sonstigen Energiegewinnungsbereiche** haben daher **für Mehrfachnutzungsoptionen** mit an das Netz angeschlossenen Windenergieanlagen **kein Potential**. Für das Ausschreibungsverfahren für sonstige Energiegewinnungsbereiche ist § 92 WindSeeG i.V.m. der auf Grundlage von § 96 Nr. 5 WindSeeG erlassenen Rechtsverordnung zur Vergabe von sonstigen Energiegewinnungsbereichen in der ausschließlichen Wirtschaftszone (SoEnergieV)[279] maßgeblich.[280]

Daneben hat das WindSeeG ein Planungs- und Genehmigungsregime für sonstige Energiegewinnungsanlagen im Bereich der Testfelder für innovative Erprobungen mit Netzanschluss. Von der Möglichkeit ein Testfeld in der AWZ festzulegen, hat der Plangeber bislang keinen Gebrauch gemacht. Für **sonstige Energiegewinnungsanlagen**, die jedoch **nicht** der innovativen Erprobung im Rahmen der **Testfelder** dienen, und die ans Netz angeschlossen werden sollen, hält das WindSeeG **kein ausdrückliches Planungs- und Genehmigungsregime** vor.

8.4.3.2 Floating-PV-Anlagen

Auch Floating-PV-Anlagen sind von der Begriffsdefinition der sonstigen Energiegewinnungsanlage nach dem WindSeeG umfasst.

Solare Energie wird in der Definition der sonstigen Energiegewinnungsanlage nach § 3 Nr. 7 WindSeeG zwar nicht ausdrücklich genannt, die Aufzählung ist aber aufgrund des verwendeten Begriffs „insbesondere“ nicht abschließend. Schwimmende PV-Anlagen, die sich aus solarer Energie speisen, stellen jedenfalls eine Energieerzeugungsform „aus anderer erneuerbarer Energie als Wind“ dar und sind damit von dem Begriff umfasst.

Demzufolge richtet sich das Planungs- und Genehmigungsregime, so wie auch für Wellenkraftwerke, nach dem WindSeeG.[281]

8.4.3.3 Algenanbau

Im Hinblick auf die Biokraftstofferzeugung aus Algen ist für den Anbau der Algen auf See der Anwendungsbereich des WindSeeG nicht eröffnet. Da auf See ausschließlich der Anbau der Algen erfolgt und die eigentliche Energieerzeugung aus dem daraus gewonnen Biokraftstoff sodann an Land stattfindet, ist die Voraussetzung der Stromerzeugung auf See nicht gegeben, vgl. §§ 2 Abs. 1, 65 Abs. 1 WindSeeG. Es ist jedoch denkbar, dass § 1 Abs. 2 Nr. 3 SeeAnlG einschlägig ist.

Unter den Anlagenbegriff des SeeAnlG fallen Einrichtungen, die für einen längeren Zeitraum mit dem Meeresboden unmittelbar verankert sind. Darüber hinaus müsste es sich bei dem Anbau zur Algenzucht um Anlagen handeln, die „anderen wirtschaftlichen Zwecken“ dienen. Historisch gesehen, fielen darunter zunächst Leitungen, die den offshore erzeugten Strom an Land übertrugen und jetzt explizit in § 1 Abs. 1 Nr. 2 genannt werden. Konkrete Anwendungsfälle gibt es

[278] BT-Drs. 19/5523, S. 124.

[279] Sonstige-Energiegewinnungsbereiche-Verordnung vom 21. September 2021 (BGBl. I S. 4328), die durch Artikel 11 des Gesetzes vom 20. Juli 2022 (BGBl. I S. 1325) geändert worden ist.

[280] Im aktuellen FEP 2023 wurde in der AWZ der Nordsee ausschließlich der sonstige Energiegewinnungsbereich SEN-1 festgelegt. Zur Zielerreichung einer installierten Leistung von Windenergieanlagen auf See, die an das Netz angeschlossen werden, von insgesamt mindestens 70 GW im Jahr 2045, werden über die im ROP 2021 getroffenen Festlegungen hinaus weitere Flächen für Windenergie auf See benötigt. Aus diesem Grund und um potentielle Nutzungskonflikte zu vermeiden, wurde auf die Festlegung weiterer sonstiger Energiegewinnungsbereiche verzichtet, s. (BSH, 2023b, S.88.)

[281] S. hierzu 8.4.3.1.2.

hierfür aktuell nicht.[282] Da die Anlagen zur Algenzucht jedenfalls zur späteren Energieerzeugung beitragen, ist davon auszugehen, dass sie dadurch auch „anderen wirtschaftlichen Zwecken" dienen.

Anlagen nach dem SeeAnlG unterfallen dem Planfeststellungsverfahren.[283] In Bezug auf Mehrfachnutzung mit Windenergie auf See ordnet das SeeAnlG an, dass sie nur zulässig sind, wenn sie die Windenergie auf See (oder die sonstigen Energiegewinnungsbereiche) „nicht wesentlich behindern".[284] Demnach genießen die Anlagen des WindSeeG Vorrang vor den Anlagen des SeeAnlG. Abgewichen werden kann von dieser Vorschrift, „wenn die Zulassung dieser Anlagen aus zwingenden Gründen des öffentlichen Interesses geboten ist".[285] Damit lässt das Gesetz ein Nebeneinander von Windenergie auf See mit anderen EE-Anlagen im Sinne des SeeAnlG nur zu, wenn entweder die EE-Anlage die Windenergie auf See nicht wesentlich behindert oder aber, sofern sie sie behindert, ihre Zulassung aus zwingenden Gründen des öffentlichen Interesses geboten ist.[286]

Im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens nach dem SeeAnlG darf der Plan nur festgestellt werden, wenn ein Katalog von Belangen nicht beeinträchtigt wird, § 5 Abs. 3 SeeAnlG. Der Katalog ist in weiten Teilen mit dem der § 5 Abs. 3 bzw. § 69 Abs. 4 WindSeeG identisch und weist insoweit keine Besonderheiten auf. Insbesondere die Berücksichtigung „sonstiger öffentlicher Bestimmungen" in § 5 Abs. 3 Nr. 7 SeeAnlG gibt Raum für die Berücksichtigung der Vorgaben des Raumordnungsplans als auch des überragenden öffentlichen Interesses der Windenergie auf See. Flächenvoruntersuchungen oder ein Ausschreibungssystem sieht das SeeAnlG im Gegensatz zum WindSeeG nicht vor.

8.4.4 Rechtsrahmen der Netzanbindung(skapazitäten) für andere EE-Anlagen als Windenergieanlagen auf See

Im Kontext der Mehrfachnutzung von Windenergieanlagen auf See und anderen EE-Anlagen soll nachfolgend erörtert werden, ob unter rechtlichen Gesichtspunkten eine Mitnutzung des Netzes der Windenergieanlagen durch die anderen EE-Anlagen in Betracht kommt und falls ja, welche Kapazität hiervon umfasst ist. In diesem Kontext soll auch ein Blick auf den Begriff des „**Overplanting**" geworfen werden.

8.4.4.1 Das Rechtsregime für die Netzanbindung von EE-Anlagen auf See

Netzanbindungsleitungen sind zunächst Teil des Übertragungsnetzes. Der Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) ist nach § 17d EnWG verpflichtet, Offshore-Netzanbindungen zu errichten und zu betreiben.

§ 17d Abs. 1 EnWG: Umsetzung der Netzentwicklungspläne und des Flächenentwicklungsplans

Betreiber von Übertragungsnetzen, in deren Regelzone die Netzanbindung von Windenergieanlagen auf See erfolgen soll (anbindungsverpflichteter Übertragungsnetzbetreiber), haben die Offshore-Anbindungsleitungen entsprechend den Vorgaben des Offshore-Netzentwicklungsplans und ab dem 1. Januar 2019 entsprechend den Vorgaben des Netzentwicklungsplans und des Flächenentwicklungsplans gemäß § 5 des Windenergie-auf-See-Gesetzes zu errichten und zu betreiben. Sie haben mit der Umsetzung der Netzanbindungen von Windenergieanlagen auf See

[282] Vgl. auch (Theobald & Kühling, 2022, SeeAnlV § 1 Rn. 8 ff.)

[283] § 2 SeeAnlG.

[284] § 2 Abs. 3 S. 1 SeeAnlG.

[285] § 2 Abs. 4 S. 2 SeeAnlG.

[286] § 2 Abs. 4 S. 1 und 2 SeeAnlG.

entsprechend den Vorgaben des Offshore-Netzentwicklungsplans und ab dem 1. Januar 2019 entsprechend den Vorgaben des Netzentwicklungsplans und des Flächenentwicklungsplans gemäß § 5 des Windenergie-auf-See-Gesetzes zu beginnen und die Errichtung der Netzanbindungen von Windenergieanlagen auf See zügig voranzutreiben. Eine Offshore-Anbindungsleitung nach Satz 1 ist ab dem Zeitpunkt der Fertigstellung ein Teil des Energieversorgungsnetzes.

Die Zuweisung von Netzanbindungskapazitäten ist grds. für jede Fläche einzeln zu betrachten. Gem. § 17d Abs. 2 S. 1 EnWG beauftragt der anbindungsverpflichtete Übertragungsnetzbetreiber die Offshore-Anbindungsleitung, sobald die anzubindende Fläche im FEP festgelegt ist.

Im Anwendungsbereich des SeeAnlG gibt es keine eigenständigen über die grds. einschlägigen §§ 17 ff. EnWG hinausgehende Regelungen für die Zuweisung der Netzanbindungskapazität.

8.4.4.2 Netzanbindungskapazitäten im Anwendungsbereich des WindSeeG

Der vormals geltende Offshore-Netzentwicklungsplan wurde gem. §§ 4 ff. WindSeeG vom Flächenentwicklungsplan sowie gem. § 12b EnWG vom Netzentwicklungsplan abgelöst. Diese haben zum Ziel die Netzanbindungskapazitäten ab 2025 zu steuern. Ziel ist es, eine geordnete und effiziente Nutzung und Auslastung der Offshore-Anbindungsleitungen zu gewährleisten und Offshore-Anbindungsleitungen im Gleichlauf mit dem Ausbau der Stromerzeugung aus Windenergieanlagen auf See zu planen, zu errichten, in Betrieb zu nehmen und zu nutzen, vgl. § 4 Abs. 2 Nr. 3 WindSeeG.

Im Anwendungsbereich des WindSeeG bestimmen §§ 24, 55 WindSeeG die Rechtsfolgen des Zuschlags. Gem. §§ 24 Abs. 1 Nr. 3 a und b, 55 Abs. 1 Nr. 3 a und b WindSeeG hat der bezuschlagte Bieter im Umfang der bezuschlagten Gebotsmenge Anspruch auf den Anschluss der Windenergieanlagen auf See auf der jeweiligen Fläche an die im FEP festgelegte Offshore-Anbindungsleitung sowie eine zugewiesene Netzanbindungskapazität auf der im FEP festgelegten Offshore-Anbindungsleitung.

Für ungenutzte Netzanbindungskapazitäten gilt seit 2023 der neu eingefügte § 14a WindSeeG. Dieser gestattet dem Anlagenbetreiber einen Anspruch auf ergänzende Kapazitätszuweisung. Folglich sieht das Gesetz zumindest die Möglichkeit vor, ungenutzte Netzanbindungskapazitäten zu verwenden, um hierdurch eine hohe Auslastung des Netzes zu ermöglichen. § 14a WindSeeG gilt jedoch ausdrücklich nur für den Windparkbetreiber.

§ 14a WindSeeG: Ergänzende Kapazitätszuweisung

Sofern die Netzanbindungskapazität einer Offshore-Anbindungsleitung nicht vollständig durch zugewiesene Netzanbindungskapazität oder Netzanbindungszusagen nach § 118 Abs. 12 des EnWG gebunden ist, kann die BNetzA die verbleibende Netzanbindungskapazität **den an die Offshore-Anbindungsleitung angeschlossenen Windenergieanlagen auf See proportional zu ihrer zugewiesenen oder zugesagten Netzanbindungskapazität befristet zur zusätzlichen Nutzung zuweisen**, sofern

1. die Kapazität nach einer Prognose der BNetzA **min. für die Dauer von sechs Monaten ungenutzt** wäre und
2. **max. 15 %** der insgesamt auf die Offshore-Anbindungsleitung verfügbaren Netzanbindungskapazität betroffen sind.

Aus genehmigungsrechtlicher Sicht gibt § 14a WindSeeG damit vor, dass eine bis zu 15 % erhöhte Einspeisung zulässig ist. Die Nutzung der freien Netzanbindungskapazitäten ist nur

befristet und nur für bereits angeschlossene Windenergieanlagen auf See möglich.[287] Außerdem müsste die freie Kapazität zumindest sechs Monate ungenutzt sein. Hintergrund dieser Regelung ist eine langfristigere, effiziente Ausnutzung von Anbindungskapazitäten.

Ausgehend hiervon wurde im Projektkontext die Frage aufgeworfen, in welchem Zusammenhang dies mit der Möglichkeit des „Overplanting" steht.

Definition: Overplanting

Ein Overplanting liegt vor, wenn die tatsächlich installierte Leistung von der zugewiesenen Netzanbindungskapazität abweicht.[288]

Gemäß FEP 2023 ist ein Overplanting bis 10 % grundsätzlich möglich. Hierfür ist dann eine Genehmigung zusätzlicher Anlagen im Rahmen des Planfeststellungs- bzw. Plangenehmigungsverfahrens erforderlich. Die zusätzlichen WEA sind sodann räumlich innerhalb der bezuschlagten Fläche zu errichten. Als faktische Grenze für eine erweiterte Netzauslastung ist hier das 2-K-Kriterium zu beachten, wonach sich das Sediment zum Schutz der Meeresumwelt nicht um mehr als 2 Grad Kelvin erwärmen darf.[289]

Die grundsätzliche Option, die tatsächlich installierte Leistung abweichend von der zugewiesenen Netzanbindungskapazität zu erweitern, liegt darin begründet, sowohl elektrische Verluste als auch eine ggf. eintretende Nichtverfügbarkeit einzelner Windenergieanlagen auf See auszugleichen, und unterscheidet sich insofern von dem Regelungsziel des § 14a WindSeeG. Die Norm dient der effizienten Ausnutzung der bestehenden Netzanbindungskapazität und könnte beispielsweise angewendet werden, wenn entgegen der Planung Pilotwindenergieanlagen nicht errichtet werden und dementsprechend auch keine Anbindung erforderlich ist. Kurzfristige Kapazitätsausfalle hingegen sollen nicht erfasst sein.[290]

Damit besteht ein Zusammenhang zwischen der Regelung des § 14a WindSeeG und der Möglichkeit des „Overplanting" nicht. .[291]

Im Übrigen ist der Rechtsrahmen für die Netzanbindungskapazitäten von Pilotwindenergieanlagen auf See in § 95 WindSeeG festgelegt. Gemäß § 95 Abs. 1 S. 1 Nr. 1 WindSeeG kann der Betreiber die zugewiesene Netzanbindungskapazität nutzen, die er aufgrund eines Zuschlags nach dem WindSeeG auf einer nach dem FEP vorgesehenen Offshore-Anbindungsleitung oder auf einer Offshore-Anbindungsleitung nach § 31 Abs. 1 S. 1 Nr. 3 WindSeeG (im Falle eines Zuschlags nach § 34 WindSeeG) hat. Zur Anbindung einer Pilotwindenergieanlage auf See, die sich in einem Testfeld befindet, wird dem Anlagenbetreiber die Netzanbindungskapazität auf der im FEP festgelegten Testfeld-Anbindungsleitung ab dem verbindlichen Fertigstellungstermin nach § 17d Abs. 2 S. 3 EnWG zugewiesen, § 95 Abs. 1 S. 2, Abs. 5 WindSeeG.

8.4.5 Fazit

Das Raumordnungsrecht lässt zu, Festlegungen zu anderen EE-Nutzungen als Windenergie im ROP zu treffen. Solche Festlegungen existieren im ROP 2021 bislang jedoch nicht.

[287] Die Dauer der Befristung ist zeitlich flexibel in dem Zeitraum möglich, in dem ein wirksamer Planfeststellungsbeschluss oder eine Plangenehmigung für die Windenergieanlage auf See besteht, vgl. § 14a Abs. 1 WindSeeG i.V.m. § 17d Abs. 5 EnWG.

[288] (BSH, 2023b, S.88.)

[289] (BSH, 2020b, S. 25 ff); s. dazu auch Abschnitt 2.3.3.3.

[290] BT-Drs. 20/1643, S. 81.

[291] (BSH, 2023b, S. 79)

Eine Mehrfachnutzung von Windenergie auf See mit anderen EE-Anlagen mit Netzanschluss ist nach dem aktuell geltenden Rechtsregime rechtssicher im Testfeld möglich und bietet im Hinblick auf den Projektkontext, insbesondere mit Blick auf die Ausbauziele des Gesetzgebers für die Windenergie auf See, wenig Potential für die Mehrfachnutzung. Anlagen, wie die Wellenkraftwerke sowie auch die schwimmenden PV-Anlagen unterliegen als „sonstige Energiegewinnungsanlage“ dem Einrichtungsbegriff und folglich auch dem Genehmigungsregime des WindSeeG.

Im Anwendungsbereich des WindSeeG kommt es insbesondere darauf an, ob die EE-Anlagen mit dem Netz verbunden werden sollen. Werden sie nicht verbunden, richtet sich ihr Zulassungsregime nach den Vorgaben zu sonstigen Energiegewinnungsbereichen. Sonstige Energiegewinnungsbereiche müssen außerhalb von Gebieten für Windenergie geplant werden. Für Anlagen in den sonstigen Energiegewinnungsbereichen sieht das Gesetz keine Mehrfachnutzung mit Windenergie auf See, die an das Netz angeschlossen werden, vor. Die Möglichkeit eines Netzanschlusses für andere EE-Anlagen besteht nach dem WindSeeG nur im Bereich der Testfelder. Hier können Windenergieanlagen auf See mit EE-Anlagen, die an das Netz angeschlossen werden, zu Erprobungszwecken zugelassen werden. Eine Genehmigung mit Netzanschluss außerhalb eines Testfelds ist nach aktuell geltendem WindSeeG nicht ausdrücklich möglich.

Das Genehmigungsregime für schwimmende PV-Anlagen und Wellenkraftwerke richtet sich nach dem WindSeeG. Diese anderen EE-Anlagen sind als sonstige Energiegewinnungsanlagen i.S.v. § 3 Nr. 7 WindSeeG in sonstigen Energiegewinnungsbereichen ohne Netzanschluss oder im Testfeld mit Netzanschluss zulässig, §§ 5 Abs. 2, 2a, 65 Abs. 1, 92 WindSeeG.

Die Anlagen zur Algenzucht unterfallen dem WindSeeG nicht, sie lassen sich aber auch nicht mit der erforderlichen Rechtssicherheit unter den Anlagenbegriff des SeeAnlG fassen. Nach dem SeeAnlG ist Mehrfachnutzung jedenfalls dann möglich, wenn Windenergieanlagen auf See nicht wesentlich behindert werden oder aber die Zulassung aus zwingenden Gründen des öffentlichen Interesses erforderlich ist.

Für die Ausgestaltung und Festlegung von **Netzanbindungen** und die dadurch resultierende mögliche Kapazitätsauslastung gelten maßgeblich der FEP bzw. der Netzentwicklungsplan. Die Zuweisung der Netzanbindungskapazität richtet sich im Anwendungsbereich des WindSeeG nach dem Zuschlag, §§ 24, 55 WindSeeG. Darüber hinaus ist eine ergänzende Netzanbindungskapazität von höchstens 15 % Mehrauslastung der gesamten Offshore-Anbindungsleitung im Rahmen des § 14a WindSeeG möglich. Der geltende FEP 2023 sieht die Möglichkeit zum „Overplanting“ vor. Dabei gilt bis 10 % „Overplanting“, dass kein zusätzlicher Nachweis zum 2-K-Kriterium geführt werden muss. Unabhängig davon ist für zusätzliche Anlagen das Genehmigungsverfahren nach dem WindSeeG zu durchlaufen.

Da für jede Anlage im Rahmen ihres Genehmigungsverfahrens gesondert auch eine entsprechende Netzanbindung festgelegt wird, ist auch diese jeweils einzeln zu betrachten und rechtlich zu bewerten. Auch für eine andere EE-Anlage als die Windenergieanlage auf See ist nach dem jeweils einschlägigen Gesetz ein Genehmigungsverfahren erforderlich.

Festzuhalten ist, dass eine Mitnutzung des Netzes der Windenergieanlagen auf See von anderen EE-Anlagen gesetzlich nicht ausdrücklich vorgesehen ist. Gleichwohl erlaubt § 14a WindSeeG eine ergänzende Netzanbindungskapazität für den Windparkbetreiber, der für einen befristeten Zeitraum für zusätzliche Windenergieanlagen, die im räumlichen Zusammenhang mit der bezuschlagten Fläche stehen, das Netz über den eigentlichen Anspruch aus dem Zuschlagsverfahren hinaus auslasten darf. Diese Option bietet Raum dafür, diese ergänzende Netzanbindungskapazität auch durch andere EE-Anlagen zu nutzen. Zwar spricht der ausdrückliche Wortlaut des § 14a WindSeeG von „den an die Offshore-Anbindungsleitung angeschlossenen

Windenergieanlagen“ und der FEP 2023 von „zusätzlichen Windenergieanlagen“, doch ist eine entsprechende Anwendung für die anderen EE-Anlagen jedenfalls denkbar und nicht von vornherein ausgeschlossen. Etwas anderes könnte sich hingegen aus dem grundsätzlichen Genehmigungsregime des WindSeeG ergeben. Das WindSeeG ordnet die anderen EE-Anlagen als sonstige Energiegewinnungsanlagen ein, die nur in sonstigen Energiegewinnungsbereichen außerhalb von Gebieten der Windenergie auf See und ohne Netzanschluss zulässig sind (mit Ausnahme von den Testfeldern).[292] **Betrachtet man also die Regelungen zur Netzanbindungskapazität im Zusammenhang mit denen des Genehmigungsregimes dürfte eine Mitnutzung derzeit ausgeschlossen sein.** Denklogisch besteht aus diesem Grund auch keine Regelung für die Netzanbindungskapazität für andere EE-Anlagen als die Windenergieanlagen auf See. In seiner aktuellen Fassung sieht das WindSeeG eine hybride Energieerzeugung in Form von anderen EE-Anlagen, die an das Netz einer Windenergieanlage angeschlossen werden, also nicht vor. **Insofern würde eine gesetzliche Klarstellung bzw. Anpassung für eine rechtssichere Ermöglichung der hybriden Energieerzeugung sorgen.**

8.5 Analyse Meeresumwelt

Die Wirkfaktoren der hybriden Energieerzeugung und somit auch kumulativen Effekte bei einer Mehrfachnutzung mit OWE unterscheiden sich je nach Form der Energieerzeugung. Im Folgenden werden drei Formen Photovoltaik (Abschnitt 8.5.1), Wellenenergie (Abschnitt 8.5.2) und Biokraftstoff aus Algen (Abschnitt 8.5.3) betrachtet.

8.5.1 Schwimmende PV-Anlagen

Dieser Abschnitt beschreibt die zusätzlichen Wirkfaktoren durch hybride Energieerzeugung in Form von Photovoltaik (Abschnitt 8.5.1.1), die potentiellen kumulativen Effekte bei einer Mehrfachnutzung mit OWE anhand von internationalen Praxisbeispielen und Forschungsprojekten (Abschnitt 8.5.1.2) sowie anhand einer Referenzfläche in der deutschen AWZ (Zone 3 in der Nordsee; Abschnitt 8.5.1.3), und technische Optionen zur Minderung negativer Umweltauswirkungen einer Mehrfachnutzung (Abschnitt 8.5.1.4).

8.5.1.1 Potentielle Wirkfaktoren der Nutzungsform „Photovoltaik“ als Einfachnutzung auf die Meeresumwelt

Schwimmende PV-Anlagen wirken auf verschiedene Schutzgüter über die Kategorien Lebensraumveränderungen, Schiffsverkehr und chemische Emissionen. Im folgenden Text werden diese Wirkfaktoren näher beschrieben und in Tabelle 25 für die vier Schutzgüter, die für die deutsche AWZ große Relevanz besitzen, aufgelistet.

- **Lebensraumveränderung**: Zur Befestigung von PV-Anlagen ist eine lokale Versiegelung des Meeresbodens notwendig. Um die PV-Anlagen in Position zu halten, sind Verankerungen erforderlich, welche zu einer lokalen Auskolkung des Meeresbodens führen und somit benthische Lebensräume stören können (Broad et al., 2020). Im Fall von Ankersystemen mit Ankergewichten und somit beweglichen Ankern können sich die Anker außerdem bewegen, wenn die PV-Anlage auf Wellen und Strömungen reagiert, was die Auswirkungen auf die angrenzenden benthischen Lebensräume möglicherweise noch verschlimmert (Benjamins et al., 2024). Moderne Ankerdesigns haben jedoch Erfahrungen aus der Aquakultur und der Offshore-Industrie für erneuerbare Energien profitiert und sind so konzipiert, dass sie solche Auswirkungen minimieren (Bienen et al., 2019). Zudem führen die PV-Anlagen zu einer Versiegelung der Wasseroberfläche, was je nach Intensität der

[292] S. hierzu Abschnitt 8.4.3.

Wasseroberflächenversiegelung beispielsweise marine Säugetiere vom Auftauchen und See- und Rastvögel vom Abtauchen hindern kann. Durch die Versiegelung der Wasseroberfläche entsteht außerdem eine Abschattung: Diese kann den Sauerstoffgehalt und die Wasserqualität beeinflussen, sowie Algen in ihrem Wachstum einschränken (Liu et al., 2023). Pedroso de Lima et al. (2021) beobachteten jedoch, dass sich der Sauerstoffgehalt unter den Floating-PV-Anlagen innerhalb eines Jahres nur geringfügig verringert hat, da Wind und Sonnenlicht die Wasseroberfläche unter den Anlagen immer noch leicht erreichen können. Die Versiegelung/Abschattung kann ebenfalls dazu führen, dass See- und Rastvögel ihre Beutefische schlechter sehen können, sodass die Fläche wiederum ein Rückzugsort für die Beutefische sein kann. Zudem wurden durch die Anlagen geringere Windaktivität an der Wasseroberfläche festgestellt, was zu einer verringerten Durchmischung der obersten Wasserschicht führen kann. Dieser Wirkfaktor tritt während der Betriebsphase und räumlich begrenzt mit meist nur wenigen (hundert) Metern um die PV-Anlage auf.

- **Akustische Emissionen durch Schiffsverkehr sowie Bau- und Wartungsarbeiten**: Der Schiffsverkehr durch Bau- und Wartungsarbeiten für schwimmende PV-Anlagen verursacht ähnliche Wirkfaktoren wie der Schiffsverkehr im Allgemeinen oder der erhöhte Schiffsverkehr während der Bau- und Wartungsfahrten von OWPs (siehe Abschnitt 4.1 und 4.2). Zudem entstehen akustische Emissionen bei den Bau- und Wartungsarbeiten von PV-Anlagen. Dieser Wirkfaktor tritt während des Baus, Betriebs und Rückbaus auf, und der Schall kann sich auf einer räumlichen Skala von mehreren Kilometern ausbreiten.

- **Chemische Emissionen**: Auch wenn Cadmiumtellurid-basierte PV-Anlagen verglichen mit anderen PV-Technologien die geringsten Emissionen an Schwermetallen zeigen (Basol & McCandless, 2014), können Schwermetalle sich bei Kontakt mit Regenwasser lösen und das Meerwasserverunreinigen, was wiederum Meeresorganismen schädigen kann. Die EU-Richtlinie definiert zwar Höchstkonzentrationen, um die Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten zu beschränken (2011/65/EU): Für Blei liegt der Wert bei 0,1 % am Gesamtgewicht; für Cadmium liegt der Wert bei 0,01 % am Gesamtgewicht. Allerdings sind PV-Anlagen von der Richtlinie ausgenommen. Zudem können durch den Schiffsverkehr chemische Emissionen eingetragen werden. Dieser Wirkfaktor tritt während der Bau-, Betriebs- und Rückbauphase auf; die Emissionsmenge hängt vom eingesetzten Material ab.

- **Störung/Anziehung/Verfangen:** Die PV-Anlagen und der Schiffsverkehr können die aquatische Fauna sowie See- und Rastvögel stören und vertreiben; zudem können sich Tiere in den Verankerungsleinen der schwimmenden PV-Anlagen verfangen. Rosa-Clot (2020) gab jedoch Hinweise auf eine gute Integration mit der Wasserfauna und selbst Vögel schienen sich nicht an den PV-Strukturen zu stören. Umgekehrt können die PV-Anlagen auch eine Anziehungswirkung auf Vögel haben, indem sie die PV-Anlagen als Rastplatz nutzen. Dieser Effekt kann durch die Navigationslichter der PV-Anlagen verstärkt werden (Maragoni et al., 2022; Schneider et al., 2023). Jedoch kann es ab einer gewissen Sonneneinstrahlung zu einer Erhitzung der PV-Struktur kommen, die zu irreversiblen Schäden an den Federn führen, sobald Vögel mit den PV-Anlagen in Berührung kommen (Grippo et al., 2015; Ho, 2016). Dieser Wirkfaktor tritt während der Betriebsphase auf; die Auswirkung ist abhängig von der Vogelart im Gebiet und entsprechender Vertreibungswirkung bzw. Anziehungskraft von PV-Anlagen auf Individuen.

Tabelle 25: Wirkfaktoren während Bau, Betrieb und Rückbau von Offshore-Windenergieanlagen auf einzelne Schutzgüter, die für die deutsche AWZ große Relevanz besitzen, sowie zusätzliche Wirkfaktoren durch hybride Energieerzeugung mit Hilfe von Photovoltaik.

Schutzgut	Kategorie	Wirkfaktoren durch OWE	Wirkfaktoren durch hybride Energieerzeugung (Photovoltaik)	Quellen beider Wirkfaktoren
Biotope am Meeresboden	Lebensraumveränderung	Sedimentaufwirbelung bei Errichtung, Betrieb und Rückbau der WEAs	Sedimentaufwirbelung bei Errichtung und Rückbau	Schultze et al. (2020)
	Lebensraumveränderung	Eintrag invasiver Arten	Eintrag invasiver Arten	Büttger et al. (2008), Jensen et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Vibration der WEAs		Vicen-Bueno et al. (2013), Djath et al. (2018), van Berkel et al. (2020), Lloret et al. (2022)
	Lebensraumveränderung	Veränderung der Hydrographie		Vicen-Bueno et al. (2013), Djath et al. (2018), Daewel et al. (2022), Lloret et al. (2022), Christiansen et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Elektrische Magnetfelder, Temperaturerhöhung durch Kabel	Elektrische Magnetfelder, Temperaturerhöhung durch Kabel	Taormina et al. (2018), Hutchinson et al. (2021)
	Lebensraumveränderung	Versiegelung	Versiegelung	Krone et al. (2017)
	Lebensraumveränderung		Abschattung	Pedroso de Lima et al. (2021)
	Lebensraumveränderung	Künstliche Riffe = Änderung von Habitat + Artzusammensetzung	Künstliche Riffe = Änderung von Habitat + Artzusammensetzung	Glarou et al. (2020), Rezaei et al. (2023)
	Fischerei	Reserve effect: Ausschluss der Fischerei im OWP und der aktiven Fischerei in 500 m Radius um OWP		Coates et al. (2016), Bastardie et al. (2020), Hintzen et al. (2021)
	Chemische Emissionen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Basol & McCandless (2014), Kirchgeorg et al. (2018), Lloret et al. (2022)

Schutzgut	Kategorie	Wirkfaktoren durch OWE	Wirkfaktoren durch hybride Energieerzeugung (Photovoltaik)	Quellen beider Wirkfaktoren
Fische	Lebensraumveränderung	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Chapman et al. (2021), Jensen et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Elektrische Magnetfelder durch Kabel	Elektrische Magnetfelder durch Kabel	Taormina et al. (2018), Hermans et al. (2024)
	Lebensraumveränderung	Künstliche Riffe = Änderung von Habitat + Artzusammensetzung	Künstliche Riffe = Änderung von Habitat + Artzusammensetzung	Glarou et al. (2020), Rezaei et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Floating OWE: Primäres und sekundäres Verfangen	Verfangen: Verankerungsleinen von schwimmenden PV-Anlagen	Maxwell et at. (2022)
	Fischerei	Reserve effect: Ausschluss der Fischerei im OWP und der aktiven Fischerei in 500 m Radius um OWP		Bigné et al. (2019), Halouani et al. (2020), Hintzen et al. (2021)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Schiffsverkehr	Schiffsverkehr	Putland et al. (2017, 2018)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Rammungen	Bau- und Wartungsarbeiten	Mooney et al. (2020)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Betriebsgeräusche		Wahlberg & Westerberg (2005), Bellmann et al. (2023)
	Chemische Emissionen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Basol & McCandless (2014), Kirchgeorg et al. (2018), Lloret et al. (2022)
Marine Säugetiere	Lebensraumveränderung	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Sonne et al. (2020), Jensen et al. (2023), Stokholm et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Elektrische Magnetfelder durch Kabel	Elektrische Magnetfelder durch Kabel	Taormina et al. (2018)
	Lebensraumveränderung	Floating OWE: Primäres und sekundäres Verfangen	Verfangen: Verankerungsleinen von schwimmenden PV-Anlagen	Benjamins et al. (2014), Maxwell et at. (2022)

Schutzgut	Kategorie	Wirkfaktoren durch OWE	Wirkfaktoren durch hybride Energieerzeugung (Photovoltaik)	Quellen beider Wirkfaktoren
	Fischerei	Reserve effect: Ausschluss der Fischerei im OWP und der aktiven Fischerei in 500 m Radius um OWP		Moan et al. (2020), Kindt-Larsen et al. (2023)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Schiffsverkehr	Schiffsverkehr	Dyndo et al. (2015), Putland et al. (2017), Wisniewska et al. (2018)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Rammungen	Bau- und Wartungsarbeiten	Brandt et al. (2018)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Betriebsgeräusche		Tougaard et al. (2009, 2020), Bellmann et al. (2023)
	Chemische Emissionen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Basol & McCandless (2014), Kirchgeorg et al. (2018), Lloret et al. (2022)
	Störung/ Kollisionsrisiko	Schiffsverkehr	Schiffsverkehr	Benhemma-Le Gall (2023)
See- und Rastvögel	Lebensraumveränderung	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Sonne et al. (2020), Jensen et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Elektrische Magnetfelder durch Kabel	Elektrische Magnetfelder durch Kabel	Taormina et al. (2018)
	Lebensraumveränderung	Floating OWE: Primäres und sekundäres Verfangen	Verfangen: Verankerungsleinen von schwimmenden PV-Anlagen	Maxwell et at. (2022)
	Fischerei	Reserve effect: Ausschluss der Fischerei im OWP und der aktiven Fischerei in 500 m Radius um OWP		Daunt et al. (2008), Searle et al. (2023)
	Akustische Emissionen	Schiffsverkehr	Schiffsverkehr	Mooney et al. (2019), Jalkanen et al. (2022)

Schutzgut	Kategorie	Wirkfaktoren durch OWE	Wirkfaktoren durch hybride Energieerzeugung (Photovoltaik)	Quellen beider Wirkfaktoren
	Akustische Emissionen	Rammungen	Bau- und Wartungsarbeiten	Mooney et al. (2019), Bellmann et al. (2023)
	Akustische Emissionen	Betriebsgeräusche		Mooney et al. (2019), Bellmann et al. (2023)
	Chemische Emissionen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Basol & McCandless (2014), Kirchgeorg et al. (2018), Lloret et al. (2022)
	Störung/ Kollisionsrisiko	Schiffsverkehr	Schiffsverkehr	Coleman et al. (2022)
	Störung/ Kollisionsrisiko	Kollisionsrisiko mit Rotorblättern	Anziehungswirkung: Irreversiblen Schäden an den Federn bei Kontakt mit PV-Anlagen ab gewisser Sonneneinstrahlung	Hüppop et al. (2006), Brabant et al. (2015), Grippo et al. (2015), Ronconi et al. (2015), Ho (2016)
	Störung/ Kollisionsrisiko	Vertreibungswirkung/ Barriere-Effekt durch OWP	Vertreibungswirkung	Fox & Krag Petersen (2019), Rosa-Clot (2020), Vilela et al. (2021), Garthe et al. (2023)

8.5.1.2 Potentielle kumulative Effekte von OWE und der Nutzungsform „Photovoltaik“ als Mehrfachnutzung auf die Meeresumwelt

Verglichen mit einer Einfachnutzung durch OWE (Abschnitt 4.2) bzw. einer Einfachnutzung durch Photovoltaik (Abschnitt 8.5.1.1) sind folgende kumulativen Effekte (siehe Definition in Abschnitt 4.4) bei einer Mehrfachnutzung aus OWE und Photovoltaik möglich:

- Eintrag von **pathogenen und invasiven Arten**: Durch den Schiffsverkehr während der Bau- und Wartungsarbeiten von OWPs sowie den Schiffsverkehr durch Bau- und Wartungsarbeiten von PV-Anlagen erhöht sich das Aufkommen an Schiffen und damit auch das Risiko, dass pathogene Arten und invasive Arten eingetragen werden. Allerdings sind Synergieeffekte möglich, sodass keine zusätzlichen Schiffe für Bau und Wartung der Photovoltaikanlagen eingesetzt und somit keine kumulativen Effekte erwartet werden.

- **Lebensraumveränderungen**: Bei OWPs verändert sich der Lebensraum durch die kleinteilige Versiegelung und somit der Entstehung einer künstlichen Riffstruktur („Artifical reef effect“), Sedimentaufwirbelung beim Bau, Betrieb und Rückbau eines OWPs, die Vibration durch die WEAs, Veränderungen der Hydrographie und elektrische Magnetfelder sowie Temperaturerhöhung um die stromführenden Kabel (siehe Abschnitt 4.2). Bei einer Mehrfachnutzung mit PV-Anlagen kommt die kleinteilige Versiegelung der Wasseroberfläche hinzu, was beispielsweise den Sauerstoffgehalt, die Wasserqualität, und somit Unterwasserpflanzen beeinflussen kann. Durch die stärkere Lebensraumveränderung bei einer Mehrfachnutzung aus OWE und hybrider Energieerzeugung mittels Photovoltaik könnten sich invasive Arten leichter ansiedeln und ausbreiten (Glarou et al., 2020; Lloret et al., 2022). Da sich der Sauerstoffgehalt unter den Floating-PV-Anlagen innerhalb eines Jahres jedoch nur geringfügig zu verringern scheint (Pedroso de Lima et al., 2021) und der Meeresboden auch für OWE als Einfachnutzung versiegelt werden muss, hängt die Lebensraumveränderung vor allem von der OWE ab. Bei einer kumulativen Betrachtung des Lebensraumes steht hier die erhöhte räumliche Effizienz durch die Mehrfachnutzung im Vordergrund, durch die der geografische Fußabdruck – verglichen mit OWE und PV-Anlagen jeweils als Einfachnutzung auf zwei unterschiedlichen Flächen – verringert wird.

- (Erhöhter) Eintrag **akustischer Emissionen**: Durch den Schiffsverkehr während Bau- und Wartungsarbeiten von OWPs oder von PV-Anlagen, sowie durch die Betriebsgeräusche von OWEAs kommt es zum Eintrag von überwiegend Dauerschall. Allerdings sind Synergieeffekte bei dem Einsatz von Schiffen für Bau und Wartung möglich, sodass keine kumulativen Effekte erwartet werden. Zusätzlich wird bei Rammungen von OWEAs und Bauarbeiten für Photovoltaik Impulsschall eingetragen. Bei zeitgleichen Bau-/Rückbauarbeiten in näherer Umgebung (d. h. überschneidenden Wirkungsradien der beiden Nutzungsformen) oder aber kurzzeitig hintereinander (z. B. aufeinanderfolgenden Monaten, aber auch jährlich während aufeinanderfolgender Paarungszeiten) im gleichen Gebiet sind kumulative Effekte möglich. Dementsprechend sollten die Schallemissionen möglichst gering und somit der Störradius möglichst klein gehalten werden, um den akustischen Fußabdruck bei einer Mehrfachnutzung zu minimieren und kumulative Effekte zu vermeiden.

- Eintrag **chemischer Emissionen**: Während der Bau-, Betriebs- und Rückbauphase von OWPs, sowie während des Schiffsverkehrs durch Photovoltaik können chemische Emissionen freigesetzt werden. Zusätzlich können durch die PV-Anlagen Schwermetalle eingetragen werden, was wiederum Meeresorganismen schädigen kann (Basol & McCandless, 2014). Allerdings wird der zusätzliche Eintrag während des Normalbetriebs aufgrund der Vorbelastung durch den allgemeinen Eintrag von Abwasser, Düngemittel, Müll und

schädlichen Substanzen in die Meere als kaum messbar eingeschätzt (ausgenommen sind Unfälle), sodass keine kumulativen Effekte erwartet werden.

- **Vertreibungswirkung**: Da die Reichweite der Vertreibungswirkung durch OWE als größer als die Reichweite der Störung durch Photovoltaik eingestuft wird, ist anzunehmen, dass die Reichweite bei einer Mehrfachnutzung größtenteils vom OWP und dessen Wirkfaktoren abhängt. Dementsprechend werden kumulative Effekte der Vertreibung bei einer Mehrfachnutzung für Arten wie beispielsweise Seetaucher, die Meideradien von über 10 km zur äußeren Windparkgrenze aufweisen (Dierschke et al., 2016; Garthe et al., 2018; Heinänen et al., 2020; Mendel et al., 2019; Vilela et al., 2020), als unwahrscheinlich eingestuft. Im Gegensatz dazu kann es bei Rastvögeln wie beispielsweise viele Möwenarten, die schwach von OWPs angezogen werden (Dierschke et al., 2016), durch die Oberflächenversiegelung durch Photovoltaik zu einem Verlust von Nahrungsgebieten und dadurch zu kumulativen Effekten der Vertreibung kommen. Rosa-Clot (2020) gab jedoch Hinweise auf eine gute Integration mit der Wasserfauna und auch Vögel schienen sich nicht an den PV-Strukturen zu stören. Auch Schweinswale könnten durch die Oberflächenversiegelung aus Gebieten schwach vertrieben werden, sodass in diesem Fall Schweinswale nicht vom vermuteten „Reserve effect“ und damit verbundenen erhöhten Nahrungsangebot innerhalb eines OWPs profitieren würden; jedoch ist der „Reserve effect“ noch wenig erforscht. Um die kumulativen Effekte einer Vertreibung bei einer Mehrfachnutzung besser beurteilen zu können, sind für die einzelnen Arten Studien zur Reichweite der Vertreibungswirkung durch Photovoltaik nötig.
- Anziehungswirkung und somit Risiko zur **Kollision/zum Verfangen/zur Verletzung**: PV-Anlagen können zusätzliche Rastoptionen darstellen und dadurch eine Anziehungswirkung auf See- und Rastvögel ausüben, in welchem Fall das Gebiet als Rast- und Nahrungsgebiet aufgewertet werden würde. Sollten PV-Anlagen eine Anziehungskraft auf See- und Rastvögel ausüben und als Rastplatz genutzt werden, sodass die Reichweite der Vertreibung durch den OWP gesenkt wird, kann sich die Anzahl an Kollisionen zwischen Vögeln und WEAs verglichen mit einer Einfachnutzung durch OWE erhöhen. Zudem können Fische, marine Säugetiere sowie See- und Rastvögel mit Schiffen kollidieren. Allerdings ist das Risiko generell als gering anzunehmen und es sind teilweise Synergieeffekte möglich, d. h. Schiffe für Bau und Wartung können gemeinsam für OWE und Photovoltaik genutzt werden, sodass sich der Schiffsverkehr nur eingeschränkt erhöht. Fische, See- und Rastvögel, sowie marine Säugetiere können sich ebenfalls in Verankerungsleinen von PV-Anlagen verfangen (siehe Abschnitt 8.5.1.1). Sollten wiederum der vermutete „Reserve effect“ und/oder der „Artifical reef effect“ der OWE bei einer Mehrfachnutzung zu einer höheren Dichte der aquatischen Fauna als bei einer Einfachnutzung durch Photovoltaik führen, dann können sich mehr Fische, See- und Rastvögel, sowie marine Säugetiere in Verankerungsleinen von PV-Anlagen verfangen. Außerdem kann es ab einer gewissen Sonneneinstrahlung zu irreversiblen Schäden an den Federn kommen (siehe Abschnitt 8.5.1.1), sobald Vögel mit den PV-Anlagen in Berührung kommen (Ho, 2016). Sollten der vermutete „Reserve effect“ und/oder der „Artifical reef effect“ der OWE bei einer Mehrfachnutzung auch zu höheren Anzahlen an See- und Rastvögeln als bei einer Einfachnutzung durch Photovoltaik führen, erhöht sich die Anzahl an verletzten Vögeln. Um die kumulativen Effekte bei einer Mehrfachnutzung besser beurteilen zu können, sind für die einzelnen Arten Studien zur Anziehungs-/Vertreibungswirkung durch Photovoltaik nötig.

Insgesamt werden bei einer Mehrfachnutzung aus OWE und Photovoltaik kumulativen Effekte in Bezug auf den Schiffsverkehr für möglich gehalten; jedoch sind hier Synergieeffekte möglich, d. h. Schiffe für Bau und Wartung können gemeinsam für OWE und Photovoltaik genutzt werden.

Zudem muss erforscht werden, inwiefern eine Mehrfachnutzung mit Photovoltaik zu einer erhöhten oder gesenkten Vertreibungswirkung führt.

Mögliche kumulative Effekte dieser Mehrfachnutzung wurden bisher in keinem Forschungsprojekt betrachtet. Auch bei keinem der laufenden Praxisbeispiele wurden die Auswirkungen auf die Meeresumwelt umfangreich untersucht: Die Mehrfachnutzung OWE und Photovoltaik wird bereits mit 2 PV-Anlagen mit insgesamt 0,5 MW an einer OWEA in Shandong (China) ausgeführt (Tabelle 21). Außerdem wurde in Griechenland eine „Ocean Hybrid Platform“ (Kombination von Wind, Wellen und Photovoltaik) getestet.

Weitere Praxisbeispiele zur Mehrfachnutzung OWE und Photovoltaik sind in Planung: Im OWP „Hollandse Kust Noord“ ist die Installation einer 0,5 MW PV-Anlage für 2025 und im OWP „Hollandse Kust West VII“ ist die Installation eines 5 MW-Demonstrators für 2026 geplant.

Zudem laufen derzeit Forschungsprojekte zur Mehrfachnutzung aus OWE und Photovoltaik, welche jedoch nicht schwerpunktmäßig die Effekte auf die Meeresumwelt adressieren:

- „MUSICA“ (2020-2025) mit einer Pilotanlage (Kombination von Wind, Wellen und Photovoltaik mit Aquakultur) in Griechenland (Schwerpunkt der Forschung: Technische Entwicklung einer replizierbaren intelligenten Plattform zur Mehrfachnutzung auf kleinen Inseln), und
- „EU-SCORES“ (2021-2025) mit Mehrfachnutzung aus Offshore-Photovoltaik-Systemen und einem im Boden befestigten OWP in Belgien (Schwerpunkt der Forschung: Technische Entwicklung eines widerstandsfähigen und stabilen Energiesystems zur Mehrfachnutzung).

Es fehlen häufig folgende Informationen, um die kumulativen Effekte genauer quantifizieren zu können:

- Wie groß ist die Vertreibungs-/Anziehungswirkung durch Photovoltaik für die einzelnen Arten und inwiefern ändert sich diese Wirkung bei einer Mehrfachnutzung mit OWE?
- Mit welcher Häufigkeit finden welche akustischen Emissionen durch Photovoltaik statt (beispielsweise Häufigkeit der Wartungsfahrten und inwiefern Synergieeffekte bei Schiffen zum Bau und zur Wartung der beiden Nutzungsformen möglich sind)?

8.5.1.3 Potentielle kumulative Umwelteffekte auf einer Referenzfläche durch die Mehrfachnutzung mit „Photovoltaik“

Bezüglich der Umweltverträglichkeit durch die Mehrfachnutzung aus OWE und hybrider Energieerzeugung mittels Photovoltaik werden im Folgenden die allgemeinen kumulativen Effekte aus Abschnitt 8.5.1.2 auf eine Referenzfläche übertragen: Hierzu wird eine Fläche Zone 3 der deutschen AWZ der Nordsee als Referenzfläche angenommen, welches unter anderem den Flächen EN9 bis EN13 entspricht (siehe Abschnitt A.5.1). Zusammenfassend hat die Referenzfläche laut Umweltbericht zum FEP (BSH, 2021a) eine erhöhte Bedeutung für die **grabende Bodenmegafauna, gefährdete Fischarten** (Sternrochen *Amblyraja radiata* und Zwergdorsch *Trisopterus minutus*), sowie **Zugvögel**. Auch wenn die Referenzfläche laut Umweltbericht zum FEP keine erhöhte Bedeutung für den **Schweinswal** hat, ist die Individuendichte in dem Gebiet vergleichsweise hoch, sodass der Schweinswal ebenfalls in einer Gesamtbetrachtung berücksichtigt werden muss (Geelhoed et al., 2023).

Generell sind die Wirkfaktoren der jeweiligen Einfachnutzungen als Auswirkungen auf die Schutzgüter anzunehmen; durch eine Mehrfachnutzung wird die räumliche Effizienz gesteigert. Insgesamt werden bei einer Mehrfachnutzung aus OWE und Photovoltaik kumulativen Effekte in

Bezug auf den Schiffsverkehr (sofern keine Synergieeffekte möglich sind) und die Vertreibungs-/Anziehungswirkung erwartet.

- (Erhöhter) Eintrag **akustischer Emissionen**: Da das Gebiet für Schweinswale eine hohe Individuendichte aufweist und für gefährdete Fischarten eine überdurchschnittliche Bedeutung hat (BSH, 2021a; Geelhoed et al., 2023), sollten akustische Emissionen möglichst gering gehalten werden. Ein Einsatz entsprechender Mitigationsmaßnahmen ist zu prüfen (siehe Abschnitt 4.3.1). Zwar können Schweinswale bei Eintrag akustischer Emissionen auf umliegende Gebiete mit einer potentiell ähnlichen Nahrungsverfügbarkeit ausweichen (Carlström et al., 2002), die Störungsradien sollten jedoch möglichst gering gehalten werden, um möglichst wenig potentielle Nahrungsgebiete auszuschließen. Die Auswirkung der kumulativen Effekte hängen dabei von der Dauer und Häufigkeit der akustischen Emissionen ab.

- **Vertreibungswirkung**: Bei einer Mehrfachnutzung aus OWE sowie hybrider Energieerzeugung mittels Photovoltaik kann die Reichweite der Störung zunehmen. In Bezug auf marine Säugetiere nutzen Schweinswale die Gebiete EN9 bis EN12 zum Durchqueren, Aufenthalt und wahrscheinlich als Nahrungsgrund (BSH, 2021a) und weisen eine hohe Individuendichte (Geelhoed et al., 2023) auf. Zudem hat die Referenzfläche eine erhöhte Bedeutung für gefährdete Fischarten (BSH, 2021a), sodass insbesondere die Vertreibungswirkung auf Schweinswale und gefährdete Fischarten geprüft werden sollte. Durch den Ausschluss der Fischerei kann der sog. „Reserve effect (Raoux et al., 2019) zum Tragen kommen, der zu einer größeren Artenvielfalt, Artengleichmäßigkeit, Abundanz, Gleichmäßigkeit im Geschlechtsverhältnis, Körpergröße und Lebenserwartung von Fischen führen kann (Bergström et al., 2023; Berkström et al., 2021; Eklöf et al., 2023; Florin et al., 2013; Halouani et al., 2020; Howarth, 2012; Roach et al., 2018; Röckmann et al., 2007; Rufener et al., 2023; Rybicki et al., 2021; Sala & Giakoumi, 2018; Simons et al., 2015; Sköld et al., 2022). Das wiederum kann das Nahrungsangebot für Fischarten auf höheren trophischen Ebenen sowie für marine Säugetiere verbessern, sodass die Fisch- und Säugetierdichte in den Gebieten bei einer Einfachnutzung durch OWE zunehmen kann; jedoch ist der „Reserve effect“ noch wenig erforscht und der Effekt des Fischereiausschlusses wurde nicht in allen Fällen als signifikant eingestuft, sondern hängt von verschiedenen Wirkfaktoren ab (siehe Abschnnitt 4.2.2). Sollten PV-Anlagen eine vertreibende Wirkung auf See- und Rastvögel ausüben, würde dieser vermutete Effekt bei einer Mehrfachnutzung verringert werden: In Bezug auf die häufigsten Zugvögel, für die die Gebiete eine durchschnittliche bis überdurchschnittliche Bedeutung haben (BSH, 2021a), könnten viele Möwenarten sowie Seeschwalben durch eine Mehrfachnutzung aus einem größeren Bereich vertrieben werden als bei einer Einfachnutzung durch OWE, denn diese zeigen ansonsten eine schwache Anziehung zu OWPs (Brabant et al., 2015; Dierschke et al., 2016; Krijgsveld, 2014). Der Effekte der Vertreibungswirkung hat im Allgemeinen jedoch einen deutlich größeren Effekt auf See- und Rastvögel verglichen mit den Zugvögeln, da Rastvögel bei einer Meidungsreaktion potentielles Habitat verlieren. In Bezug auf See- und Rastvögel wird die Referenzfläche als typischer Lebensraum der fischfressenden Hochseevogelgemeinschaft eingestuft mit Trottellumme, Dreizehenmöwe, Tordalk und Heringsmöwe als häufigste Arten in den Gebieten (BSH, 2021a). Heringsmöwen zeigen im Allgemeinen eine schwache Anziehung auf OWPs, Dreizehenmöwen zeigen Anziehungs- und Meideverhalten über alle Studien hinweg ungefähr gleich, während Tordalk und Trottellumme OWPs meiden (Dierschke et al., 2016; Peschko, Mendel, et al., 2020). Die Mehrfachnutzung könnte die Reichweite der Vertreibung bei diesen Arten dementsprechend verstärken verglichen mit einer Einfachnutzung aus OWE.

- Anziehungswirkung und somit Risiko **zur Kollision/zum Verfangen/zur Verletzung**: Anstatt der Vertreibung können PV-Anlagen durch die zusätzlichen Rastoptionen ebenfalls eine Anziehungswirkung auf See- und Rastvögel ausüben, in welchem Fall sich die Anzahl an Kollisionen zwischen Vögeln und WEAs verglichen mit einer Einfachnutzung durch OWE erhöhen kann. Da die Referenzfläche eine erhöhte Bedeutung für Zugvögel hat (BSH, 2021a), sollten technische Optionen zur Minimierung des Kollisionsrisikos geprüft werden (siehe Abschnitt 4.3.2). Sollten wiederum der vermutete „Reserve effect" und/oder der „Artifical reef effect" der OWE bei einer Mehrfachnutzung zu einer höheren Dichte der aquatischen Fauna als bei einer Einfachnutzung durch Photovoltaik führen, dann können sich mehr Fische, See- und Rastvögel, sowie marine Säugetiere in Verankerungsleinen von PV-Anlagen verfangen und mehr Vögel können irreversible Schäden an den Federn erleiden, sobald sie mit den PV-Anlagen in Berührung kommen. Auch diesbezüglich sollten Vergrämungsmaßnahmen geprüft werden. Eine Mehrfachnutzung könnte dementsprechend die Anzahl an Kollisionen und Verletzungen erhöhen verglichen mit der jeweiligen Einfachnutzung.

Für eine genauere Quantifizierung sind weitere Informationen nötig (siehe Abschnitt 8.5.1.2).

8.5.1.4 Bewertung technischer Optionen zur Minderung negativer Umweltwirkungen durch Mehrfachnutzung mit „Photovoltaik"

Es werden die üblichen technischen Optionen wie bei einer Einfachnutzung von OWE (beispielsweise Lärmminderungssysteme bei der Rammung der OWEA-Fundamente, vgl. Abschnitt 4.3) empfohlen. Hinsichtlich kumulativer Effekte durch gleichzeitige Nutzung einer Fläche für PV-Anlagen werden folgende technische Optionen zur Minderung negativer Umweltwirkungen durch Mehrfachnutzung empfohlen:

- (Erhöhter) Eintrag **akustischer Emissionen**: Da das Gebiet für Schweinswale eine mittlere Bedeutung und für gefährdete Fischarten eine überdurchschnittliche Bedeutung hat (BSH, 2021a), sollten akustische Emissionen möglichst gering gehalten werden (siehe Abschnitt 4.3.1). Zusätzlich zu diesen technischen Optionen wird ein Managementplan empfohlen, um beispielsweise Wartungsfahrten zu kombinieren und die Maximalgeschwindigkeit von Schifffahrzeugen zu begrenzen (Leaper et al., 2014).

- **Vertreibungswirkung**: Derzeit sind keine technischen Optionen bekannt, um die Vertreibungswirkung zu reduzieren.

- Anziehungswirkung und somit Risiko **zur Kollision/zum Verfangen/zur Verletzung**: Um Fische und Meeressäuger von PV-Anlagen fernzuhalten, können Vergrämungsgeräte eingesetzt werden (z. B. Pinger; Voß et al., 2023). Um See- und Rastvögel von OWEAs fernzuhalten, können Turbinen bei Erkennung eines hohen Kollisionsrisikos mittels technischer Systeme (Kamera/Radar) vorübergehend abgeschaltet werden. Zudem kann eine Anpassung der Lichtemissionen von OWEAs beispielsweise durch eine niedrigere Lichtintensität oder blinkende anstatt Dauerlichtern das Kollisionsrisiko senken. Des Weiteren ist eine akustische oder visuelle Vergrämung möglich, um Tiere von OWEAs fernzuhalten. Diese und weitere technische Optionen zur Minderung des Kollisionsrisikos von Vögeln werden in Abschnitt 4.3.2 näher beschrieben.

8.5.2 Wellenenergie

Dieser Abschnitt beschreibt die zusätzlichen Wirkfaktoren durch hybride Energieerzeugung in Form von Wellenenergie (Abschnitt 8.5.2.1), die potentiellen kumulativen Effekte bei einer Mehrfachnutzung mit OWE anhand von internationalen Praxisbeispielen und

Forschungsprojekten (Abschnitt 8.5.2.2) sowie anhand einer Referenzfläche in der deutschen AWZ (Zone 3 in der Nordsee; Abschnitt 8.5.2.3), und technische Optionen zur Minderung negativer Umweltauswirkungen einer Mehrfachnutzung (Abschnitt 8.5.2.4).

8.5.2.1 Potentielle Wirkfaktoren der Nutzungsform „Wellenenergie“ als Einfachnutzung auf die Meeresumwelt

Wie auch Photovoltaik, verursacht Wellenenergie ebenfalls Wirkfaktoren durch Lebensraumveränderungen, Schiffsverkehr und chemische Emissionen. Im folgenden Text werden diese Kategorien näher beschrieben und in Tabelle 26 für die vier Schutzgüter, die für die deutsche AWZ große Relevanz besitzen, aufgelistet.

- **Lebensraumveränderung**: Zur Befestigung von Wellenkraftwerken ist eine lokale Versiegelung des Meeresbodens notwendig, welche die Wasserströmung verändern und zu Kolk und/oder Ablagerungen führen kann (Frid et al., 2012; Taormina et al., 2020). Zudem kann sich die Wasser- und Sandströmung in der unmittelbaren Umgebung der Anlagen verändern, was den Sedimenttransport, Erosionen und die Ablagerung von Sedimenten und somit die benthischen Lebensräume, Besiedlungsmuster und die Artzusammensetzung in lokalen Ökosystemen beeinflusst (Frid et al., 2012; Langhamer et al., 2010; Taormina et al., 2020). Je nach Form der Wellenenergieanlage kann es außerdem zu einer Versiegelung der Wasseroberfläche kommen. Der aktuelle Forschungsstand deutet jedoch darauf hin, dass es keine signifikanten Auswirkungen auf Meerestiere und Lebensräume durch elektromagnetische Felder von Kabeln geben wird, noch Veränderungen in benthischen und pelagischen Lebensräumen oder ozeanographischen Systemen (Copping et al., 2020). Dieser Wirkfaktor tritt während der Betriebsphase und räumlich begrenzt mit meist nur wenigen (hundert) Metern um die Wellenenergieanlage auf.

- **Akustische Emissionen durch Schiffsverkehr**: Der Schiffsverkehr durch Bau- und Wartungsarbeiten für Wellenenergie verursacht ähnliche Wirkfaktoren wie der Schiffsverkehr im Allgemeinen oder der erhöhte Schiffsverkehr während der Bau- und Wartungsfahrten von OWPs: Beispielsweise können invasive Arten, pathogene Arten, Dauerschall und chemische Emissionen eingetragen werden, sowie marine Säugetiere oder See- und Rastvögel gestört werden und mit den Schiffen kollidieren (Junge et al., 2022). Derartige Auswirkungen sind bereits in Abschnitt 4.1 und 4.2 näher beschrieben. Dieser Wirkfaktor tritt während des Baus, Betriebs und Rückbaus auf, und der Schall kann sich auf einer räumlichen Skala von mehreren Kilometern ausbreiten.

- **Akustische Emissionen durch Wellenenergie**: Durch den Betrieb von Wellenkraftwerken entstehen akustische Emissionen, welcher Meeressäuger jedoch wahrscheinlich nicht beeinträchtigt (Copping et al., 2020; Tougaard, 2015). Zudem können Fische und Invertebraten die Partikelbewegung und Substratvibrationen der Wellenkraftwerke wahrnehmen (Popper et al., 2023), welches beispielsweise zu Veränderungen des Verhaltens oder der Physiologie führen kann (Nedelec, 2023). Dieser Wirkfaktor tritt während des Betriebs auf, wobei Copping et al. (2020) nach aktuellem Forschungsstand keine signifikanten Auswirkungen auf Meerestiere und Lebensräume erwartet.

- **Chemische Emissionen**: Das Wasser in der Umgebung von Wellenkraftwerken sollte chemisch analysiert werden, da Emissionen möglich sind (Bayoumi et al., 2010; Clemente et al., 2021). Dieser Wirkfaktor tritt während der Betriebsphase auf, die Emissionsmenge hängt vom eingesetzten Material ab.

- **Störung/Kollisionsrisiko**: Die Wellenkraftwerke können die aquatische Fauna sowie See- und Rastvögel stören und vertreiben, dieses Risiko wird jedoch als gering eingestuft (Lin & Yu, 2012; R. Smith & Adonizio, 2011). Zudem können sich Fische, marine Säugetiere sowie See- und Rastvögel in den Verankerungsleinen verfangen (Copping et al., 2020; Wilson et al., 2007) oder mit den statischen Anlagen kollidieren (Wilson et al., 2007), diese Wahrscheinlichkeiten werden jedoch ebenfalls als gering eingeschätzt (Copping et al., 2020; Frid et al., 2012). Das erheblich größere Risiko besteht darin, dass Fische, Meeressäuger oder Seevögel in den Turbinen der Wellenkraftwerke verenden (Frid et al., 2012). Dieses Risiko von Kollisionen mit Fischen, Meeressäugern und Seevögeln mit Turbinen ist bislang noch relativ unerforscht, da die Häufigkeit des Auftretens und die Folgen unbekannt sind (Copping et al., 2020). Unter den Technologien für Wellenkraftwerke, welche sich im fortgeschrittenen Realisierungsstatus befinden (siehe Abschnitt 8.1.2), werden jedoch nur bei dem Prinzip der oszillierenden Wassersäule Turbinen eingesetzt (siehe Abschnitt 8.1.2.3). Dieser Wirkfaktor tritt während der Betriebsphase räumlich begrenzt um die einzelnen Wellenkraftwerke auf.

Tabelle 26: Wirkfaktoren während Bau, Betrieb und Rückbau von Offshore-Windenergieanlagen auf einzelne Schutzgüter, die für die deutsche AWZ große Relevanz besitzen, sowie zusätzliche Wirkfaktoren durch hybride Energieerzeugung mit Hilfe von Wellenenergie.

Schutzgut	Kategorie	Wirkfaktoren durch OWE	Wirkfaktoren durch hybride Energieerzeugung (Wellenenergie)	Quellen beider Wirkfaktoren
Biotope am Meeresboden	Lebensraumveränderung	Sedimentaufwirbelung bei Errichtung, Betrieb und Rückbau der WEAs	Sedimentaufwirbelung bei Errichtung und Rückbau	Schultze et al. (2020)
	Lebensraumveränderung	Eintrag invasiver Arten	Eintrag invasiver Arten	Büttger et al. (2008), Jensen et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Vibration der WEAs	Veränderung der Wasser- und Sandströmung in der unmittelbaren Umgebung der Anlagen	Langhamer et al. (2010), Frid et al. (2012), Vicen-Bueno et al. (2013), Djath et al. (2018), van Berkel et al. (2020), Taormina et al. (2020), Lloret et al. (2022), Nedelec (2023), Popper et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Veränderung der Hydrographie		Vicen-Bueno et al. (2013), Djath et al. (2018), Daewel et al. (2022), Taormina et al. (2020), Lloret et al. (2022), Christiansen et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Elektrische Magnetfelder, Temperaturerhöhung durch Kabel	Elektrische Magnetfelder, Temperaturerhöhung durch Kabel	Taormina et al. (2018), Hutchinson et al. (2021)
	Lebensraumveränderung	Versiegelung	Versiegelung	Krone et al. (2017)
	Lebensraumveränderung	Künstliche Riffe = Änderung von Habitat + Artzusammensetzung	Künstliche Riffe = Änderung von Habitat + Artzusammensetzung	Glarou et al. (2020), Rezaei et al. (2023)
	Fischerei	Reserve effect: Ausschluss der Fischerei im OWP und der aktiven Fischerei in 500 m Radius um OWP		Coates et al. (2016), Bastardie et al. (2020), Hintzen et al. (2021)

Schutzgut	Kategorie	Wirkfaktoren durch OWE	Wirkfaktoren durch hybride Energieerzeugung (Wellenenergie)	Quellen beider Wirkfaktoren
	Chemische Emissionen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Bayoumi et al. (2010), Kirchgeorg et al. (2018), Clemente et al. (2021), Lloret et al. (2022)
Fische	Lebensraumveränderung	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Chapman et al. (2021), Jensen et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Elektrische Magnetfelder durch Kabel	Elektrische Magnetfelder durch Kabel	Taormina et al. (2018), Hermans et al. (2024)
	Lebensraumveränderung	Künstliche Riffe = Änderung von Habitat + Artzusammensetzung	Künstliche Riffe = Änderung von Habitat + Artzusammensetzung	Glarou et al. (2020), Rezaei et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Floating OWE: Primäres und sekundäres Verfangen	Verfangen: Verankerungsleinen von Wellenkraftwerken	Wilson et al. (2007), Maxwell et at. (2022)
	Fischerei	Reserve effect: Ausschluss der Fischerei im OWP und der aktiven Fischerei in 500 m Radius um OWP		Bigné et al. (2019), Halouani et al. (2020), Hintzen et al. (2021)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Schiffsverkehr	Schiffsverkehr	Putland et al. (2017, 2018)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Rammungen	Bau- und Wartungsarbeiten	Mooney et al. (2020)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Betriebsgeräusche	Vibration der Wellenkraftwerke / Teilchenbewegung	Wahlberg & Westerberg (2005), Bellmann et al. (2023), Popper et al. (2023)
	Chemische Emissionen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Bayoumi et al. (2010), Kirchgeorg et al. (2018), Clemente et al. (2021), Lloret et al. (2022)

Schutzgut	Kategorie	Wirkfaktoren durch OWE	Wirkfaktoren durch hybride Energieerzeugung (Wellenenergie)	Quellen beider Wirkfaktoren
	Störung/ Kollisionsrisiko		Vertreibungswirkung	Smith & Adonizio (2011)
	Störung/ Kollisionsrisiko		Verenden in Turbinen (beim Prinzip der oszillierenden Wassersäule; siehe Abschnitt 8.1.2.3	Frid et al. (2012), Copping et al. (2020)
Marine Säugetiere	Lebensraumveränderung	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Sonne et al. (2020), Jensen et al. (2023), Stokholm et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Elektrische Magnetfelder durch Kabel	Elektrische Magnetfelder durch Kabel	Taormina et al. (2018)
	Lebensraumveränderung	Floating OWE: Primäres und sekundäres Verfangen	Verfangen: Verankerungsleinen von Wellenkraftwerken	Wilson et al. (2007), Benjamins et al. (2014), Copping et al. (2020), Maxwell et at. (2022)
	Fischerei	Reserve effect: Ausschluss der Fischerei im OWP und der aktiven Fischerei in 500 m Radius um OWP		Moan et al. (2020), Kindt-Larsen et al. (2023)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Schiffsverkehr	Schiffsverkehr	Dyndo et al. (2015), Putland et al. (2017), Wisniewska et al. (2018)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Rammungen	Bau- und Wartungsarbeiten	Brandt et al. (2018), Copping et al. (2020)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Betriebsgeräusche		Tougaard et al. (2009, 2020), Bellmann et al. (2023)
	Chemische Emissionen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Bayoumi et al. (2010), Kirchgeorg et al. (2018), Clemente et al. (2021), Lloret et al. (2022)
	Störung/ Kollisionsrisiko	Schiffsverkehr	Schiffsverkehr	Benhemma-Le Gall (2023)

Schutzgut	Kategorie	Wirkfaktoren durch OWE	Wirkfaktoren durch hybride Energieerzeugung (Wellenenergie)	Quellen beider Wirkfaktoren
See- und Rastvögel	Lebensraumveränderung	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Sonne et al. (2020), Jensen et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Elektrische Magnetfelder durch Kabel	Elektrische Magnetfelder durch Kabel	Taormina et al. (2018)
	Lebensraumveränderung	Floating OWE: Primäres und sekundäres Verfangen	Verfangen: Verankerungsleinen von Wellenkraftwerken	Wilson et al. (2007), Copping et al. (2020), Maxwell et at. (2022)
	Fischerei	Reserve effect: Ausschluss der Fischerei im OWP und der aktiven Fischerei in 500 m Radius um OWP		Daunt et al. (2008), Searle et al. (2023)
	Akustische Emissionen	Schiffsverkehr	Schiffsverkehr	Mooney et al. (2019), Jalkanen et al. (2022)
	Akustische Emissionen	Rammungen	Bau- und Wartungsarbeiten	Mooney et al. (2019), Bellmann et al. (2023)
	Akustische Emissionen	Betriebsgeräusche		Mooney et al. (2019), Bellmann et al. (2023)
	Chemische Emissionen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Bayoumi et al. (2010), Kirchgeorg et al. (2018), Clemente et al. (2021), Lloret et al. (2022)
	Störung/ Kollisionsrisiko	Schiffsverkehr	Schiffsverkehr	Coleman et al. (2022)
	Störung/ Kollisionsrisiko	Kollisionsrisiko mit Rotorblättern	Kollisionsrisiko über und unter Wasser	Hüppop et al. (2006), Wilson et al. (2007), Grecian et al. (2010), Brabant et al. (2015), Ronconi et al. (2015), Copping et al. (2020)
	Störung/ Kollisionsrisiko	Vertreibungswirkung/ Barriere-Effekt durch OWP	Vertreibungswirkung	Grecian et al. (2010), Lin & Yu (2012), Fox & Krag Petersen

Schutzgut	Kategorie	Wirkfaktoren durch OWE	Wirkfaktoren durch hybride Energieer-zeugung (Wellenenergie)	Quellen beider Wirkfaktoren
				(2019), Vilela et al. (2021), Garthe et al. (2023)

8.5.2.2 Potentielle kumulative Effekte von OWE und der Nutzungsform „Wellenenergie“ als Mehrfachnutzung auf die Meeresumwelt

Verglichen mit einer Einfachnutzung durch OWE (Abschnitt 4.2) bzw. einer Einfachnutzung durch Wellenenergie (Abschnitt 8.5.2.1) sind folgende kumulativen Effekte (siehe Definition in Abschnitt 4.4) bei einer Mehrfachnutzung aus OWE und Wellenenergie möglich:

- Eintrag von **pathogenen und invasiven Arten**: Durch den Schiffsverkehr während der Bau- und Wartungsarbeiten von OWPs sowie den Schiffsverkehr durch Bau- und Wartungsarbeiten von Wellenkraftwerken erhöht sich das Aufkommen an Schiffen und damit auch das Risiko, dass pathogene Arten und invasive Arten eingetragen werden. Allerdings sind Synergieeffekte möglich, sodass keine zusätzlichen Schiffe für Bau und Wartung der Wellenenergieanlagen eingesetzt und somit keine kumulativen Effekte erwartet werden.

- **Lebensraumveränderungen**: Bei OWPs verändert sich der Lebensraum durch die Versiegelung und somit der Entstehung einer künstlichen Riffstruktur („Artifical reef effect“), Sedimentaufwirbelung beim Bau, Betrieb und Rückbau eines OWPs, die Vibration der WEAs, Veränderungen der Hydrographie und elektrische Magnetfelder sowie Temperaturerhöhung um die stromführenden Kabel (siehe Abschnitt 4.2). Bei einer Mehrfachnutzung mit Wellenenergie kann sich die Wasser- und Sandströmung in der unmittelbaren Umgebung der Anlagen verändern, was den Sedimenttransport, Erosionen und die Ablagerung von Sedimenten und somit die benthischen Lebensräume, Besiedlungsmuster und die Artzusammensetzung in lokalen Ökosystemen beeinflusst. Da der Meeresboden jedoch auch für OWE als Einfachnutzung versiegelt werden muss und sich auch bei OWE die Strömungsmuster ändern können, hängt die Lebensraumveränderung vor allem von der OWE ab. Bei einer kumulativen Betrachtung des Lebensraumes steht hier die erhöhte räumliche Effizienz durch die Mehrfachnutzung im Vordergrund, durch die der geografische Fußabdruck – verglichen mit OWE und Wellenkraftwerken jeweils als Einfachnutzung auf zwei unterschiedlichen Flächen – verringert wird.

- (Erhöhter) Eintrag **akustischer Emissionen**: Durch den Schiffsverkehr während Bau- und Wartungsarbeiten von OWPs oder von Wellenkraftwerken, sowie durch die Betriebsgeräusche von OWEAs und Wellenkraftwerken kommt es zum Eintrag von überwiegend Dauerschall. Allerdings sind Synergieeffekte bei dem Einsatz von Schiffen für Bau und Wartung möglich, sodass keine kumulativen Effekte erwartet werden. Zusätzlich wird bei Rammungen von OWEAs und Bauarbeiten für Wellenenergie Impulsschall eingetragen. Bei zeitgleichen Bau-/Rückbauarbeiten in näherer Umgebung (d. h. überschneidenden Wirkungsradien der beiden Nutzungsformen) oder aber kurzzeitig hintereinander (z. B. aufeinanderfolgenden Monaten, aber auch jährlich während aufeinanderfolgender Paarungszeiten) im gleichen Gebiet sind kumulative Effekte möglich. Dementsprechend sollten die Schallemissionen möglichst gering und somit der Störradius möglichst klein gehalten werden, um den akustischen Fußabdruck bei einer Mehrfachnutzung zu minimieren und kumulative Effekte zu vermeiden.

- Eintrag **chemischer Emissionen**: Während der Bau-, Betriebs- und Rückbauphase von OWPs, sowie während des Schiffsverkehrs bei Bau- und Wartungsfahrten von Wellenkraftwerken können chemische Emissionen freigesetzt werden. Zusätzlich können durch die Wellenkraftwerke an sich chemische Schadstoffe emittiert werden, was wiederum Meeresorganismen schädigen kann (Bayoumi et al., 2010; Clemente et al., 2021). Allerdings wird der zusätzliche Eintrag während des Normalbetriebs aufgrund der Vorbelastung durch den allgemeinen Eintrag von Abwasser, Düngemittel, Müll und schädlichen

Substanzen in die Meere als kaum messbar eingeschätzt (ausgenommen sind Unfälle), sodass keine kumulativen Effekte erwartet werden.

- **Vertreibungswirkung**: Wellenkraftwerke sowie der Schiffsverkehr können die aquatische Fauna und See- und Rastvögel stören, die Reichweite der Vertreibung durch Wellenkraftwerke scheint jedoch deutlich geringer zu sein als durch OWE (Grecian et al., 2010; Inger et al., 2009; Mueller & Wallace, 2008). Dementsprechend wird erwartet, dass die Reichweite der Vertreibung bei einer Mehrfachnutzung mit Wellenenergie größtenteils vom OWP und dessen Wirkfaktoren abhängt. Kumulative Effekte der Vertreibung bei einer Mehrfachnutzung werden für Arten wie beispielsweise Seetaucher, die Meideradien von über 10 km zur äußeren Windparkgrenze aufweisen (Dierschke et al., 2016; Garthe et al., 2018; Heinänen et al., 2020; Mendel et al., 2019; Vilela et al., 2020), als unwahrscheinlich eingestuft. Im Gegensatz dazu kann es bei Rastvögeln wie beispielsweise viele Möwenarten, die schwach von OWPs angezogen werden (Dierschke et al., 2016), durch die Oberflächenversiegelung durch Wellenkraftwerke zu einem Verlust von Nahrungsgebieten und dadurch zu kumulativen Effekten der Vertreibung kommen. Auch Schweinswale können durch die Oberflächenversiegelung aus Gebieten schwach vertrieben werden, sodass in diesem Fall Schweinswale nicht vom vermuteten „Reserve effect“ und damit verbundenen erhöhten Nahrungsangebot innerhalb eines OWPs profitieren würden; jedoch ist der „Reserve effect“ noch wenig erforscht. Um die kumulativen Effekte einer Vertreibung bei einer Mehrfachnutzung besser beurteilen zu können, sind für die einzelnen Arten Studien zur Reichweite der Vertreibungswirkung durch Wellenenergie nötig.
- Anziehungswirkung und somit Risiko **zur Kollision/zum Verfangen/zur Verletzung:** Wellenenergieanlagen können durch die Strukturen an der Wasseroberfläche (siehe Abschnitt 8.1.2) und die damit einhergehenden zusätzlichen Rastoptionen eine Anziehungswirkung auf See- und Rastvögel ausüben, in welchem Fall das Gebiet als Rast- und Nahrungsgebiet aufgewertet werden würde. Sollten Wellenenergieanlagen eine Anziehungskraft auf See- und Rastvögel ausüben und als Rastplatz genutzt werden, sodass die Reichweite der Vertreibung durch den OWP gesenkt wird, erhöht sich die Anzahl an Kollisionen zwischen Vögeln und WEAs verglichen mit einer Einfachnutzung durch OWE. Zudem können Fische, marine Säugetiere sowie See- und Rastvögel mit Schiffen kollidieren. Allerdings ist das Risiko generell als gering anzunehmen und es sind teilweise Synergieeffekte möglich, d. h. Schiffe für Bau und Wartung können gemeinsam für OWE und Wellenenergie genutzt werden, sodass sich der Schiffsverkehr nur eingeschränkt erhöht. Zudem können sich Fische, See- und Rastvögel, sowie marine Säugetiere in Verankerungsleinen von Wellenkraftwerken verfangen oder in den Turbinen der Wellenkraftwerke verenden (Copping et al., 2020; Frid et al., 2012; Wilson et al., 2007). Sollten der vermutete „Reserve effect“ und/oder der „Artifical reef effect“ der OWE auch bei einer Mehrfachnutzung eine Anziehungskraft auf Fische, marine Säugetiere sowie See- und Rastvögel ausüben, sodass die Reichweite der Vertreibung verglichen mit einer Einfachnutzung durch Wellenenergie gesenkt wird, erhöht sich die Anzahl an Kollisionen mit Wellenkraftwerken, an in Verankerungsleinen der Wellenkraftwerke verfangenen und in Turbinen verendeten Tieren. Unter den Technologien für Wellenkraftwerke, welche sich im fortgeschrittenen Realisierungsstatus befinden (siehe Abschnitt 8.1.2), werden jedoch nur bei dem Prinzip der oszillierenden Wassersäule Turbinen eingesetzt (siehe Abschnitt 8.1.2.3). Um die kumulativen Effekte bei einer Mehrfachnutzung besser beurteilen zu können, sind für die einzelnen Arten Studien zur Anziehungs-/Vertreibungswirkung bei einer Mehrfachnutzung aus OWE und Wellenenergie nötig.

Insgesamt werden bei einer Mehrfachnutzung aus OWE und Wellenenergie kumulativen Effekte in Bezug auf den Schiffsverkehr für möglich gehalten; jedoch sind hier Synergieeffekte möglich, d. h. Schiffe für Bau und Wartung können gemeinsam für OWE und Wellenenergie genutzt werden. Zudem muss erforscht werden, inwiefern eine Mehrfachnutzung mit Wellenenergie zu einer erhöhten oder gesenkten Vertreibungswirkung führt.

Mögliche kumulative Effekte dieser Mehrfachnutzung wurden bisher in keinem Forschungsprojekt betrachtet. Auch bei keinem der laufenden Praxisbeispiele und abgeschlossenen Forschungsprojekte wurden die Auswirkungen auf die Meeresumwelt umfangreich untersucht: Die Mehrfachnutzung OWE und Wellenenergie wurde bereits mit einer Pilotanlage eines Wellenenergiewerks im Modellmaßstab in Deutschland in unmittelbarer Nähe zur Forschungsplattform FINO 3 und zum OWP „DanTysk“, innerhalb des europäischen Forschungsprojektes „O-RECCA“ (2010-2011) zur Mehrfachnutzung aus Offshore-Wind-, Wellen- und Gezeitenenergie, sowie mit der „Ocean Hybrid Platform“ (Kombination von Wind, Wellen und Photovoltaik) in Griechenland getestet (Tabelle 21). Stattdessen haben die Forschungsprojekte hauptsächlich die technischen Aspekte untersucht.

Weitere Forschungsprojekte zur Mehrfachnutzung aus OWE und Wellenenergie laufen derzeit, welche jedoch ebenfalls nicht schwerpunktmäßig die Effekte auf die Meeresumwelt adressieren:

- „MUSICA“ (2020-2025) mit einer Pilotanlage (Kombination von Wind, Wellen und Photovoltaik mit Aquakultur) in Griechenland (Schwerpunkt der Forschung: Technische Entwicklung einer replizierbaren intelligenten Plattform zur Mehrfachnutzung auf kleinen Inseln), und
- „EU-SCORES“ (2021-2025) mit Mehrfachnutzung aus Wellenenergieanlagen und einem schwimmenden OWP in Portugal (Schwerpunkt der Forschung: Technische Entwicklung eines widerstandsfähigen und stabilen Energiesystems zur Mehrfachnutzung).

Es fehlen häufig folgende Informationen, um die kumulativen Effekte genauer quantifizieren zu können:

- Wie groß ist Vertreibungs-/Anziehungswirkung durch Wellenenergie für die einzelnen Arten und inwiefern ändert sich diese Wirkung bei einer Mehrfachnutzung mit OWE?
- Mit welcher Häufigkeit finden welche akustischen Emissionen durch Wellenenergie statt (beispielsweise Häufigkeit der Wartungsfahrten und inwiefern Synergieeffekte bei Schiffen zum Bau und zur Wartung der beiden Nutzungsformen möglich sind)?

8.5.2.3 Potentielle kumulative Umwelteffekte auf einer Referenzfläche durch die Mehrfachnutzung mit „Wellenenergie“

Bezüglich der Umweltverträglichkeit durch die Mehrfachnutzung aus OWE und hybrider Energieerzeugung mittels Wellenenergie werden im Folgenden die allgemeinen kumulativen Effekte aus Abschnitt 8.5.2.2 auf eine Referenzfläche übertragen: Hierzu wird eine Fläche Zone 3 der deutschen AWZ der Nordsee als Referenzfläche angenommen, welches unter anderem den Flächen EN9 bis EN13 entspricht (siehe Abschnitt A.5.1). Zusammenfassend hat die Referenzfläche laut Umweltbericht zum FEP (BSH, 2021a) eine erhöhte Bedeutung für die **grabende Bodenmegafauna, gefährdete Fischarten** (Sternrochen *Amblyraja radiata* und Zwergdorsch *Trisopterus minutus*), sowie **Zugvögel**. Auch wenn die Referenzfläche laut Umweltbericht zum FEP keine erhöhte Bedeutung für den **Schweinswal** hat, ist die Individuendichte in dem Gebiet vergleichsweise hoch, sodass der Schweinswal ebenfalls in einer Gesamtbetrachtung berücksichtigt werden muss (Geelhoed et al., 2023).

Generell sind die Wirkfaktoren der jeweiligen Einfachnutzungen als Auswirkungen auf die Schutzgüter anzunehmen; durch eine Mehrfachnutzung wird die räumliche Effizienz gesteigert. Insgesamt werden bei einer Mehrfachnutzung aus OWE und Wellenenergie kumulativen Effekte in Bezug auf den Schiffsverkehr (sofern keine Synergieeffekte möglich sind) und die Vertreibungs-/Anziehungswirkung erwartet.

- (Erhöhter) Eintrag **akustischer Emissionen**: Da das Gebiet für Schweinswale eine hohe Individuendichte aufweist und für gefährdete Fischarten eine überdurchschnittliche Bedeutung hat (BSH, 2021a; Geelhoed et al., 2023), sollten akustische Emissionen möglichst gering gehalten werden. Ein Einsatz entsprechender Mitigationsmaßnahmen ist zu prüfen (siehe Abschnitt 4.3.1). Zwar können Schweinswale bei Eintrag akustischer Emissionen auf umliegende Gebiete mit einer potentiell ähnlichen Nahrungsverfügbarkeit ausweichen (Carlström et al., 2002), die Störungsradien sollten jedoch möglichst gering gehalten werden, um möglichst wenig potentielle Nahrungsgebiete auszuschließen. Die Auswirkung der kumulativen Effekte hängen von der Dauer und Häufigkeit der akustischen Emissionen ab.
- **Vertreibungswirkung**: Bei einer Mehrfachnutzung aus OWE sowie hybrider Energieerzeugung mittels Wellenenergie kann die Reichweite der Störung zunehmen. In Bezug auf marine Säugetiere nutzen Schweinswale die Gebiete EN9 bis EN12 zum Durchqueren, Aufenthalt und wahrscheinlich als Nahrungsgrund (BSH, 2021a) und weisen eine hohe Individuendichte (Geelhoed et al., 2023) auf. Zudem hat die Referenzfläche eine erhöhte Bedeutung für gefährdete Fischarten (BSH, 2021a), sodass insbesondere die Vertreibungswirkung auf Schweinswale und gefährdete Fischarten geprüft werden sollte. Durch den Ausschluss der Fischerei kann der sog. „Reserve effect“ (Raoux et al., 2019) zum Tragen kommen, der zu einer größeren Artenvielfalt, Artengleichmäßigkeit, Abundanz, Gleichmäßigkeit im Geschlechtsverhältnis, Körpergröße und Lebenserwartung von Fischen führen kann (Bergström et al., 2023; Berkström et al., 2021; Eklöf et al., 2023; Florin et al., 2013; Halouani et al., 2020; Howarth, 2012; Roach et al., 2018; Röckmann et al., 2007; Rufener et al., 2023; Rybicki et al., 2021; Sala & Giakoumi, 2018; Simons et al., 2015; Sköld et al., 2022) führen kann. Das wiederum kann das Nahrungsangebot für Fischarten auf höheren trophischen Ebenen sowie für marine Säugetiere verbessern, sodass die Fisch- und Säugetierdichte in den Gebieten bei einer Einfachnutzung durch OWE zunehmen kann; jedoch ist der „Reserve effect“ noch wenig erforscht und der Effekt des Fischereiausschlusses wurde nicht in allen Fällen als signifikant eingestuft, sondern hängt von verschiedenen Wirkfaktoren ab (siehe Abschnitt 4.2.2). Sollten Wellenkraftwerke eine vertreibende Wirkung auf See- und Rastvögel ausüben, würde dieser vermutete Effekt bei einer Mehrfachnutzung verringert werden. In Bezug auf die häufigsten Zugvögel, für die die Gebiete eine durchschnittliche bis überdurchschnittliche Bedeutung haben (BSH, 2021a), könnten viele Möwenarten sowie Seeschwalben durch eine Mehrfachnutzung aus einem größeren Bereich vertrieben werden als bei einer Einfachnutzung durch OWE, denn diese zeigen ansonsten eine schwache Anziehung zu OWPs (Brabant et al., 2015; Dierschke et al., 2016; Krijgsveld, 2014). Der Effekte der Vertreibungswirkung hat im Allgemeinen jedoch einen deutlich größeren Effekt auf See- und Rastvögel verglichen mit den Zugvögeln, da Rastvögel bei einer Meidungsreaktion potentielles Habitat verlieren. In Bezug auf See- und Rastvögel wird die Referenzfläche als typischer Lebensraum der fischfressenden Hochseevogelgemeinschaft eingestuft mit Trottellumme, Dreizehenmöwe, Tordalk und Heringsmöwe als häufigste Arten in den Gebieten (BSH, 2021a). Heringsmöwen zeigen im Allgemeinen eine schwache Anziehung auf OWPs, Dreizehenmöwen zeigen Anziehungs- und Meideverhalten über alle Studien hinweg ungefähr gleich,

während Tordalk und Trottellumme OWPs meiden (Dierschke et al., 2016; Peschko, Mendel, et al., 2020). Die Mehrfachnutzung könnte die Reichweite der Vertreibung bei diesen Arten dementsprechend verstärken verglichen mit einer Einfachnutzung aus OWE.

- Anziehungswirkung und somit Risiko **zur Kollision/zum Verfangen/zur Verletzung**: Anstatt der Vertreibung können Wellenenergieanlagen durch die zusätzlichen Rastoptionen ebenfalls eine Anziehungswirkung auf See- und Rastvögel ausüben, in welchem Fall sich die Anzahl an Kollisionen zwischen Vögeln und WEAs verglichen mit einer Einfachnutzung durch OWE erhöhen kann. Da die Referenzfläche eine erhöhte Bedeutung für Zugvögel hat (BSH, 2021a), sollten technische Optionen zur Minimierung des Kollisionsrisikos geprüft werden (siehe Abschnitt 4.3.2). Sollten wiederum der vermutete „Reserve effect“ und/oder der „Artifical reef effect“ der OWE auch bei einer Mehrfachnutzung eine Anziehungskraft auf Fische, marine Säugetiere sowie See- und Rastvögel ausüben, sodass die Reichweite der Vertreibung verglichen mit einer Einfachnutzung durch Wellenenergie gesenkt wird, erhöht sich die Anzahl an Kollisionen mit Wellenkraftwerken, an in Verankerungsleinen der Wellenkraftwerke verfangenen und in Turbinen verendeten Tieren. Unter den Technologien für Wellenkraftwerke, welche sich im fortgeschrittenen Realisierungsstatus befinden (siehe Abschnitt 8.1.2), werden jedoch nur bei dem Prinzip der oszillierenden Wassersäule Turbinen eingesetzt (siehe Abschnitt 8.1.2.3). Da die Referenzfläche eine erhöhte Bedeutung für Zugvögel hat, sollten insbesondere für diese Arten technische Optionen zur Vergrämung geprüft werden. Die Mehrfachnutzung könnte die Anzahl an Kollisionen und Verletzungen erhöhen verglichen mit der jeweiligen Einfachnutzung.

Für eine genauere Quantifizierung sind weitere Informationen nötig (siehe Abschnitt 8.5.2.2).

8.5.2.4 Bewertung technischer Optionen zur Minderung negativer Umweltwirkungen durch Mehrfachnutzung mit „Wellenenergie“

Es werden die üblichen technischen Optionen wie bei einer Einfachnutzung von OWE (beispielsweise Lärmminderungssysteme bei der Rammung der OWEA-Fundamente) empfohlen. Hinsichtlich kumulativer Effekte durch gleichzeitige Nutzung einer Fläche für Anlagen zur Wellenenergieerzeugung werden folgende technische Optionen zur Minderung negativer Umweltwirkungen durch Mehrfachnutzung empfohlen:

- (Erhöhter) Eintrag **akustischer Emissionen**: Da das Gebiet für Schweinswale eine mittlere Bedeutung und für gefährdete Fischarten eine überdurchschnittliche Bedeutung hat (BSH, 2021a), sollten akustische Emissionen möglichst gering gehalten werden (siehe Abschnitt 4.3.1). Zusätzlich zu dieser technischen Option wird ein Managementplan empfohlen, um beispielsweise Wartungsfahrten zu kombinieren und die Maximalgeschwindigkeit von Schifffahrzeugen zu begrenzen (Leaper et al., 2014).

- **Vertreibungswirkung**: Derzeit sind keine technischen Optionen bekannt, um die Vertreibungswirkung zu reduzieren.

- Anziehungswirkung und somit Risiko **zur Kollision/zum Verfangen/zur Verletzung**: Um Fische und Meeressäuger von Wellenkraftwerken fernzuhalten, können Vergrämungsgeräte eingesetzt werden (z. B. Pinger; Voß et al., 2023). Unter den Technologien für Wellenkraftwerke, welche sich im fortgeschrittenen Realisierungsstatus befinden (siehe Abschnitt 8.1.2), werden jedoch nur bei dem Prinzip der oszillierenden Wassersäule Turbinen eingesetzt (siehe Abschnitt 8.1.2.3). Um See- und Rastvögel von OWEAs fernzuhalten, können Turbinen bei Erkennung eines hohen Kollisionsrisikos mittels

technischer Systeme (Kamera/Radar) vorübergehend abgeschaltet werden. Zudem kann eine Anpassung der Lichtemissionen von WEAs beispielsweise durch eine niedrigere Lichtintensität oder blinkende anstatt Dauerlichtern das Kollisionsrisiko senken. Des Weiteren ist eine akustische oder visuelle Vergrämung möglich, um Tiere von OWEA fernzuhalten. Diese und weitere technische Optionen zur Minderung des Kollisionsrisikos von Vögeln werden in Abschnitt 4.3.2 näher beschrieben.

8.5.3 Biokraftstoff aus Algen

Dieser Abschnitt beschreibt die zusätzlichen Wirkfaktoren durch hybride Energieerzeugung in Form von Biokraftstoff aus Algen (Abschnitt 8.5.3.1), die potentiellen kumulativen Effekte bei einer Mehrfachnutzung mit OWE anhand von internationalen Praxisbeispielen und Forschungsprojekten (Abschnitt 8.5.3.2) sowie anhand einer Referenzfläche in der deutschen AWZ (Zone 3 in der Nordsee; Abschnitt 8.5.3.3), und technische Optionen zur Minderung negativer Umweltauswirkungen einer Mehrfachnutzung (Abschnitt 8.5.3.4).

8.5.3.1 Potentielle Wirkfaktoren der Nutzungsform „Biokraftstoff aus Algen“ als Einfachnutzung auf die Meeresumwelt

Wie auch Photovoltaik und Wellenenergie, verursacht der Anbau von Algen ebenfalls Wirkfaktoren durch Lebensraumveränderungen, Schiffsverkehr und chemische Emissionen. Zusätzlich besteht die Gefahr der Ausbreitung. Im folgenden Text werden diese Kategorien näher beschrieben und in Tabelle 27 für die vier Schutzgüter, die für die deutsche AWZ große Relevanz besitzen, aufgelistet.

- Gefahr der **Ausbreitung**: Es besteht das Risiko, dass sich nicht einheimische und/oder schädliche Arten aus der Algenzuchtanlage ebenfalls in der Umgebung ausbreiten und somit die Artenzusammensetzung beeinflussen (Eklöf et al., 2006; Tano et al., 2015). Beispielsweise können sich Viren, Bakterien oder Parasiten von den Algen innerhalb der Anlagen auf Organismen in der Umgebung übertragen (Barrett et al., 2019). Dieser Wirkfaktor tritt während der Betriebsphase auf und kann sich im Falle einer Ausbreitung auf einer räumlichen Skala von Kilometern ausdehnen. Das Risiko einer Ausbreitung hängt von der Intensität der Algenzucht ab.

- **Lebensraumveränderung**: Zur Befestigung von Anlagen zur Algenzucht ist eine lokale Versiegelung des Meeresbodens notwendig, welche lokale Strömungs- und Wellenmuster verändern kann (Campbell et al., 2019), was beispielsweise den Sedimenttransport und die Ablagerung von Sedimenten somit die benthischen Lebensräume, Besiedlungsmuster und die Artzusammensetzung in lokalen Ökosystemen beeinflusst. Zudem führen Anlagen zur Herstellung von Biokraftstoff aus Algen zu einer Versiegelung der Wasseroberfläche (ähnlich wie die PV-Anlagen in Abschnitt 8.5.1.1) und damit zu einer Reduzierung der Sonneneinstrahlung auf der Wasseroberfläche, was Algen in ihrem Wachstum einschränkt (Dillschneider, 2014). Dieser Wirkfaktor tritt während der Betriebsphase und räumlich begrenzt mit meist nur wenigen (hundert) Metern um die Anlage zur Algenzucht auf.

- **Akustische Emissionen durch Schiffsverkehr sowie Bau- und Wartungsarbeiten**: Der Schiffsverkehr durch Bau- und Wartungsarbeiten für Algenzuchtanlagen verursacht ähnliche Wirkfaktoren wie der Schiffsverkehr im Allgemeinen oder der erhöhte Schiffsverkehr während der Bau- und Wartungsfahrten von OWPs (siehe Abschnitt 4.1 und 4.2). Zudem entstehen akustische Emissionen bei den Bau- und Wartungsarbeiten von Anlagen

zur Algenzucht. Dieser Wirkfaktor tritt während des Baus, Betriebs und Rückbaus auf, und der Schall kann sich auf einer räumlichen Skala von mehreren Kilometern ausbreiten.

- **Chemische Emissionen**: Für das Algenwachstum sind Nährstoffe nötig – vor allem Kohlenstoff, aber auch andere Nährstoffe wie P, K, Fe, Mn und Mg (Lundquist et al., 2010). Diese werden teils in das Meer eingetragen. Der Eintrag von Nährstoffen gemeinsam mit der Versiegelung der Wasseroberfläche können beispielsweise den pH-Wert, den Sauerstoffgehalt, die Wasserqualität und Unterwasserpflanzen beeinflussen (Campbell et al., 2019). Aber auch antimikrobielle Rückstände wie Oxytetracyclin und Oxolinsäure werden in das Meerwasser eingetragen und sammeln sich in beispielsweise Fischarten an (Barrett et al., 2019). Ebenfalls bestehen einige Algenzuchtanlagen aus synthetischem Material, welches sich lösen kann (Chung et al., 2021). Der Eintrag chemischer Emissionen tritt während der Betriebsphase auf und kann sich auf einer räumlichen Skala von mehreren Kilometern ausbreiten; die Auswirkung hängt von der Intensität der Algenzucht ab.
- **Störung/Kollisionsrisiko**: Die Anlagen zur Algenzucht scheinen generell mit einer höheren Abundanz und einem größeren Artenreichtum von beispielsweise See- und Rastvögeln verbunden zu sein (Barrett et al., 2019). Jedoch können sich die Tiergruppen in den Verankerungsleinen verfangen, was zu hohen Mortalitätsraten führen kann (Barrett et al., 2019). Dieser Wirkfaktor tritt während der Betriebsphase und räumlich begrenzt um die einzelnen Anlagen zur Algenzucht auf.

Tabelle 27: Wirkfaktoren während Bau, Betrieb und Rückbau von Offshore-Windenergieanlagen auf einzelne Schutzgüter, die für die deutsche AWZ große Relevanz besitzen, sowie zusätzliche Wirkfaktoren durch hybride Energieerzeugung mit Hilfe von Biokraftstoff aus Algen.

Schutzgut	Kategorie	Wirkfaktoren durch OWE	Wirkfaktoren durch hybride Energieerzeugung (Biokraftstoff aus Algen)	Quellen beider Wirkfaktoren
Biotope am Meeresboden	Lebensraumveränderung	Sedimentaufwirbelung bei Errichtung, Betrieb und Rückbau der WEAs	Sedimentaufwirbelung bei Errichtung und Rückbau	Schultze et al. (2020)
	Lebensraumveränderung	Eintrag invasiver Arten	Eintrag invasiver Arten	Büttger et al. (2008), Jensen et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Vibration der WEAs		Vicen-Bueno et al. (2013), Djath et al. (2018), van Berkel et al. (2020), Lloret et al. (2022)
	Lebensraumveränderung	Veränderung der Hydrographie		Vicen-Bueno et al. (2013), Djath et al. (2018), Daewel et al. (2022), Lloret et al. (2022), Christiansen et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Elektrische Magnetfelder, Temperaturerhöhung durch Kabel	Elektrische Magnetfelder, Temperaturerhöhung durch Kabel	Taormina et al. (2018), Hutchinson et al. (2021)
	Lebensraumveränderung	Versiegelung	Versiegelung	Krone et al. (2017)
	Lebensraumveränderung	Künstliche Riffe = Änderung von Habitat + Artzusammensetzung		Glarou et al. (2020), Rezaei et al. (2023)
	Lebensraumveränderung		Abschattung	Dillschneider (2014)
	Lebensraumveränderung		Gefahr der Ausbreitung	Eklöf et al. (2006), Tano et al. (2015)
	Lebensraumveränderung		Anstieg des pH-Wertes, Abnahme des Sauerstoffs im Wasser (Hypoxie)	Campbell et al. (2019)

Schutzgut	Kategorie	Wirkfaktoren durch OWE	Wirkfaktoren durch hybride Energieerzeugung (Biokraftstoff aus Algen)	Quellen beider Wirkfaktoren
	Fischerei	Reserve effect: Ausschluss der Fischerei im OWP und der aktiven Fischerei in 500 m Radius um OWP		Coates et al. (2016), Bastardie et al. (2020), Hintzen et al. (2021)
	Chemische Emissionen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Lundquist et al. (2010), Kirchgeorg et al. (2018), Barrett et al. (2019), Chung et al. (2021), Lloret et al. (2022)
Fische	Lebensraumveränderung	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Chapman et al. (2021), Jensen et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Elektrische Magnetfelder durch Kabel	Elektrische Magnetfelder durch Kabel	Taormina et al. (2018)
	Lebensraumveränderung	Künstliche Riffe = Änderung von Habitat + Artzusammensetzung	Künstliche Riffe = Änderung von Habitat + Artzusammensetzung	Glarou et al. (2020), Rezaei et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Floating OWE: Primäres und sekundäres Verfangen	Verfangen: Verankerungsleinen der Algenfarm	Barrett et al. (2019), Maxwell et at. (2022)
	Fischerei	Reserve effect: Ausschluss der Fischerei im OWP und der aktiven Fischerei in 500 m Radius um OWP		Bigné et al. (2019), Halouani et al. (2020), Hintzen et al. (2021)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Schiffsverkehr	Schiffsverkehr	Putland et al. (2017, 2018)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Rammungen	Bau- und Wartungsarbeiten	Mooney et al. (2020)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Betriebsgeräusche		Wahlberg & Westerberg (2005), Bellmann et al. (2023)
	Chemische Emissionen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Lundquist et al. (2010), Kirchgeorg et al. (2018), Barrett

Schutzgut	Kategorie	Wirkfaktoren durch OWE	Wirkfaktoren durch hybride Energieerzeugung (Biokraftstoff aus Algen)	Quellen beider Wirkfaktoren
				et al. (2019), Chung et al. (2021), Lloret et al. (2022)
Marine Säugetiere	Lebensraumveränderung	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Sonne et al. (2020), Jensen et al. (2023), Stokholm et al. (2023)
	Lebensraumveränderung	Elektrische Magnetfelder durch Kabel	Elektrische Magnetfelder durch Kabel	Taormina et al. (2018)
	Lebensraumveränderung	Floating OWE: Primäres und sekundäres Verfangen	Verfangen: Verankerungsleinen der Algenfarm	Benjamins et al. (2014), Barrett et al. (2019), Maxwell et at. (2022)
	Fischerei	Reserve effect: Ausschluss der Fischerei im OWP und der aktiven Fischerei in 500 m Radius um OWP		Moan et al. (2020), Kindt-Larsen et al. (2023)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Schiffsverkehr	Schiffsverkehr	Dyndo et al. (2015), Putland et al. (2017), Wisniewska et al. (2018)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Rammungen	Bau- und Wartungsarbeiten	Brandt et al. (2018)
	Akustische Emissionen/ Druckänderungen	Betriebsgeräusche		Tougaard et al. (2009, 2020), Bellmann et al. (2023)
	Chemische Emissionen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Lundquist et al. (2010), Kirchgeorg et al. (2018), Barrett et al. (2019), Chung et al. (2021), Lloret et al. (2022)
	Störung/ Kollisionsrisiko	Schiffsverkehr	Schiffsverkehr	Benhemma-Le Gall (2023)
See- und Rastvögel	Lebensraumveränderung	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Einschleppung von invasiven und pathogenen Arten	Barrett et al. (2019), Sonne et al. (2020), Jensen et al. (2023)

Schutzgut	Kategorie	Wirkfaktoren durch OWE	Wirkfaktoren durch hybride Energieerzeugung (Biokraftstoff aus Algen)	Quellen beider Wirkfaktoren
	Lebensraumveränderung	Elektrische Magnetfelder durch Kabel	Elektrische Magnetfelder durch Kabel	Taormina et al. (2018)
	Lebensraumveränderung	Floating OWE: Primäres und sekundäres Verfangen	Verfangen: Verankerungsleinen der Algenfarm	Barrett et al. (2019), Maxwell et at. (2022)
	Fischerei	Reserve effect: Ausschluss der Fischerei im OWP und der aktiven Fischerei in 500 m Radius um OWP		Daunt et al. (2008), Searle et al. (2023)
	Akustische Emissionen	Schiffsverkehr	Schiffsverkehr	Mooney et al. (2019), Jalkanen et al. (2022)
	Akustische Emissionen	Rammungen	Bau- und Wartungsarbeiten	Mooney et al. (2019), Bellmann et al. (2023)
	Akustische Emissionen	Betriebsgeräusche		Mooney et al. (2019), Bellmann et al. (2023)
	Chemische Emissionen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Eintrag von Schadstoffen, Abfällen, Nährstoffen und organischen Stoffen	Lundquist et al. (2010), Kirchgeorg et al. (2018), Barrett et al. (2019), Chung et al. (2021), Lloret et al. (2022)
	Störung/ Kollisionsrisiko	Schiffsverkehr	Schiffsverkehr	Coleman et al. (2022)
	Störung/ Kollisionsrisiko	Kollisionsrisiko mit Rotorblättern		Hüppop et al. (2006), Brabant et al. (2015), Ronconi et al. (2015)
	Störung/ Kollisionsrisiko	Vertreibungswirkung/ Barriere-Effekt durch OWP		Fox & Krag Petersen (2019), Vilela et al. (2021), Garthe et al. (2023)

8.5.3.2 Potentielle kumulative Effekte von OWE und der Nutzungsform „Biokraftstoff aus Algen“ als Mehrfachnutzung auf die Meeresumwelt

Verglichen mit einer Einfachnutzung durch OWE (Abschnitt 4.2) bzw. einer Einfachnutzung durch Biokraftstoff aus Algen (Abschnitt 8.5.3.1) sind folgende kumulativen Effekte (siehe Definition in Abschnitt 4.4) bei einer Mehrfachnutzung aus OWE und Biokraftstoff aus Algen möglich:

- Eintrag von **pathogenen und invasiven Arten**: Durch den Schiffsverkehr während der Bau- und Wartungsarbeiten von OWPs sowie den Schiffsverkehr durch Bau- und Wartungsarbeiten von Anlagen zur Algenzucht erhöht sich das Aufkommen an Schiffen und damit auch das Risiko, dass pathogene Arten und invasive Arten eingetragen werden. Zudem besteht das Risiko, dass sich Viren, Bakterien oder Parasiten von den Algen innerhalb der Anlagen auf Organismen in der Umgebung übertragen (Barrett et al., 2019) und sich nicht einheimische und/oder schädliche Arten aus der Algenzuchtanlage ebenfalls in der Umgebung ausbreiten und somit die Artenzusammensetzung beeinflussen (Eklöf et al., 2006; Tano et al., 2015). Durch die Versiegelung und Überbauung und somit einer künstlichen Riffstruktur („Artifical reef effect“) bedingt durch die OWE können sich invasive Arten eher ausbreiten und gegen einheimische Arten konkurrieren. Daher wird erwartet, dass das Risiko der Ausbreitung von nicht einheimischen und/oder schädliche Arten aus der Algenzuchtanlage bei einer Mehrfachnutzung mit OWE erhöht ist. Um die kumulativen Effekte besser beurteilen zu können, sind Informationen zur Intensität der Algenzucht nötig.

- **Lebensraumveränderungen**: Bei OWPs verändert sich der Lebensraum durch die Versiegelung und somit der Entstehung einer künstlichen Riffstruktur („Artifical reef effect“), Sedimentaufwirbelung beim Bau, Betrieb und Rückbau eines OWPs, die Vibration der WEAs, Veränderungen der Hydrographie und elektrische Magnetfelder sowie Temperaturerhöhung um die stromführenden Kabel (siehe Abschnitt 4.2). Bei einer Mehrfachnutzung mit Anlagen zur Algenzucht können sich lokale Strömungs- und Wellenmuster verändern, was beispielsweise den Sedimenttransport und die Ablagerung von Sedimenten somit die benthischen Lebensräume, Besiedlungsmuster und die Artzusammensetzung in lokalen Ökosystemen beeinflusst (Campbell et al., 2019). Da der Meeresboden jedoch auch für OWE als Einfachnutzung versiegelt werden muss und sich auch bei OWE die Strömungsmuster ändern können, hängen die künstliche Riffstruktur und die Veränderungen der Hydrographie vor allem von der OWE ab. Auch wenn bei einer Mehrfachnutzung mit Anlagen zur Algenzucht die Versiegelung der Wasseroberfläche hinzukommt, was beispielsweise den pH-Wert, den Sauerstoffgehalt, die Wasserqualität, Unterwasserpflanzen und Algen beeinflussen kann (Campbell et al., 2019), wird dieser Wirkfaktor durch seinen geringen räumlichen Umfang in seiner Auswirkung als kaum messbar eingeschätzt. Bei einer kumulativen Betrachtung des Lebensraumes steht hier die erhöhte räumliche Effizienz durch die Mehrfachnutzung im Vordergrund, durch die der geografische Fußabdruck – verglichen mit OWE und Anlagen zur Algenzucht jeweils als Einfachnutzung auf zwei unterschiedlichen Flächen – verringert wird.

- (Erhöhter) Eintrag **akustischer Emissionen**: Durch den Schiffsverkehr während Bau- und Wartungsarbeiten von OWPs oder von Anlagen zur Algenzucht, sowie durch die Betriebsgeräusche von OWEAs kommt es zum Eintrag von überwiegend Dauerschall. Allerdings sind Synergieeffekte möglich, sodass keine zusätzlichen Schiffe für Bau und Wartung der Anlagen zur Algenzucht eingesetzt und somit keine kumulativen Effekte erwartet werden. Zusätzlich wird bei Rammungen von OWEAs und teilweise bei Bauarbeiten

für die Anlagen zur Algenzucht Impulsschall eingetragen. Bei zeitgleichen Bau-/Rückbauarbeiten in näherer Umgebung (d. h. überschneidenden Wirkungsradien der beiden Nutzungsformen) oder aber kurzzeitig hintereinander (z. B. aufeinanderfolgenden Monaten, aber auch jährlich während aufeinanderfolgender Paarungszeiten) im gleichen Gebiet sind kumulative Effekte möglich. Dementsprechend sollten die Schallemissionen möglichst gering und somit der Störradius möglichst klein gehalten werden, um den akustischen Fußabdruck bei einer Mehrfachnutzung zu minimieren und kumulative Effekte zu vermeiden.

- Eintrag **chemischer Emissionen**: Während der Bau-, Betriebs- und Rückbauphase von OWPs, sowie während des Schiffsverkehrs bei Bau- und Wartungsfahrten der Anlagen zur Algenzucht können chemische Emissionen freigesetzt werden. Zusätzlich können durch die Anlagen zur Algenzucht Nährstoffe, antimikrobielle Stoffe oder synthetisches Material eingetragen werden, was wiederum Meeresorganismen schädigen kann (Barrett et al., 2019; Chung et al., 2021; Lundquist et al., 2010). Die Auswirkung hängt von der Intensität der Algenzuchtab, kumulative Effekte werden jedoch nicht erwartet.
- **Vertreibungswirkung**: Die Anlagen zur Algenzucht scheinen generell mit einer höheren Abundanz und einem größeren Artenreichtum von beispielsweise See- und Rastvögeln (Attraktionswirkung) verbunden zu sein (Barrett et al., 2019). Statt kumulativer Effekte wird daher erwartet, dass die Reichweite der Vertreibung bei einer Mehrfachnutzung mit Algenzucht größtenteils vom OWP und dessen Wirkfaktoren abhängt.
- Risiko **zur Kollision/zum Verfangen**: Fische, marine Säugetiere sowie See- und Rastvögel können mit den Schiffen kollidieren und sich in Verankerungsleinen von Anlagen zur Algenzucht verfangen (Barrett et al., 2019). Sollten der vermutete „Reserve effect“ und/oder der „Artifical reef effect“ der OWE auch bei einer Mehrfachnutzung eine Anziehungskraft auf Fische, marine Säugetiere sowie See- und Rastvögel ausüben, sodass sich die Individuendichte verglichen mit einer Einfachnutzung durch Biokraftstoff aus Algen in dem Gebiet erhöht, erhöht sich auch die Anzahl an in Verankerungsleinen der Algenzuchtanlagen verfangenen Tieren. Um die kumulativen Effekte bei einer Mehrfachnutzung besser beurteilen zu können, sind weitere Informationen zur Intensität der Algenzucht und zum Risiko für das Verfangen in Verankerungsleinen notwendig.

Insgesamt werden bei einer Mehrfachnutzung aus OWE und Anlagen zur Algenzucht kumulativen Effekte in Bezug auf den Schiffsverkehr für möglich gehalten; jedoch sind hier Synergieeffekte möglich, d. h. Schiffe für Bau und Wartung können gemeinsam für OWE und Biokraftstoff aus Algen genutzt werden. Zudem werden kumulative Effekte in Bezug auf den Eintrag von pathogenen und invasiven Arten für möglich gehalten. Es sind weitere Informationen zur Intensität der Algenzucht sowie zum Risiko für das Verfangen in Verankerungsleinen notwendig, um kumulative Effekte genauer quantifizieren zu können.

Mögliche kumulative Effekte dieser Mehrfachnutzung wurden bisher in Forschungsprojekten zum Thema OWE und Aquakultur betrachtet:

- In Dänemark wurde die potentielle Mehrfachnutzung aus bestehenden OWPs und Muschel- sowie Algenzucht zur Verbesserung der Umweltbedingungen und zur Erzeugung von Biomasse untersucht. Die Auswirkungen auf die Meeresumwelt haben Karlson et al. (2017) insgesamt als **neutral** bewertet. Positiv bewertet wurden bei diesem Fallbeispiel, (a) dass die Mehrfachnutzung ein gutes Potential für die Nährstoffbindung und die Erhöhung der biologischen Vielfalt im Meer birgt, (b) dass die Ansiedlung von Seegras und Muscheln die Sanderosion auf dem Meeresboden verhindern kann und (c) dass die

Schutzwirkung des OWPs die Kapazität für die biologische Vielfalt erhöhen kann (Ansiedlungseffekt). Zu den negativen Aspekten gehörten (a) mögliches Biofouling durch Aquakulturen, (b)die Zunahme von Bakterien durch eine erhöhte Vogelpopulation und deren Ausscheidungen, (c) das begrenzte Wissen über Umweltauswirkungen bei dieser Mehrfachnutzung und (d) die Einführung von Lebensräumen, die invasive Arten fördern.

- In Deutschland wurde die potentielle Mehrfachnutzung von Offshore-Aquakulturanlagen innerhalb der Vorranggebiete für OWE mit zwei möglichen Szenarien Bezug auf die Anbindung untersucht: (1) die direkte Befestigung von Anlagen wie Käfigen oder Langleinen an den Turbinenfundamenten der OWPs oder (2) die gemeinsame Unterbringung von Aquakulturanlagen innerhalb der Sicherheitszone der OWPs. Die Auswirkungen auf die Meeresumwelt haben Schupp & Buck (2017) insgesamt als **mittelmäßig positiv** bewertet. Positiv bewertet wurden bei diesem Fallbeispiel die räumliche Effizienz verglichen mit OWE und Fischerei jeweils als Einfachnutzung auf zwei unterschiedlichen Flächen, sodass sich der geografische Fußabdruck des Menschen verringert bzw. Gebiete für neue Nutzungsformen reserviert werden können. Zu den negativen Aspekten gehörten beispielsweise Eutrophierung, Ausbreitung von Krankheiten oder Auswirkungen von Ausreißern auf natürliche Populationen, sollte die Aquakultur nicht nach der besten Managementpraxis, mit den bestmöglichen Technologien und nach der besten Umweltpraxis durchgeführt werden (abhängig von der Art der Aquakultur; Fisch-Aquakultur wird für die deutschen OWP-Flächen nach aktuellem Stand jedoch nicht in Betracht gezogen).
- In Schweden wurde die potentielle Mehrfachnutzung aus bestehender OWE und mit zusätzlicher Kultivierung von Muscheln oder möglicherweise Algen an langen Leinen, die zwischen den Pfählen befestigt sind, untersucht. Die Auswirkungen auf die Meeresumwelt haben Franzén et al. (2017) insgesamt als **mittelmäßig positiv** bewertet. Positiv bewertet wurden bei diesem Fallbeispiel die Nährstoffaufnahme und die Futtermittelproduktion (Fischfarmen oder Geflügelzucht). Zu den negativen Aspekten gehörten Lärmbelastung (Transporte) und mögliche negative Auswirkungen von Fischzuchtanlagen.

Zudem liefen bzw. laufen weitere Forschungsprojekte zur Mehrfachnutzung aus OWE und Aquakultur, welche jedoch nicht schwerpunktmäßig die Effekte auf die Meeresumwelt adressieren:

- „MULTI-FRAME“ (2020-2023) mit dem Fallbeispiel „OWE und Fischerei/Aquakultur“ in Frankreich (Schwerpunkte der Forschung: Benennung sozioökonomischer, kultureller und ökologischer Auswirkungen der Mehrfachnutzung ohne Bewertung),
- „UNITED“ (2020-2023) mit einer Pilotanlage (Austernaquakultur und Algenzucht) in einem belgischen OWP, sowie einer Pilotanlage (Miesmuschelaquakultur und Algenzucht) in einem deutschen OWP in der Nordsee (Schwerpunkte der Forschung: Benennung technischer Schwierigkeiten und Lösungsansätze sowie wirtschaftlicher Synergien der Mehrfachnutzung),
- „MUSICA“ (2020-2025) mit einer Pilotanlage (Kombination von Wind, Wellen und Photovoltaik mit Aquakultur) in Griechenland (Schwerpunkt der Forschung: Technische Entwicklung einer replizierbaren intelligenten Plattform zur Mehrfachnutzung auf kleinen Inseln), und
- „ULTFARMS“ (2023-2026) mit den Fallbeispielen „OWE und Aquakultur“ (in zwei dänischen und einem niederländischen OWP), sowie „OWE und Muschelaquakultur/Algenzucht“ (in einem belgischen und einem deutschen OWP) (Schwerpunkt der Forschung: Optimierung von niedertrophischen Aquakultursystemen bei einer Mehrfachnutzung).

Außerdem findet seit 2023 im OWP Krigers Flak ein Pilotprojekt zu „OWE und Algenzucht/Muschelaquakultur“ statt und Algenzucht ist innerhalb eines OWPs im niederländischen Projekt „North Sea Farm 1“ in Planung.

Es fehlen häufig folgende Informationen, um die kumulativen Effekte genauer quantifizieren zu können:

- In welcher Intensität wird die Algenzucht betrieben?
- Mit welcher Häufigkeit finden welche akustischen Emissionen durch Anlagen zur Algenzucht statt (beispielsweise Häufigkeit der Wartungsfahrten und inwiefern Synergieeffekte bei Schiffen zum Bau und zur Wartung der beiden Nutzungsformen möglich sind)?

8.5.3.3 Potentielle kumulative Umwelteffekte auf einer Referenzfläche durch die Mehrfachnutzung mit „Biokraftstoff aus Algen“

Bezüglich der Umweltverträglichkeit durch die Mehrfachnutzung aus OWE und hybrider Energieerzeugung mittels Biokraftstoff aus Algen werden im Folgenden die allgemeinen kumulativen Effekte aus Abschnitt 8.5.3.2 auf eine Referenzfläche übertragen: Hierzu wird eine Fläche Zone 3 der deutschen AWZ der Nordsee als Referenzfläche angenommen, welches unter anderem den Flächen EN9 bis EN13 entspricht (siehe Abschnitt A.5.1). Zusammenfassend hat die Referenzfläche laut Umweltbericht zum FEP (BSH, 2021a) eine erhöhte Bedeutung für die **grabende Bodenmegafauna, gefährdete Fischarten** (Sternrochen *Amblyraja radiata* und Zwergdorsch *Trisopterus minutus*), sowie **Zugvögel**. Auch wenn die Referenzfläche laut Umweltbericht zum FEP keine erhöhte Bedeutung für den **Schweinswal** hat, ist die Individuendichte in dem Gebiet vergleichsweise hoch, sodass der Schweinswal ebenfalls in einer Gesamtbetrachtung berücksichtigt werden muss (Geelhoed et al., 2023).

Generell sind die Wirkfaktoren der jeweiligen Einfachnutzungen als Auswirkungen auf die Schutzgüter anzunehmen; durch eine Mehrfachnutzung wird die räumliche Effizienz gesteigert. Insgesamt werden bei einer Mehrfachnutzung aus OWE und Anlagen zur Algenzucht kumulativen Effekte in Bezug auf den Schiffsverkehr (sofern keine Synergieeffekte möglich sind) und die Vertreibungswirkung erwartet.

- Eintrag von **pathogenen und invasiven Arten**: Da das Gebiet eine erhöhte Bedeutung für die grabende Megafauna aufweist (BSH, 2021a), sollte ein Eintrag von pathogenen und invasiven Arten insbesondere in den Gebieten mit grabender Megafauna auf der Referenzfläche vermieden werden.
- (Erhöhter) Eintrag **akustischer Emissionen**: Da das Gebiet für Schweinswale eine hohe Individuendichte aufweist und für gefährdete Fischarten eine überdurchschnittliche Bedeutung hat (BSH, 2021a; Geelhoed et al., 2023), sollten akustische Emissionen möglichst gering gehalten werden. Ein Einsatz entsprechender Mitigationsmaßnahmen ist zu prüfen (siehe Abschnitt 4.3.1). Zwar können Schweinswale bei Eintrag akustischer Emissionen auf umliegende Gebiete mit einer potentiell ähnlichen Nahrungsverfügbarkeit ausweichen (Carlström et al., 2002), die Störungsradien sollten jedoch möglichst gering gehalten werden, um möglichst wenig potentielle Nahrungsgebiete auszuschließen. Die Auswirkung der kumulativen Effekte hängt von der Dauer und Häufigkeit der akustischen Emissionen ab.
- Anziehungswirkung und somit Risiko **zum Verfangen**: Sollten der vermutete „Reserve effect“ und/oder der „Artifical reef effect“ der OWE auch bei einer Mehrfachnutzung eine Anziehungskraft auf Fische, marine Säugetiere sowie See- und Rastvögel ausüben, sodass

die Reichweite der Vertreibung verglichen mit einer Einfachnutzung durch Biokraftstoff aus Algen gesenkt wird, erhöht sich die Anzahl an in Verankerungsleinen verfangenen Tieren. Da die Referenzfläche eine erhöhte Bedeutung für gefährdete Fischarte, Schweinswale und Zugvögel aufweist (BSH, 2021a), sollten insbesondere für diese Arten technische Optionen zur Vergrämung geprüft werden. Die Mehrfachnutzung könnte die Anzahl an verfangenen Tieren verglichen mit einer Einfachnutzung durch Biokraftstoff aus Algen erhöhen.

Für eine genauere Quantifizierung sind weitere Informationen nötig (siehe Abschnitt 8.5.3.2).

8.5.3.4 Bewertung technischer Optionen zur Minderung negativer Umweltwirkungen durch Mehrfachnutzung mit „Biokraftstoff aus Algen“

Es werden die üblichen technischen Optionen wie bei einer Einfachnutzung von OWE (beispielsweise Lärmminderungssysteme bei der Rammung der OWEA-Fundamente) empfohlen. Hinsichtlich kumulativer Effekte durch gleichzeitige Nutzung einer Fläche für Anlagen zur Algenzucht werden folgende technische Optionen zur Minderung negativer Umweltwirkungen durch Mehrfachnutzung empfohlen:

- Eintrag von **pathogenen und invasiven Arten**: Um einen Eintrag von pathogenen und invasiven Arten aus den Anlagen zur Algenzucht in die Umgebung zu vermeiden, sind keine technischen Optionen bekannt. Stattdessen sollte ein Managementplan das Risiko des Eintrags pathogener oder invasiver Arten minimieren.
- (Erhöhter) Eintrag **akustischer Emissionen**: Da das Gebiet für Schweinswale eine mittlere Bedeutung und für gefährdete Fischarten eine überdurchschnittliche Bedeutung hat (BSH, 2021a), sollten akustische Emissionen möglichst gering gehalten werden (siehe Abschnitt 4.3.1). Zusätzlich zu dieser technischen Option wird ein Managementplan empfohlen, um beispielsweise Wartungsfahrten zu kombinieren und die Maximalgeschwindigkeit von Schifffahrzeugen zu begrenzen (Leaper et al., 2014).
- Anziehungswirkung und somit Risiko **zum Verfangen**: Um Fische und Meeressäuger von Anlagen zur Algenzucht fernzuhalten, können Vergrämungsgeräte eingesetzt werden (z.B. Pinger; Voß et al., 2023).

9 Fazit: Potentiale durch Mehrfachnutzung

Auf den Vorrang- und Vorbehaltsgebieten für Windenergie in der deutsche AWZ gemäß ROP 2021 lassen sich mit hohen Leistungsdichten von 8 – 11 MW/km² bei freier Planung den Berechnungen zufolge Gesamtleistungen von 49,1 – 67,5 GW installieren. Kommen die bedingten Gebiete hinzu, steigert sich die mögliche Gesamtleistung auf 50,7 – 69,7 GW. Es ist zu beachten, dass diese Werte auf einer rein theoretischen Berechnung fußen, die zum Ziel hat, die Auswirkungen einzelner Parameterveränderungen bei der Offshore-Windparkauslegung zu verdeutlichen. Es wird somit in den Beispielfällen jeweils von einer einheitlichen Technologie und Leistungsdichte in der gesamten deutschen AWZ ausgegangen. Die im Maximum angenommene einheitliche, korrigierte Leistungsdichte von 11 MW/km² ist in der Realität nicht zu erwarten. Dies zeichnet sich auch in den bisherigen Planungen gemäß FEP ab, wo die Leistungsdichte zwischen 5,7 MW/km² und 11,2 MW/km² liegt. Grundsätzlich konnten die Berechnungen den erheblichen Einfluss der gewählten Parameter zur Beplanung der verfügbaren Offshore-Flächen auf den möglichen Zubau und Ertrag verdeutlichen. So steigt beispielsweise der zu erwartende Gesamtertrag bei Verwendung einer Anlagentechnologie mit 367 W/m² bei einer durchschnittlichen Leistungsdichte von 9 MW/km² um rund 8 % im Vergleich zu einer durchschnittlichen Leistungsdichte von 8 MW/km². Eine weitere Stellschraube stellt die verwendete Anlagentechnologie dar: Beträgt die durchschnittliche spezifische Flächenleistung beispielsweise 333 W/m² anstatt von 367 W/m², können die Gesamterträge um rund 2 % gesteigert werden, die gleiche Größenordnung wird erreicht, wenn der Leistungsbeiwert um 10 % gesteigert wird.

In dem vorliegenden Bericht wurde untersucht, inwiefern die Mehrfachnutzung von Offshore-Windenergieflächen, die durch andere Nutzungen belegt sind, zu zusätzlichen Potentialen für die OWE führen könnte. Die Flächenfestlegungen zum Schutz und zur Verbesserung der Meeresumwelt wurde im Rahmen des Projektes nicht betrachtet, alle anderen Nutzungsformen wurden hinsichtlich des räumlichen und aus fachlicher Sicht erwartbaren Möglichkeiten zur Mehrfachnutzung einer Voreinschätzung unterzogen. Bei vielen Nutzungsformen ist eine Mehrfachnutzung mit der OWE ausgeschlossen, nicht zu erwarten oder hätte kein Potential.

Darauf aufbauend wurden die Mehrfachnutzungsoptionen von Offshore-Windenergie mit der Landes- und Bündnisverteidigung, der Fischereiforschung und der hybriden Energieerzeugung einer vertieften Analyse unterzogen (Kapitel 6, 7und 8). Diese stützte sich auf die Ergebnisse aus Literaturrecherchen und Interviews mit Experten*innen der jeweiligen Zielbranchen. Das Konzept der Mehrfachnutzung war den Akteuren grundsätzlich bekannt und wurde mehrheitlich mit hoher Relevanz für die Zukunft bewertet. Die hohe Relevanz wurde mit der begrenzten Flächenverfügbarkeit in der deutschen AWZ und dem gleichzeitig steigenden Nutzungsbedarf und dem damit einhergehenden Platzbedarf begründet. Mehrfachnutzungskonzepte wurden als unerlässlich für die Vereinbarkeit der unterschiedlichen Nutzungsinteressen angesehen, deren Gelingen jedoch ein hohes Maß an Dialog, Abstimmung und Koordination voraussetzt.

Auf Raumordnungs- und Fachplanungsebene gibt es keine Anreize für eine Mehrfachnutzung von Windenergie mit anderen Nutzungen. Sie ist aber unter Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben möglich. Durch den ROP wird die gesamte AWZ fast vollständig überplant. Er stellt das zentrale Instrument für eine erfolgreiche und rechtssichere Weichenstellung für Mehrfachnutzungen dar. Nur in den auf dem ROP aufbauenden im FEP festgelegten Flächen werden Windenergieanlagen errichtet. Der FEP lässt Mehrfachnutzungen in den festgelegten Gebieten und Flächen zu, wenn dadurch keine Gefährdungen (Meeresumwelt) oder Beeinträchtigungen (anderer Nutzungen) entstehen. Die Zulässigkeit ist anhand des konkreten Einzelfalls zu bestimmen.

Eine Mehrfachnutzung der Vorbehaltsflächen für LV/BV ist nur mit Akteuren und Nutzungen möglich, deren Nutzungsarten der AWZ mit den Nutzungsprofilen der Bundeswehr

kompatibel sind. Diese Akteure zeichnen sich dadurch aus, dass sie die Flächen der AWZ nicht permanent und zeitlich flexibel nutzen können, u.a. Schifffahrt, Tourismus, Fischfang, aber auch in Teilen Naturschutz und Forschung. Diese Akteure stehen der temporären Nutzung von großflächigen, unbebauten Gebieten nicht im Weg. Für Übungen der Marine sind aus verschiedenen Gründen Gebiete in der AWZ notwendig. Diese liegen in der Aufrechterhaltung der LV/BV und damit im verfassungsmäßig verankerten Auftrag der Bundeswehr begründet. Um die Fähigkeiten zur LV/BV zu erhalten, muss die Bundeswehr unter anderem große und kleine Manöver mit dreidimensionalen Gefechtsfeldübungen im Wasser, über und unter der Wasseroberfläche (+Cyber, Weltraum) durchführen, kleine Übungen unter unterschiedlichen geologischen Bedingungen in der AWZ und entlang der Küstenlinie abhalten sowie notwendige Instandsetzungskontrollen und die Zertifizierung des Geräts durchführen. Dafür benötigt die Bundeswehr unterschiedlich beschaffene und verortete Gebiete, die entsprechend dem Grundsatz „train as you fight" dort liegen, wo die Bundesrepublik Deutschland im Konflikt- oder Kriegsfall verteidigt wird. Damit ist geboten, dass sowohl Flächen in Nord- und Ostsee zur Verfügung stehen und für den täglichen Übungs- und Instandhaltungsbetrieb in der Nähe der Marinestützpunkte liegen. Die für die Verteidigung genutzten Flächen in der ausschließlichen Wirtschaftszone, wie sie im Raumordnungsplan 2021 festgeschrieben sind, bilden das operative Minimum, das notwendig für die Erhaltung der Landes- und Bündnisverteidigung ist. Ein Potential zur Mehrfachnutzung von Vorbehaltsflächen für Verteidigung mit anderen stationären und permanent gegenwärtigen Akteure, also auch Windenergieanlagen auf See, ist aktuell nicht gegeben.

Die Mehrfachnutzung mit der Fischereiforschung ist bereits im ROP angelegt: Zwei Vorbehaltsgebiete der Fischereiforschung überschneiden sich mit bedingten Vorbehaltsgebieten und Vorranggebieten für die Windenergie auf See. Damit die Grundschleppnetzfänge durchgeführt werden können, müssen die entsprechenden Bereiche dauerhaft ohne Hindernisse befahrbar sein. Der Windparkbetreiber muss die Belange der Forschung in die Gestaltung des Windparks integrieren, insbesondere bei der Planung des Aufstellmusters der Windenergieanlagen und bei der Innerparkverkabelung. Exemplarische Windparklayouts zeigen, dass diese unter der Berücksichtigung der Bedarfe für die Fischereiforschung lediglich in geringem Maße angepasst werden mussten, damit die Schleppstriche inklusive Pufferabstand für die Fischereiforschung freigehalten werden konnten. Vorausgesetzt, dass es in diesem Zusammenhang als vertretbar gewertet wird, dass keine Flächen mehr exklusiv für die Fischereiforschung vorgesehen sind, könnten sich zusätzliche Fläche in geringem Umfang für die Windenergienutzung ergeben: der exklusive Teil der Fischereiforschungsfläche FoN3. Hierdurch ließe sich das Flächen-, Gesamtleistungs- und Ertragspotential für die Offshore-Windenergie somit durch die Mehrfachnutzung von Offshore-Windenergie und Fischereiforschung leicht erhöhen.

Mehrfachnutzungskonzepte von Offshore-Windenergie mit anderen Erneuerbaren Energien bieten eine Vielzahl an Möglichkeiten und Kombinationen. Die Größe der Windgebiete in der deutschen AWZ hat deutlich zugenommen, mit der voranschreitenden Anlagenentwicklung nimmt auch der Platz zwischen den einzelnen Windenergieanlagen innerhalb eines Windenergieprojekts zu. Aus diesem Grund wäre das Flächenangebot für zusätzliche EE-Anlagen wie PV- und Wellenergieanlagen und Einrichtungen für die Algenzucht zwischen den Windenergieanlagen grundsätzlich ausreichend. Eine kombinierte Nutzung könnte zu Synergien führen, die in verschiedenen Bereichen entlang des gesamten Lebenszyklus der Projekte (z.B. Infrastrukturnutzungen, Planungsprozesse, usw.) denkbar wären. Die Hauptpotentiale der hybriden Auslegung von Offshore-Flächen im Hinblick auf die Energieerzeugung liegen in der höheren Ausnutzung der bestehenden Windflächen und der verbesserten Auslastung der Netzanbindung durch eine verstetigte Einspeisung. Je nach Bebauungsdichte lassen sich unterschiedlich viele Standorte für die zusätzlichen EE-Anlagen finden, entsprechend könnte auch das Leistungs- und Ertragspotential der Windfläche unterschiedlich stark gesteigert werden. Da sich die

Technologien der schwimmenden PV-Anlagen und Wellenenergieanlagen noch in der Entwicklungsphase befinden, liegen noch keine praktischen Erfahrungswerte derartiger Hybridparks auf See aus der Praxis vor. Insbesondere die Ergänzung von OWP mit schwimmenden PV-Anlagen könnte aktuell jedoch die höchsten Potentiale für die Mehrfachnutzung bieten.

Kumulative Auswirkungen auf die Meeresumwelt durch die Mehrfachnutzung müssen ebenfalls berücksichtigt werden. Um die kumulativen Effekte quantifizieren zu können, sind jedoch weitere Informationen, beispielsweise zum kumulativen Zusammenwirken von Vertreibungseffekten und Anziehungseffekten der einzelnen Nutzungsformen, nötig. Zudem können ähnliche kumulative Effekte unterschiedliche Folgen für Populationen und Arten je nach Bedeutung des Gebietes für die jeweilige Population/Art haben und sollten dementsprechend in Umweltverträglichkeitsprüfungen ortsspezifisch untersucht werden. Um die negativen Umweltauswirkungen zu minimieren, können verschiedene technische Optionen eingesetzt werden. Einige dieser innovativen Ansätze scheinen vielversprechend zu sein, jedoch fehlen oft Studien zu deren Effektivität.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass in der deutschen AWZ das Mehrfachnutzungspotential unter der Voraussetzung des Ziels einer Kapazitätssteigerung in Bezug auf die in diesem Vorhaben betrachteten Nutzungsformen eher gering ist. Eine Erhöhung der Leistungsdichte auf den Flächen hätte im Vergleich dazu den deutlich größeren Effekt, ist allerdings nicht allein auf dieser Basis zu bewerten, sondern auch hinsichtlich des Kosten-Nutzen-Verhältnisses aus betriebs- und volkswirtschaftlicher Sicht.

Im Falle der **Landes- und Bündnisverteidigung** wird **aktuell kein Potential** für eine Mehrfachnutzung mit der OWE gesehen. Im Falle der **Fischereiforschung** ist die Mehrfachnutzung im ROP bereits angelegt und ein Potential vorhanden. Allerdings ist das sich daraus ergebende zusätzliche Flächenpotential **eher gering**. Die **hybride Energieerzeugung** auf OWE-Flächen führt naturgemäß nicht zu zusätzlichen Potentialen für die Offshore-Windenergie und somit nicht zu einer Annäherung in Richtung Zielerreichung gemäß WindSeeG. Gleichwohl können die auf See erzielbaren **Erträge gesteigert** werden und die **Netzauslastung erhöht** werden. Es wurde eine Betrachtung für ausgewählte Fallbeispiele durchgeführt, bei denen beispielsweise in einem exemplarischen Projekt mit 18 MW-Anlagen und rund 1 GW Leistung durch Installation von Floating PV-Anlagen mit einer Kapazität von rund 20 % der Windparkleistung Ertragszuwächse von rund 5 % erreicht wurden. Mehrfachnutzungskonzepte mit der Offshore-Windenergie aus anderer Perspektive bzw. mit einer anderen Zielstellung könnten also durchaus vielversprechende Potentiale bieten. Neben der genannten Erhöhung der EE-Stromerzeugung durch Hybridprojekte könnten sich auch in anderen Bereichen neue Möglichkeiten ergeben und in Zukunft weiter untersucht werden (wie bspw. Verbesserung des militärischen Lagebilds oder Algenanbau für die Lebensmittelbranche).

10 Quellenverzeichnis

Agora Energiewende, Agora Verkehrswende, Technical University of Denmark, & Max-Planck-Insitute for Biogeochemistry. (2020). *Making the Most of Offshore Wind—Re-Evaluating the Potential of Offshore Wind in the German North Sea*. https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2019/Offshore_Potentials/176_A-EW_A-VW_Offshore-Potentials_Publication_WEB.pdf

Akhtar, N., Geyer, B., Rockel, B., Sommer, P. S., & Schrum, C. (2021). Accelerating deployment of offshore wind energy alter wind climate and reduce future power generation potentials. *Scientific Reports*, *11*(1). https://doi.org/10/gpfb52

Al Shami, E., Zhang, R., & Wang, X. (2018). Point Absorber Wave Energy Harvesters: A Review of Recent Developments. *Energies*, *12*, 47. https://doi.org/10.3390/en12010047

Amundin, M., Carlström, J., Thomas, L., Carlén, I., Teilmann, J., Tougaard, J., Loisa, O., Kyhn, L. A., Sveegaard, S., Burt, M. L., Pawliczka, I., Koza, R., Arciszewski, B., Galatius, A., Laaksonlaita, J., MacAuley, J., Wright, A. J., Gallus, A., Dähne, M., … Blankett, P. (2022). Estimating the abundance of the critically endangered Baltic Proper harbour porpoise (*Phocoena phocoena*) population using passive acoustic monitoring. *Ecology and Evolution*, *12*(2). https://doi.org/10.1002/ece3.8554

Anderson Hansen, K., Hernandez, A., Mooney, A., Rasmussen, M., Sørensen, K., & Wahlberg, M. (2020). The common murre (*Uria aalge*), an auk seabird, reacts to underwater sound. *J. Acoust. Soc. Am.*, *147*(6), 4069–4074. https://doi.org/10.1121/10.0001400

Anderson, P. A., Berzins, I. K., Fogarty, F., Hamlin, H. J., & Jr., L. J. G. (2011). *Sound, stress, and seahorses: The consequences of a noisy environment to animal health*. *311*(1–4), 129–138. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.11.013

Andersson, M. H., & Johannson, T. (2016). Assessment of Marine Mammal Impact Zones for Use of Military Sonar in the Baltic Sea. In *Popper, A. N. & Hawkins, A. D. (Eds.): Effects of noise on aquatic life II.* (S. 37–45). Springer.

Araújo, R., Calderón, F. V., López, J. S., & Azevedo, I. C. (2021). Current Status of the Algae Production Industry in Europe: An Emerging Sector of the Blue Bioeconomy. *Frontiers in Marine Science*. https://doi.org/10.3389/fmars.2020.626389

Arnett, E. B., & Baerwald, E. F. (2013). Impacts of Wind Energy Development on Bats: Implications for Conservation. In R. A. Adams & S. C. Pedersen (Hrsg.), *Bat Evolution, Ecology, and Conservation* (S. 435–456). Springer Science+Business Media New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7397-8_21

Auld, T., McHenry, M. P., & Whale, J. (2014). Options to mitigate utility-scale wind turbine impacts on defence capability, air supremacy, and missile detection. *Renewable Energy*, *63*, 255–262. https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.09.017

Baasch, D. M., Hegg, A. M., Dwyer, J. F., Caven, A. J., Taddicken, W. E., Worley, C. A., Medaries, A. H., Wagner, C. G., Dunbar, P. G., & Mittman, N. D. (2022). Mitigating avian collisions with power lines through illumination with ultraviolet light. *Avian Conservation and Ecology*, *17*(2), 9. https://doi.org/10.5751/ace-02217-170209

Baker, B., & Hamilton, S. (2014). *Technical Review: Development and Application of Bycatch Mitigation Devices for Marine Mammals in Mid-Water Trawl Gear* (Report prepared for the Department of the Environment (on behalf of the expert panel) 12 May 2014).

Barrett, L. T., Swearer, S. E., & Dempster, T. (2019). Impacts of marine and freshwater aquaculture on wildlife: A global meta-analysis. *Reviews in Aquaculture*, *11*(4), 1022–1044. https://doi.org/10.1111/raq.12277

Basol, B. M., & McCandless, B. (2014). Brief review of cadmium telluride-based photovoltaic technologies. *Journal of Photonics for Energy*, *4*(040996).

Bastardie, F., Danto, J., Rufener, M.-C., Van Denderen, D., Eigaard, O. R., Dinesen, G. E., & Nielsen, J. R. (2020). Reducing fisheries impacts on the seafloor: A bio-economic evaluation of policy strategies for improving sustainability in the Baltic Sea. *Fisheries Research*, *230*(105681).

Baumgärtner, D., Borowski, J., Deters, C., Dietrich, E., Dörenkämper, M., Fricke, J., Hans, F., Jersch, T., Leimeister, M., Meyer, T., Neshati, M., Pangalos, G., Quiroz, T., Quistorf, G., Requate, N., Schmidt, J., Schnackenberg, M., Schwegmann, S., Spill, S., … Widerspan, V. (2021). *Weiterentwicklung der Rahmenbedingungen zur Planung von Windenergieanlagen auf See und Netzanbindungssystemen—Erster Zwischenbericht*. https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Meeresfachplanung/Flaechenentwicklungsplan/_Anlagen/Downloads/FEP_2022/Erster_Zwischenbericht_FEP.pdf

Bayoumi, S., Kamel, W., El-Gamal, H., & Incecik, A. (2010, September 15). *Environmental Impact Assessment of Wave Energy device in Sidi Barrani (NW Egypt)*. 10th International Conference on Clean Energy (ICCE-2010), Famagusta (CYP).

Beineke, A., Siebert, U., Stott, J., Müller, G., & Baumgartner, W. (2007). *Phenotypical charactrization of changes in thymus and spleen associated with lymphoid depletion in free-ranging harbor porpoises (Phocoena phocoena). 117*, 254–265.

Bellebaum, J., Diederichs, A., Kube, J., Schulz, A., & Nehls, G. (2006). Flucht- und Meidedistanzen überwinternder Seetaucher und Meeresenten gegenüber Schiffen auf See. *Ornitologischer Rundbrief für Mecklenburg-Vorpommern*, *45*(Sonderheft 1), 86–90.

Bellmann, M. (2014). Overview of existing noise mitigation systems for reducing pile-driving noise. In J. Davy (Hrsg.), *Book of Abstracts. 43rd International Congress on Noise Control Engineering. Improving the world through noise control*.

Bellmann, M. (2018). *Schallschutz im Offshore-Bereich—Ein Überblick inkl. Risiken und Nebenwirkungen*. Offshoretage 2018. http://spreewind.de/offshoretage/wp-content/uploads/sites/5/2018/03/5OT0103_F3_1630_Offshoretage_2018_Bellmann-Schallschutz.pdf

Bellmann, M., Kühler, R., Matuschek, R., Müller, M., Betke, K., Schuckenbrock, J., Gündert, S., & Remmers, P. (2018). Noise mitigation during large foundations (Monopile L & XL): Technical options for complying with noise limits. *International conference on noise mitigation for the construction of increasingly large offshore wind turbines: Technical options for complying with noise limits*.

Bellmann, M., May, A., Wendt, T., Gerlach, S., Remmers, P., & Brinkmann, J. (2020). *Underwater noise during percussive pile driving: Influencing factors on pile-driving noise and technical possibilities to comply with noise mitigation values* [ERa Report].

Bellmann, M., Müller, T., Scheiblich, K., & Betke, K. (2023). *Erfahrungsbericht Betriebsschall: Projektübergreifende Auswertung und Bewertung der Unterwasserschallmessungen aus der Betriebsphase von Offshore-Windparks* (Abschlussbericht itap Bericht Nr. 3926). Itap GmbH.

Bellmann, M., & Remmers, P. (2013). Noise mitigation systems (NMS) for reducing pile driving noise: Experiences with the “big bubble curtain” relating to noise reduction. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *134*(5), 4059.

Benhemma-Le Gall, A., Thompson, P., Merchant, N., & Graham, I. (2023). Vessel noise prior to pile driving at offshore windfarm sites deters harbour porpoises from potential injury zones. *Environmental Impact Assessment Review*, *103*(107271).

Benjamins, S., Harnois, V., Smith, H. C. M., Johanning, L., Greenhill, L., Carter, C., & Wilson, B. (2014). *Understanding the potential for marine megafauna entanglement risk from marine renewable energy developments* (Scottish Natural Heritage Commissioned Report No. 791).

Benjamins, S., Masden, E., & Collu, M. (2020). Integrating Wind Turbines and Fish Farms: An Evaluation of Potential Risks to Marine and Coastal Bird Species. *J. Mar. Sci. Eng.*, *8*(6), 414. https://doi.org/10.3390/jmse8060414

Benjamins, S., Williamson, B., Billing, S.-L., Yuan, Z., Collu, M., Fox, C., Hobbs, L., Masden, E. A., Cottier-Cook, E. J., & Wilson, B. (2024). Potential environmental impacts of floating solar photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *199*(114463).

Berggren, P., Ishaq, R., Zebühr, Y., Näf, C., Bandh, C., & Broman, D. (1999). Patterns and Levels of Organochlorines (DDTs, PCBs, non-ortho PCBs and PCDD/Fs) in Male Harbour Porpoises (*Phocoena phocoena*) from the Baltic Sea, the Kattegat-Skagerrak Seas and the West Coast of Norway. *Marine Pollution Bulletin*, *38*(12), 1070–1084.

Berggren, P., Wade, P. R., Carlström, J., & Read, A. J. (2002). Potential limits to anthropogenic mortality for harbour porpoises in the Baltic region. *Biological Conservation*, *103*(3), 313–322.

Bergström, U., Berkström, C., Sköld, M., Börjesson, P., Eggertsen, M., Fetterplace, L., Florin, A.-B., Fredriksson, R., Fredriksson, S., Kraufvelin, P., Lundström, K., Nilsson, J., Ovegård, M., Perry, D., Sundelöf, A., Wikström, A., & Wennhage, H. (2023). *Long-term effects of no-take zones in Swedish waters* (S. 289). Department of Aquatic Resources, Swedish University of Agricultural Sciences.

Berkström, C., Florin, A.-B., Fredriksson, R., Lundström, K., & Bergström, U. (2021). Rapid effects of a fishing closure on whitefish (*Coregonus maraena*) in the northern Baltic Sea. *Boreal Environment Research*, *26*, 89–104.

BERR Department for Business Enterprise & Regulatory Reform. (2008). *Review of cabling techniques and environmental effects applicable to the offshore wind farm industry* (S. 160) [Technical Report]. Berr.

BfN & BMU (Hrsg.). (2021). *Handreichung zum Vollzug der Bundeskompensationsverordnung*. https://www.bfn.de/sites/default/files/2021-11/Handreichung%20zur%20BKompV.pdf

Bienen, B., Gaudin, C., & Randolph, M. F. (2019). Geotechnical considerations associated with offshore renewable energy installations. *Proc. 16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.

Bigné, M., Nielsen, J. R., & Bastardie, F. (2019). Opening of the Norway pout box: Will it change the ecological impacts of the North Sea Norway pout fishery? *ICES Journal of Marine Science*, *76*(1), 136–152. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsy121

Blanchet, M.-A., Vincent, C., Womble, J. N., Steingass, S. M., & Desportes, G. (2021). Harbour Seals: Population Structure, Status, and Threats in a Rapidly Changing Environment. *Oceans*, *2*(1), 41–63. https://doi.org/10.3390/oceans2010003

BMUV (Hrsg.). (2013). *Konzept für den Schutz der Schweinswale vor Schallbelastungen bei der Errichtung von Offshore Windparks in der deutschen Nordsee (Schallschutzkonzept)*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Meeresfachplanung/Flaechenentwicklungsplan/_Anlagen/Downloads/FEP_2022_2/Schallschutzkonzept_BMU.pdf;jsessionid=2D3C40982D23C16BA4B46F4AF717AFB2.live11314?__blob=publicationFile&v=2

Boatman, M. (2020). *Electromagnetic Fields (EMF) from Offshore Wind Facilities* (Bureau of Ocean Energy Management (BOEM), Hrsg.).

Boehlert, G. W., & Gill, A. B. (2010). Environmental and ecological effects of ocean renewable energy development: A current synthesis. *Oceanography*, *23*(2), 68–81.

Bolle, L. J., Dickey-Collas, M., van Beek, J. K. L., Erftemeijer, P. L. A., Witte, J. I., van der Veer, H. W., & Rijnsdorp, A. D. (2009). Variability in transport of fish eggs and larvae. III. Effects of hydrodynamics and larval behaviour on recruitment in plaice. *Marine Ecology Progress Series*, *390*, 195–211. https://doi.org/10.3354/meps08177

Borkenhagen, K., Corman, A.-M., & Garthe, S. (2018). Estimating flight heights of seabirds using optical rangefinders and GPS data loggers: A methodological comparison. *Marine Biology*, *165*(17).

Borkenhagen, K., Guse, N., Markones, H., Markones, N., Schwemmer, H., & Garthe, S. (2020). *Seabird monitoring in the German North Sea and Baltic Sea 2018*. Research and Technology Centre West Coast (FTZ), Kiel University. https://www.researchgate.net/publication/347560615_Seabird_Monitoring_in_the_German_North_Sea_and_Baltic_Sea_2018

Borkenhagen, K., Markones, H., Markones, N., Schwemmer, H., & Garthe, S. (2021). *Seabird Monitoring in the German North Sea and Baltic Sea 2019*. Research and Technology Centre West Coast (FTZ), Kiel University. https://www.researchgate.net/publication/356144451_Seabird_Monitoring_in_the_German_North_Sea_and_Baltic_Sea_2019

Borrmann, R., Kruse, D., & Wallasch, A.-K. (2021). *Erzeugung von grünem Wasserstoff durch Windenergie auf See*. https://www.offshore-stiftung.de/sites/offshorelink.de/files/documents/210922_Wasserstoffpotentialanalyse_Gesamtbericht.pdf

Bosserelle, C., Kruger, J., & Reddy, S. (2015). *Cost Analysis of Wave Energy in the Pacific*. https://www.researchgate.net/publication/305126646_Cost_Analysis_of_Wave_Energy_in_the_Pacific

Brabant, R., Rumes, B., & Degraer, S. (2021). Occurrence of intense bird migration events at rotor height in Belgian offshore wind farms and curtailment as possible mitigation to reduce collision risk. In S. Degraer, R. Brabant, B. Rumes, & L. Vigin (Hrsg.), *Environmental impacts of offshore wind farms in the Belgian part of the North Sea: Attraction, avoidance and habitat use at various spatial scales* (S. 47–60). Royal Belgian Institute of Natural Sciences, OD Natural Environment, Marine Ecology and Management.

Brabant, R., Vanermen, N., Stienen, E. W. M., & Degraer, S. (2015). Towards a cumulative collision risk assessment of local and migrating birds in North Sea offshore wind farms. *Hydrobiologia*, *756*(1), 63–74.

Brandt, M., Dragon, A.-C., Diederichs, A., Bellmann, M., Wahl, V., Piper, W., Nabe-Nielsen, J., & Nehls, G. (2018). Disturbance of harbour porpoises during construction of the first seven offshore wind farms in Germany. *Marine Ecology Progress Series*, *596*, 213–232.

Bredick, M. (2021, Januar 4). *Großmachtkonkurrenz in der Ostsee USA und Russland*. marineforum. https://marineforum.online/im-schatten-der-grossmachtkonkurrenz/

Broad, A., Rees, M. J., & Davis, A. R. (2020). Anchor and chain scour as disturbance agents in benthic environments: Trends in the literature and charting a course to more sustainable boating and shipping. *Marine Pollution Bulletin*, *161*(111683).

Bruhn, R., Narayanan, K., & Gert, P. (1999). *Persistent chlorinated organic contaminants in harbour porpoises from the North Sea, the Baltic Sea and Arctic waters*. *237–238*, 351–361. https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00148-5

Buck, B. H., & Langan, R. (Hrsg.). (2017). *Aquaculture Perspective of Multi-Use Sites in the Open Ocean*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51159-7

Bundesamt für Naturschutz. (2024). *Fischerei in Nord- und Ostsee*. https://www.bfn.de/fischerei-nord-und-ostsee

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (Hrsg.). (2013). *Standard—Untersuchung der Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt (StUK4)*. https://www.bsh.de/DE/PUBLIKATIONEN/_Anlagen/Downloads/Offshore/Standards/Standard-Auswirkungen-Offshore-Windenergieanlagen-Meeresumwelt.pdf;jsessionid=35E3442BA1EB2C8DA38260478BB99DDF.live11312?__blob=publicationFile&v=24

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (Hrsg.). (2020a). *BSH—Nutzungskarten*. https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Nutzungskarten/nutzungskarten_node.html

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (Hrsg.). (2020b). *Flächenentwicklungsplan 2020 für die deutsche Nord- und Ostsee*. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Meeresfachplanung/Fortschreibung/_Anlagen/Downloads/FEP_2020_Flaechenentwicklungsplan_2020.pdf

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (Hrsg.). (2021a). *Umweltbericht zum Raumordnungsplan für die deutsche ausschließliche Wirtschaftszone in der Nordsee*. https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Meeresraumplanung/Raumordnungsplan_2021/_Anlagen/Downloads/Umweltbericht_Nordsee_Endfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=6

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (Hrsg.). (2021b). *Umweltbericht zum Raumordnungsplan für die deutsche ausschließliche Wirtschaftszone in der Ostsee*. https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Meeresraumplanung/Raumordnungsplan_2021/_Anlagen/Downloads/Umweltbericht_Ostsee_Endfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=7

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (Hrsg.). (2021c). *Raumordnungsplan für die deutsche ausschließliche Wirtschaftszone in der Nordsee und in der Ostsee*. BSH.

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (Hrsg.). (2023a). *BSH bespricht neue Planungen für Windenergie auf See*. https://www.bsh.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/Text_html/html_2023/Pressemitteilung-2023-26-10.html

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (Hrsg.). (2023b). *Flächenentwicklungsplan 2023 für die deutsche Nordsee und Ostsee* (BSH-Nummer 7608; S. 133). https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Meeresfachplanung/Flaechenentwicklungsplan/_Anlagen/Downloads/FEP_2023_1/Flaechenentwicklungsplan_2023.pdf?__blob=publicationFile&v=1

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (Hrsg.). (2023c). *Seegangsportal*. https://seastate.bsh.de/rave/index.jsf

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (Hrsg.). (2023d). *Umweltbericht zum Flächenentwicklungsplan 2023 für die deutsche Ostsee* (BSH-Nummer 7608). Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Meeresfachplanung/Flaechenentwicklungsplan/_Anlagen/Downloads/FEP_2023_1/Umweltbericht_Ostsee_FEP_2023.pdf?__blob=publicationFile&v=1

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (Hrsg.). (2023e). *Vorentwurf zur Fortschreibung des Flächenentwicklungsplan 2023*. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Meeresfachplanung/Laufende_Fortschreibung_Flaechenentwicklungsplan/Anlagen/Downloads/Vorentwurf_FEP.pdf?__blob=publicationFile&v=1

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. (2023a). *Die Hochsee- und Küstenfischerei in der Bundesrepublik Deutschland im Jahre 2022—Bericht über die Anlandungen von Fischereierzeugnissen durch deutsche Fischereifahrzeuge*. https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Fischerei/Fischwirtschaft/Anlandestatistik2022.pdf?__blob=publicationFile&v=2

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. (2023b). *Fischereiforschung*. Fischerei in Deutschland. https://www.portal-fischerei.de/bund/fischereiforschung

Bundesministerium der Verteidigung. (2023, November). *Verteidigungspolitische Richtlinien 2023*. Bundesministerium der Verteidigung (BMVg).

Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, & Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. (2021, September 1). *Auswertung der Beteiligung nach § 9 Absatz 3 ROG und Anhörung nach §§ 47, 62 GGO*.

Bundesministerium des Innern und für Heimat. (2023). *Entwurf eines Gesetzes zur Umsetzung der CER-Richtlinie und zur Stärkung der Resilienz kritischer Anlagen (KRITIS-DachG) Bearbeitungsstand vom 25.07.2023*.

https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/gesetzgebungsverfahren/DE/Downloads/referentenent-wuerfe/KM4/KRITIS-DachG.pdf;jsessionid=2F90C519B779A9BD79D441167846398D.1_ cid378?__blob=publi-cationFile&v=3

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. (2014). *Durchführungsrichtlinie „Seeraumbeobach-tung Offshore-Windparks“*.

Bundeswehr. (2023, Oktober 17). *Deutschlands maritime Sicherheit braucht mehr Vernetzung*. https://www.bundeswehr.de/de/organisation/marine/aktuelles/deutschlands-maritime-sicherheit-vernetzung-5691186

Burger, C., Schubert, A., Heinänen, S., Dorsch, M., Kleinschmidt, B., Žydelis, R., Morkūnas, J., Quillfeldt, P., & Nehls, G. (2019). A novel approach for assessing effects on distributions and movements of seabirds in relation to shipping traffic. *Journal of Environmental Management*, *251*, 109511. https://doi.org/10.1016/j.jen-vman.2019.109511

Busse, P. (2016). Some aspects of the occurrence and behaviour of the crane *Grus grus* in Poland in light of pre-investment wind-farm monitoring. *The Ring*, *38*(1), 3–23.

Butt, N., Halpern, B. S., O'Hara, C. C., Allcock, A. L., Polidoro, B., Sherman, S., Byrne, M., Birkeland, C., Dwyer, R. G., Frazier, M., Woodworth, B. K., Arango, C. P., Kingsford, M. J., Udyawer, V., Hutchings, P., Scanes, E., McClaren, E. J., Maxwell, S. M., Diaz-Pulido, G., … Klein, C. J. (2022). A trait-based framework for assessing the vulnerability of marine species to human impacts. *Ecosphere*, *13*(2), e3919. https://doi.org/10.1002/ecs2.3919

Büttger, H., Asmus, H., Asmus, R., Buschbaum, C., Dittmann, S., & Nehls, G. (2008). Community dynamics of in-tertidal soft-bottom mussel beds over two decades. *Helgoland Marine Research*, *62*(1), 23–36. https://doi.org/10.1007/s10152-007-0099-y

Campbell, I., Macleod, A., Sahlmann, C., Neves, L., Funderud, J., Øverland, M., Hughes, A. D., & Stanley, M. (2019). The Environmental Risks Associated With the Development of Seaweed Farming in Europe—Prioritizing Key Knowledge Gaps. *Frontiers in Marine Science*, *6*, 107. https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00107

Carbon Trust. (2021, Februar 4). *Industriekonsortium startet weltweit erste umfassende Untersuchung zur Vermessung des „Global Blockage Effects“ in Offshore-Windparks*. https://www.carbontrust.com/de/news-und-events/news/industriekonsortium-startet-weltweit-erste-umfassende-untersuchung-zur. https://www.car-bontrust.com/de/news-und-events/news/industriekonsortium-startet-weltweit-erste-umfassende-untersu-chung-zur

Carlström, J., Berggren, P., Dinnétz, F., & Börjesson, P. (2002). A field experiment using acoustic alarms (ping-ers) to reduce harbour porpoise by-catch in bottom-set gillnets. *ICES Journal of Marine Science*, *59*(4), 816–824. https://doi.org/10.1006/jmsc.2002.1214

Carreño, A., & Lloret, J. (2021). Environmental impacts of increasing leisure boating activity in Mediterranean coastal waters. *Ocean & Coastal Management*, *209*, 105693. https://doi.org/10.1016/j.oce-coaman.2021.105693

Chapman, J. M., Kelly, L. A., Teffer, A. K., Miller, K. M., & Cooke, S. J. (2021). Disease ecology of wild fish: Oppor-tunities and challenges for linking infection metrics with behaviour, condition, and survival. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, *78*, 995–1007. https://doi.org/10.1139/cjfas-2020-0315

Chowdhry, N. E., Shakib, M. A., Xu, F., Salehin, S., Islam, R., & Bhuiyan, A. (2022). Adverse environmental im-pacts of wind farm installations and alternative research pathways to their mitigation. *Cleaner Engineering and Technology*, *7*(100415).

Chowdhry, S., Hinz, J., Kamin, K., & Wanner, J. (2022). Brothers in arms: The value of coalitions in sanctions re-gimes. *Kiel Working Papers*, *2234*. https://www.ifw-kiel.de/de/publikationen/kieler-arbeitspa-piere/2022/brothers-in-arms-the-value-of-coalitions-in-sanctions-regimes-17690/

Christiansen, N., Carpenter, J. R., Daewel, U., Suzuki, N., & Schrum, C. (2023). The large-scale impact of anthropogenic mixing by offshore wind turbine foundations in the shallow North Sea. *Frontiers in Marine Science*, *10*, 1178330. https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1178330

Christiansen, N., Daewel, U., Djath, B., & Schrum, C. (2022). Emergence of Large-Scale Hydrodynamic Structures Due to Atmospheric Offshore Wind Farm Wakes. *Frontiers in Marine Science*, *9*, 818501. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.818501

Chung, Y. H., Church, D., Koellhoffer, E. C., Osota, E., Shukla, S., Rybicki, E. P., Pokorski, J. K., & Steinmetz, N. F. (2021). Integrating plant molecular farming and materials research for next-generation vaccines. *Nature Reviews Materials*, *7*(5), 372–388. https://doi.org/10.1038/s41578-021-00399-5

Clarke Murray, C., Mach, M., & Martone, R. G. (2014). *Cumulative effects in marine ecosystems: Scientific perspectives on it challenges and solutions* (S. 60). WWF-Canada and Center For Ocean Solutions.

Clausen, K. T., Wahlberg, M., Beedholm, K., Deruiter, S., & Madsen, P. T. (2011). Click communication in harbour porpoises Phocoena phocoena. *Bioacoustics*, *20*(1), 1–28.

Cleasby, I. R., Wakefield, E. D., Bearhop, S., Bodey, T. W., Votier, S. C., & Hamer, K. C. (2015). Three-dimensional tracking of a wide-ranging marine predator: Flight heights and vulnerability to offshore wind farms. *Journal of Applied Ecology*, *52*(6), 1474–1482.

Clemente, D., Rosa-Santos, P., & Taveira-Pinto, F. (2021). On the potential synergies and applications of wave energy converters: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *135*(110162).

Clyde, N. Mt., Provencher, J. F., & Heath, J. P. (2012). Responses of pelagic cormorants (*Phalacrocorax pelagicus*) to marine traffic and bald eagles (*Haliaeetus leucocephalus*) in Barkley Sound, British Columbia. *Northwestern Naturalist*, *93*(3), 237–240. https://doi.org/10.1898/11-25.1

Coates, D. A., Kapasakali, D.-A., Vincx, M., & Vanaverbeke, J. (2016). Short-term effects of fishery exclusion in offshore wind farms on macrofaunal communities in the Belgian part of the North Sea. *Fisheries Research*, *179*, 131–138. Scopus. https://doi.org/10.1016/j.fishres.2016.02.019

Coleman, J., Hollyman, P. R., Black, A., & Collins, M. A. (2022). Blinded by the light: Seabird collision events in South Georgia. *Polar Biology*, *45*(6), 1151–1156.

Collie, J. S., Hall, S. J., Kaiser, M. J., & Poiner, I. R. (2000). A quantitative analysis of fishing impacts on shelf-sea benthos. *Journal of Animal Ecology*, *69*(5), 785–798. https://doi.org/10.1046/j.1365-2656.2000.00434.x

Copping, A. E., Hemery, L. G., Overhus, D. M., Garavelli, L., Freeman, M. C., Whiting, J. M., Gorton, A. M., Farr, H. K., Rose, D. J., & Tugade, L. G. (2020). Potential Environmental Effects of Marine Renewable Energy Development—The State of the Science. *J. Mar. Sci. Eng.*, *8*(879). https://doi.org/10.3390/jmse8110879

CorPower Ocean. (2023, September 5). *CorPower Ocean's Wave Energy Converter Deployed in Portugal*. https://corpowerocean.com/corpower-oceans-wave-energy-converter-deployed/

Crown. (2021, September 29). *Air defence and offshore wind—Working together towards Net Zero*. Policy Paper. https://www.gov.uk/government/publications/air-defence-and-offshore-wind-working-together-towards-net-zero/air-defence-and-offshore-wind-working-together-towards-net-zero

Daewel, U., Akhtar, N., Christiansen, N., & Schrum, C. (2022). Offshore wind farms are projected to impact primary production and bottom water deoxygenation in the North Sea. *Communications Earth & Environment*, *3*(292), 292.

Dahlke, F. T., Butzin, M., Nahrgang, J., Puvanendran, V., Mortensen, A., Pörtner, H.-O., & Storch, D. (2018). *Northern cod species face spawning habitat losses if global warming exceeds 1.5°C. 4*.

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. *Marine Ecology Progress Series*, *580*, 221–237.

D'Alessandro, M., Esposito, V., Porporato, E. M. D., Berto, D., Renzi, M., Giacobbe, S., Scotti, G., Consoli, P., Valastro, G., Andaloro, F., & Romeo, T. (2018). Relationships between plastic litter and chemical pollutants on benthic biodiversity. *Environmental Pollution*, *242*, 1546–1556. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.08.002

Daunt, F., Wanless, S., Greenstreet, S. P. R., Jensen, H., Hamer, K. C., & Harris, M. P. (2008). The impact of the sandeel fishery closureon seabird food consumption, distribution, and productivity in the northwestern North Sea. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, *65*, 362–381.

Davidsen, J. G., Dong, H., Linné, M., Andersson, M. H., Piper, A., Prystay, T. S., Hvam, E. B., Thorstad, E. B., Whoriskey, F., Cooke, S. J., Sjursen, A. D., Rønning, L., Netland, T. C., & Hawkins, A. D. (2019). Effects of sound exposure from a seismic airgun on heart rate, acceleration and depth use in free-swimming Atlantic cod and saithe. *Conservation Physiology*, *7*(1), coz020. https://doi.org/10.1093/conphys/coz020

de Groot, S. J. (1984). The Impact of Bottom Trawling on Benthic Fauna of the North Sea. *Ocean Management*, *9*, 177–190. https://doi.org/10.1016/0302-184X(84)90002-7

De Rijcke, M., Andersen, T. L., & Martinelli, L. (2023, August 25). *Wave energy converters*. https://www.coastal-wiki.org/wiki/Wave_energy_converters

Defence and Security Accelerator, Defence Science and Technology Laboratory, & Department for Business, Energy & Industrial Strategy. (2021, September 28). *£3.8 million in contracts awarded to mitigate the radar risk of windfarms*. GOV.UK. https://www.gov.uk/government/news/38-million-in-contracts-awarded-to-mitigate-the-radar-risk-of-windfarms

Defingou, M., Bils, F., Horchler, B., Liesenjohann, T., & Nehls, G. (2019). *PHAROS4MPAs project. A review of solutions to avoid and mitigate environmental impacts of offshore wind farms.* (S. 269). BioConsult SH.

Degraer, S., Brabant, R., Rumes, B., & Vigin, L. (2019). *Environmental Impacts of Offshore Wind Farms in the Belgian Part of the North Sea: Marking a Decade of Monitoring, Research and Innovation* (S. 134). Royal Belgian Institute of Natural Sciences, OD Natural Environment, Marine Ecology and Management.

Degraer, S., Brabant, R., Rumes, B., & Vigin, L. (2021). *Environmental Impacts of Offshore Wind Farms in the Belgian Part of the North Sea: Attraction, avoidance and habitat use at various spatial scales. Memoirs on the Marine Environment.* (S. 104). Royal Belgian Institute of Natural Sciences, OD Natural Environment, Marine Ecology and Management.

Degraer, S., Carey, D., Coolen, J., Hutchison, Z., Kerckhof, F., Rumes, B., & Vanaverbeke, J. (2020). Offshore wind farm artificial reefs affect ecosystem structure and functioning: A synthesis. *Oceanography*, *33*(4), 48–57. https://doi.org/10.5670/oceanog.2020.405

Dehnhard, N., Skei, J., Christensen-Dalsgaard, S., May, R., Halley, D., Ringsby, T. H., & Lorentsen, S.-H. (2020). Boat disturbance effects on moulting common eiders *Somateria mollissima*. *Marine Biology*, *167*(12).

Demirbas, A., & Andejany, M. I. (2017). Optimization of wind power generation using shaking energy. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, *12*(4), 326–331. https://doi.org/10.1080/15567249.2015.1112860

Deutscher Bundestag. (2024, März 12). *Unterrichtung durch die Wehrbeauftragte (Bundestagsdrucksache 20/10500)*. Bundestag, Berlin. https://dserver.bundestag.de/btd/20/105/2010500.pdf

Dierschke, V., Furness, R. W., & Garthe, S. (2016). Seabirds and offshore wind farms in European waters: Avoidance and attraction. *Biological Conservation*, *202*, 59–68. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.08.016

Dierschke, V., & Garthe, S. (2006). Literature review of offshore wind farms with regard to seabirds. In C. Zucco, W. Wende, T. Merck, I. Köchling, & J. Köppel, *Ecological Research on Offshore Wind Farms: International Exchange of Experiences. Part B: Literature Review of Ecological Impacts* (S. 131–186). Bundesamt für Naturschutz (BfN).

Dillschneider, R. (2014). *Die Effizienz der Kultivierung von Mikroalgen zur Biodieselgewinnung – Prozessentwicklung auf der Grundlage von Energiebilanzierung, Simulation und Integration modellprädiktiver Regelungskonzepte* [Dissertation]. Karlsruher Institut für Technologie.

Dirksen, S., Spaans, A. L., & Van Der Winden, J. (2007). Collision risk for diving ducks at Semi-Offshore wind farms in freshwater lakes: A case study. In *Birds and wind farms. Risk assessment and mitigation* (S. 201–218). Quercus.

Djath, B., Schulz-Stellenfleth, J., & Cañadillas, B. (2018). Impact of atmospheric stability on X-band and C-band synthetic aperture radar imagery of offshore windpark wakes. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, *10*(043301).

DNV. (2022). *Meteorologische Messungen auf FINO 2*. https://www.fino2.de/de/forschung/meteorologie.html

Doherty, T. S., Hays, G. C., & Driscoll, D. A. (2021). Human disturbance causes widespread disruption of animal movement. *Nature Ecology & Evolution*, *5*(4), 513–519. https://doi.org/10.1038/s41559-020-01380-1

Dörenkämper, M. (2022, Mai 19). *Windgeschwindigkeitsverteilungen Deutsche Bucht* [Persönliche Kommunikation].

Dörenkämper, M., Wahed, A., Kumar, A., de Jong, M., Kroon, J., & Reindl, T. (2021). The cooling effect of floating PV in two different climate zones: A comparison of field test data from the Netherlands and Singapore. *Solar Energy*, *219*. https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.03.051

Dorey, K., Dickey, S., & Walker, T. R. (2019). Testing efficacy of bird deterrents at wind turbine facilities: A pilot study in Nova Scotia, Canada. *Proceedings of the Nova Scotian Institute of Science*, *50*(1), 91–108.

Duineveld, G. C. A., Bergman, M. J. N., & Lavaleye, M. S. S. (2007). Effects of an area closed to fisheries on the composition of the benthic fauna in the southern North Sea. *ICES Journal of Marine Science*, *64*, 899–908. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsm029

Durner, W. (2022). *Planung, Finanzierung und Zulassung von Offshore-Windenergie—Grundfragen des maritimen Infrastrukturrechts*. 3 (64).

Dyndo, M., Wiśniewska, D. M., Rojano-Doñate, L., & Madsen, P. T. (2015). Harbour porpoises react to low levels of high frequency vessel noise. *Scientific Reports*, *5*(1), 1–9.

ECS/ASCOBANS/ACCOBAMS. (2013). *CHEMICAL POLLUTION AND MARINE MAMMALS*. https://www.ascobans.org/sites/default/files/publication/Pollution_Proceedings_final.pdf

Edebohls, I., Berkenhagen, J., & Döring, R. (2020). *Steckbrief zur Meeresfischerei in Deutschland*. Thünen Institut für Seefischerei.

EDF Renewables & Neart na Gaoithe Offshore Wind (Hrsg.). (2012). Chapter 25 Summary of suggested mitigation and monitoring. In *Neart na Gaoithe Offshore Wind Farm Environmental Statement*.

EK. (2020). *Eine EU-Strategie zur Nutzung des Potenzials der erneuerbaren Offshore-Energie für eine klimaneutrale Zukunft*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1605792629666&uri=COM%3A2020%3A741%3AFIN

Eklöf, J. S., Hansen, J. P., Eriksson, B. K., Östman, Ö., Austin, Å. N., Yanos, C., Fredriksson, R., Bergström, U., & Andersson, H. C. (2023). Effects of seasonal spawning closures on pike (*Esox lucius* L.) and perch (*Perca fluviatilis* L.) catches and coastal food webs in the western Baltic Sea. *Fisheries Research*, *263*, 106674.

Eklöf, J. S., Henriksson, R., & Kautsky, N. (2006). Effects of tropical open-water seaweed farming on seagrass ecosystem structure and function. *Marine Ecology Progress Series*, *325*, 73–84. https://doi.org/10.3354/meps325073

Elmer, K.-H., Betke, K., & Neumann, T. (2007). *Standardverfahren zur Ermittlung und Bewertung der Belastung der Meeresumwelt durch die Schallimmission von Offshore-Windenergieanlagen. SCHALL 2* (Abschlussbericht BMU-Forschungsvorhaben 0329947; S. 129). Institut für Statik und Dynamik (ISD).

Endeavor Business Media. (2024, Februar). *Shell joins RSP wave power, subsea energy storage project*. Offshore. https://www.offshore-mag.com/renewable-energy/article/14304694/shell-joins-rsp-wave-power-subsea-energy-storage-project

Erbe, C., Marley, S. A., Schoeman, R. P., Smith, J. N., Trigg, L. E., & Embling, C. B. (2019). The Effects of Ship Noise on Marine Mammals—A Review. *Frontiers in Marine Science*, *6*, 21.

Eschenbach, C. (2021). *Offshore-Windkraftanlagen verwirbeln Wasser und Luft* [HTML,PDF]. 507 KB. https://doi.org/10.48440/ESKP.059

Esteban, M., López-Gutiérrez, J.-S., & Negro, V. (2019). Gravity-Based Foundations in the Offshore Wind Sector. *Journal of Marine Science and Engineering*, *7*(3), 64.

Europäische Kommission. (2023, März 10). *Sicherheit: EU aktualisiert Strategie zum Schutz des maritimen Raums*. https://germany.representation.ec.europa.eu/news/sicherheit-eu-aktualisiert-strategie-zum-schutz-des-maritimen-raums-2023-03-10-0_de

European Defence Agency. (2022). *SYMBIOSIS | About us*. Default. https://eda.europa.eu/what-we-do/eu-policies/symbiosis/about-us

European MSP Platform. (2019, Januar 1). *Edulis: Offshore mussel culture in wind farms*. https://maritime-spatial-planning.ec.europa.eu/projects/edulis-offshore-mussel-culture-wind-farms

Falkenberg, H., Koepp, M., Krampe, L., Wendring, P., Patzack, S., Svoboda, P., Wilms, J., Armeni, A., Borrmann, R., Gerdes, G., Kruse, D., Wallasch, A.-K., & Koch, F. (2020). *Unterstützung zur Aufstellung und Fortschreibung des FEP*. 266.

Fallow, P. M., Pitcher, B. J., & Magrath, R. D. (2013). Alarming features: Birds use specific acoustic properties to identify heterospecific alarm calls. *Proc. R. Soc. B.*, *280*, 20122539. https://doi.org/10.1098/rspb.2012.2539

Farr, H., Ruttenberg, B., Walter, R. K., Wang, Y.-H., & White, C. (2021). Potential environmental effects of deep-water floating offshore wind energy facilities. *Ocean & Coastal Management*, *207*, 105611. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105611

Federal Maritime and Hydrographic Agency (BSH) & Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU) (Hrsg.). (2014). *Ecological Research at the Offshore Windfarm* alpha ventus*: Challenges, Results and Perspectives*. Springer Spektrum.

Fewtrell, J. L., & McCauley, R. D. (2012). Impact of air gun noise on the behaviour of marine fish and squid. *Marine Pollution Bulletin*, *64*(5), 984–993. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.02.009

Finck, P., Heinze, S., Raths, U., Riecken, U., & Ssymank, A. (2017). *Rote Liste der gefährdeten Biotoptypen Deutschlands: Dritte fortgeschriebene Fassung 2017*. Bundesamt für Naturschutz.

Fine, M. L., Winn, H. E., & Olla, B. L. (1977). Chapter 20—Communication in fish. In T. A. Sebeok (Hrsg.), *How animals communicate*. Indiana University Press. https://publish.iupress.indiana.edu/read/how-animals-communicate/section/4e0d1178-4a43-4b7d-84ce-b8990705ace8##ch20

Fliessbach, K. L., Borkenhagen, K., Guse, N., Markones, N., Schwemmer, P., & Garthe, S. (2019). A ship traffic disturbance vulnerability index for northwest european seabirds as a tool for marine Spatial planning. *Frontiers in Marine Science*, *6*, 192. https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00192

Florin, A. -B., Bergström, U., Ustups, D., Lundström, K., & Jonsson, P. R. (2013). Effects of a large northern European no-take zone on flatfish populations [a]. *Journal of Fish Biology*, *83*(4), 939–962.

Fox, A. D., & Krag Petersen, I. (2019). Offshore wind farms and their effects on birds. *Dansk Ornitologisk Forenings Tidsskrift*, *113*, 86–101.

Franzén, F., Nordzell, H., Wallström, J., & Gröndahl, F. (2017). *Case study 4: Multi-use for local development focused on energy production, tourism and environment in Swedish Waters (Island of Gotland—Baltic Sea). Muses deliverable: D.3.3—Case study implementation—Annex 7* (Muses Project). Anthesis Enveco, Royal Institute of Technology, SEED department.

Fraunhofer IWES. (2023a). *Weiterentwicklung der Rahmenbedingungen zur Planung von Windenergieanlagen auf See und Netzanbindungssystemen—Endbericht*. https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Meeresfachplanung/Flaechenentwicklungsplan/_Anlagen/Downloads/FEP_2023_1/Endbericht_FEP_2023_Beratung.pdf?__blob=publicationFile&v=1/

Fraunhofer IWES. (2023b, Juni 14). *X-Wakes*. https://www.iwes.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/aktuelle-projekte/x-wakes-.html

Freyhof, J., & Kottelat, M. (2008). *IUCN Red List of Threatened Species—Twaite shad (Alosa fallax)*. IUCN Red List of Threatened Species. https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2008.RLTS.T904A174776207.en

Frid, C., Andonegi, E., Depestele, J., Judd, A., Rihan, D., Rogers, S. I., & Kenchington, E. (2012). The environmental interactions of tidal and wave energy generation devices. *Environmental Impact Assessment Review*, *32*(1), 133–139. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2011.06.002

Froese, R., Tsikliras, A. C., Scarcella, G., & Gascuel, D. (2021). Progress towards ending overfishing in the Northeast Atlantic. *Marine Policy*, *125*, 104282. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.104282

Furness, R. W., Wade, H. M., & Masden, E. A. (2013). Assessing vulnerability of marine bird populations to offshore wind farms. *Journal of Environmental Management*, *119*, 56–66. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.025

Gaertner, E., Rinker, J., Sethuraman, L., Zahle, F., Anderson, B., Barter, G., Abbas, N., Meng, F., Bortolotti, P., Skrzypinski, W., Scott, G., Feil, R., Bredmose, H., Dykes, K., Shields, M., Allen, C., & Viselli, A. (2020). *Definition of the IEA Wind 15-Megawatt Offshore Reference Wind Turbine*. https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/75698.pdf

Galatius, A., Abel, C., Brackman, J., Brasseur, S., Jeß, A., Meise, K., Meyer, J., Schop, J., Siebert, U., Teilmann, J., & Bie Thøstesen, C. (2021). *EG-Marine Mammals harbour seal surveys in the Wadden Sea and Helgoland 2021. Common Wadden Sea Secretariat*. Common Wadden Sea Secretariat.

Garthe, S., Dierschke, V., Weichler, T., & Schwemmer, P. (2004). Teilprojekt 5—Rastvogelvorkommen und Offshore-Windkraftnutzung: Analyse des Konfliktpotenzials für die deutsche Nord- und Ostsee. In A. Kellermann, B. Frank, & K. Eskildsen, *Endbericht. Marine Warmblüter in Nord- und Ostsee: Grundlagen zur Bewertung von Windkraftanlagen im Offshorebereich (MINOS)* (S. 195–333).

Garthe, S., & Hüppop, O. (1994). Distribution of ship-following seabirds and their utilization of discards in the North Sea in summer. *Marine Ecology Progress Series*, *106*, 1–9.

Garthe, S., & Hüppop, O. (2004). Scaling possible adverse effects of marine wind farms on seabirds: Developing and applying a vulnerability index. *Journal of Applied Ecology*, *41*(4), 724–734. https://doi.org/10.1111/j.0021-8901.2004.00918.x

Garthe, S., Schwemmer, H., Müller, S., Peschko, V., Markones, N., & Mercker, M. (2018). *Seetaucher in der Deutschen Bucht: Verbreitung, Bestände und Effekte von Windparks* [Bericht für das Bundesamt für Seeschiffahrt und Hydrographie und das Bundesamt für Naturschutz]. http://www.ftz.uni-

kiel.de/de/forschungsabteilungen/ecolab-oekologie-mariner-tiere/laufende-projekte/offshore-windenergie/Seetaucher_Windparkeffekte_Ergebnisse_FTZ_BIONUM.pdf

Garthe, S., Schwemmer, H., Peschko, V., Markones, N., Müller, S., Schwemmer, P., & Mercker, M. (2023). Large-scale effects of offshore wind farms on seabirds of high conservation concern. *Scientific Reports*, *13*(4779).

Geelhoed, S. C. V., Authier, M., Pigeault, R., & Gilles, A. (2023). Abundance and Distribution of Cetaceans. In *SPAR, 2023: The 2023 Quality Status Report for the Northeast Atlantic*. OSPAR Commission.

Geisler, R., Schulz, C., Michl, S. C., & Strothotte, E. (2018, Juli). *Offshore-Aquakultur am Standort der Forschungsplattform FINO3*. https://www.fh-kiel-gmbh.de/files/aktuelles/pdf/Machbarkeitsstudie_Offshore_Aquakultur_FuE-GmbH.pdf

Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt. (2014, Dezember 22). *Allgemeinverfügung zur Regelung des Befahrens einer Sicherheitszone nach § 7 Abs. 3 der Verordnung zu den Internationalen Regeln von 1972 zur Verhütung von Zusammenstößen auf See*. https://www.elwis.de/DE/Seeschifffahrt/Offshore-Windparks/Nordsee-02.pdf?__blob=publicationFile&v=3

Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt. (2021). *Richtlinie Offshore-Anlagen, Version 3.1 vom 01.07.2022*. 49.

Ghosh, A. (2023). A comprehensive review of water based PV: Flotavoltaics, under water, offshore & canal top. *Ocean Engineering*, *281*, 115044. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115044

Gieron, J., Grochowalski, A., & Chrzaszcz, R. (2010). *PBB levels in fish from the Baltic and North seas and in selected food products from Poland*. *48*(10). https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.12.031

Giesberts, L., & Reinhardt, M. (Hrsg.). (2018). *Umweltrecht: BImSchG, KrWG, BBodSchG, WHG, BNatSchG: Kommentar* (2. Auflage). C.H. Beck.

Giesberts, L., & Reinhardt, M. (2022). *BeckOK Umweltrecht* (62. Edition). Beck.

Gill, A. B., Bartlett, M., & Thomsen, F. (2012). Potential interactions between diadromous fishes of U.K. conservation importance and the electromagnetic fields and subsea noise from marine renewable energy developments. *Journal of Fish Biology*, *81*(2), 664–695. https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2012.03374.x

Gill, A. B., & Desender, M. (2020). *Risk to Animals from Electromagnetic Fields Emitted by Electric Cables and Marine Renewable Energy Devices* (S. 18) [State of the Science Report]. Ocean Energy Systems (OES). https://www.osti.gov/servlets/purl/1633088

Gilles, A., Authier, M., Ramirez-Martinez, N., Araújo, H., Blanchard, A., Carlström, J., Eira, C., Dorémus, G., Fernández-Maldonado, C., Geelhoed, S. C. V., Kyhn, L., Laran, S., Nachtsheim, D., Panigada, S., Sequeira, M., Sveegaard, S., Taylor, N. L., Owen, K., Saavedra, C., … Hammond, P. S. (2023). *Scans-IV. Small cetaceans in European Atlantic water and the North Sea 2022*.

Glarou, M., Zrust, M., & Svendsen, J. C. (2020). Using artificial-reef knowledge to enhance the ecological function of offshore wind turbine foundations: Implications for fish abundance and diversity. *Journal of Marine Science and Engineering*, *8*(332).

Goldenman, G., Lietzmann, J., & Meura, L. (2017). *Study for the strategy for a non-toxic environment of the 7th Environment Action Programme, European Commission (DG ENV)*. Milieu Ltd.

Golroodbari, S. Z. M., Vaartjes, D. F., Meit, J. B. L., van Hoeken, A. P., Eberveld, M., Jonker, H., & van Sark, W. G. J. H. M. (2021). Pooling the cable: A techno-economic feasibility study of integrating offshore floating photovoltaic solar technology within an offshore wind park. *Solar Energy*, *219*, 65–74. https://doi.org/10/gpfb5z

Goodale, M. W., & Milman, A. (2016). Cumulative adverse effects of offshore wind energy development on wildlife. *Journal of Environmental Planning and Management*, *59*(1), 1–21.

Goodale, M. W., & Milman, A. (2019). Assessing the cumulative exposure of wildlife to offshore wind energy development. *Journal of Environmental Management*, *235*, 77–83.

Government of the Netherlands. (2021). *Draft North Sea Programme 2022—2027*. https://www.noordzeeloket.nl/en/policy/north-sea-programme-2022-2027/

Government of the Netherlands. (2023, April 24). *Ostend Declaration on the North Sea as Europe's Green Power Plant—Diplomatic statement—Government.nl* [Diplomatieke_verklaring]. Ministerie van Algemene Zaken. https://www.government.nl/documents/diplomatic-statements/2023/04/24/ostend-declaration-on-the-north-sea-as-europes-green-power-plant

Grecian, W. J., Inger, R., Attrill, M. J., Bearhop, S., Godley, B. J., Witt, M. J., & Votier, S. C. (2010). Potential impacts of wave-powered marine renewable energy installations on marine birds: Impacts of wave-powered marine renewables on birds. *Ibis*, *152*(4), 683–697. https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.2010.01048.x

Gren, I.-M., Brutemark, A., & Jägerbrand, A. (2022). Effects of shipping on non-indigenous species in the Baltic Sea. *Science of The Total Environment*, *821*(153465).

Grippo, M., Hayse, J. W., & O'Connor, B. L. (2015). Solar Energy Development and Aquatic Ecosystems in the Southwestern United States: Potential Impacts, Mitigation, and Research Needs. *Environmental Management*, *55*(1), 244–256. https://doi.org/10.1007/s00267-014-0384-x

Groenendijk, F. (2018). *Review on Risk Assessment on transit and co-use of offshore wind farms in Dutch coastal water* (S. 121). ARCADIS. https://zoek.officielebekendmakingen.nl/blg-842692.pdf

Guo, B., & Ringwood, J. V. (2021). Geometric optimisation of wave energy conversion devices: A survey. *Applied Energy*, *297*, 117100. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117100

Gușatu, L. F., Menegon, S., Depellegrin, D., Zuidema, C., Faaij, A., & Yamu, C. (2021). Spatial and temporal analysis of cumulative environmental effects of offshore wind farms in the North Sea basin. *Scientific Reports*, *11*(1), 10125.

Gusatu, L. F., Yamu, C., Zuidema, C., & Faaij, A. (2020). A Spatial Analysis of the Potentials for Offshore Wind Farm Locations in the North Sea Region: Challenges and Opportunities. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *9*(2), Art. 2. https://doi.org/10.3390/ijgi9020096

Guşatu, L. F., Zuidema, C., & Faaij, A. (2022). A multi-criteria analysis framework for conflict resolution in the case of offshore wind farm sitting: A study of England and the Netherlands offshore space. *Frontiers in Marine Science*, *9*. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2022.959375

Guse, N., Fleet, D., van Franeker, J., & Garthe, S. (2005). Der Eissturmvogel (*Fulmarus glacialis*)—Mülleimer der Nordsee? *Seevögel*, *26*(2), 3–12.

Hac, B., & Szefler, K. (2018). Offshore Wind Farms – Support or Threat to the Defence of Polish Sea Areas? In Á. Rocha & T. Guarda (Hrsg.), *Developments and Advances in Defense and Security* (S. 266–274). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78605-6_22

Hague, E. L., Sparling, C. E., Morris, C., Vaughan, D., Walker, R., Culloch, R. M., Lyndon, A. R., Fernandes, T. F., & McWhinnie, L. H. (2022). Same Space, Different Standards: A Review of Cumulative Effects Assessment Practice for Marine Mammals. *Frontiers in Marine Science*, *9*(822467).

Halouani, G., Villanueva, C.-M., Raoux, A., Dauvin, J. C., Ben Rais Lasram, F., Foucher, E., Le Loc'h, F., Safi, G., Araignous, E., Robin, J. P., & Niquil, N. (2020). A spatial food web model to investigate potential spillover effects of a fishery closure in an offshore wind farm. *Journal of Marine Systems*, *212*. https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2020.103434

Halpern, B. S., Frazier, M., Afflerbach, J., Lowndes, J. S., Micheli, F., O'Hara, C., Scarborough, C., & Selkoe, K. A. (2019). Recent pace of change in human impact on the world's ocean. *Scientific Reports*, *9*(11609).

Halpern, B. S., Walbridge, S., Selkoe, K. A., Kappel, C. V., Micheli, F., D'Agrosa, C., Bruno, J. F., Casey, K. S., Ebert, C., Fox, H. E., Fujita, R., Heinemann, D., Lenihan, H. S., Madin, E. M. P., Perry, M. T., Selig, E. R., Spalding, M., Steneck, R., & Watson, R. (2008). A Global Map of Human Impact on Marine Ecosystems. *Science*, *319*(5865), 948–952. https://doi.org/10.1126/science.1149345

Halvorsen, M. B., Casper, B. M., Popper, A. N., & Carlson, T. J. (2017). Comprehensive summary of the impulsive pile driving sound exposure study series. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *141*(5), 3922–3922.

HANSA International Maritime Journal. (2023, Mai 8). *Werk für XXXL-Monopiles entsteht in China*. https://hansa-online.de/2023/05/offshore-2/213608/xxxl-monopiles-werk/

Harnois, V., Smith, H. C. M., Benjamins, S., & Johanning, L. (2015). Assessment of entanglement risk to marine megafauna due to offshore renewable energy mooring systems. *International Journal of Marine Energy*, *11*, 27–49. https://doi.org/10.1016/j.ijome.2015.04.001

Harwood, A. J. P., & Perrow, M. R. (2019). Mitigation for birds with implications for bats. In *Wildlife and Wind Farms, Conflicts and Solutions. Vol. 4 Offshore: Monitoring and Mitigation, Chapter: 8.* Pelagic Publishing.

Hawkins, A. D., Hazelwood, R. A., Popper, A. N., & Macey, P. C. (2021). Substrate vibrations and their potential effects upon fishes and invertebrates. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *149*(4), 2782–2790. https://doi.org/10.1121/10.0004773

Hawkins, A. D., Pembroke, A. E., & Popper, A. N. (2015). Information gaps in understanding the effects of noise on fishes and invertebrates. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, *25*(1), 39–64.

Hegmann, G., Cocklin, C., Creasey, S., Dupuis, S., Kennedy, A., Kingsley, L., Ross, W., Spaling, H., & Stalker, D. (1999). *Cumulative Effects Assessment Practitioners Guide*.

Heinänen, S., Žydelis, R., Kleinschmidt, B., Dorsch, M., Burger, C., Morkūnas, J., Quillfeldt, P., & Nehls, G. (2020). Satellite telemetry and digital aerial surveys show strong displacement of red-throated divers (*Gavia stellata*) from offshore wind farms. *Marine Environmental Research*, *160*(104989).

Helm, R. C., Costa, D. P., O'Shea, T. J., Wells, R. S., & Williams, T. M. (2015). Overview of effects of oil spills on marine mammals. In *Handbook of Oil Spill Science and Technology,* (1.). John Wiley & Sons Inc. https://costa.eeb.ucsc.edu/wp-content/uploads/2017/12/Helm-et-al.-2015-Overview-of-Effects-of-Oil-Spills-on-Marine-Mammals2.pdf

Hermans, A., Winter, H. V., Gill, A. B., & Murk, A. (2024). Do electromagnetic fields from subsea power cables effect benthic elasmobranch behaviour? A risk-based approach for the Dutch Continental Shelf. *Environmental Pollution*, *346*, 123570. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123570

Herr, H., Fock, H. O., & Siebert, U. (2009). Spatio-temporal associations between harbour porpoise *Phocoena phocoena* and specific fisheries in the German Bight. *Biological Conservation*, *142*(12), 2962–2972. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.07.025

Herr, H., Scheidat, M., Lehnert, K., & Siebert, U. (2009). Seals at sea: Modelling seal distribution in the German bight based on aerial survey data. *Marine Biology*, *156*(5), 811–820. https://doi.org/10.1007/s00227-008-1105-x

Herrmann, C. (2004). Phocoena phocoena *LINNAEUS, 1758* (FFH-Arten Steckbrief, LUNG MV).

Heubeck, M., Camphuysen, K. C. J., Bao, R., Humple, D., Sandoval Rey, A., Cadiou, B., Bräger, S., & Thomas, T. (2003). Assessing the impact of major oil spills on seabird populations. *Marine Pollution Bulletin*, *46*(7), 900–902. https://doi.org/10.1016/S0025-326X(03)00098-5

Hintzen, N., Beukhof, E., Brunel, T., Eweg, A., Hamon, K., de Koning, S., Mol, A., & Steins, N. (2021). *Exploring potential ecological impacts of different scenarios for spatial closures and fleet decommissioning for Dutch North Sea demersal fisheries* (Research report C029/21). Wageningen Marine Research.

Ho, C. K. (2016). Review of avian mortality studies at concentrating solar power plants. *AIP Conference Proceedings*, *1734*, 070017. https://doi.org/10.1063/1.4949164

Hoffmann, E., Astrup, J., Larsen, F., Munch-Petersen, S., & Støttrup, J. G. (2000). *Effects of marine windfarms on the distribution of fish, shellfish and marine mammals in the Horns Rev area* (DFU-rapport 117-02; S. 45).

Hoge, A. (2021). Measures for mitigating avian collision rates with wind turbines—Determining an effective technique regarding effort and effect. *EGU Journal of Renewable Energy Short Reviews*, 42–47.

Hollingsworh, D. (2018). Tilting at Windmills: Reconciling Military Needs and Wind Energy Initiatives in the 21st Century. *Oil and Gas*, *4*, 28.

Holvi Oy. (o. J.). *The Penguin*. The Penguin Wave Energy Converter. Abgerufen 7. November 2022, von https://holvienergy.com/technology.html

Horta, P. A., Baruffi, J. B., Destri, G., Fonseca, A. L., Rocha, L. S., Bastos, E., Rörig, L. R., & Costa, G. B. (2021). Chapter 8: Marine Eutrophication: Overview from Now to the Future. In *Anthropogenic Pollution of Aquatic Ecosystems* (S. 157–180). Springer Nature Switzerland AG. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75602-4_8

Howarth, L. M. (2012). *Exploring the fishery and ecological effects of Lamlash Bay No-Take Zone*. University of York.

Hüppop, O., Dierschke, J., Exo, K. M., Fredrich, E., & Hill, R. (2006). Bird migration studies and potential collision risk with offshore wind turbines. *Ibis*, *148*, 90–109.

Hutchinson, Z. L., Gill, A. B., Sigray, P., He, H., & King, J. W. (2021). A modelling evaluation of electromagnetic fields emitted by buried subsea power cables and encountered by marine animals: Considerations for marine renewable energy development. *Renewable Energy*, *177*, 72–81. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.041

Hutchison, Z., Sigray, P., He, H., Gill, A., King, J., & Gibson, C. (2018). *Electromagnetic Field (EMF) Impacts on Elasmobranch (shark, rays, and skates) and American Lobster Movement and Migration from Direct Current Cables* (S. 254) [OCS Study]. U.S. Department of the Interior - Bureau of Ocean Energy Management.

ICES. (2023). *Who we are*. https://www.ices.dk/about-ICES/who-we-are/Pages/Who-we-are.aspx

IJsseldijk, L. L., Leopold, M. F., Begeman, L., Kik, M. J. L., Wiersma, L., Morell, M., Bravo Rebolledo, E. L., Jauniaux, T., Heesterbeek, H., & Gröne, A. (2022). Pathological findings in stranded harbor porpoises (*Phocoena phocoena*) with special focus on anthropogenic causes. *Frontiers in Marine Science*, *9*(997388).

Inger, R., Attrill, M. J., Bearhop, S., Broderick, A. C., James Grecian, W., Hodgson, D. J., Mills, C., Sheehan, E., Votier, S. C., Witt, M. J., & Godley, B. J. (2009). Marine renewable energy: Potential benefits to biodiversity? An urgent call for research. *Journal of Applied Ecology*, *46*, 1145–1553. https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2009.01697.x

Inspekteur der Marine. (2023). *Das Zielbild für die Marine ab 2035*. Marinekommando. https://www.bundeswehr.de/resource/blob/5600760/7c1f3f406c5e745b64a93e90da87c305/20230315-broschuere-zielbild-marine-2035--data.pdf

IQIP (Hrsg.). (2021). *Pulse piling—Reducing environmental impact*.

Jalkanen, J.-P., Johannson, L., Andersson, M. H., Majamäki, E., & Sigray, P. (2022). Underwater noise emissions from ships during 2014–2020. *Environmental Pollution*, *311*, 119766. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119766

Jech, M. J., Schaber, M., Cox, M., Escobar-Flores, P., Gastauer, S., Haris, K., Horne, J., Jarvis, T., Ladroit, Y., O'Driscoll, R., Pedersen, G., Peña, M., Ryan, T., Sakinan, S., Thomas, R., Viehman, H., Wall, C., & Whitton, T. (2021). *Collecting Quality Echosounder Data in Inclement Weather* (352; ICES Cooperative Research Report). International Council for the Exploration of the Sea. https://doi.org/10.17895/ices.pub.7539

Jeffrey, H., & Sedgwick, J. (2011). *ORECCA European Offshore Renewable Energy Roadmap* (S. 101). University of Edinburgh on behalf of the ORECCA Project.

Jensen, K. R., Andersen, P., Andersen, N. R., Bruhn, A., Buur, H., Carl, H., Jakobsen, H., Jaspers, C., Lundgreen, K., Nielsen, R., Strandberg, B., & Stæhr, P. A. U. (2023). Reviewing Introduction Histories, Pathways, Invasiveness, and Impact of Non-Indigenous Species in Danish Marine Waters. *Diversity*, *15*(3), 434. https://doi.org/10.3390/d15030434

Jia, G., Ma, C., Zhao, Y., Sun, Y., & Liu, H. (2024). *Numerical study on the sensitivity of photovoltaic panels to wind load on array layout*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772737824000130

Jiang, Z. (2021). Installation of offshore wind turbines: A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *139*, 110576. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110576

Johnston, A., Cook, A. S. C. P., Wright, L. J., Humphreys, E. M., & Burton, N. H. K. (2014). Modelling flight heights of marine birds to more accurately assess collision risk with offshore wind turbines. *Journal of Applied Ecology*, *51*(1), 31–41. https://doi.org/10.1111/1365-2664.12191

Joint Research Centre (JRC) for the European Commission's Knowledge Centre for Bioeconomy. (2019). *Brief on algae biomass production* (JRC 118214).

Junge, F., Ammermann, K., Räder, M., & Schroeder, A. (2022). Menschliche Aktivitäten und ihre Auswirkungen auf die Meeresumwelt. *Natur und Landschaft*, *97*(01), 28–36. https://doi.org/10/gptc3k

Jüssi, M., Härkönen, T., Helle, E., & Jüssi, I. (2008). *Decreasing Ice Coverage Will Reduce the Breeding Success of Baltic Grey Seal (*Halichoerus grypus*) Females*. *37*(2), 6. https://doi.org/10.1579/0044-7447(2008)37

Kabbabe Poleo, K., Crowther, W. J., & Barnes, M. (2021). Estimating the impact of drone-based inspection on the Levelised Cost of electricity for offshore wind farms. *Results in Engineering*, *9*(100201).

Kafas, A. (2017). *Case study 1a. Offshore wind and commercial fisheries in the east coast of Scotland. Muses Deliverable: D3.3 case study implementation—Annex 1* (Muses Project). Marine Scotland.

Kahl & Gärditz. (2023). *Umweltrecht* (13. Auflage). Beck.

Kahle, C. (2022, April 27). *Russische Angriffe konzentrieren sich auffällig auf Windkraft-Betreiber*. https://winfuture.de/news,129327.html

Karlson, H. L., Jørgensen, L., Andresen, L., & Lukic, I. (2017). *Case study 5: Offshore wind and mariculture: Potentials for multi-use and nutrient remediation in Rødsand 2(South coast of Lolland-Falster- Denmark—Baltic Sea): Muses Delieverabele D.3.3—Case study implementation—Annex 8* (Muses Project). Danish Technological Institute, Submariner Network.

Kastelein, R. A., Helder-Hoek, L., Van de Voorde, S., von Benda-Beckmann, A. M., Lam, F.-P. A., Jansen, E., de Jong, C. A. F., & Ainslie, M. A. (2017). Temporary hearing threshold shift in a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) after exposure to multiple airgun sounds. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *142*(4), 2430–2442. https://doi.org/10.1121/1.5007720

Kastelein, R. A., Hoek, L., Wensveen, P. J., Terhune, J. M., & de Jong, C. A. (2010). The effect of signal duration on the underwater hearing thresholds of two harbor seals (*Phoca vitulina*) for single tonal signals between 0.2 and 40 kHz. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *127*(2), 1135–1145. https://doi.org/10.1121/1.3283019

Kastelein, R. A., Wensveen, P. J., Hoek, L., Verboom, W. C., & Terhune, J. M. (2009). Underwater detection of tonal signals between 0.125 and 100kHz by harbor seals (*Phoca vitulina*). *The Journal of the Acoustical Society of America*, *125*(2), 1222–1229. https://doi.org/10.1121/1.3050283

Kavet, R., Wyman, M. T., Klimley, A. P., & Vegara, X. (2016). *Assessment of Potential Impact of Electromagnetic Fields from Undersea Cable on Migratory Fish Behavior* (FINAL REPORT, 1406896; S. FINAL REPORT, 1406896). https://doi.org/10.2172/1406896

Keindorf (FH Kiel), C. (2023, Mai 31). *Taufe des Wellenkraftwerks*.

Kindt-Larsen, L., Glemarec, G., Berg, C. W., Königson, S., Kroner, A.-M., Søgaard, M., & Lusseau, D. (2023). Knowing the fishery to know the bycatch: Bias-corrected estimates of harbour porpoise bycatch in gillnet fisheries. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *290*(20222570).

Kinze, C. C. (1994). Schweinswal oder Kleintümmler (auch Braunfisch). In J. Niethammer & F. Krapp (Hrsg.), *Handbuch der Säugetiere Europas: Bd. Band 6: Meeressäuger* (S. 242–264). Aula-Verlag.

Kirchgeorg, T., Weinberg, I., Hörnig, M., Baier, R., Schmid, M. J., & Brockmeyer, B. (2018). Emissions from corrosion protection systems of offshore wind farms: Evaluation of the potential impact on the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, *136*, 257–268.

Kleidon, A., & Miller, L. M. (2020). The Kinetic Energy Budget of the Atmosphere (KEBA) model 1.0: A simple yet physical approach for estimating regional wind energy resource potentials that includes the kinetic energy removal effect by wind turbines. *Geoscientific Model Development*, *13*(10), 4993–5005. https://doi.org/10.5194/gmd-13-4993-2020

Klimley, A. P., Wyman, M. T., & Kavet, R. (2017). *Chinook salmon and green sturgeon migrate through San Francisco Estuary despite large distortions in the local magnetic field produced by bridges*. *12*(6). https://doi.org/10.1371/ journal.pone.0169031

Kment, M., Dietz, A., Durner, W., Faßbender, K., & Grotefels, S. (2019). *Raumordnungsgesetz: Mit Landesplanungsrecht* (1. Auflage). Nomos.

Koch, Hofmann, & Reese. (2024). *Umweltrecht-Handbuch* (6. Auflage). Beck.

Kok, A. C. M., Bruil, L., Berges, B., Sakinan, S., Debusschere, E., Reubens, J., de Haan, D., Norro, A., & Slabbekoorn, H. (2021). An echosounder view on the potential effects of impulsive noise pollution on pelagic fish around windfarms in the North Sea. *Environ Pollut.*, *290*, 118063. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118063

Kopp & Ramsauer. (2023). *Verwaltungsverfahrensgesetz Kommentar*. Beck.

Kortekaas, S., Bagdanavičiūtė, I., Gyssels, P., Huerta, A., & Hequette, A. (2010). Assessment of the Effects of Marine Aggregate Extraction on the Coastline: An Example from the German Baltic Sea Coast. *Journal of Coastal Research*, *SI*(51), 205–214.

Koschinski, S., Diederichs, A., & Amundin, M. (2008). Click train patterns of free-ranging harbour porpoises acquired using T-PODs may be useful as indicators of their behaviour. *Journal of Cetacean Research and Management*, *10*(2), 147–155.

Koschinski, S., & Lüdemann, K. (2013). *Entwicklung schallminderndender Maßnahmen beim Bau von Offshore-Windenergieanlagen 2013*.

Koschinski, S., & Lüdemann, K. (2020). *Noise mitigation for the construction of increasingly large offshore wind turbines* (S. 40).

Krause, J. C., Diesing, M., & Arlt, G. (2010). The physical and biological impact of sand extraction: A case study of the Western Baltic Sea. *Journal of Coastal Research*, *51*, 215–226.

Krijgsveld, K. L. (2014). *Avoidance behaviour of birds around offshore wind farms* (S. 30) [Final Report]. Bureau Waardenburg.

Krijgsveld, K. L., Akershoek, K., Schenk, F., Dijk, F., & Dirksen, S. (2009). Collision risk of birds with modern large wind turbines. *Ardea*, *97*(3), 357–366. https://doi.org/10.5253/078.097.0311

Krone, R., Dederer, G., Kanstinger, P., Krämer, P., Schneider, C., & Schmalenbach, I. (2017). Mobile demersal megafauna at common offshore wind turbine foundations in the German Bight (North Sea) two years after deployment—Increased production rate of *Cancer pagurus*. *Marine Environmental Research*, *123*, 53–61. https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.11.011

Krylov, V. V., Izyumov, Yu. G., Izvekov, E. I., & Nepomnyashchikh, V. A. (2014). *Magnetic Fields and Fish Behavior*. *4*(3), 222–231.

Kuehne, L. M., Erbe, C., Ashe, E., Bogaard, L. T., Collins, M. S., & William, R. (2020). Above and below: Military Aircraft Noise in Air and under Water at Whidbey Island, Washington. *Journal of Marine Science and Engineering*, *8*, 923. https://doi.org/10.3390/jmse8110923

Laczny, M., Beckers, B., Stelter, M., Castillo, R., Piper, W., & Burger, C. (2021). *Umweltmonitoring im Cluster „Westlich Adlergrund". Fachgutachten Rastvögel. 7. Jahr der Clusteruntersuchung. März 2020 bis Februar 2021*.

Laczny, M., Liedtke, J., & Burger, C. (2021). *Umweltmonitoring für das Vorhaben OWP „Baltic Eagle". Fachgutachten für das Schutzgut Rastvögel. 5. Untersuchungsjahr der Basisuntersuchung (2. Jahr der Aktualisierung der Basisuntersuchung). März 2020 bis Februar 2021*.

Ladich, F. (2014). *Fish bioacoustics*. *28*, 121–127. http://dx.doi.org/10.1016/j.conb.2014.06.013

Ladich, F. (2019). *Ecology of sound communication in fish*. *20*, 552–563. https://doi.org/10.1111/faf.123

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen. (2022, Oktober 25). *NIBIS Kartenserver* [Kartenserver]. Niedersächsisches Bodeninformationssystem. https://nibis.lbeg.de/cardomap3/?TH=BEWILLIGUNG&lang=de#

Landmann, R. von, Rohmer, G., & Beckmann, M. (Hrsg.). (2022). *Umweltrecht: Kommentar* (98. Ergänzungslieferung). Beck.

Langhamer, O., Haikonen, K., & Sundberg, J. (2010). Wave power—Sustainable energy or environmentally costly? A review with special emphasis on linear wave energy converters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *14*(4), 1329–1335. https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.016

LBEG. (2024a, Februar 16). *Betriebe und Anlagen im Offshore-Bereich | Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie*. Betriebe und Anlagen im Offshore-Bereich. https://www.lbeg.niedersachsen.de/startseite/bergbau/offshore/betriebe_und_anlagen/betriebe-und-anlagen-im-offshore-bereich-124109.html

LBEG. (2024b, Februar 16). *Erdgasprojekt in der Nordsee vor Borkum: LBEG erteilt Bewilligung | Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie*. https://www.lbeg.niedersachsen.de/aktuelles/pressemitteilungen/erdgasprojekt-in-der-nordsee-vor-borkum-lbeg-erteilt-bewilligung-214075.html

Leaper, R. (2019). The Role of Slower Vessel Speeds in Reducing Greenhouse Gas Emissions, Underwater Noise and Collision Risk to Whales. *Front. Mar. Sci.*, *6*, 505. https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00505

Leaper, R., Renilson, M., & Ryan, C. (2014). Reducing underwater noise from large commercial ships: Current status and future directions. *The Journal of Ocean Technology*, *9*(1), 51–69.

Lee, K. M., Wochner, M. S., & Wilson, P. S. (2012). Mitigation of low-frequency underwater anthropogenic noise using stationary encapsulated gas bubbles. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 070011.

Leemans, J. J., & Collier, M. P. (2022). *Update on the current state of knowledge on the impacts of offshore wind farms on birds in the OSPAR Region: 2019-2022* (Report nr 22-198).

Lengkeek, W., Didderen, K., Teunis, M., Driessen, F., Coolen, J. W. P., Bos, O. G., Vergouwen, S. A., Raaijmakers, T. C., de Vries, M. B., & van Koningsveld, M. (2017). *Eco-friendly design of scour protection: Potential enhancement of ecological functioning in offshore wind farms. Towards an implementation guide and experimental set-up* (Report nr 17-001).

Leonard Krampe, Paul Wendring, Rasmus Borrmann, Merle Heyken, Anna-Kathrin Wallasch, Tamara Preuß, Dr.-Ing. Jürgen Wilms, Lukas Wammes, Johannes Antoni, Victoria Harsch, & Franziska Stamme. (2023). *Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß § 97 Erneuerbare-Energien-Gesetz*. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/W/wind-offshore-endbericht-230712.pdf?__blob=publicationFile&v=2

Lin, L., & Yu, H. (2012). Offshore wave energy generation devices: Impacts on ocean bio-environment. *Acta Ecologica Sinica*, *32*. https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2012.02.007

Lippert, F., Kranstauber, B., Forré, P. D., & van Loon, E. E. (2022). Learning to predict spatiotemporal movement dynamics from weather radar networks. *Methods in Ecology and Evolution*, *13*(12), 2811–2826. https://doi.org/10.1111/2041-210X.14007

Liu, Z., Ma, C., Li, X., Deng, Z., & Tian, Z. (2023). Aquatic environment impacts of floating photovoltaic and implications for climate change challenges. *Journal of Environmental Management*, *346*, 118851. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118851

Lloret, J., Turiel, A., Solé, J., Berdalet, E., Sabatés, A., Olivares, A., Gili, J.-M., Vila-Subirós, J., & Sardá, R. (2022). Unravelling the ecological impacts of large-scale offshore wind farms in the Mediterranean Sea. *Science of The Total Environment*, *824*(153803).

Løkkeborg, S. (2011). Best practices to mitigate seabird bycatch in longline, trawl and gillnet fisheries—Efficiency and practical applicability. *Mar Ecol Prog Ser*, *435*, 285–303. https://doi.org/10.3354/meps09227

Loughney, S., Wang, J., Bashir, M., Armin, M., & Yang, Y. (2021). Development and application of a multiple-attribute decision-analysis methodology for site selection of floating offshore wind farms on the UK Continental Shelf. In *Sustainable Energy Technologies and Assessments* (Bd. 47). https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101440

Louis. (2007). *Die Entwicklung der Eingriffsregelung*.

Lucas, S., & Berggren, P. (2023). A systematic review of sensory deterrents for bycatch mitigation of marine megafauna. *Rev Fish Biol Fisheries*, *33*, 1–33. https://doi.org/10.1007/s11160-022-09736-5

Lucke, K., Lepper, P. A., Blanchet, M.-A., & Siebert, U. (2011). The use of an air bubble curtain to reduce the received sound levels for harbor porpoises (*Phocoena phocoena*). *The Journal of the Acoustical Society of America*, *130*(5), 3406–3412. https://doi.org/10.1121/1.3626123

Lundquist, T. J., Woertz, I. C., Quinn, N. W. T., & Benemann, J. R. (2010). *A Realistic Technology and Engineering Assessment of Algae Biofuel Production*. Energy Biosciences Institute University of California.

Lütkes & Ewer. (2018). *Bundesnaturschutzgesetz Kommentar* (2. Auflage). Beck.

Mackenzie, B. R., Almesjö, L., & Hansson, S. (2004). *Fish, Fishing, and Pollutant Reduction in the Baltic Sea*. *38*(7), 1970–1976.

MacLeod, C. D., Santos, M. B., Reid, R. J., Scott, B. E., & Pierce, G. J. (2007). Linking sandeel consumption and the likelihood of starvation in harbour porpoises in the Scottish North Sea: Could climate change mean more starving porpoises? *Biology Letters*, *3*(2), 185–188. https://doi.org/10.1098/rsbl.2006.0588

Maragoni, L. F. B., Davies, T., Smyth, T., Rodríguez, A., Hamann, M., Duarte, C., Pendoley, K., Berge, J., Maggi, E., & Levy, O. (2022). Impacts of artificial light at night in marine ecosystems—A review. *Blobal Change Biology*, *28*(18), 5346–5367. https://doi.org/10.1111/gcb.16264

Marine Traffic Density Map. (2024). *Schiffsverkehrsdichte Nord- und Ostsee im Jahr 2022* [Map]. https://www.marinetraffic.com/en/ais/home/centerx:11.1/centery:54.7/zoom:7

MarineForum. (2024, April 13). *Niederlande—Größte schwimmende Solaranlage der Welt projektiert*. marineforum. https://marineforum.online/niederlande-groesste-schwimmende-solaranlage-der-welt-projektiert/

Maritimes Sicherheitszentrum des Bundes und der Küstenländer. (2018). *Kommunikation—Information—Kooperation—Koordinierung*. https://www.msz-cuxhaven.de/DE/GLZSee/Aufgaben/aufgaben_node.html

Marques, A. T., Batalha, H., & Bernardino, J. (2021). Bird Displacement by Wind Turbines: Assessing Current Knowledge and Recommendations for Future Studies. *Birds*, *2*(4), 460–475. https://doi.org/10.3390/birds2040034

Marques, A. T., Batalha, H., Rodrigues, S., Costa, H., Pereira, M. J. R., Fonseca, C., Mascarenhas, M., & Bernardino, J. (2014). Understanding bird collisions at wind farms: An updated review on the causes and possible mitigation strategies. *Biological Conservation*, *179*, 40–52.

Martin, G., & Banks, A. (2023). Marine birds: Vision-based wind turbine collision mitigation. *Global Ecology and Conservation*, *42*(e02386).

Martin, M. (2016). *Building the Impact Economy*. Springer International Publishing.

Marx, D., Feldens, A., Papenmeier, S., Feldens, Darr, A., Zettler, M. L., & Heinicke, K. (2024). Habitats and Biotopes in the German Baltic Sea. *Biology*, *13*, 6. https://doi.org/10.3390/biology13010006

Masden, E. (2015). *Developing an avian collision risk model to incorporate variability and uncertainty* (S. 26). Environmental Research Institute, North Highland College – UHI University of the Highlands and Islands.

Maxwell, S. M., Kershaw, F., Locke, C. C., Conners, M. G., Dawson, C., Aylesworth, S., Loomis, R., & Johnson, A. F. (2022). Potential impacts of floating wind turbine technology for marine species and habitats. *Journal of Environmental Management*, *307*, 114577.

May, R., Åström, J., Hamre, Ø., & Dahl, E. L. (2017). Do birds in flight respond to (ultra)violet lighting? *Avian Research*, *8*(33).

Mayring, P. (2015). *Qualitative Inhaltsanalyse*. Beltz Verlagsgruppe. https://content-select.com/de/portal/media/view/552557d1-12fc-4367-a17f-4cc3b0dd2d03?forceauth=1

Mazzuchi, N. (2019). Renewable Energy Infrastructure: Physical and Cyber Vulnerabilities Assessment. *Beyond the era of fossil fuelss.*, *12*, 32–40.

Mehdi, R. A., Schröder-Hinrichs, J.-U., Ölçer, A. I., & Baldauf, M. (2018). A Framework to Improve the Coexistence of Maritime Activities & Offshore Wind Farms. In A. I. Ölçer, M. Kitada, D. Dalaklis, & F. Ballini (Hrsg.), *Trends and Challenges in Maritime Energy Management* (S. 513–525). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74576-3_35

Meinig, H., Boye, P., Dähne, M., Hutterer, R., & Lang, J. (2020). *Rote Liste und Gesamtartenliste der Säugetiere (Mammalia) Deutschlands.* (170; Naturschutz und Biologische Vielfalt, S. 73). Rote Liste Zentrum Deutschland.

Mendel, B., Schwemmer, P., Peschko, V., Müller, S., Schwemmer, H., Mercker, M., & Garthe, S. (2019). Operational offshore wind farms and associated ship traffic cause profound changes in distribution patterns of Loons (*Gavia spp.*). *Journal of Environmental Management*, *231*, 429–438. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.053

Miao, R., Ghosh, P. N., Khanna, M., Wang, W., & Rong, J. (2019). Effect of wind turbines on bird abundance: A national scale analysis based on fixed effects models. *Energy Policy*, *132*, 357–366. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.04.040

Military Aviation and Installation Assurance Siting Clearinghouse. (o. J.). *Military Aviation and Installation Assurance Siting Clearinghouse*. Abgerufen 30. Juni 2023, von https://www.acq.osd.mil/dodsc/index.html

Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. (2023, April 26). *Extra pakket maatregelen dicht gat tot klimaatdoel 2030—Nieuwsbericht—Rijksoverheid.nl* [Nieuwsbericht]. Ministerie van Algemene Zaken. https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2023/04/26/extra-pakket-maatregelen-dicht-gat-tot-klimaatdoel-2030

Mitchell, P. I., Newton, S. F., Ratcliffe, N., & Dunn, T. E. (2004). *Seabird population Britain and Ireland: Results of the Seabird 2000 census (1998—2002)*. T and A . D . Poyser.

Moan, A., Skern-Mauritzen, M., Vølstad, J. H., & Bjørge, A. (2020). Assessing the impact of fisheries-related mortality of harbour porpoise (*Phocoena phocoena*) caused by incidental bycatch in the dynamic Norwegian gillnet fisheries. *ICES Journal of Marine Science*, *77*(7–8), 3039–3049. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa186

Mocean Energy. (2021, November 17). *Mocean Energy Blue X wave machine completes sea trials*. Mocean Energy. https://www.mocean.energy/blue-x-device-removal/

Mohr, Dr. T. (2020). *Meeresschutzrecht—Ein Überblick*. 389 (440).

Mooney, A., Andersson, M., & Stanley, J. (2020). Acoustic Impacts of Offshore Wind Energy on Fishery Resources: An Evolving Source and Varied Effects Across a Wind Farm's Lifetime. *Oceanography*, *33*(4), 82–95.

Mooney, A., Smith, A., Naesbye Larsen, O., Anderson Hansen, K., Wahlberg, M., & Rasmussen, M. (2019). Field-based hearing measurements of two seabird species. *Journal of Experimental Biology*, *222*, jeb190710. https://doi.org/10.1242/jeb.190710

Mueller, M., & Wallace, R. (2008). Enabling science and technology for marine renewable energy. *Energy Policy*, *36*(12), 4376–4382. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.035

Nabe-Nielsen, J., & Harwood, J. (2016). *Comparison of the iPCoD and DEPONS models for modelling population consequences of noise on harbour porpoises* (ISBN 9788771562057; Scientific Report From DCE - Danish Centre for Environment and Energy). Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi.

Nabe-Nielsen, J., Tougaard, J., Teilmann, J., & Sveegaard, S. (2011). *Effects of wind farms on harbour porpoise behaviour and population dynamics. Report commissioned by the Environmental Group under the Danish Environmental Monitoring Programme* (Scientific Report from Danish Centre for Environment and Energy 1; S. 48). Danish Centre for Environment and Energy, Aarhus University.

NATO ENERGY SECURITY Center of Excellence. (2021). *Offshore wind farms – challenges, risks and opportunities for building more resilient national energy systems*.

Nedelec, S. L. (2023). Categorizing the Effects of Anthropogenic Noise on Aquatic Life. In *The Effects of Noise on Aquatic Life*. Springer.

Nedelec, S. L., Radford, A. N., McCormick, M. I., & Simpson, S. D. (2017). *Motorboat noise impacts parentalbehaviour and offspring survivalin a reef fish*. *284*. http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2017.0143

Noordzeeloket. (2022). *Borssele wind farm zone*. Noordzeeloket. https://www.noordzeeloket.nl/en/functions-and-use/offshore-wind-energy/free-passage-shared-use/borssele-wind-farm-zone/

Nordin, M., Sharma, S., Khan, A., Gianni, M., Rajendran, S., & Sutton, R. (2022). Collaborative Unmanned Vehicles for Inspection, Maintenance, and Repairs of Offshore Wind Turbines. *Drones*, *6*(137).

Ocean Energy Europe. (2023). *Ocean Energy—Key trends and statistics 2022*. https://www.oceanenergy-europe.eu/wp-content/uploads/2023/03/Ocean-Energy-Key-Trends-and-Statistics-2022.pdf

Ocean Energy Systems. (2023). *Wave Energy Developments Highlights*.

Ocean Sun AS. (2023, Juni 22). *The innovation | Ocean Sun*. https://oceansun.no/the-innovation/

Ocean Sun AS. (2024). *Haiyang (offshore) | Ocean Sun*. https://oceansun.no/project/haiyang-offshore/

Oceans of Energy. (2022). *Oceans of Energy Projects*. Oceans of Energy. https://oceansofenergy.blue/projects/

Oceans of Energy. (2023, April 24). CrossWind and Oceans of Energy add offshore solar to the Hollandse Kust Noord offshore wind park. *Oceans of Energy*. https://oceansofenergy.blue/2023/04/24/crosswind-and-oceans-of-energy-add-offshore-solar-to-the-hkn-offshore-wind-park/

Olsson, O., Nilsson, T., & Fransson, T. (2000). *Long-term study of mortality in the common guillemot in the Baltic Sea. Analysis of 80 years of ringing data*. Swedish Environmental Protection Agency.

ONE-Dyas B.V. (2022, September 27). *GEMS - Gasförderprojekt in der Nordsee*. GEMS - Gasförderprojekt in der Nordsee. https://www.gemsnordsee.de/

Onoufriou, J., Davies, I., & McGregor, H. (2016). *Investigations into the interactions between harbour seals (*Phoca vitulina*) and vessels in the inner Moray Firth* (Scottish Marine and Freshwater Science Report Vol 7 No 24).

Österblom, H., Fransson, T., & Olsson, O. (2002). Bycatches of common guillemot (*Uria aalge*) in the Baltic Sea gillnet fishery. *Biological Conservation*, *105*(3), 309–319.

Owen, K., Gilles, A., Authier, M., Carlström, J., Genu, M., Kyhn, L. A., Nachtsheim, D. A., Ramírez-Martínez, N. C., Siebert, U., Sköld, M., Teilmann, J., Unger, B., & Sveegaard, S. (2024). A negative trend in abundance and an exceeded mortality limit call for conservation action for the Vulnerable Belt Sea harbour porpoise population. *Frontiers in Marine Science*, *11*(1289808).

P. Richards, D., Whytlaw, J., Allen, T., McLeod, G., Miles, J., & J. A. Cronin, J. (2021). User Experience Design as a Framework for Environmental and Political Negotiation in Decision-Making about Wind Energy. *Proceedings of the 39th ACM International Conference on Design of Communication*, 231–239. https://doi.org/10.1145/3472714.3473646

Parsons, M. J. G., Duncan, A. J., Parsons, S. K., & Erbe, C. (2020). Reducing vessel noise: An example of a solar-electric passenger ferry. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *147*(5), 3575–3583. https://doi.org/10.1121/10.0001264

Pavat, D., Harker, A. J., Humphries, G., Keogan, K., Webb, A., & Macleod, K. (2023). *Consideration of avoidance behaviour of northern gannet (*Morus bassanus*) in collision risk modelling for offshore wind farm impact assessments* (Natural England Commissioned Report NERC512).

Pedroso de Lima, R. L., Paxinou, K., C. Boogaard, F., Akkerman, O., & Lin, F.-Y. (2021). In-Situ Water Quality Observations under a Large-Scale Floating Solar Farm Using Sensors and Underwater Drones. *Sustainability*, *13*(6421).

Peschko, V., Mendel, B., Müller, S., Markones, N., Mercker, M., & Garthe, S. (2020). Effects of offshore windfarms on seabird abundance: Strong effects in spring and in the breeding season. *Marine Environmental Research*, *162*, 105157.

Peschko, V., Müller, S., Schwemmer, P., Mercker, M., Lienau, P., Rosenberger, T., Sundermeyer, J., & Garthe, S. (2020). Wide dispersal of recently weaned grey seal pups in the Southern North Sea. *ICES Journal of Marine Science*, *77*(5), 1762–1771. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa045

Peschko, V., Schwemmer, H., Mercker, M., Markones, N., Borkenhagen, K., & Garthe, S. (2024). Cumulative effects of offshore wind farms on common guillemots (Uria aalge) in the southern North Sea—Climate versus biodiversity? *Biodiversity and Conservation*. https://doi.org/10.1007/s10531-023-02759-9

Petersen, I. K., MacKenzie, Monique, Rexstad, Eric, Wisz, Mary S, & Fox, Anthony D. (2011). *Comparing pre- and post-construction distributions of long-tailed ducks* Clangula hyemalis *in and around the Nysted offshore wind farm, Denmark: A quasi-designed experiment accounting for imperfect detection, local surface features and autocorrelation* (2011–1; CREEM Tech Report, S. 16).

Piet, G., Tamis, J., van der Wal, J., & Jongbloed, R. (2021). *Cumulative impacts of wind farms on the North Sea ecosystem* (Wageningen University&Research report C081/21). Wageningen Marine Research. https://doi.org/10.18174/556024

Piet, G., Tamis, J., Volwater, J., de Vries, P., van der Wal, J. T., & Jongbloed, R. H. (2021). A roadmap towards quantitative cumulative impact assessments: Every step of the way. *Science of The Total Environment*, *784*, 146847.

Pirotta, E., Brookes, K. L., Graham, I. M., & Thompson, P. M. (2014). Variation in harbour porpoise activity in response to seismic survey noise. *Biology Letters*, *10*(5), 1–5. https://doi.org/10.1098/rsbl.2013.1090

Planungsamt der Bundeswehr. (2017). *Unmanned Underwater Vehicles*. Referat Zukunftsanalyse. https://www.bundeswehr.de/resource/blob/140478/ced16e7db8129001e1f020424a617d4e/ft-uuv-data.pdf

Platis, A., Bange, J., Bärfuss, K., Canadillas, B., Hundhausen, M., Djath, B., Lampert, A., Schulz-Stellenfleth, J., Siedersleben, S., Neumann, T., & Emeis, S. (2020). *Offshore wind farm far field—Results of the project WIPAFF* (EGU2020-10087). EGU2020. Copernicus Meetings. https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-10087

Platteeuw, M., Bakker, J., van den Bosch, I., Erkman, A., Graafland, M., Lubbe, S., & Warnas, M. (2017). A Framework for Assessing Ecological and Cumulative Effects (FAECE) of Offshore Wind Farms on Birds, Bats and Marine Mammals in the Southern North Sea. In J. Köppel (Hrsg.), *Wind Energy and Wildlife Interactions* (S. 219–237). Springer International Publishing.

Polet, H., & Depestele, J. (2010). *Impact assessment of the effect of a selected range of fishing gears in the North Sea*. ILVO (Instituut voor Landbouw en Visserijonderzoek).

Pons, M., Watson, J. T., Ovando, D., Andraka, S., Brodie, S., Domingo, A., Fitchett, M., Forselledo, R., Hall, M., Hazen, E. L., Jannot, J. E., Herrera, M., Jiménez, S., Kaplan, D. M., Kerwath, S., Lopez, J., McVeigh, J., Pacheco, L., Rendon, L., … Hilborn, R. (2022). Trade-offs between bycatch and target catches in static versus dynamic fishery closures. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *119*(4), e2114508119. https://doi.org/10.1073/pnas.2114508119

Pophof, B., Henschenmacher, B., Kattnig, D. R., Kuhne, J., Vian, A., & Ziegelberger, G. (2023). Biological Effects of Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields from 0 to 100 MHz on Fauna and Flora: Workshop Report. *Health Physics*, *124*(1), 39–52. https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001624

Popper, A. N., & Hastings, M. C. (2009). The effects of anthropogenic sources of sound on fishes. *Journal of Fish Biology*, *75*(3), 455–489.

Popper, A. N., & Hawkins, A. D. (2018). The importance of particle motion to fishes and invertebrates. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *143*(1), 470–488. https://doi.org/10.1121/1.5021594

Popper, A. N., & Hawkins, A. D. (2019). An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes. *Journal of Fish Biology*, *94*, 692–713. https://doi.org/10.1111/jfb.13948

Popper, A. N., Haxel, J., Staines, G., Guan, S., Nedelec, S. L., Roberts, L., & Deng, Z. D. (2023). Marine energy converters: Potential acoustic effects on fishes and aquatic invertebrates. *J. Acoust. Soc. Am.*, *154*, 518–532. https://doi.org/10.1121/10.0020150

Popper, A. N., Smith, M. E., Cott, P. A., Hanna, B. W., MacGillivray, A. O., Austin, M. E., & Mann, D. A. (2005). Effects of exposure to seismic airgun use on hearing of three fish species. *Journal of Acoustical Society of America*, *117*(6), 3958–3971. https://doi.org/10.1121/1.1904386

Pörtner, H. O., & Peck, M. A. (2010). Climate change effects on fishes and fisheries: Towards a cause-and-effect understanding. *Journal of Fish Biology*, *77*(8), 1745–1779. https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2010.02783.x

Price, S., & Figueira, R. (2017). Corrosion Protection Systems and Fatigue Corrosion in Offshore Wind Structures: Current Status and Future Perspectives. *Coatings*, *7*(2), 25. https://doi.org/10.3390/coatings7020025

Pronińska, K., & Księżopolski, K. (2021). Baltic Offshore Wind Energy Development—Poland's Public Policy Tools Analysis and the Geostrategic Implications. *Energies*, *14*(16), Art. 16. https://doi.org/10.3390/en14164883

Purser, J., & Radford, A. N. (2011). Acoustic Noise Induces Attention Shifts and Reduces Foraging Performance in Three-Spined Sticklebacks (Gasterosteus aculeatus). *PLoS ONE*, *6*(2), e17478. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0017478

Putland, R. L., Constantine, R., & Radford, C. A. (2017). Exploring spatial and temporal trends in the soundscape of an ecologically significant embayment. *Scientific Reports*, *7*(5713).

Putland, R. L., Merchant, N. D., Farcas, A., & Radford, C. A. (2018). Vessel noise cuts down communication space for vocalizing fish and marine mammals. *Global Change Biology*, *24*(4), 1708–1721.

PVGIS user manual—European Commission. (2024). https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis/getting-started-pvgis/pvgis-user-manual_en

Ramasamy, V., & Margolis, R. (2021). *Floating Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2021 Installations on Artificial Water Bodies* (NREL/TP-7A40-80695, 1828287, MainId:77479; S. NREL/TP-7A40-80695, 1828287, MainId:77479). https://doi.org/10.2172/1828287

Raoux, A., Lassalle, G., Pezy, J.-P., Tecchio, S., Safi, G., Ernande, B., Mazé, C., Loc'h, F. L., Lequesne, J., Girardin, V., Dauvin, J.-C., & Niquil, N. (2019). Measuring sensitivity of two OSPAR indicators for a coastal food web model under offshore wind farm construction. *Ecological Indicators*, *96*(1), 728–738.

Rappuhn, T., & Struck, S. (2021, Dezember). Streitkräfte der Zukunft. *#GIDSstatement*. https://gids-hamburg.de/wp-content/uploads/2022/02/GIDSStatement_2021_12_Rappuhn_Struck_220225.pdf

Rebke, M., Dierschke, V., Weiner, C. N., Aumüller, R., Hill, K., & Hill, R. (2019). Attraction of nocturnally migrating birds to artificial light: The influence of colour, intensity and blinking mode under different cloud cover conditions. *Biological Conservation*, *233*, 220–227.

Reed, J. R., Sinccok, J. L., & Hailman, J. P. (1985). Light attraction in endangered procellariiform birds: Reduction by shielding upward radiation. *The Auk*, *102*, 377–383. https://doi.org/10.2307/4086782

Rees, J., Larcombe, P., Vivian, C., & Judd, A. (2006). *Scroby Sands Offshore Wind Farm – Coastal Processes Monitoring* [Final Report for the Department of Trade and Industry].

Reijnders, P. J. H., Aguilar, A., & Borrell, A. (2008). Pollution and Marine Mammals. In W. Perrin, B. Wursig, & J. Thewissen (Hrsg.), *Encyclopedia of Marine Mammals* (S. 890–898). Academic Press.

Rezaei, F., Contestabile, P., Vicinanza, D., & Azzellino, A. (2023). Towards understanding environmental and cumulative impacts of floating wind farms: Lessons learned from the fixed-bottom offshore wind farms. *Ocean & Coastal Management*, *243*, 106772. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106772

Rheinheimer, G. (Hrsg.). (1996). *Meereskunde der Ostsee* (2. Auflage). Springer.

Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen (FFH-RL), Pub. L. No. 92/43/EWG (1992).

Rijnsdorp, A. D., Hiddink, J. G., van Denderen, P. D., Hintzen, N. T., Eigaard, O. R., Valanko, S., Bastardie, F., Bolam, S. G., Boulcott, P., Egekvist, J., Garcia, C., van Hoey, G., Jonsson, P., Laffargue, P., Nielsen, J. R., Piet, G. J., Sköld, M., & van Kooten, T. (2020). Different bottom trawl fisheries have a differential impact on the status of the North Sea seafloor habitats. *ICES Journal of Marine Science*, *77*(5), 1772–1786. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa050

Rinaldi, G., Thies, P. R., & Johanning, L. (2021). Current Status and Future Trends in the Operation and Maintenance of Offshore Wind Turbines: A Review. *Energies*, *14*(9), 2484. https://doi.org/10.3390/en14092484

Roach, M., Cohen, M., Forster, R., Revill, A. S., & Johnson, M. (2018). The effects of temporary exclusion of activity due to wind farm construction on a lobster (*Homarus gammarus*) fishery suggests a potential management approach. *ICES Journal of Marine Science*, *75*(4), 1416–1426. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsy006

Roberts, L., Cheesman, S., Breithaupt, T., & Elliott, M. (2015). Sensitivity of the mussel *Mytilus edulis* to substrate-borne vibration in relation to anthropogenically generated noise. *Marine Ecology Progress Series*, *538*, 185–195. https://doi.org/10.3354/meps11468

Roberts, L., & Elliott, M. (2017). Good or bad vibrations? Impacts of anthropogenic vibration on the marine epibenthos. *Science of The Total Environment*, *595*, 255–268. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.117

Roberts, L., & Laidre, M. E. (2019). Finding a home in the noise: Cross-modal impact of anthropogenic vibration on animal search behaviour. *Biology Open*, *8*(bio041988).

Robinson, S. P., Wang, L., Cheong, S.-H., Lepper, P., Hartley, J. P., Thompson, P., Edwards, E., & Bellmann, M. (2022). Acoustic characterisation of unexploded ordnance disposal in the North Sea using high order detonations. *Marine Pollution Bulletin*, *184*, 114178. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114178

Robinson Willmott, J., Forcey, G. M., & Hooton, L. A. (2015). Developing an automated risk management tool to minimize bird and bat mortality at wind facilities. *Ambio*, *44*(S4), 557–571. https://doi.org/10.1007/s13280-015-0707-z

Rochman, C. M., Tahir, A., & Williams, S. L. (2015). *Anthropogenic debris in seafood: Plastic debris and fibers from textiles in fish and bivalves sold for human consumption*. *5*. https://doi.org/10.1038/srep14340

Röckmann, C., St. John, M. A., Schneider, U. A., & Tol, R. S. J. (2007). Testing the implications of a permanent or seasonal marine reserve on the population dynamics of Eastern Baltic cod under varying environmental conditions. *Fisheries Research*, *85*, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.fishres.2006.11.035

Roman, L., Hardesty, B. D., Hindell, M. A., & Wilcox, C. (2020). Disentangling the influence of taxa, behaviour and debris ingestion on seabird mortality. *Environmental Research Letters*, *15*(124071).

Ronconi, R. A., Allard, K. A., & Taylor, P. D. (2015). Bird interactions with offshore oil and gas platforms: Review of impacts and monitoring techniques. *Journal of Environmental Management*, *147*, 34–45.

Rosa-Clot, P. (2020). Chapter 9—FPV and Environmental Compatibility. In *Floating PV Plants* (S. 101–118). Elsevier.

Rose, A., Brandt, M. J., Vilela, R., Diederichs, A., Schubert, A., Kosarev, V., Nehls, G., Volkenandt, M., Wahl, V., Michalik, A., Wendeln, H., Freund, A., Ketzer, C., Limmer, B., Laczny, M., & Piper, W. (2019). *Effects of noise-mitigated offshore pile driving on harbour porpoise abundance in the German Bight 2014-2016 (Gescha 2)* (S. 193) [Final Report].

Rufener, M.-C., Nielsen, J. R., Kristensen, K., & Bastardie, F. (2023). Closing certain essential fish habitats to fishing could be a win-win for fish stocks and their fisheries – Insights from the western Baltic cod fishery. *Fisheries Research*, *268*, 106853.

RWE. (2023, März 10). *Studie: RWE und DNV prüfen die Auswirkungen von weitläufigen Abschattungseffekten auf große Offshore-Windpark-Cluster*. https://www.rwe.com/presse/rwe-offshore-wind-gmbh/2023-03-10-rwe-und-dnv-pruefen-auswirkungen-abschattungseffekte-auf-grosse-offshore-windpark-cluster/

Rybicki, S., Hamon, K. G., Simons, S., & Temming, A. (2021). The more the merrier? Testing spatial resolution to simulate area closure effects on the pelagic North Sea autumn spawning herring stock and fishery. *Regional Studies in Marine Science*, *48*(102023).

Säcker, F. J., & Steffens, J. (Hrsg.). (2022). *Berliner Kommentar zum Energierecht. EEG-Erneuerbare-Energien-Gesetz 2021 mit EEG-Rechtsverordnungen und WindSeeG-Windenergie-auf-See-Gesetz* (5., völlig neu bearbeitete und wesentlich erweiterte Auflage). Fachmedien Recht und Wirtschaft, dfv Mediengruppe.

Säcker, F.-J., Bruchmann, C., & Germany (Hrsg.). (2017). *Berliner Kommentar zum Energierecht* (4. Aufl.). Fachmedien Recht und Wirtschaft, dfv Mediengruppe.

Sala, E., & Giakoumi, S. (2018). No-take marine reserves are the most effective protected areas in the ocean. *ICES Journal of Marine Science*, *75*(3), 1166–1168.

Salomon/Schumacher. (2018). *Natura 2000-Gebiete in der deutschen AWZ - Wann wir aus Schutzgebieten Schutz?*

Sarnocińska, J., Teilmann, J., Balle, J. D., Van Beest, F. M., Delefosse, M., & Tougaard, J. (2020). Harbor Porpoise (*Phocoena phocoena*) reaction to a 3D seismic airgun survey in the North Sea. *Frontiers in Marine Science*, *6*(824).

Schneider, L., Heye, S., & Troost, T. (2023). *Impact of offshore floating solar on the marine environment* (S. 31). https://publications.deltares.nl/11208338_000_0008.pdf

Schoeman, R. P., Patterson-Abrolat, C., & Plön, S. (2020). A Global Review of Vessel Collisions With Marine Animals. *Frontiers in Marine Science*, *7*, 292.

Schultze, L. K. P., Merckelbach, L. M., Horstmann, J., Raasch, S., & Carpenter, J. R. (2020). Increased Mixing and Turbulence in the Wake of Offshore Wind Farm Foundations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *125*(e2019JC015858).

Schultz-Zehden, A., Coornaert, C., Ooms, E., Plug, D., Koch, A., & Strazdina, L. (2019). *BalticLINes Project Findings* (S. 17). INTERREG Baltic Sea Region Programme. https://vasab.org/wp-content/uploads/2019/06/BalticLINes_project_findings_2019.pdf

Schupp, M. F., & Buck, B. H. (2017). *Case study 1c: Multi-use of offshore windfarms with marine aquaculture and fisheries (German North Sea EEZ - North Sea). Muses Deliverable: D.3.3—Case study implementation—Annex 3* (Muses Project). Alfred-Wegener-Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research.

Schwemmer, P., Mendel, B., Sonntag, N., Dierschke, V., & Garthe, S. (2011). Effects of ship traffic on seabirds in offshore waters: Implications for marine conservation and spatial planning. *Ecological Applications*, *21*(5), 1851–1860. https://doi.org/10.1890/10-0615.1

Scott, K., Harsanyi, P., Easton, B., Piper, A., Rochas, C., & Lyndon, A. R. (2021). Exposure to Electromagnetic Fields (EMF) from Submarine Power Cables Can Trigger Strength-Dependent Behavioural and Physiological Responses in Edible Crab, Cancer pagurus (L.). *Marine Science and Engineering*, 16. https://doi.org/10.3390/jmse9070776

Searle, K. R., Regan, C. E., Perrow, M. P., Butler, A., Rindorf, A., Harris, M. P., Newell, M. A., Wanless, S., & Daunt, F. (2023). Effects of a fishery closure and prey abundance on seabird diet and breeding success: Implications for strategic fisheries management and seabird conservation. *Biological Conservation*, *281*, 109990. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.109990

Sellmann, E., & kleine Holthaus, J.-D. (2015). *Die Anforderungen an Betreiber von Offshore-Windparks zur Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs*. 45.

Senko, J. F., Peckham, S. H., Aguilar-Ramirez, D., & Wang, J. H. (2022). Net illumination reduces fisheries bycatch, maintains catch value, and increases operational efficiency. *Current Biology*, *32*(4), 911-918.e2. https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.12.050

Sergey, L., Hubbard, O., Ding, Z., Ghadaki, H., Wang, J., & Ponsford, T. (2008). Advanced mitigating techniques to remove the effects of wind turbines and wind farms on primary surveillance radars. *2008 IEEE Radar Conference*, 1–6. https://doi.org/10.1109/RADAR.2008.4721114

Shafiee, M., Zhou, Z., Mei, L., Dinmohammadi, F., Karama, J., & Flynn, D. (2021). Unmanned Aerial Drones for Inspection of Offshore Wind Turbines: A Mission-Critical Failure Analysis. *Robotics*, *10*(26).

Shimada, Y. (2021). Reducing bird collision risk per megawatt by introducing longer wind turbine blade. *253 Ornithol Sc*, *20*, 253–261.

Siddagangaiah, S., Fang Chen, C.-, Hu, W.-C., Akamatsu, T., & Pieretti, N. (2024). Assessing the influence of offshore wind turbine noise on seasonal fish chorusing. *ICES Journal of Marine Science*, *fsae061*.

Siebert, U., Gilles, A., Lucke, K., Ludwig, M., Benke, H., Kock, K.-H., & Scheidat, M. (2006). A decade of harbour porpoise occurrence in German waters—Analyses of aerial surveys, incidental sightings and strandings. *Journal of Sea Research*, *56*(1), 65–80. https://doi.org/10.1016/j.seares.2006.01.003

Siebert, U., Stürznickel, J., Schaffeld, T., Oheim, R., Rolvien, T., Penger-Berninghoff, E., & Wohlsein, P. (2022). *Blast injury on harbour porpoises (Phocoena phocoena) from the Baltic Sea after explosions of deposits of World War II ammunition*. *159*. https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.107014

Sill Torres, F., Kulev, N., Skobiej, B., Meyer, M., Eichhorn, O., & Schäfer-Frey, J. (2020). *Indicator-based Safety and Security Assessment of Offshore Wind Farms*. https://doi.org/10.1109/RWS50334.2020.9241287

Simons, S. L., Döring, R., & Temming, A. (2015). Combining area closures with catch regulations in fisheries with spatio-temporal variation: Bio-economic implications for the North Sea saithe fishery. *Marine Policy*, *51*, 281–292. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2014.08.017

Sivalingam, K., Spring, M., Sepulveda, M., & Davies, P. (2018). A Review and Methodology Development for Remaining Useful Life Prediction of Offshore Fixed and Floating Wind turbine Power Converter with Digital Twin Technology Perspective. *2nd International Conference on Freen Energy and Applications*, 197–204.

Sköld, M., Börjesson, P., Wennhage, H., Hjelm, J., Lövgren, J., & Ringdahl, K. (2022). A no-take zone and partially protected areas are not enough to save the Kattegat cod, but enhance biomass and abundance of the local fish assemblage. *ICES Journal of Marine Science*, *79*(8), 2231–2246.

Skopljak, N. (2024, Februar 13). Two out of six platforms hit the water for Dutch offshore solar pilot. *Offshore Energy*. https://www.offshore-energy.biz/two-out-of-six-platforms-hit-the-water-for-dutch-offshore-solar-pilot/

Smith, R., & Adonizio, M. A. (2011). *Roosevelt Island Tidal Energy (RITE) Environmental Assessment Project* (Final Report Report 11-04).

Smith, T., & Rigby, J. (2022). Underwater radiated noise from marine vessels: A review of noise reduction methods and technology. *Ocean Engineering*, *266*(112863).

SolarDuck. (2023a, Mai 8). *Offshore pilot "Merganser" to be tested at North Sea Farmers offshore test site – SolarDuck*. https://solarduck.tech/offshore-pilot-merganser-to-be-tested-at-north-sea-farmers-offshore-test-site/

SolarDuck. (2023b, Juni 22). *About – SolarDuck*. https://solarduck.tech/about/

SolarDuck. (2024). *SolarDuck, Green Arrow Capital and New Developments s.r.l. Sign collaboration agreement for a grid-scale offshore hybrid wind-solar project in Italy*. https://solarduck.tech/wp-content/uploads/2024/03/Press-release-ITALY_EN.pdf

Sonne, C., Lakemeyer, J., Desforges, J.-P., Eulaers, I., Persson, S., Stokholm, I., Galatius, A., Gross, S., Gonnsen, K., Lehnert, K., Andersen-Ranberg, E., Tange Olsen, M., Dietz, R., & Siebert, U. (2020). A review of pathogens in selected Baltic Sea indicator species. *Environment International*, *137*(105565).

Sonne, C., Siebert, U., Gonnsen, K., Desforges, J.-P., Eulaers, I., Persson, S., Roos, A., Bäcklin, B.-M., Kauhala, K., Tange Olsen, M., Harding, K. C., Treu, G., Galatius, A., Andersen-Ranberg, E., Gross, S., Lakemeyer, J., Lehnert, K., Lam, S. S., Peng, W., & Dietz, R. (2020). Health effects from contaminant exposure in Baltic Sea birds and marine mammals: A review. *Environment International*, *139*, 105725.

Southall, B. L., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Finneran, J. J., Gentry, R. L., Greene, C. R., Kastak, D., Ketten, D. R., Miller, J. H., Nachtigall, P. E., Richardson, W. J., Thomas, J., & Tyack, P. (2007). *Marine mammal noise exposure*

criteria: Initial scientific recommendations. *4*(33). https://csi.whoi.edu/content/marine-mammal-noise-exposure-criteria-initial-scientific-recommendations-0/index.html

Southall, B. L., Finneran, J. J., Reichmuth, C., Nachtigall, P. E., Ketten, D. R., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Nowacek, D. P., & Tyack, P. L. (2019). Marine mammal noise exposure criteria: Updated scientific recommendations for residual hearing effects. *Aquatic Mammals*, *45*(2), 125–232. https://doi.org/10.1578/AM.45.2.2019.125

Southall, B. L., Nowacek, D. P., Bowles, A. E., Senigaglia, V., Bejder, L., & Tyack, P. L. (2021). Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Assessing the Severity of Marine Mammal Behavioral Responses to Human Noise. *Aquatic Mammals*, *47*(5), 421–464. https://doi.org/10.1578/AM.47.5.2021.421

Spannowsky, W., Runkel, P., & Goppel, K. (2018). *Raumordnungsgesetz (ROG): Kommentar* (2. Auflage). C.H. Beck.

Spieth, W. F., & Lutz-Bachmann, S. (Hrsg.). (2018). *Offshore-Windenergierecht: EEG, WindSeeG, EnWG: Handkommentar* (1. Auflage). Nomos.

Stapela, F., & Welcker, J. (2021). *Umweltmonitoring im Cluster „Westlich Adlergrund". Fachgutachten Zugvögel. 7. Jahr der Clusteruntersuchung. März bis November 2020*.

Stapela, F., Welcker, J., & Castillo, R. (2021). *Umweltmonitoring für das Vorhaben OWP „Baltic Eagle". Fachgutachten >>Vogelzug<<. 5. Untersuchungsjahr der Basiserfassung (2. Jahr der aktualisierten Basisuntersuchung). März 2020 bis Februar 2021*.

Stoevesandt, Dr. B., & Schwegmann, Dr. S. (2022). *Offshore Flächenpotenziale: Analyse derEnergieerzeugungseffizienz in derdeutschen AWZ*. https://bwo-offshorewind.de/uberarbeitete-flachenpotenzialstudie-des-fraunhofer-iwes/

Stokholm, I., Baechlein, Persson, S., Roos, A., Galatius, A., Kyhn, L. A., Sveegaard, S., Thøstesen, C. B., Olsen, M. T., Becher, P., & Siebert, U. (2023). Screening for Influenza and Morbillivirus in Seals and Porpoises in the Baltic and North Sea. *Pathogens*, *12*(3), 357. https://doi.org/10.3390/pathogens12030357

Sveegaard, S., Andreasen, H., Mouritsen, KimN., Jeppesen, J., Teilmann, J., & Kinze, CarlC. (2012). Correlation between the seasonal distribution of harbour porpoises and their prey in the Sound, Baltic Sea. *Marine Biology*, *159*(5), 1029–1037. https://doi.org/10.1007/s00227-012-1883-z

Sveegaard, S., Galatius, A., Dietz, R., Kyhn, L., Koblitz, J. C., Amundin, M., Nabe-Nielsen, J., Sinding, M.-H. S., Andersen, L. W., & Teilmann, J. (2015). Defining management units for cetaceans by combining genetics, morphology, acoustics and satellite tracking. *Global Ecology and Conservation*, *3*, 839–850. https://www.researchgate.net/publication/275719131_Defining_management_units_for_cetaceans_by_combining_genetics_morphology_acoustics_and_satellite_tracking

Swistek, G. (2024). Der Schutz maritimernfrastrukturen aus militärisch-sicherheitspolitischer Perspektive: Nato und Bundeswehr. *SWP-Studie*, *S 03*, 61–70. https://doi.org/10.18449/2024s03

Syposz, M., Padget, O., Willis, J., Van Doren, B. M., Gillies, N., Fayet, A. L., Wood, M. J., Alejo, A., & Guilford, T. (2021). Avoidance of different durations, colours and intensities of artificial light by adult seabirds. *Scientific Reports*, *11*(18941).

Taminiau, F., & van der Zwaan, B. (2022). The Physical Potential for Dutch Offshore Wind Energy. *Journal of Energy and Power Technology*, *4*(4), Art. 4. https://doi.org/10.21926/jept.2204032

Tano, S. A., Halling, C., Lind, E., Buriyo, A., & Wikström, S. A. (2015). Extensive spread of farmed seaweeds causes a shift from native to non-native haplotypes in natural seaweed beds. *Marine Biology*, *162*(10), 1983–1992. https://doi.org/10.1007/s00227-015-2724-7

Taormina, B. (2019). *Potential impacts of submarine power cables from marine renewable energy projects on benthic communities* [Dissertation]. L'UNIVERSITE DE BRETAGNE OCCIDENTALE.

Taormina, B., Bald, J., Want, A., Thouzeau, G., Lejart, M., Desroy, N., & Carlier, A. (2018). A review of potential impacts of submarine power cables on the marine environment: Knowledge gaps, recommendations and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *96*, 380–391.

Taormina, B., Laurans, M., Marzloff, M. P., Dufouraud, N., Lejart, M., Desroy, N., Leroy, D., Martin, S., & Carlier, A. (2020). Renewable energy homes for marine life: Habitat potential of a tidal energy project for benthic megafauna. *Marine Environmental Research*, *161*, 105131. https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.105131

Tapoglou, E., Georgakaki, A., Letout, S., Kuokkanen, A., Mountraki, A., Ince, E., Shtjefni, D., Joanny Ordonez, G., Eulaerts, O., & Grabowska, M. (2022). *Clean Energy Technology Observatory: Ocean Energy in the European Union – 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets* (JRC130617). Publications Office of the European Union.

The Esbjerg Offshore Wind Declaration. (2022). *The Declaration of Energy Ministers on The North Sea as a Green Power Plant of Europe*.

Theobald, C., & Kühling, J. (Hrsg.). (2022). *Energierecht: Energiewirtschaftsgesetz mit Verordnungen, EU-Richtlinien, Gesetzesmaterialien, Gesetze und Verordnungen zu Energieeinsparung und Umweltschutz sowie andere energiewirtschaftlich relevante Rechtsregelungen: Kommentar* (118. Aufl.). C.H. Beck.

Thiel, H., Dänhardt, A., Winkler, H., Fricke, R., George, M., M, K., T, S., C, U., & R, V. (2013). Rote Liste und Gesamtartenliste der etablierten Fische und Neunaugen (Elasmobranchii, Actinopterygii & Petromyzontida) der marinen Gewässer Deutschlands. 5. Fassung, Stand August 2013. In N. Becker, H. Haupt, N. Hofbauer, G. Ludwig, & S. Nehring (Hrsg.), *Rote Liste gefährdeter Tiere, Pflanzen und Pilze Deutschlands, Band 2: Meeresorganismen.* (S. S. 11-76).

Thomsen, F., Lüdemann, K., Kafemann, R., & Piper, W. (2006). *Effects of offshore wind farm noise on marine mammals and fish* (S. 62). Biola.

Thomsen, K. (2014). *Offshore wind: A comprehensive guide to successful offshore wind farm installation* (2nd edition). Elsevier.

Thünen-Institut. (2023a). *Fischinventur in der Nordsee (IBTS)*. https://www.thuenen.de/de/fachinstitute/seefischerei/service/forschungsreisen/fischinventur-in-der-nordsee-ibts

Thünen-Institut. (2023b). *Mess- und Beobachtungssysteme*. https://www.thuenen.de/de/fachinstitute/seefischerei/arbeitsbereiche/mess-und-beobachtungssysteme

Thünen-Institut. (2023c). *Trawl-Surveys*. https://www.thuenen.de/de/fachinstitute/ostseefischerei/arbeitsbereiche/monitoring/trawl-surveys

Tiedke, M. (2023, November 17). *Deutscher Ex-General leitet NATO-Zelle zum Schutz von Unterwasserinfrastruktur*. https://www.bmvg.de/de/aktuelles/verbesserungen-schutz-kritischer-unterwasserinfrastruktur-5616738

Tougaard, J. (2015). Underwater Noise from a Wave Energy Converter Is Unlikely to Affect Marine Mammals. *PLOS ONE*, *10*(7), e0132391. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132391

Tougaard, J., Beedholm, K., & Madsen, P. T. (2022). Thresholds for noise induced hearing loss in harbor porpoises and phocid seals. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *151*(6), 4252–4263.

Tougaard, J., Damsgaard Henriksen, O., & Miller, L. A. (2009). Underwater noise from three types of offshore wind turbines: Estimation of impact zones for harbor porpoises and harbor seals. *Journal of Acoustical Society of America*, *125*(6), 3766–3773.

Tougaard, J., Hermannsen, L., & Madsen, P. T. (2020). How loud is the underwater noise from operating offshore wind turbines? *The Journal of the Acoustical Society of America*, *148*(5), 2885–2893.

Tsouvalas, A. (2020). Underwater noise emission due to offshore pile installation: A review. *Energies*, *13*(12), 3037.

Uhlfelder, E. (2013). Bloody Skies: The Fight to Reduce Deadly Bird-Plane Collisions. *National Geographic*.

UK Ministry of Defence. (2021). *Air defence and offshore wind—Working together towards Net Zero*. GOV.UK. https://www.gov.uk/government/publications/air-defence-and-offshore-wind-working-together-towards-net-zero/air-defence-and-offshore-wind-working-together-towards-net-zero

ULTFARMS. (2023). *About ULTFARMS*. ULTFARMS. https://ultfarms.eu/about/

UNCTAD, U. N. C. an T. and D. (2023). *Review of Maritime Transport 2023* (Review of Maritime Transport). https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2023_en.pdf

UNITED. (o. J.). *Blue mussels, seaweed and offshore wind energy in Germany*. Abgerufen 29. Juni 2023, von https://www.h2020united.eu/pilots/2-uncategorised/40-blue-mussels-seaweed-and-offshore-wind-energy-in-germany

Uścinowicz, S., Jegliński, W., Miotk-Szpiganowicz, G., Nowak, J., Pączek, U., Przezdziecki, P., Szefler, K., & Poręba, G. (2014). Impact of sand extraction from the bottom of the southern Baltic Sea on the relief and sediments of the seabed. *Oceanologia*, *56*(4), 857–880. https://doi.org/10.5697/oc.56-4.857

Vaghese, H. K., Miksis-Olds, J., DiMarzio, N., Lowell, K., Linder, E., Mayer, L., & Moretti, D. (2020). The effect of two 12 kHz multibeam mapping surveys on the foraging behavior of Cuvier's beaked whales off of southern California. *J Acoust Soc Am*, *147*(6), 3849. https://doi.org/10.1121/10.0001385

van Beest, F. M., Teilmann, J., Hermannsen, L., Galatius, A., Mikkelsen, L., Sveegaard, S., Balle, J. D., Dietz, R., & Nabe-Nielsen, J. (2018). Fine-scale movement responses of free-ranging harbour porpoises to capture, tagging and short-term noise pulses from a single airgun. *Royal Society Open Science*, *5*(1), 170110. https://doi.org/10.1098/rsos.170110

van Berkel, J., Burchard, H., Christensen, A., Mortensen, L., Petersen, O., & Thomsen, F. (2020). The Effects of Offshore Wind Farms on Hydrodynamics and Implications for Fishes. *Oceanography*, *33*(4), 108–117.

van Deurs, M., Moran, N. P., Schreiber Plet-Hansen, K., Dinesen, G. E., Azour, F., Carl, H., Møller, P. R., & Behrens, J. W. (2021). Impacts of the invasive round goby (*Neogobius melanostomus*) on benthic invertebrate fauna: A case study from the Baltic Sea. *NeoBiota*, *68*, 19–30. https://doi.org/10.3897/neobiota.68.67340

Vanhatalo, J., Vetemaa, M., Herrero, A., Aho, T., & Tiilikainen, R. (2014). By-Catch of Grey Seals (Halichoerus grypus) in Baltic Fisheries—A Bayesian Analysis of Interview Survey. *PLoS ONE*, *9*(11), e113836. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113836

Versteyl, A., & Marschhäuser, K. (2022). „Überragendes öffentliches Interesse" als Abwägungsbelang zur Beschleunigung von Klimaschutzvorhaben. *KlimR*, 74.

Vicen-Bueno, R., Horstmann, J., Terril, E., de Paolo, T., & Dannenberg, J. (2013). Real-Time Ocean Wind Vector Retrieval from Marine Radar Image Sequences Acquired at Grazing Angle. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, *30*(1), 127–139.

Vilela, R., Bachl, F., Szostek, L., Bellebaum, J., Burger, C., Freund, A., Beckers, B., Diederichs, A., Braasch, A., Piper, W., & Nehls, G. (2020). *Divers (Gavia spp.) in the German North Sea: Changes in Abundance and Effects of Offshore Wind Farms. A study into diver abundance and distribution based on aerial survey data in the German North Sea.* BioConsult SH.

Vilela, R., Burger, C., Diederichs, A., Bachl, F. E., Szostek, L., Freund, A., Braasch, A., Bellebaum, J., Beckers, B., Piper, W., & Nehls, G. (2021). Use of an INLA latent gaussian modeling approach to assess bird population changes due to the development of offshore wind farms. *Frontiers in Marine Science*, *8*(701332).

Voelsen, D. (2024). Maritime kritische Infrastrukturen: Strategische Bedeutung und geeignete Schutzmaßnahmen. *SWP-Studie*, *03*(2024), 89. https://doi.org/10.18449/2024S03

Vogel, S., & Nordheim, H. (1995). *Gefährdung von Meeressäugetieren durch Schiffsverkehr. 16*, 82–86.

Vollmer, L., & Dörenkämper, M. (2022). *Methodik der Leistungsermittlung—Folien zum Fachgespräch am 27.01.2022*.

Vollmer, L., & Dörenkämper, M. (2024). *Ad-Hoc Analyse: Ertragsmodellierung der Ausbauszenarien 16 bis 21*. https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Meeresfachplanung/Laufende_Fortschreibung_Flaechenentwicklungsplan/Anlagen/Downloads/Adhoc_Analyse_Ertragsmodellg.pdf?__blob=publicationFile&v=1

Voß, J., Rose, A., Korarev, V., Vilela, R., & Diederichs, A. (2023). Response of Harbour Porpoises to Pingers and Acoustic Harassment Devices. In *The Effects of Noise on Aquatic Life*.

Vuorinen, I., Hänninen, J., Rajasilta, M., Laine, P., Eklund, J., Montesino-Pouzols, F., Corona, F., Junker, K., Meier, H. E. M., & Dippner, J. W. (2015). Scenario simulations of future salinity and ecological consequences in the Baltic Sea and adjacent North Sea areas–implications for environmental monitoring. *Ecological Indicators*, *50*, 196–205. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.10.019

Waggitt, J. J., Evans, P. G., Andrade, J., Banks, A. N., Boisseau, O., Bolton, M., Bradbury, G., Brereton, T., Camphuysen, C. J., Durinck, J., & others. (2020). Distribution maps of cetacean and seabird populations in the North-East Atlantic. *Journal of Applied Ecology*, *57*(2), 253–269. https://doi.org/10.1111/1365-2664.13525

Wahlberg, M., & Westerberg, H. (2005). Hearing in fish and their reactions to sounds from offshore wind farms. *Marine Ecology Progress Series*, *288*, 295–309.

Walter, B. (2023). *Der Schutz der maritimen Kritischen Infrastruktur nach den Anschlägen auf die Nord-Stream-Pipelines*. 297.

Watson, S. C. L., Somerfield, P. J., Lemasson, A. J., Knights, A. M., Edwards-Jones, A., Nunes, J., Pascoe, C., McNeill, C. L., Schratzberger, M., Thompson, M. S. A., Couce, E., Szostek, C. L., Baxter, H., & Beaumont, N. J. (2024). The global impact of offshore wind farms on ecosystem services. *Ocean & Coastal Management*, *249*, 107023. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2024.107023

WEDUSEA. (o. J.). *Tony Lewis receives Ocean Energy Europe's Vi Maris award*. WEDUSEA. Abgerufen 23. April 2024, von https://wedusea.eu/press-releases/tony-lewis-receives-ocean-energy-europes-vi-maris-award/

WEDUSEA. (2022, November). *Communication and dissemination plan*. WEDUSEA. https://wedusea.eu/publications/

Wehkamp, M., Welcker, J., & Simmering, J. (2022). *BeBeO „Bedarfsgerechte Befeuerung von Offshore Windenergieanlagen"* [Abschlussbericht].

Weinert, M., Mathis, M., Kröncke, I., Pohlmann, T., & Reiss, H. (2021). Climate change effects on marine protected areas: Projected decline of benthic species in the North Sea. *Marine Environmental Research*, *163*(105230).

Welcker, J. (2019). *Patterns of nocturnal bird migration in the German North and Baltic Seas. ProBIRD report 2* (S. 70). BioConsult SH.

Welcker, J., & Vilela, R. (2019). *Weather-dependence of nocturnal bird migration and cumulative collision risk at offshore wind farms in the German North and Baltic Seas.* (S. 70) [Technical report]. BioConsult SH.

Werner, B. (2019, Februar 14). Navy Awards Boeing $43 Million to Build Four Orca XLUUVs. *USNI News*. https://news.usni.org/2019/02/13/41119

Wilke, F., Kloske, K., & Bellmann, M. (2012). *ESRa – Evaluation von Systemen zur Rammschallminderung an einem Offshore-Testpfahl ESRa – Evaluation von Systemen zur Rammschallminderung an einem Offshore-Testpfahl* (Technischer Abschlussbericht Förderkennzeichen 0325307).

Wilken, H., Kuhlmann, T., & Meyer, Th. (2019). *Fachgutachten Benthos zum Offshore-Windparkprojekt „Baltic Eagle"—Herbst 2018*.

Williams, I. (2017, Januar 3). *The Russia—NATO A2AD Environment*. Missile Threat. https://missilethreat.csis.org/russia-nato-a2ad-environment/

Willsteed, E. A., Jude, S., Gill, A. B., & Birchenough, S. N. R. (2018). Obligations and aspirations: A critical evaluation of offshore wind farm cumulative impact assessments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *82*, 2332–2345.

Wilson, B., Batty, R., Daunt, F., & Carter, C. (2007). *Collision risks between marine renewable energy devices and mammals, fish and diving birds: Report to the Scottish executive* (Report to the Scottish Executive PA37 1QA.). Scottish Association for Marine Science.

Wirth, D. H. (2024). *Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland, Fassung vom 16.01.2024*. Fraunhofer ISE. https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf

Wiser, R., Rand, J., Seel, J., Beiter, P., Baker, E., Lantz, E., & Gilman, P. (2021). Expert elicitation survey predicts 37% to 49% declines in wind energy costs by 2050. *Nature Energy*, *6*(5), 555–565. https://doi.org/10/gjv5k9

Wisniewska, D. M., Johnson, M., Beedholm, K., Wahlberg, M., & Madsen, P. T. (2012). Acoustic gaze adjustments during active target selection in echolocating porpoises. *The Journal of Experimental Biology*, *215*, 4358–4373.

Wisniewska, D. M., Johnson, M., Teilmann, J., Rojano-Doñate, L., Shearer, J., Sveegaard, S., Miller, L. A., Siebert, U., & Madsen, P. T. (2016). Ultra-high foraging rates of harbor porpoises make them vulnerable to anthropogenic disturbance. *Current Biology*, *26*(11), 1441–1446. https://doi.org/10.1016/j.cub.2016.03.069

Wisniewska, D. M., Johnson, M., Teilmann, J., Siebert, U., Galatius, A., Dietz, R., & Madsen, P. T. (2018). High rates of vessel noise disrupt foraging in wild harbour porpoises (*Phocoena phocoena*). *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *285*(1872), 20172314.

Withers, P. J. A., Neal, C., Jarvie, H. P., & Doody, D. G. (2014). *Agriculture and Eutrophication: Where Do We Go from Here?* https://doi.org/10.3390/su6095853

Wochner, M. S. (2019). *AdBm Noise Mitigation System 2018 Demonstration Results*. AdBm Corp.

Wolf, R. (2010). Eingriffsregelung in der AWZ. *ZUR*, *7–8*, 365–371.

Wolters, D. (2012). *Anlage 1 zu Teil 2. Effekte und Auswirkungen der Kabelverlegung. Abschnitt Seetrasse. Arbeitshilfe Eingriffsregelung*.

Wolters, D., & Volkenandt, M. (2020). *Raumordnungsverfahren Seetrassen 2030* (S. 54) [Erläuterungsbericht]. TenneT Offshore GmbH, Amprion Offshore GmbH.

WSV, W. S. des B. (2022, August 19). *ELWIS - Offshore Windparks*. https://www.elwis.de/DE/Seeschifffahrt/Offshore-Windparks/Offshore-Windparks-node.html

Yazdi, E. A. (2018). Nonlinear model predictive control of a vortex-induced vibrations bladeless wind turbine. *Smart Materials and Structures*, *27*(075005), 075005.

Zeitoun, M. M., & Mehana, E.-S. E. (2014). Impact of Water Pollution with Heavy Metals on Fish Health: Overview and Updates. *Global Veterinaria*, *12*(2), 219–231.

Žydelis, R., Bellebaum, J., Österblom, H., Vetemaa, M., Schirmeister, B., Stipniece, A., Dagys, M., van Eerden, M., & Garthe, S. (2009). Bycatch in gillnet fisheries – An overlooked threat to waterbird populations. *Biological Conservation*, *142*(7), 1269–1281. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.02.025

Žydelis, R., Small, C., & French, G. (2013). The incidental catch of seabirds in gillnet fisheries: A global review. *Biological Conservation*, *162*, 76–88. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.04.002

A Anhang

A.1 Übersicht Definitionen

Begriff	Definition
Mehrfachnutzung	Im Rahmen dieses Projekts ist unter einer Mehrfachnutzung die Nutzung eines räumlichen Gebiets durch zwei oder mehr Funktionen oder Nutzungen zu verstehen. Wenn in diesem Dokument also von einer Mehrfachnutzung die Rede ist, so ist damit die Nutzung eines Gebiets durch die Windenergie und durch mindestens eine andere Nutzung oder Funktion gemeint.
Kritische Infrastrukturen nach dem BSIG	Kritische Infrastrukturen i.S.d Gesetzes sind Einrichtungen, Anlagen oder Teile davon, die u.a. den Sektoren Energie angehören und von hoher Bedeutung für das Funktionieren des Gemeinwesens sind, weil durch ihren Ausfall oder ihre Beeinträchtigung erhebliche Versorgungsengpässe oder Gefährdungen für die öffentliche Sicherheit eintreten würden, § 2 Abs. 10 BSIG.
Anlage gem. § 2 Nr. 2 sowie Kritische Anlage gem. 2 Nr. 3 i.V.m. § 2 Nr. 4 KRITIS-DachG-E	Eine Anlage ist eine Betriebsstätte, sonstige ortsfeste Installation, Maschine, Gerät und sonstige ortsveränderliche technische Installation. Eine kritische Anlage ist eine Anlage, die eine kritische Dienstleistung erbringt. Eine kritische Dienstleistung ist eine Dienstleistung, die eine hohe Bedeutung für das Funktionieren des Gemeinwesens hat, da durch ihren Ausfall oder ihre Beeinträchtigung langfristige Versorgungsengpässe oder Gefährdungen für wirtschaftliche Tätigkeiten, die öffentliche Sicherheit oder Ordnung, die öffentliche Gesundheit, wichtige gesellschaftliche Funktionen oder die Erhaltung der Umwelt eintreten.
Verantwortliche Personen	Die verantwortlichen Personen im Sinne des § 78 Abs. 1 WindSeeG sind insbesondere der Adressat des Planfeststellungsbeschlusses oder der Plangenehmigung, der Betreiber der Anlage und die zur Leitung oder Beaufsichtigung des Betriebs bestellten Personen.
Testfelder	Bereiche in der AWZ und im Küstenmeer, in denen im räumlichen Zusammenhang Pilotwindenergieanlagen auf See, Windenergieanlagen auf See oder sonstige Energiegewinnungsanlagen, die an das Netz angeschlossen werden und bei denen Innovationen erprobt werden sollen, errichtet werden sollen und die gemeinsam über eine Testfeld-Anbindungsleitung angebunden werden sollen.
Pilotwindenergieanlagen auf See	Die jeweils ersten drei Windenergieanlagen auf See eines Typs, mit denen nachweislich eine wesentliche, weit über den Stand der Technik hinausgehende Innovation erprobt wird; die Innovation kann insbesondere die Generatorleistung, den Rotordurchmesser, die Nabenhöhe, den Turmtypen oder die Gründungsstruktur betreffen.
Einrichtung i.S.d. WindSeeG	Eine Einrichtung nach § 44 a.F. WindSeeG liegt im Bereich der ausschließlichen Wirtschaftszone vor, wenn es sich um die Errichtung, den Betrieb und die Änderung von Windenergieanlagen auf See, sonstigen Energiegewinnungsanlagen sowie Offshore-Anbindungsleitungen, Anlagen zur Übertragung von Strom aus Windenergieanlagen auf See und Anlagen zur Übertragung von anderen Energieträgern aus Windenergieanlagen auf See handelt. Außerdem sind auch sonstige Energiegewinnungsanlagen

Begriff	Definition
	jeweils einschließlich der zur Errichtung und zum Betrieb der Anlagen erforderlichen technischen und baulichen Nebeneinrichtungen von dem Einrichtungsbegriff des WindSeeG erfasst, § 65 Abs. 1 Nr. 1 WindSeeG n.F.
sonstige Energiegewinnungsanlage	Anlagen zur Erzeugung von Strom auf See aus anderen erneuerbaren Energien als Wind, insbesondere aus Wasserkraft einschließlich der Wellen-, Gezeiten-, Salzgradienten- und Strömungsenergie, oder zur Erzeugung anderer Energieträger, insbesondere Gas, oder anderer Energieformen, insbesondere thermischer Energie, § 3 Nr. 7 WindSeeG.
Anlage nach dem SeeAnlG	Der Anlagenbegriff des SeeAnlG umfasst alle festen oder nicht nur zu einem kurzfristigen Zweck schwimmend befestigten baulichen oder technischen Einrichtungen, einschließlich Bauwerke und künstlicher Inseln, sowie die jeweils für die Errichtung und den Betrieb erforderlichen Nebeneinrichtungen, die der Erzeugung und Übertragung von Energie aus Wasser oder Strömung sowie anderen wirtschaftlichen Zwecken dienen, solange sie keine Einrichtungen nach dem WindSeeG sind.
sonstige Energiegewinnungsbereiche	Bereiche außerhalb von Gebieten, auf denen Windenergieanlagen auf See und sonstige Energiegewinnungsanlagen, die jeweils nicht an das Netz angeschlossen werden, in räumlichem Zusammenhang errichtet werden können, § 3 Nr. 8 WindSeeG.
Overplanting	Ein Overplanting liegt vor, wenn die tatsächlich installierte Leistung von der zugewiesenen Netzanbindungskapazität abweicht.

A.2 Interviewleitfaden für die vertiefte Analyse von Mehrfachnutzungsoptionen – Landes- und Bündnisverteidigung

3. Halten Sie eine kombinierte Nutzung von AWZ-Flächen in der Nordsee und / oder Ostsee von Offshore-Windenergie und Verteidigung prinzipiell für möglich?
   a. Sehen Sie die Notwendigkeit, nach Nordsee und Ostsee zu differenzieren, weil die Bedrohungslage sich unterscheidet und die Räume unterschiedlich intensiv genutzt werden (Ostsee als „densely populated area“)?
4. Welche Mehrfachnutzungen von Flächen sind Ihnen in der AWZ konkret bekannt? Von welchen konkreten Herausforderungen haben Sie Kenntnis?
5. Was sind die abstrakten Erfolgsfaktoren für eine Mehrfachnutzung?
6. Was sind die abstrakten Hemmnisse einer Mehrfachnutzung?
7. Seit 2022 liegt eine maritime Raumplanung vor. Wie bewerten Sie aus der Perspektive der Bundeswehr (Marine) das Potential, jenseits der aktuellen Planung weitere Flächen für die (gemeinsame) Nutzung von Offshore-Windenergie auszuweisen.
   a. Oder konkreter: Was ist an Kombinationen von Nutzungsszenarien in den einzelnen, von der Bundeswehr genutzten Flächen der Nordsee/Ostsee, möglich?
8. Mit wem sollte Ihrer Meinung nach im Rahmen dieses Projektes noch über dieses Thema gesprochen werden?
9. Sind Ihnen Mehrfachnutzungsoptionen aus anderen Ländern bekannt?
10. Mehrfachnutzung und Beübung zum Schutz kritischer Infrastruktur als Zukunftsaufgabe?
    a. Sind Ihnen Rechtsprobleme im Zusammenhang mit der Mehrfachnutzung bekannt?
    b. Wie sieht die durchschnittliche/typische Nutzung in der Nordsee/Ostsee aus: Maximal und Minimal?

A.3 Interviewleitfaden für die vertiefte Analyse von Mehrfachnutzungsoptionen – Fischereiforschung

Allgemeiner Teil:

1. Wie schätzen Sie die zukünftige Relevanz von Mehrfachnutzungen mit der Offshore-Windenergie ein? (Sollten Windenergieprojekte mit anderen Nutzungsformen zusammenarbeiten?)
2. Was sind aus Ihrer Sicht die wichtigsten Chancen/Vorteile für Mehrfachnutzungskonzepte von Windenergie und anderen Mehrfachnutzungsoptionen? (verschiedene Aspekte: technisch, rechtlich, organisatorisch)
3. Was sind aus Ihrer Sicht die wichtigsten Hemmnisse/Nachteile für Mehrfachnutzungskonzepte von Windenergie und anderen Mehrfachnutzungsoptionen? (verschiedene Aspekte: technisch, rechtlich, organisatorisch)
4. Hinsichtlich welcher Aspekte/Bedingungen sehen Sie aktuell Änderungsbedarf? Welche Lösungsmöglichkeiten sehen Sie?
5. Welche Länder/Region schätzen Sie als aktuell besonders attraktiv für die Mehrfachnutzung mit Offshore-Windenergie ein?

Fokus auf (Fischerei-)Forschung:

6. Vorstellung des Projekts/Unternehmens
7. Wo wird die Forschung durchgeführt?
8. Wie und wo genau werden die Versuche durchgeführt (Sedimententnahme, Schleppnetze, etc.)?
9. Was ist der Hintergrund für die Versuche (welche internationalen Verpflichtungen)?
10. Ist eine Mehrfachnutzung mit Offshore-Windenergie grundsätzlich möglich? Wird eine Mehrfachnutzung mit Offshore-Windenergie bereits durchgeführt?
    a. Falls JA: Welche Versuchsart unter welchen Bedingungen (Anlagenabstände, Überdeckung parkinterne Verkabelung, etc.?) Inwiefern werden die Forschungsergebnisse durch die Installation von Offshore-Windenergieanlagen beeinflusst?
    b. Falls NEIN: Welche (technischen) Lösungsmöglichkeiten werden benötigt, um eine Mehrfachnutzung zu ermöglichen?
11. Liegen Erfahrungswerte aus anderen Ländern vor?

A.4 Interviewleitfaden für die vertiefte Analyse von Mehrfachnutzungsoptionen – Hybride Energieerzeugung

Allgemeiner Teil:

1. Wie schätzen Sie die zukünftige Relevanz von Mehrfachnutzungen mit der Offshore-Windenergie ein? (Sollten Windenergieprojekte mit anderen Nutzungsformen zusammenarbeiten?)
2. Was sind aus Ihrer Sicht die wichtigsten Chancen/Vorteile für Mehrfachnutzungskonzepte von Windenergie und anderen Mehrfachnutzungsoptionen? (verschiedene Aspekte: technisch, rechtlich, organisatorisch)
3. Was sind aus Ihrer Sicht die wichtigsten Hemmnisse/Nachteile für Mehrfachnutzungskonzepte von Windenergie und anderen Mehrfachnutzungsoptionen? (verschiedene Aspekte: technisch, rechtlich, organisatorisch)
4. Hinsichtlich welcher Aspekte/Bedingungen sehen Sie aktuell Änderungsbedarf? Welche Lösungsmöglichkeiten sehen Sie?
5. Welche Länder/Region schätzen Sie als aktuell besonders attraktiv für die Mehrfachnutzung mit Offshore-Windenergie ein?

Fokus auf Hybride Energieerzeugung:

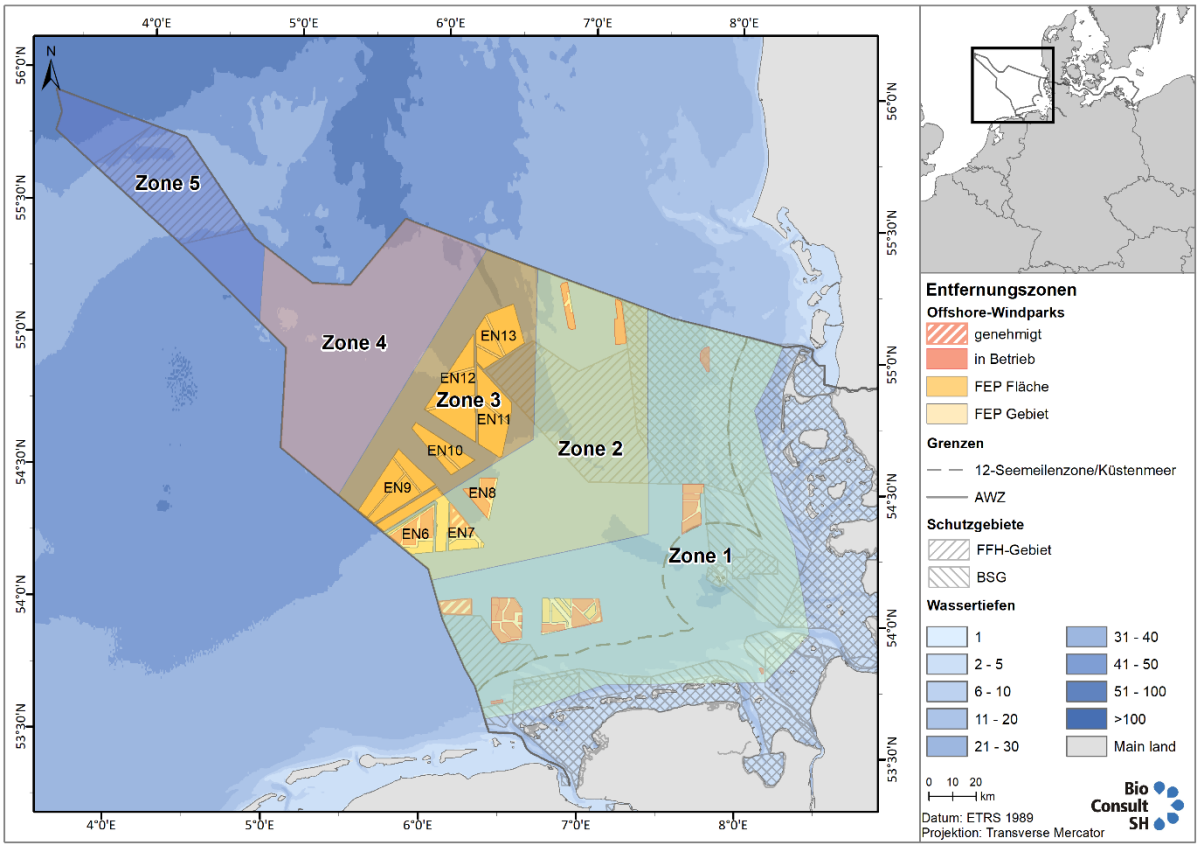
6. Vorstellung des Projekts/Unternehmens
7. Haben Sie bereits Erfahrungen mit Mehrfachnutzungskonzepten mit Offshore-Windenergie?
   a. Falls JA: Können Sie das Projekt/die Projekte kurz vorstellen?
   b. Falls NEIN: Wäre ein Projekt grundsätzlich denkbar und welche Voraussetzungen wären notwendig?
8. Wie ist der Entwicklungsstand und Marktreife einzuschätzen?
9. Wie ist die weitere Entwicklung zeitlich einzuschätzen?
10. Wie lässt sich die Technologie konkret mit Offshore Windenergie vereinen?
11. Wie würde der optimale Windpark mit der Mehrfachnutzung aussehen? Welche Anforderungen bestünden an die Windenergie?

A.5 Analyse Meeresumwelt: Beschreibung der Referenzfläche

A.5.1 Referenzfläche in der Nordsee

Um die Auswirkungen der Mehrfachnutzung aus OWE sowie Landes- und Bündnisverteidigung auf die deutsche Meeresumwelt zu beschreiben, wird eine Fläche der deutschen AWZ mittig in der Nordsee als Referenzfläche angenommen, welches in etwa Zone 2 und Zone 3 mit den Flächen EN6 bis EN13 entspricht (Abbildung 45). Um die Auswirkungen der Mehrfachnutzung aus OWE sowie hybride Energieerzeugung mittels Photovoltaik auf die deutsche Meeresumwelt zu beschreiben, wird Zone 3 der deutschen AWZ in der Nordsee als Referenzfläche angenommen, welches unter anderem den Flächen EN9 bis EN13 entspricht (Abbildung 45). Durch die Nähe zu den Flächen EN6 bis EN8 gelten für die Referenzfläche der hybriden Energieerzeugung ähnliche Eigenschaften wie bei der Referenzfläche der Landes- und Bündnisverteidigung.

Abbildung 45: Die deutsche AWZ in der Nordsee mit ihren fünf Zonen, sowie OWE (geplant, in Betrieb)



Quelle: eigene Darstellung, BioConsult SH GmbH & Co. KG

Bezüglich **Biotopen am Meeresboden** kommen nach aktueller Kenntnislage keine gesetzlich geschützten Biotope und FFH-LRTs auf der Referenzfläche vor, sodass die Gebiete EN6 bis EN13 eine geringe Bedeutung für das Schutzgut Biotoptypen haben (BSH, 2021a). In Teilbereichen mit grabender Bodenmegafauna hat das Gebiet eine durchschnittliche bis überdurchschnittliche Bedeutung für das Benthos (BSH, 2021a).

Bezüglich **Fischfauna** werden die Seltenheit und Gefährdung der Fischfauna in den betrachteten Gebieten als durchschnittlich bis überdurchschnittlich bewertet (BSH, 2021a). Für die steten,

häufigen Charakterarten konnte keine besondere Bedeutung eines speziellen Gebietes gezeigt werden; jedoch ist die Tendenz erkennbar, dass die küstennäheren Gebiete mehr Arten beherbergen (IBTS-Daten 2017 & 2018). Schollen (*Pleuronectes platessa*) schlüpfen beispielsweise in der zentralen Nordsee, wandern in ihre Aufwuchsgebiete an die Küste und durchqueren dabei alle genannten Gebiete, die somit als Transitgebiete bedeutsam sein können (Bolle et al., 2009). Für einzelne vom Aussterben bedrohte oder stark gefährdete Arten stuft das BSH die Bedeutung der Gebiete wegen ihrer Seltenheit als unterdurchschnittlich ein, wobei die Gebiete EN6 bis EN8 durch die geringfügig höheren Anteile vom Aussterben bedrohter, stark gefährdeter, gefährdeter und in unbekanntem Ausmaß gefährdeter Arten eine höhere Bedeutung haben könnten (BSH, 2021a). Gefährdete Arten (Sternrochen *Amblyraja radiata* und Zwergdorsch *Trisopterus minutus*) kommen in allen Gebieten relativ häufiger vor als in der Roten Liste, sodass die Gebiete für diese Arten eine überdurchschnittliche Bedeutung haben (BSH, 2021a).

Schweinswale nutzen die Gebiete ganzjährig mit den höchsten Dichten im Frühling und Sommer (bis zu über 10 Individuen pro km^2 auf einzelnen Flächen in Zone 2 und bis zu 6 Individuen pro km^2 auf einzelnen Flächen in Zone 3) als im Herbst und Winter (Rose et al., 2019). Eine Besonderheit des Gebietes als Jungenaufzuchtgebiet konnte bisher nicht gezeigt werden. Aufgrund der nur wenigen Sichtungen von Mutter-Kalb-Paaren kann den Gebieten keine besondere Funktion als Aufzuchtgebiet zugewiesen werden (BSH, 2021a). Auch wenn die Referenzfläche laut Umweltbericht zum FEP keine erhöhte Bedeutung für den Schweinswal hat (BSH, 2021a), ist die Individuendichte in dem Gebiet vergleichsweise hoch, sodass der Schweinswal ebenfalls in einer Gesamtbetrachtung berücksichtigt werden muss (Geelhoed et al., 2023). Laut der International Union for Conservation of Nature (IUCN) Marine Mammal Protected Areas Task Force, welche sogenannte „Important Marine Mammal Areas" (IMMAs) identifiziert, hat die Referenzfläche ebenfalls in Teilen eine hohe Bedeutung für Schweinswale: Die Zonen 2 und 3 der Referenzfläche liegen teils im Eastern North Sea and Southern Slopes of the Norwegian Trench Complex IMMA (diese IMMA stellt wichtige Lebensräume durch nahrungsreiche Fronten und Auftrieb dar, sodass ganzjährig hohen Schweinswal-Dichten beobachtet werden können).

Obwohl **Robben** zur Nahrungssuche weite Distanzen von ihren Liege- und Wurfplätzen zurücklegen (Peschko, Müller, et al., 2020) und dementsprechend regelmäßig in den Gebieten nachgewiesen werden können, haben die Gebiete laut Umweltbericht zum FEP wegen der Entfernung zu den nächsten Liege- und Wurfplätzen keine besondere Bedeutung für Robben (BSH, 2021a; Herr, Scheidat, et al., 2009). Laut der IUCN Marine Mammal Protected Areas Task Force hat ebenfalls nur ein kleines Teilgebiet der Referenzfläche eine hohe Bedeutung für Seehunde: Die Zone 2 der Referenzfläche liegt in geringen Teilen im Wadden Sea IMMA (diese IMMA umfasst ein sehr großes Gezeitengebiet, in dem eine der beiden größten Seehundpopulationen im Nordostatlantik mit etwa 30-40.000 Individuen lebt).

Bezüglich **See- und Rastvögel** weisen die Gebiete ein mittleres bis saisonbedingt kurzzeitig hohes Vorkommen auf (Borkenhagen et al., 2020, 2021; Waggitt et al., 2020). Wegen des Artenspektrums und der Abundanzverhältnisse (Trottellumme, Dreizehenmöwe, Tordalk und Heringsmöwe als häufigste Arten) werden diese Gebiete als typischer Lebensraum der fischfressenden Hochseevogelgemeinschaft eingestuft, wobei Möwen insgesamt vor allem auf der Jagd nach Fischereiabfällen beobachtet werden (BSH, 2021a). Sturmmöwen hingegen kommen unabhängig von Fischereiaktivitäten im Herbst und Winter in kleiner Anzahl vor (BSH, 2021a). Eissturmvögel und Basstölpel werden ganzjährig in diesen Gebieten beobachtet, weisen aber starke intra- und interannuelle Schwankungen auf (BSH, 2021a). Arten des Anhangs I der V-RL treten in den Gebieten nur vereinzelt während der Zugzeiten und im Winter auf, wobei Zwergmöwen, Seeschwalben und Seetaucher in den Gebieten EN6 bis EN13 keine Tendenz zu einem speziellen Gebiet zeigen, sondern alle genannten Gebiete als Durchzugsgebiete sowie kurzzeitig auf

Nahrungssuche nutzen (BSH, 2021a). Seetaucher zeigen im Allgemeinen jedoch eine sehr heterogene Verteilung in der AWZ der Nordsee, und in Zone 2 liegt eines ihrer Hauptkonzentrationsgebiete (Vilela et al., 2021), sodass einzelne Flächen in Zone 2 eine überdurchschnittliche Bedeutung für Seetaucher haben können. Für tauchende Meeresenten haben die Gebiete laut BSH wegen der Wassertiefe keine Bedeutung als Rast- und Nahrungshabitate, und für Brutvögel haben die Gebiete wegen der Entfernung zur Küste keine Bedeutung (BSH, 2021a). Zudem liegen kleine Bereiche von Zone 2 der Referenzfläche im SPA Östliche Deutsche Bucht (EU-Vogelschutzgebiet 1011-401), welches als international bedeutendes Rast-, Nahrungs- u. Überwinterungsgebiet für Seevögel gilt.

Bezüglich **Zugvögel** haben in der deutschen AWZ der Nordsee vor allem Möwen, Seeschwalben, Basstölpel und Singvögel die höchsten Dominanzwerte und/oder Stetigkeiten (Borkenhagen et al., 2020, 2021; Waggitt et al., 2020). Insgesamt ähneln sich die Zugintensitäten der einzelnen Gebiete EN1 bis EN13 hinsichtlich der Monatsmittel, jedoch können zwischen den einzelnen Gebieten Unterschiede bei den Maximalwerten sowie in der interannuellen Variabilität beobachtet werden (BSH, 2021a). In den Gebieten EN6 bis EN13 wurde eine höhere interannuellen Variabilität der Zugraten verglichen mit den anderen Gebieten festgestellt (BSH, 2021a). Auch der nächtliche, von Singvögeln dominierte Vogelzug zeigt eine große interannuelle Variabilität, allerdings mit einem Gradienten von abnehmender Zugintensität mit größerer Entfernung zur Küste (Welcker, 2019). Obwohl Leitlinien und Konzentrationsbereiche fehlen, haben die Gebiete EN1 bis EN13 insgesamt gesehen eine durchschnittliche bis überdurchschnittliche Bedeutung für den Vogelzug (BSH, 2021a).

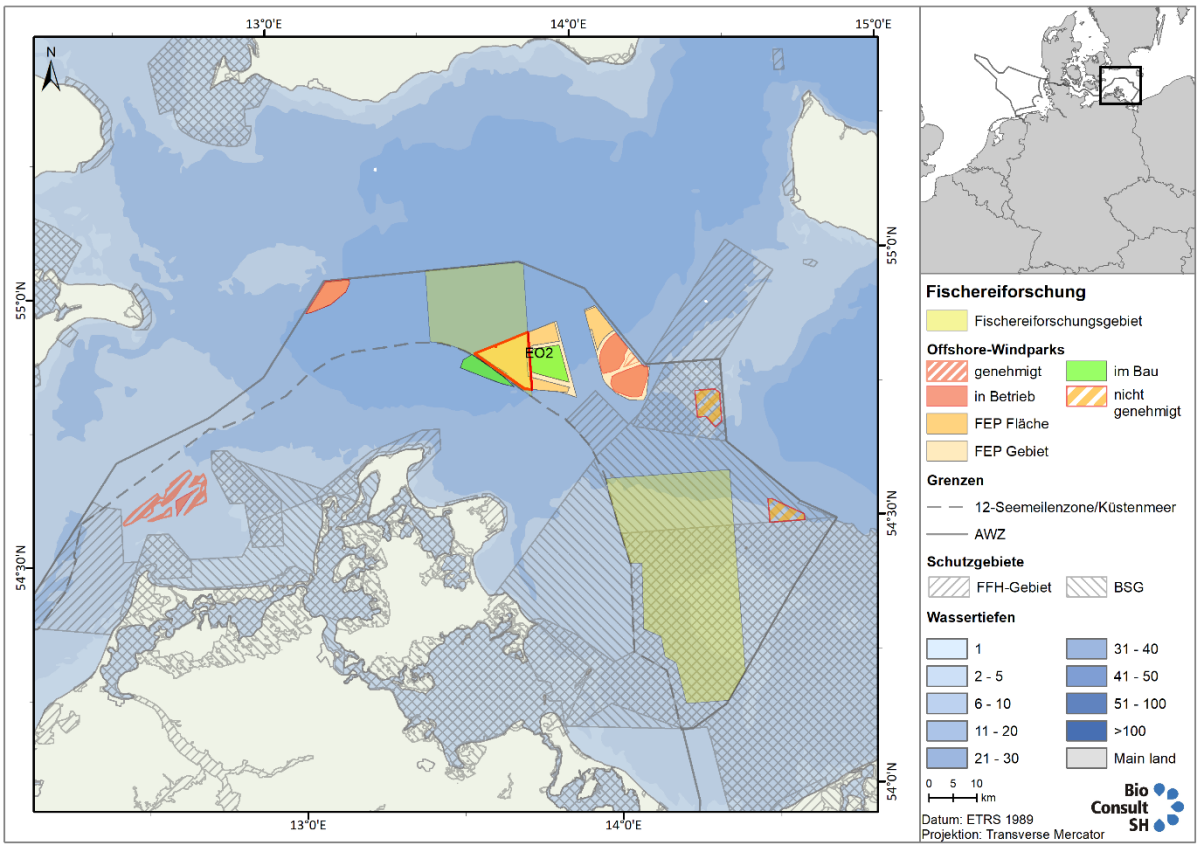
Zudem liegen Bereiche von Zone 2 und 3 der Referenzfläche im NSG Sylter Außenriff mit Sandbänken, Riffen, artenreichen Kies-, Grobsand- und Schillgründen, sowie Schweinswal, Seehund, Kegelrobbe, Flussneunauge, Finte, Seetaucher und Trauerente als besonders relevanten marinen Lebensräume bzw. Arten.

Zusammenfassend hat die Referenzfläche laut Umweltbericht zum FEP (BSH, 2021a) eine erhöhte Bedeutung für die **grabende Bodenmegafauna, gefährdete Fischarten** (Sternrochen *Amblyraja radiata* und Zwergdorsch *Trisopterus minutus*), **Seetaucher** auf einzelnen Flächen in Zone 2, sowie **Zugvögel**. Zudem sollte der **Schweinswal** ebenfalls berücksichtigt werden, da die Individuendichte in dem Gebiet vergleichsweise hoch ist (Geelhoed et al., 2023).

A.5.2 Referenzfläche in der Ostsee

Um die Auswirkungen der Mehrfachnutzung aus OWE und Fischereiforschung auf die deutsche Meeresumwelt zu beschreiben, wird die Überschneidung aus OWE und Fischereiforschung laut FEP (rot umrandet in Abbildung 46) als Referenzfläche angenommen, welche sich innerhalb der Fläche EO2 befindet.

Abbildung 46: Die deutsche AWZ in der Ostsee mit den Gebieten für Fischereiforschung, sowie OWE (geplant, genehmigt, im Bau, in Betrieb und im FEP)



Quelle: eigene Herstellung, BioConsult SH GmbH & Co. KG

Bezüglich **Biotopen am Meeresboden** kommt auf der gesamten Referenzfläche der Biotoptyp „Sublitoraler Schlickgrund der Ostsee“ vor, für den derzeit keine Gefährdung erkennbar ist (Finck et al., 2017; Marx et al., 2024). Der Strukturreichtum dieses Biotops ist insgesamt gering: Im gesamten Gebiet ist die in weiten Teilen der Ostsee verbreitete Baltische Plattmuschel *Macoma balthica*-Gemeinschaft ausgebildet, wobei die Baltische Plattmuschel, der Kiemenringelwurm *Scoloplos armiger* und der Cumaceen-Krebs *Diastylis rathkei* die höchsten Gesamtindividuenzahlen haben (BSH, 2021b). Diese und die meisten anderen in dem Gebiet vorkommende Benthosarten regenerieren sich nach Störungen schnell (Rheinheimer, 1996). Gefährdete Arten waren hingegen eher auf Einzelfunde beschränkt (BSH, 2023d). Insgesamt entspricht die Referenzfläche hinsichtlich der Umweltfaktoren und den anthropogenen Einflüssen dementsprechend den charakteristischen Gegebenheiten des Arkonabeckens (Wilken et al., 2019) und besitzt somit eine geringe Bedeutung sowohl für die Infauna als auch für die Epifauna (BSH, 2021b).

Bezüglich **Fischfauna** hat die Referenzfläche für die steten, häufigen Charakterarten keine besondere Bedeutung (UVS-Daten ab 2014 und Daten von 2017/2018 aus der DATRAS-Datenbank des ICES). Marine Arten nutzen die Fläche als Transitgebiet auf den regelmäßigen Wanderungen zwischen den Laichgründen und Aufwuchsgebieten nahe der Küste und den tieferen Bereichen. Für die Ostsee typische und prägende Süßwasserarten fehlen auf der Fläche überwiegend, da diese sich an der Küste und nahe der Ästuare konzentrieren (Thiel et al., 2013), sodass die Referenzfläche für diese Arten von geringer Bedeutung ist. Stark gefährdete Fischarten wie Aal (*Anguilla anguilla*), Schellfisch (*Melanogrammus aeglefinus*) und Seestichling (*Spinachia spinachia*) haben auf der Fläche jedoch einen höheren Anteil verglichen mit anderen Gebieten, sodass die

Referenzfläche für diese Arten von höherer Bedeutung zu sein scheint. Insgesamt wird die Fischfauna auf der Referenzfläche hinsichtlich des Kriteriums Seltenheit und Gefährdung jedoch als durchschnittlich bewertet (BSH, 2021b).

Bezüglich der **Schweinswale** wird angenommen, dass zumindest im Winter auf der Referenzfläche sowohl Schweinswale aus der Beltsee-Population als auch aus der Baltic Proper-Population vorkommen können, während im Sommer ausschließlich Tiere der Beltsee das Gebiet besiedeln (Amundin et al., 2022; Sveegaard et al., 2015). Zur Beltsee-Population gehören etwa 14.000 Individuen (Gilles et al., 2023) und zur Baltic Proper-Population etwa 500 Individuen (Amundin et al., 2022). Die Tiere nutzen das Gebiet ganzjährig und Amundin et al. (2022) haben eine Detektionsrate von etwa 0.05 bis 1 Klick-positive Sekunden pro 1000 Sekunden „survey effort" ermittelt. Die Dichte der Schweinswale in der Ostsee nimmt von Westen nach Osten ab (Siebert et al., 2006), sodass die Detektionsrate gering im Vergleich zum Vorkommen westlich der Darßer Schwelle und insbesondere um die Insel Fehmarn, in der Kieler Bucht, der Beltsee und dem Kattegat ist, aber höher im Vergleich zum Vorkommen östlich der Referenzfläche in polnischen, schwedischen, litauischen, lettischen, estländischen, finnischen und russischen Gewässern ist (Amundin et al., 2022). Schweinswale nutzen die Referenzfläche zum Durchqueren, zum Aufhalten, als Nahrungsgrund und es können auch im Sommer vereinzelte Mutter-Kalbpaare gesichtet werden (BSH, 2021b). Das Gebiet hat laut Umweltbericht zum FEP eine mittlere bis saisonal hohe Bedeutung für den Schweinswal (BSH, 2021b). Laut der IUCN Marine Mammal Protected Areas Task Force, welche sogenannte „Important Marine Mammal Areas" (IMMAs) identifiziert, hat die Referenzfläche hingegen eine hohe Bedeutung für Schweinswale: Die Referenzfläche liegt teils im Western Baltic IMMA (diese IMMA umfasst den größten Teil des Verbreitungsgebiets der genetisch unterschiedlichen Beltsee-Population und enthält wichtige Gebiete zur Nahrungssuvhe und Fortpflanzung) sowie im Baltic Proper IMMA (diese IMMA umfasst das Hauptverbreitungsgebiet der genetisch und morphometrisch unterschiedlichen Baltic Proper-Population).

Für **Robben** hat die Fläche laut Umweltbericht zum FEP eine geringe bis höchstens mittlere Bedeutung (BSH, 2023d). Laut der IUCN Marine Mammal Protected Areas Task Force hat die Referenzfläche hingegen eine hohe Bedeutung für Seehunde: Die Referenzfläche liegt teils im Western Baltic IMMA (diese IMMA umfasst einen wichtigen Lebensraum für drei Managementunits des Atlantischen Seehunds: Limfjord mit etwa 1.000 Individuen, Kattegat und der nördliche Teil der Beltsee mit etwa 10.000 Individuen und die südwestliche Ostsee mit etwa 1.000 Individuen) und im Baltic Proper IMMA (diese IMMA umfasst das gesamte Verbreitungsgebiet der geografisch isolierten und genetisch unterschiedlichen Kalmarsund-Population mit etwa 2.000 Seehunden).

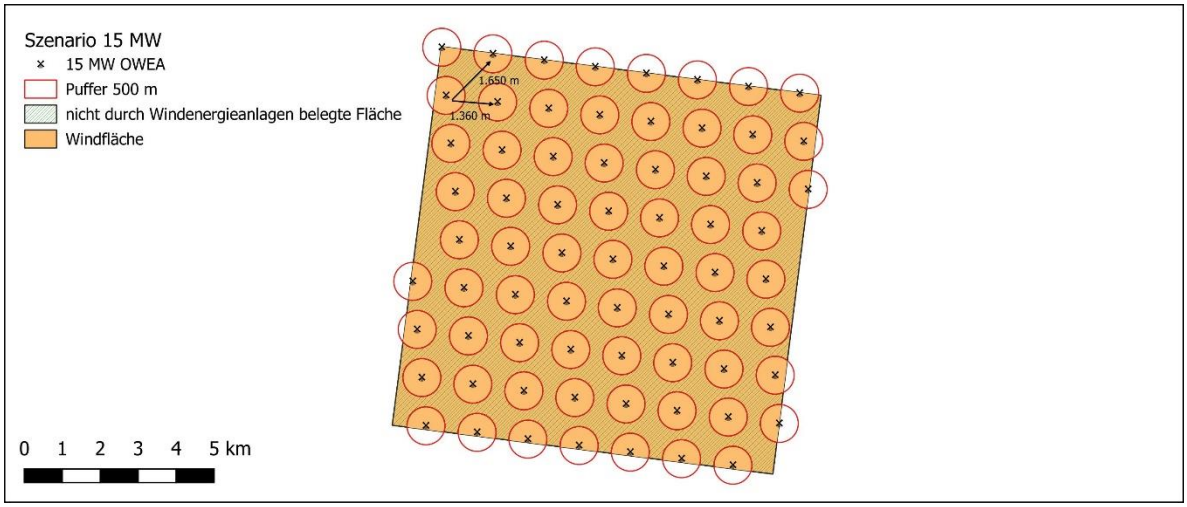
Bezüglich **See- und Rastvögel** kommen häufig Meeresenten (v. a. Eisente, Samtente, Trauerente), Möwen (v. a. Silbermöwe, Sturmmöwe), Alkenvögel (v. a. Trottellumme, Tordalk), Kormorane und Seetaucher (v. a. Sterntaucher, Prachttaucher) vor (Laczny, Beckers, et al., 2021; Laczny, Liedtke, et al., 2021). Das Vorkommen von gefährdeten und besonders schützenswerten Arten ist gering (BSH, 2021b). Dementsprechend hat das Gebiet nach bisherigem Wissenstand eher eine geringe Bedeutung für See- und Rastvögel (BSH, 2021b).

Bezüglich **Zugvögeln** kommen häufig Gänse (v. a. Weißwangengans, Blässgans, Saatgans), Kormorane, Meeresenten (v. a. Pfeifente, Eiderente), Singvögel (z. B. Wiesenpieper, Feldlerche, Rauchschwalbe) und Kraniche vor (Stapela et al., 2021; Stapela & Welcker, 2021). Für ziehende Wasservögel und nachtziehende Landvögel hat das Gebiet eine durchschnittliche bis überdurchschnittliche Bedeutung (BSH, 2021b). Für tagziehende Landvögel wie Tauben und Singvögel hat die Referenzfläche eine geringe bis durchschnittliche Bedeutung, für Greifvögel hat sie eine geringe Bedeutung (BSH, 2021b).

Zusammenfassend hat die Referenzfläche laut Umweltbericht zum FEP (BSH, 2021b) daher eine erhöhte Bedeutung für **Schweinswale** und einige **Zugvogelarten** (ziehende Wasservögel und nachtziehende Landvögel).

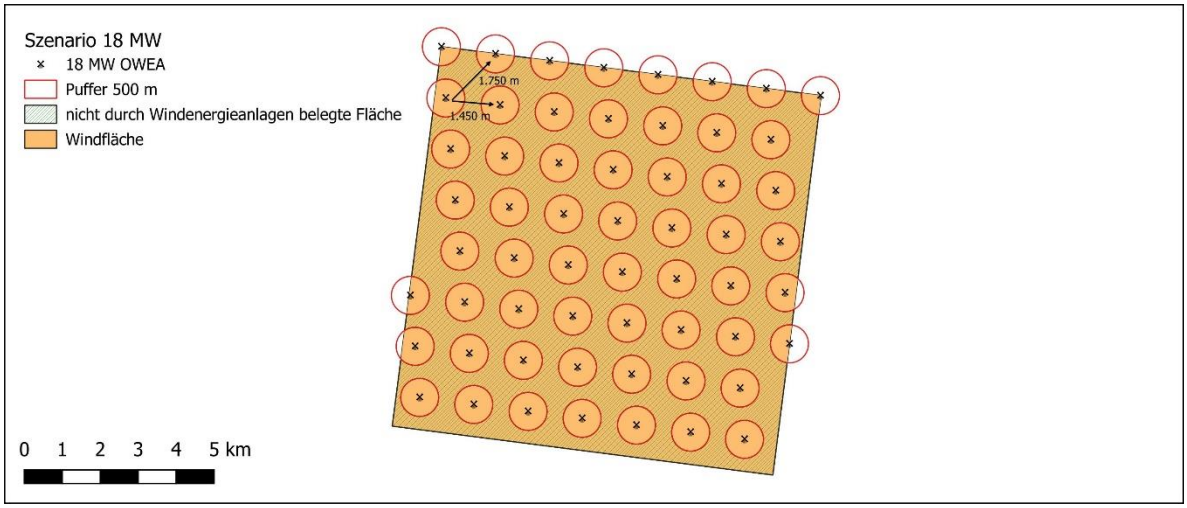
A.6 Beispielwindparklayout

Abbildung 47: Fläche zur hybriden Energieerzeugung auf einer generischen Windparkfläche (100km²) mit OWEA 15 MW



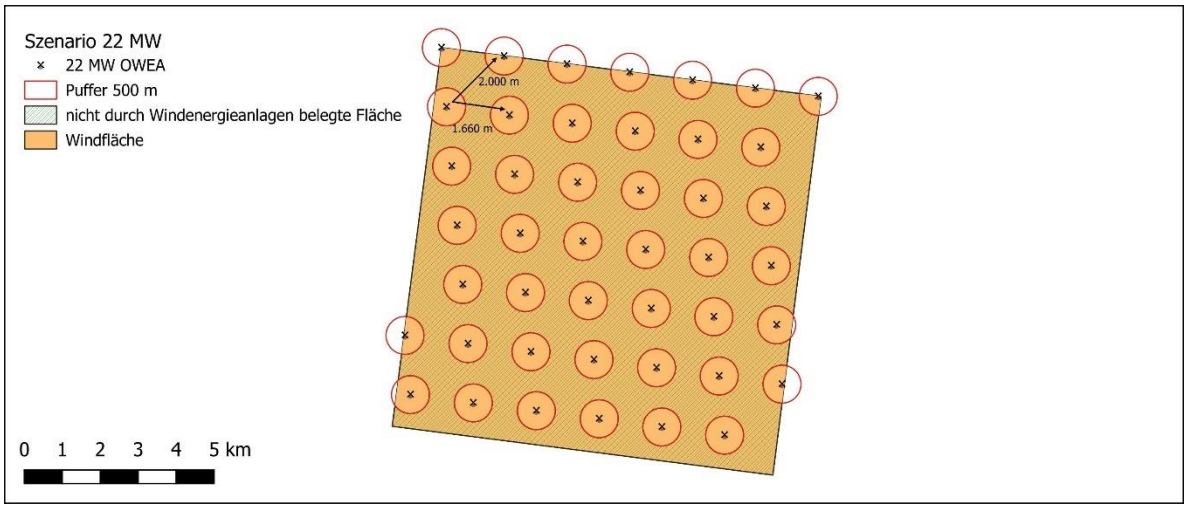
Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Abbildung 48: Fläche zur hybriden Energieerzeugung auf einer generischen Windparkfläche (100km²) mit OWEA 18 MW



Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

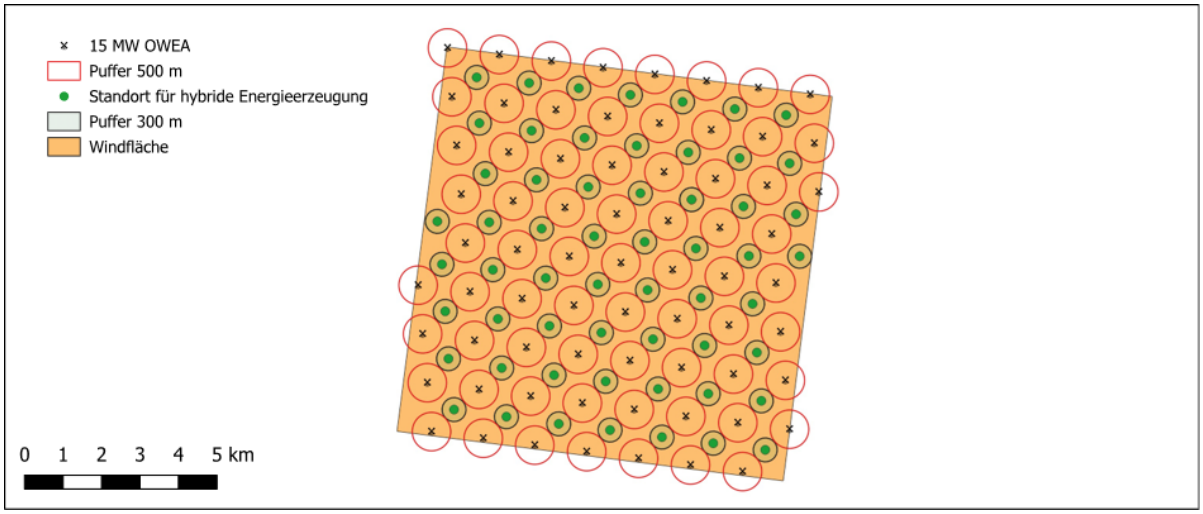
Abbildung 49: Fläche zur hybriden Energieerzeugung auf einer generischen Windparkfläche (100km²) mit OWEA 22 MW



Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

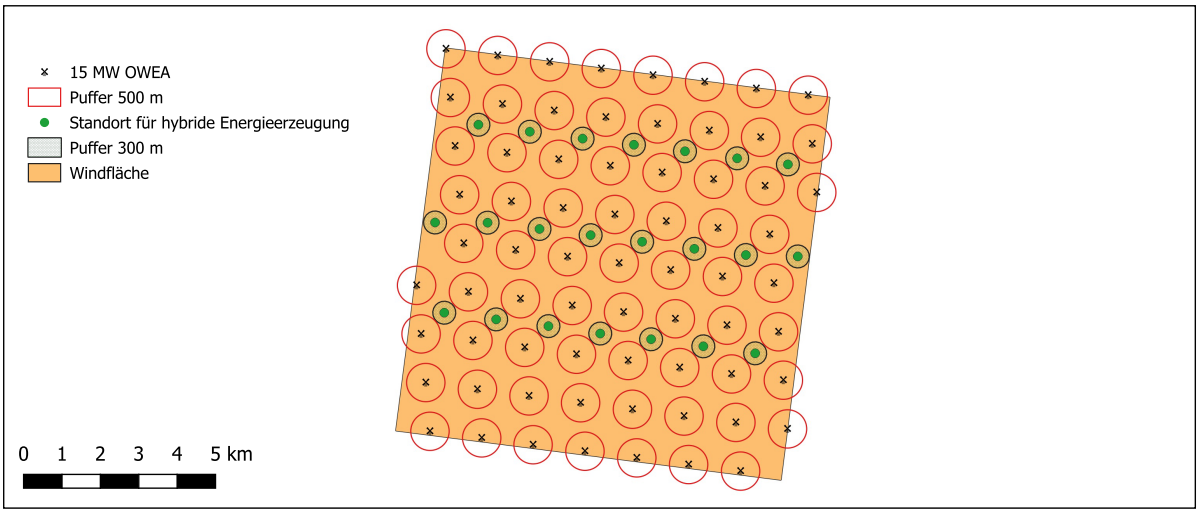
A.7 Standorte für EE-Anlagen in einem Beispielwindparklayout

Abbildung 50: Verteilung von Standorten für hybride Energieerzeugung in einem generischen Windpark mit 15 MW OWEA und maximaler Flächennutzung



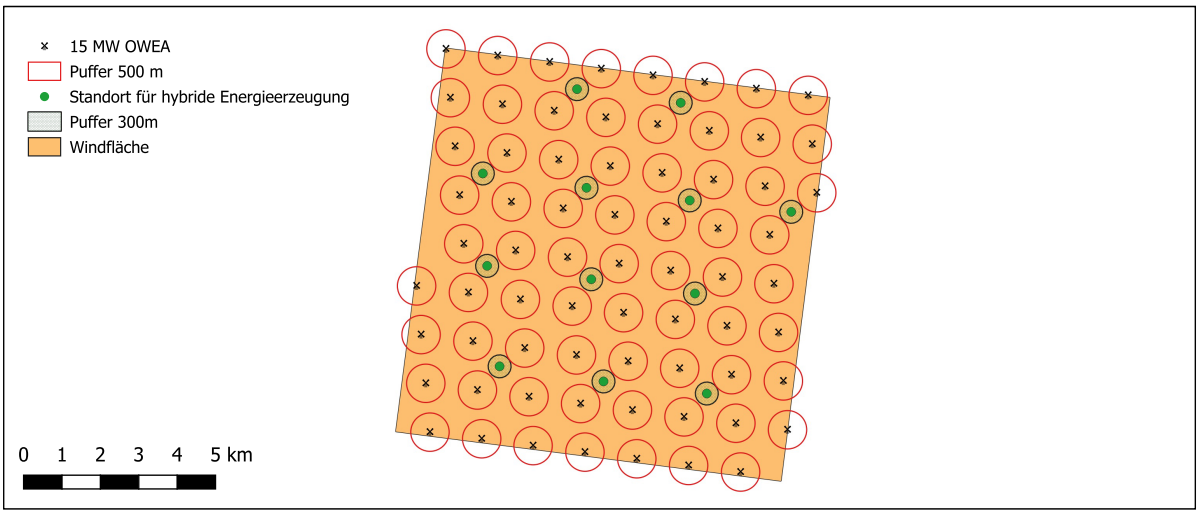
Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Abbildung 51: Verteilung von Standorten für hybride Energieerzeugung in einem generischen Windpark mit 15 MW OWEA und mittlerer Flächennutzung



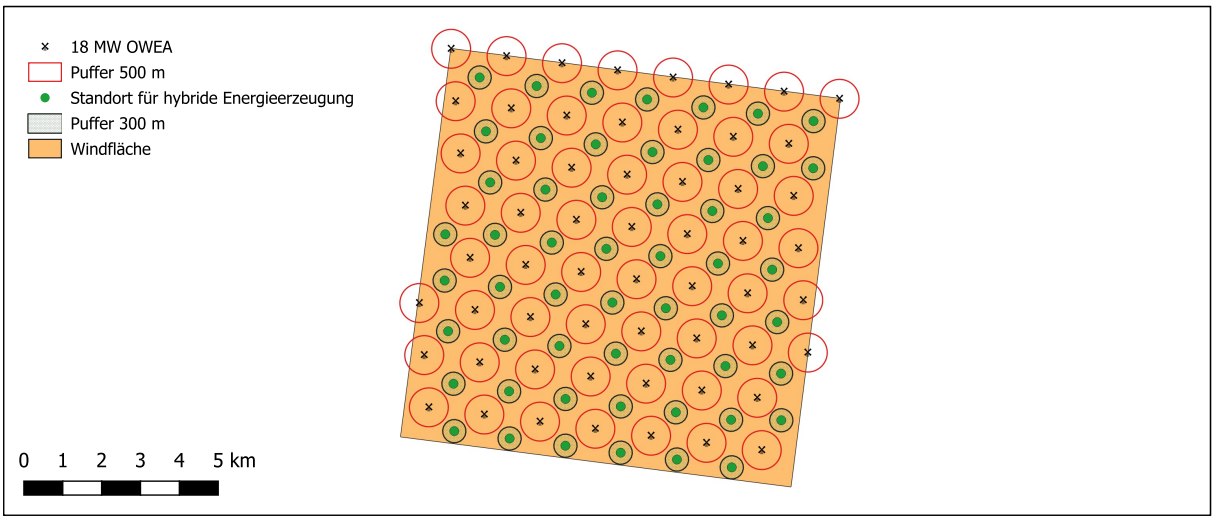
Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Abbildung 52: Verteilung von Standorten für hybride Energieerzeugung in einem generischen Windpark mit 15 MW OWEA und minimaler Flächennutzung



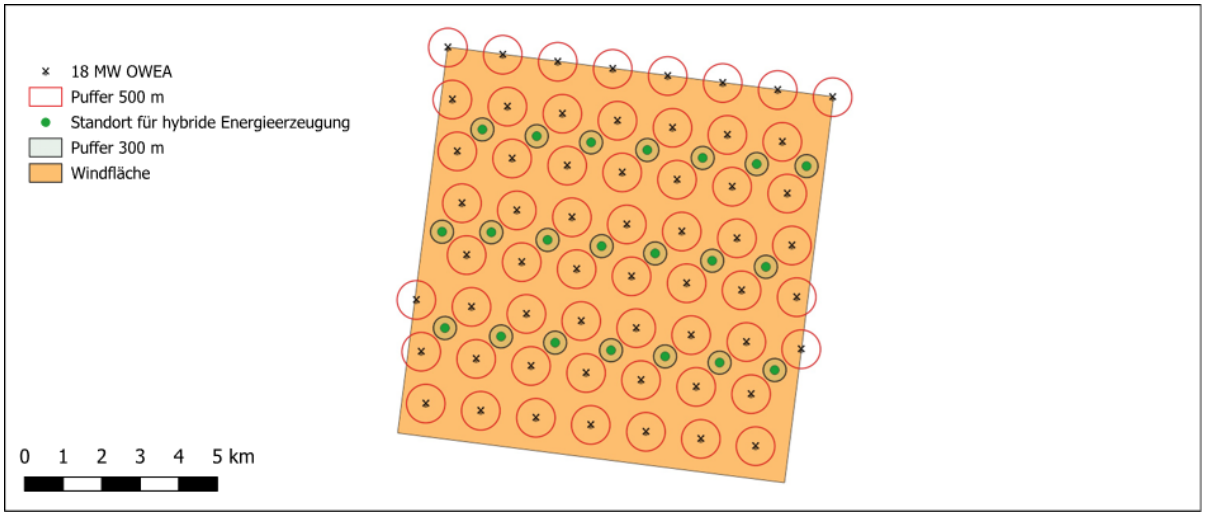
Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Abbildung 53: Verteilung von Standorten für hybride Energieerzeugung in einem generischen Windpark mit 18 MW OWEA und maximaler Flächennutzung



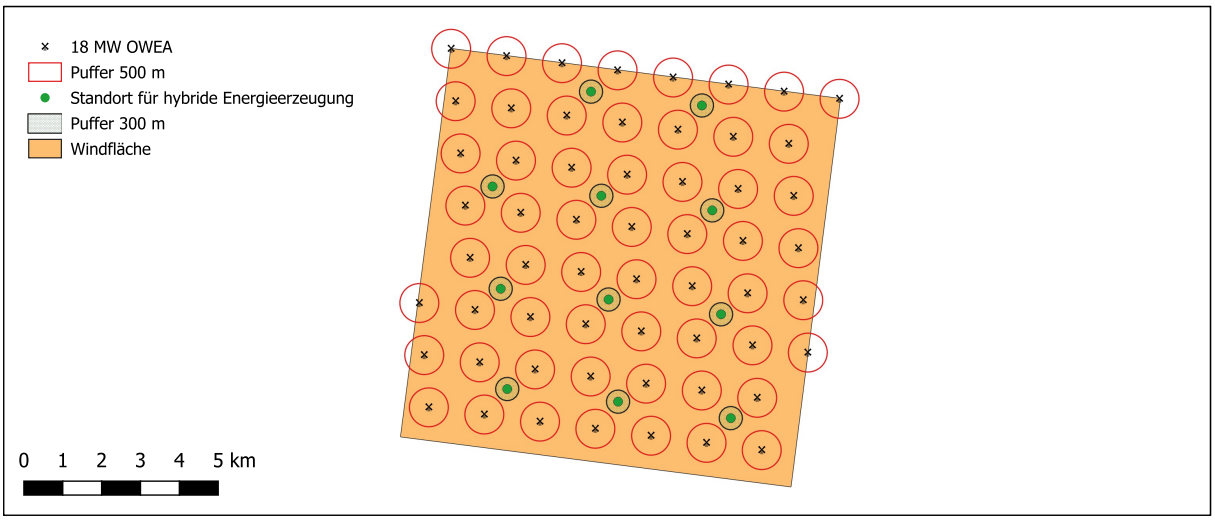
Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Abbildung 54: Verteilung von Standorten für hybride Energieerzeugung in einem generischen Windpark mit 18 MW OWEA und mittlerer Flächennutzung



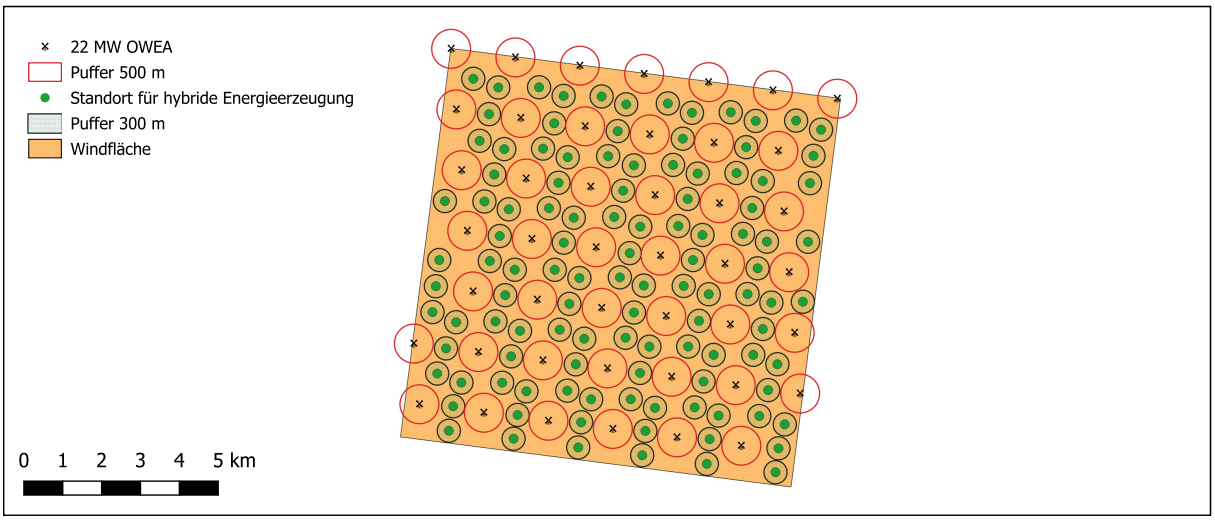
Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Abbildung 55: Verteilung von Standorten für hybride Energieerzeugung in einem generischen Windpark mit 18 MW OWEA und minimaler Flächennutzung



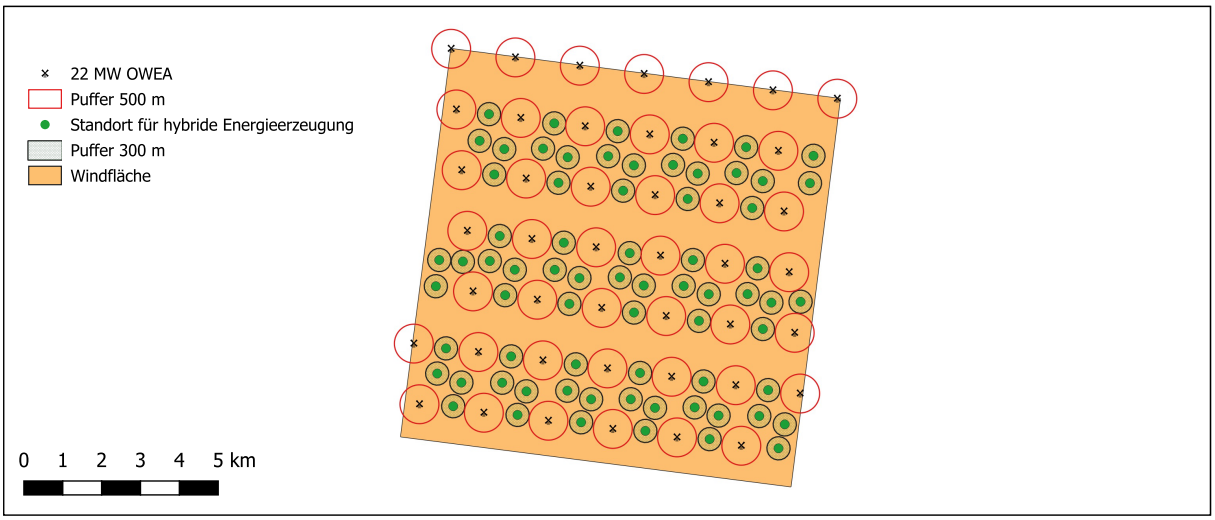
Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Abbildung 56: Verteilung von Standorten für hybride Energieerzeugung in einem generischen Windpark mit 22 MW OWEA und maximaler Flächennutzung



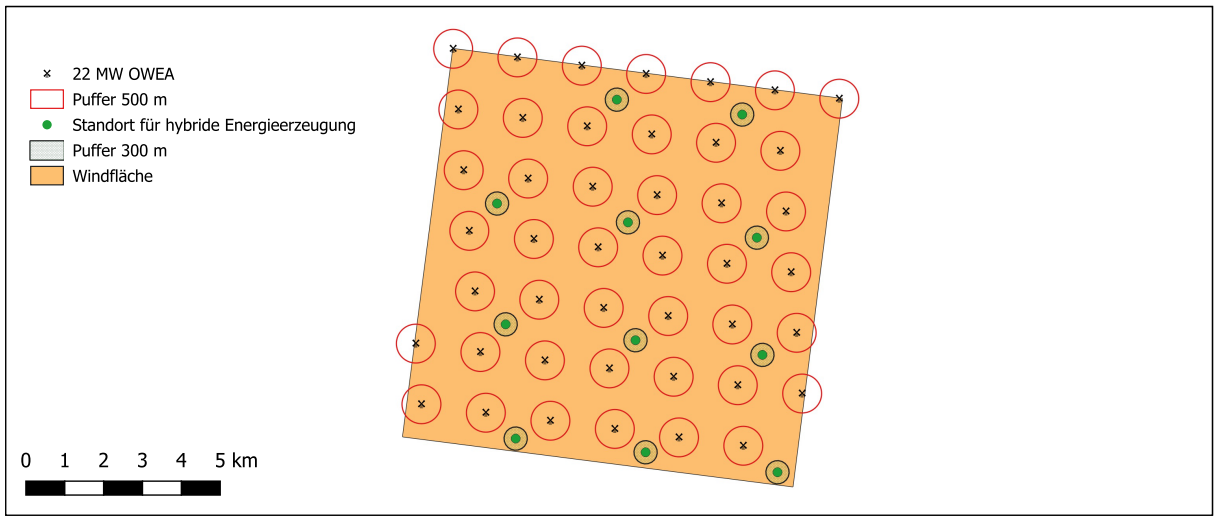
Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Abbildung 57: Verteilung von Standorten für hybride Energieerzeugung in einem generischen Windpark mit 22 MW OWEA und mittlerer Flächennutzung



Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH

Abbildung 58: Verteilung von Standorten für hybride Energieerzeugung in einem generischen Windpark mit 22 MW OWEA und minimaler Flächennutzung



Quelle: eigene Darstellung, Deutsche WindGuard GmbH