

Offshore Flächenpotenziale: Analyse der Energieerzeugungseffizienz in der deutschen AWZ

Studie im Auftrag des BWO und BDEW

Abschlussbericht

6.12.2022

Dr. Bernhard Stoevesandt
(bernhard.stoevesandt@iwes.fraunhofer.de)
Dr. Sandra Schwegmann
(sandra.schwegmann@iwes.fraunhofer.de)

Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme
Küppersweg 70
26129 Oldenburg
Tel.: +49 441 798 5011
www.iwes.fraunhofer.de

Vertraulichkeitsstatus

	öffentlich
x	intern
	vertraulich

Autor/Projektleiter: Dr. Bernhard Stoevesandt	Ort, Datum:
Unterschrift:	Oldenburg, 6.12.2022
geprüft durch: Dr. Bernhard Stoevesandt	Ort, Datum:
Unterschrift:	Oldenburg, 6.12.2022

Inhaltsverzeichnis

I	Kurzzusammenfassung	6
II	Zusammenfassung für Entscheidungsträger	7
II.1	Methode und Vorgehen	7
II.1.1	Potenzialbestimmung	7
II.1.2	Evaluation für mögliche Co-Nutzungsszenarien	7
II.2	Ergebnisse	8
II.2.1	Bedingungen für eine Co-Nutzung	8
II.2.2	Energiegewinnungspotenziale der voraussichtlich verfügbaren Flächen	9
II.2.3	Energiegewinnungspotenziale unter Co-Nutzung	10
II.3	Schlussfolgerung	11
1	Einleitung und Zielsetzung	12
2	Methodisches Vorgehen	14
2.1	Interviews zur Analyse von Co-Nutzungspotenzialen und Hindernissen	14
2.2	Modellrechnungen zur Ertragspotenzialanalyse	15
2.2.1	Mesoskalige Windfeldmodellierung	15
2.2.2	Windenergieanlagentechnologie und Flächenbeplanung	16
2.2.3	Studienspezifisches Modellsetup	17
2.2.4	Evaluationsparameter	18
3	Basisszenarien	20
4	Co-Nutzungspotenziale: Ergebnisse der Gespräche mit den Interessensgruppen in der AWZ	24
4.1	Naturschutz	24
4.2	Militärische Nutzung	27
4.3	Fischerei	29
4.4	Schifffahrt	31
5	Potenziale bei erweiterten Flächen	32
6	Zusammenfassung und Ausblick	36
7	Literaturverzeichnis	38
8	Abkürzungen	41

I Kurzzusammenfassung

Im Rahmen einer vom BWO und BDEW in Auftrag gegebenen wissenschaftlichen Studie zum zukünftigen Offshore-Windenergiepotenzial wurden durch das Fraunhofer IWES verschiedene Szenarien zum Windenergieausbau in der Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) der Bundesrepublik untersucht. Hierzu wurden zunächst Erträge und Effizienzen auf den gemäß Raumordnungsplan verfügbaren Flächen berechnet. Bei einer dichten Beplanung der Windparkflächen von teils über 10 MW/km² korrigierter Leistungsdichte sinken die Volllaststunden auch im Mittel deutlich unter die Erträge in heute bereits voll ausgebauten Windparkclustern ab. In einigen Gebieten in der Deutschen Bucht können dann weniger als 3000 Volllaststunden realisiert werden. Eine Modernisierung der Anlagen (Repowering) auf den heute bereits betriebenen Flächen wird sich in Zukunft positiv auf die Erträge und Effizienzen der Windparkflächen auswirken, da größere und höhere Windenergieanlagen das Windpotenzial in großen Höhen besser nutzen können.

Neben den gemäß Raumordnungsplan verfügbaren Flächen wurden in einem weiteren Schritt im Rahmen der Studie auch mögliche zukünftige Co-Nutzungspotenziale analysiert. Hierzu hat das Fraunhofer IWES zunächst Gespräche mit Stakeholdern aus den Nutzungsformen Naturschutz, Fischerei und Militär durchgeführt. Basierend auf diesen Gesprächen erfolgte eine Analyse und Zusammenfassung von Hindernissen und Potenzialen der Co-Nutzung. Zukünftige technische Entwicklungen wie schwimmende Anlagen oder alternative Netzanbindungen können möglicherweise die Anforderungen der bisherigen Nutzungsformen zumindest teilweise erfüllen.

Gemeinsam mit den Auftraggebern wurden zusätzliche Szenarien mit höherer gesamter installierter Kapazität durch Co-Nutzung definiert und simuliert. Die Ergebnisse dieser Szenarien zeigen, dass eine weniger dichte Bebauung in den momentan vorgesehenen Gebieten und Verlagerung dieser Kapazitäten in Co-Nutzungsgebiete zu einer deutlichen Erhöhung von Volllaststunden und Effizienzen der Windparks führen kann. So ließen sich Volllaststunden in ähnlicher Höhe wie bereits in heute voll ausgebauten Clustern auch beim weiteren zukünftigen Ausbau realisieren.

Insgesamt wurden mehrere Co-Nutzungs-Szenarien, die die Ausbaupläne der Bundesregierung von 70 GW jeweils überschreiten, untersucht. Bei einem Gesamtpotenzial von 81,6 GW installierter Leistung lassen sich gemäß den Ergebnissen der Untersuchungen Erträge von bis zu 292,1 TWh bei rund 3580 Volllaststunden in der Deutschen AWZ realisieren.

Die Studie zeigt somit auf, dass die Co-Nutzung eine Möglichkeit zur Erhöhung der Offshore-Windenergieerträge in der Deutschen Bucht ist, und weitere Diskussionen hierzu aus energetischer Sicht sinnvoll sind. Dieses setzt politischen Willen und technische Innovationen voraus, aber vor allem eine lösungsorientierte Diskussion zwischen den Beteiligten. Um diese zu ermöglichen, wäre ein Vorschlag eine mediativ orientierte Koordinierungsstelle einzurichten, welche die Kommunikation zwischen den Gruppen zielführend moderiert, um gemeinsam Lösungen zu erarbeiten.

II Zusammenfassung für Entscheidungsträger

Im Rahmen einer vom BWO und BDEW in Auftrag gegebenen wissenschaftlichen Studie zu Offshore-Ausbaupotenzialen wurden verschiedene Szenarien für einen Ausbau der Offshore-Windenergie in der Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) der Bundesrepublik untersucht. Ziel war dabei, die Potenziale und Möglichkeiten von bestimmten Flächennutzungen zu evaluieren, um mindestens das Ausbauziel der Bundesregierung von 70 GW sinnvoll zu erreichen. Prinzipiell kann ein Ausbauziel einer installierten Gesamtkapazität durch eine sehr hohe Dichte an Windenergieanlagen (WEA) auch bei begrenzter Flächenkulisse erreicht werden, jedoch sinken die Effizienzen und die relativen Erträge entsprechend. Daher wurde im Rahmen der Studie evaluiert, wie sich verschiedene Flächenkulissen des Ausbaus auf die Gesamterträge auswirken und was die Hinzunahme weiterer Flächen unter Co-Nutzungsbedingungen für die Effizienz der Energieerzeugung bedeutet.

II.1 Methode und Vorgehen

II.1.1 Potenzialbestimmung

Die Berechnung des Ertragspotenzials erfolgte mit dem mesoskaligen Wettermodell WRF, in welchem die Windparks über eine Windparkparametrisierung berücksichtigt wurden. Gemäß ihrer Funktion entziehen die Windparks der großräumigen Strömung im Modell Impuls und führen turbulente kinetische Energie zu. Ein repräsentatives Windjahr wurde ausgewählt, um die mittleren Windbedingungen in der Deutschen AWZ möglichst genau abbilden zu können. Mit diesem Modellierungsansatz wurde in einer Reihe von Szenarien die resultierenden Erträge und Effizienzen auf verschiedenen Windparkflächen und unter verschiedenen Flächenkulissen evaluiert.

Grundlage für die Auswahl der Windparkflächen war dabei der im Dezember 2021 veröffentlichte Vorentwurf des Flächenentwicklungsplans (FEP) des Bundesamtes für Schifffahrt und Hydrografie (BSH, 2021b), zu der jeweils zusätzliche Flächen hinzugenommen wurden. Zum einen ist das ein Gebiet innerhalb der Schifffahrtsstraße SN10 analog zur Studie der Deutschen Windguard (Borrmann, Kruse und Wallasch, 2021) zum Wasserstoffpotenzial sowie ggf. weitere Co-Nutzungsflächen je nach betrachtetem Szenario.

Co-Nutzung wird im Kontext dieser Studie so verstanden, dass eine Fläche sowohl das Ziel ihrer jetzigen Bestimmung nach Raumordnungsplan erfüllen, als auch durch Windenergie genutzt werden kann. Dieses setzt je nach kombinierten Nutzungsarten sowohl politischen Willen, als auch technische Innovationen voraus.

II.1.2 Evaluation für mögliche Co-Nutzungsszenarien

Um zu ermitteln, ob und unter welchen Bedingungen überhaupt zusätzliche, bisher nicht für die Windenergienutzung gemäß Raumordnungs- und Flächenentwicklungsplan vorgesehene Flächen infrage kämen, wurden Gespräche mit verschiedenen Akteuren, die bisher die Flächen nutzen bzw. deren Nutzungsbedingungen überwachen, geführt. Hierfür wurden Repräsentanten von

- der Deutschen Marine,
- dem Naturschutzbund,
- dem Naturschutzring,
- der Deutschen Umwelthilfe,
- und dem Johann Heinrich von Thünen Institut

interviewt. Zum Teil gab es mehrere Gespräche mit den einzelnen Beteiligten. Des Weiteren hat das Fraunhofer IWES am "Human Stressors in the North Sea - Foresight" Workshop teilgenommen, zu dem das Thünen Institut im Rahmen des Projekts Multiple Stressors on North Sea Life (MuSSeL) eingeladen hatte. Daneben wurde an einem Workshop im Rahmen der Wind Europe Konferenz 2021 in Kopenhagen zu "Wind energy, defence and aviation" teilgenommen. Evaluiert wurde im Rahmen dieser Gespräche, welche kritischen Punkte einer Co-Nutzung im Wege stehen, welche technischen Möglichkeiten es seitens der Windenergiebranche gibt, die Probleme zu beheben und welche weiteren Bedingungen für eine Co-Nutzung erfüllt sein müssten.

II.2 Ergebnisse

II.2.1 Bedingungen für eine Co-Nutzung

Naturschutz

Die Artenvielfalt der Lebewesen des Meeres ist stark bedroht. Viele Arten stehen unter extrem hohem Druck. Vor diesem Hintergrund sind weite Gebiete der Nord- und Ostsee durch europäische Naturschutzregeln geschützt. Für die Naturschutzverbände, die ihre Aufgabe darin sehen, diese Arten zu schützen, gibt es daher unter den jetzigen Bedingungen kaum Spielraum, weitere Flächen der industriellen Nutzung freizugeben. Allerdings standen alle Gesprächspartner der Energiewende sehr offen gegenüber und befürworten prinzipiell auch den Ausbau der Offshore-Windenergie. Es wurde jedoch als essenziell angesehen, dass der Ausbau so naturverträglich wie möglich zu gestalten ist.

Dazu wurde geäußert, dass die einzige Möglichkeit dem Problem beizukommen, darin liegt, die Stressoren für die Arten an anderen Stellen abzubauen. Wenn die Arten durch bessere Umweltbedingungen insgesamt besser geschützt sind, stellen WEA, welche unter größtmöglichen Schutzmaßnahmen errichtet und betrieben werden, nicht mehr die kritische Bedrohung dar, die sie jetzt darstellen würden. Genannt wurden als Maßnahmen zur Verbesserung der Umweltbedingungen eine deutliche Reduktion von Eutrophierung, eine Reduktion von Rohstoffabbau im Meer, geringere schädliche Fischerei sowie eine Reduktion von Schiffsverkehr in kritischen Gebieten. Im Ergebnis wäre die Nutzung von bestimmten Naturschutzbereichen für die Windenergie in der Nordsee zumindest denkbar.

Militärische Nutzung

Grundsätzlich stellt die Windenergie aus militärischer Sicht einen Fortschritt dar, da die Dezentralität der Energieerzeugung die Resilienz gegenüber Angriffen fördert. Allerdings sieht die Bundeswehr und im Speziellen die Marine ihre Offshore-Nutzungsmöglichkeiten durch die schon vorhandene Offshore-Flächenkulisse gemäß Raumordnungsplan schon erheblich eingeschränkt. Trotzdem ergab sich in Gesprächen über technische Möglichkeiten der Kooperation doch eine prinzipielle Überlegung, ob nicht doch weitere Flächen gemeinsam genutzt werden könnten. Angedacht waren dabei Flächen mit Kapazitäten von 1 - 2 GW Leistung.

Diese prinzipielle Offenheit wurde allerdings durch den Krieg in der Ukraine vorerst beendet, da die Bundeswehr sich nun neu ausrichten muss. Trotzdem scheint eine langfristige Zusammenarbeit einträglich sein zu können, um auch unter den neuen geopolitischen Bedingungen Möglichkeiten einer Co-Nutzung zwischen Windenergie und militärischer Nutzung zu eröffnen. Dies wird jedoch auch gezielte Innovationen auf Seiten der Windenergiebranche (zum Beispiel zu Verkabelungen) voraussetzen.

Fischerei

Die küstennahe Fischerei in der AWZ ist schon heute einem existenziellen Druck ausgesetzt. Aufgrund des Rückgangs der Fischbestände, hoher Betriebskosten und starker internationaler Konkurrenz stehen die lokalen Betriebe heute schon signifikanten wirtschaftlichen Unsicherheiten gegenüber. Ob eine in der momentanen Form betriebene Fischerei in Zukunft überhaupt noch tragfähig ist, ist unklar. Eine weitere Einschränkung der Fanggebiete ist, für die küstennahe Fischerei daher kaum hinzunehmen.

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, ob eine Kooperation mit den Betrieben in Windenergiegebieten eher auf eine direkte Co-Nutzung in Form von Aquakulturen hinauslaufen könnte, um den Fischereibetrieben ein berechenbareres Auskommen zu ermöglichen. Erste Versuche in diese Richtung wurden bereits unternommen.

In Bezug auf die Fischereiforschung wäre eine Co-Nutzung ebenfalls schwierig. Zurzeit werden die Forschungsflächen standardisiert nach identischem Verfahren langfristig befischt, um repräsentative Aussagen zu Fischbeständen machen zu können. Hier müsste, bei einer Co-Nutzung, die Methode langfristig validiert umgestellt werden. Dies ist prinzipiell denkbar, braucht aber einen hinreichenden Vorlauf.

Zusammenfassung Co-Nutzung

Die Co-Nutzung auf zusätzlichen Flächen, die gemäß Raumordnungsplan nicht für die Windenergienutzung vorgesehen sind, ist nicht einfach zu realisieren. Für die Nutzung müssten jeweils spezifische Bedingungen erfüllt werden. Trotzdem scheint eine Co-Nutzung, außer aus politisch-prinzipiellen Überlegungen, in keinem Fall unmöglich zu sein. Technische Weiterentwicklungen, die zum Beispiel Eingriffe in die Natur minimieren, könnten eine Co-Nutzung ermöglichen. Dies setzt eine langfristige Kooperation der verschiedenen Interessengruppen miteinander voraus. Flächen, die für so eine Co-Nutzung infrage kommen, würden vermutlich erst in den letzten Ausbaustufen ab 2040 genutzt werden. Es besteht also Zeit, die offenen Fragen miteinander zu klären und notwendige technische Weiterentwicklungen voranzutreiben, sofern heute bereits ein konstruktiver und ergebnisoffener Dialog angestoßen wird.

II.2.2 Energiegewinnungspotenziale der voraussichtlich verfügbaren Flächen

Die Energiepotenziale und die Erzeugungseffizienz wurden für verschiedene Szenarien für die voraussichtlich bereits für Windenergieerzeugung verfügbaren Flächen gemäß Raumordnungsplan berechnet. Neben den im Vorentwurf FEP (BSH, 2021b) vom BSH vorgesehenen Flächen mit einer Kapazität von 59 GW wurde hierbei auch ein Gebiet im Mittelstreifen der Schifffahrtsstraße SN10 zwischen den Ausbauzonen 3 und 4 mit einer Kapazität von bis zu 10 GW berücksichtigt. Das modellierte Energieerzeugungspotenzial dieses Gesamtausbaus beträgt 233 TWh, was etwas weniger als 50 % des derzeitigen Strombedarfs und weniger als 10 % des derzeitigen Gesamtbedarfs an Energieträgern in Deutschland bedeutet. Die Erzeugungseffizienz sinkt bei diesem Ausbau allerdings signifikant im Vergleich zu der bisherigen Erzeugung aus den knapp 8 GW Bestandswindparks und ist sehr ungleichmäßig zwischen den verschiedenen Flächen verteilt.

Eine Reduktion der installierten Kapazität in Flächen mit besonders hoher Leistungsdichte und aufgrund externen Abschattungsverlusten ungünstiger Lage führt zwar zu einer Reduktion des Energieerzeugungspotenzials, allerdings wird die Energie bei wesentlich höherer Kosten- und Ressourceneffizienz gewonnen. Konkret wurde ein Szenario mit einer Reduktion der Kapazität um 8,5 GW in den Gebieten EN9 bis EN13 gerechnet. Die um 12,3 % reduzierte Gesamtkapazität in der deutschen AWZ führt allerdings nur zu einer um 6,9 % reduzierten Energieproduktion. Dies bedeutet, dass etwa die Hälfte des Energieerzeugungspotenzials dieser 8,5 GW durch die erhöhten Abschattungsverluste verloren geht.

tungseffekte verloren geht. Aus diesem Grund sollte die Effizienz der Energieerzeugung weiterhin ein Thema bei der Flächenplanung bleiben.

Ein weiteres Ergebnis der Studie ist das in den Bestandsparks verfügbare Energiegewinnungspotenzial durch eine Modernisierung der Windenergieanlagen (Repowering) nach Auslaufen der Betriebsdauer. Allein durch eine Modernisierung auf die prognostizierten 30 MW Anlagen mit Nabenhöhen von über 190 m steigt das Potenzial um etwa 20 % in den betrachteten Gebieten.

II.2.3 Energiegewinnungspotenziale unter Co-Nutzung

Auswahl der modellierten Co-Nutzungsflächen

Im Rahmen der Studie ging es darum, zu evaluieren, wie die Energiegewinnungspotenziale unter Co-Nutzung ausfallen würden. Dafür wurden Gebiete für die Co-Nutzung ausgewählt, bei denen angenommen wurde, dass eine Co-Nutzung grundsätzlich absehbar z.B. technisch möglich sein könnte. Es sei jedoch explizit darauf hingewiesen, dass sehr viele offene Fragen zur Co-Nutzung noch nicht geklärt sind und noch diskutiert und beantwortet werden müssten.

Eine Co-Nutzung der Fläche der Doggerbank setzt voraus, dass die Bedingungen des Artenschutzes eingehalten werden und auf die Doggerbank angewiesene gefährdete Arten in ihren Lebensbedingungen in der Nordsee insgesamt trotz einer Co-Nutzung verbesserte Bedingungen vorfinden. Die Wege dahin sind bekannt. Technische Innovationen zur Minimierung eines Natureingriffs durch einen Windenergieausbau erscheinen möglich. Daher wurde diese Fläche in Betracht gezogen.

Eine Co-Nutzung von Flächen militärischer Nutzung - insbesondere der Marine - setzt voraus, dass es keine Einschränkung der Verteidigungsfähigkeit aus dem Ausbau erfolgt. Dieses setzt auch technische Innovationen in der Windenergie voraus. Prinzipiell wurde unter enger Abstimmung eine Co-Nutzung als grundsätzlich möglich gesehen. In welchem Umfang dies möglich sein könnte, hängt an rechtlichen und zum Teil militärisch-technischen Fragestellungen, die zu beantworten sind. Dies schien nicht unmöglich und bot beidseitig spannendes Potenzial. Es wurden daher zwei verschiedene Szenarien der Co-Nutzung betrachtet, eines mit einem begrenzten Ausbau im Artillerieschießgebiet in der Nordsee und einer Teilnutzung eines U-Boot Tauchgebiets in der Ostsee, sowie das eines zusätzlichen starken Ausbaus im Artillerieschießgebiet.

Ergebnisse zu Effizienz und Energieertrag

Die Ergebnisse der Ertragsmodellierung veranschaulichen das hohe Windenergiepotenzial in den Co-Nutzungsgebieten. Im Gegensatz zu einer Verdichtung der Leistung auf den bereits für Windenergienutzung vorgesehenen Flächen, würde die gesamte Erzeugungseffizienz beispielsweise durch einen Ausbau im deutschen Teilgebiet der Doggerbank nur geringfügig verringert. Die Gebiete zur militärischen Co-Nutzung zeigen ein etwas geringeres Windenergiepotenzial als das Gebiet auf der Doggerbank, liegen in ihrer Effizienz allerdings weiterhin signifikant höher als wenn der Kapazitätswachstum durch eine Verdichtung der installierten Kapazität auf bestehenden Flächen erreicht wird. Zu berücksichtigen bei diesem Ergebnis ist, dass keinerlei Verluste durch eventuelle Co-Nutzungseinschränkungen berücksichtigt wurden.

Die Szenarien beinhalten jeweils eine Gesamtkapazität von 71 GW und 260 TWh Energieertrag bei der Nutzung der Doggerbank, 73 GW Kapazität und 265 TWh Energieertrag bei einer Co-Nutzung mit 2 GW installierter Leistung auf militärischen Flächen. Das Szenario bei voller Nutzung der untersuchten Gebiete betrachtet eine Gesamtkapazität Offshore von 81,6 GW und berechnet daraus einen Energieertrag von 292 TWh.

Tabelle II.1 Ergebnisse der Basisszenarien sowie der Potenzialszenarien für die gesamte deutsche AWZ in Bezug auf die Evaluationsparameter.

Szenarien Nord und Ostsee	Inst. Leistung [GW]	Produktion [TWh]	Volllaststunden [h]
0 – Basisszenario	69,0	232,7	3372
1 – Variante SN10	63,0	215,1	3414
2 – Variante höhere Volllaststunden	60,5	216,7	3582
3 – Variante Modernisierung Bestandsparcs	69,0	237,9	3447
4 – Potential Doggerbank	71,0	260,0	3662
5 – Potential U-Boot Tauchgebiet Ostsee & Teilnutzung Artillerieschießgebiete	73,0	265,0	3630
6 – Potential Artillerieschießgebiete & U-Boot Tauchgebiete	81,6	292,1	3580

II.3 Schlussfolgerung

Eine Co-Nutzung von Flächen anderer Nutzungsarten mit der Windenergie stellt eine große Herausforderung dar, wird basierend auf den im Rahmen der Studie durchgeführten Interviews und Gesprächen als prinzipiell möglich angesehen. Für eine erweiterte Co-Nutzung spricht ein deutlich gesteigerter Energieertrag selbst bei einem nur moderaten Anstieg der installierten Leistung. Dieses würde im Gegensatz zu einer weiteren Leistungsverdichtung auf bestehenden Flächen dabei helfen, Ressourcen zu sparen und den Gesamteingriff, der notwendig wird, um die benötigte Energie zu erzeugen, gering zu halten. Konkret bedeutet dies:

- Die Co-Nutzung ermöglicht einen höheren Gesamtenergieertrag bei gleichzeitig hoher Ausbaueffizienz, was Ressourcen und das Klima schützt.
- Durch Verlagerung des Ausbaus auf weitere Flächen durch Co-Nutzung lässt sich der Gesamtenergieertrag überproportional im Vergleich zu einer weiteren Verdichtung der Flächen steigern, wodurch die Effizienz der Parks steigt und Kosten relativ gesehen sinken können.
- Die Modernisierung von Bestandsparcs ist in jedem Fall zur Erreichung höherer Effizienz und höherer Erträge sinnvoll.

Voraussetzung für diese Co-Nutzung ist allerdings, dass alle beteiligten Interessensgruppen in den jeweiligen Flächen eine adäquate Lösung für ihre Nutzungsart unter der Co-Nutzung bekommen. Dieses setzt politischen Willen und technische Innovationen voraus, aber vor allem eine lösungsorientierte Diskussion zwischen den Beteiligten. Um diese zu ermöglichen, wäre ein Vorschlag eine mediativ orientierte Koordinierungsstelle einzurichten, welche die Kommunikation zwischen den Gruppen zielführend moderiert, um gemeinsame Lösungen zu erarbeiten.

1 Einleitung und Zielsetzung

Die Bundesverbände der Windparkbetreiber Offshore e.V. (Bundesverband der Windparkbetreiber Offshore e.V. (BWO)) und der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW)) vertreten insbesondere in der Öffentlichkeit und gegenüber der Politik die Interessen der Betreiber von Offshore-Windparks in Deutschland. Ein zentrales Thema ist dabei die Planbarkeit des zukünftigen Ausbaus der Offshore-Windenergie.

Da auch dieser und der damit verbundene Flächenbedarf in Nord- und Ostsee stark von verschiedenen Interessen getrieben und dessen Dimension infrage gestellt wird, ist es zentral für die Verbände eigene Expertise zum Offshore-Ausbau aufzubauen, um fachlich kompetent mögliche Ausbauszenarien der Zukunft nach außen vertreten zu können. Gleichzeitig stellt eine solche Expertise eine Basis für die Mitglieder der Verbände dar, um langfristig eigene Aktivitäten zu planen. Dementsprechend beteiligten sich die Mitgliedsunternehmen RWE, Ørsted, Lichtblick und Vattenfall direkt an dem Projekt und den darin geführten Diskussionen.

Die alte Bundesregierung (2017-2021) hatte mit der Änderung des Windenergie-auf-See Gesetzes (Gesetz zur Entwicklung und Förderung der Windenergie auf See (WindSeeG)) im Jahr 2020 nun ein Offshore-Ausbauziel von 40 GW (installierter Leistung) bis 2040 definiert (BMW, 2020). Im Rahmen der Fortschreibung des vom BSH verfassten Flächenentwicklungsplans (Flächenentwicklungsplan (FEP)) (BSH, 2020 - Anhang 14) aus demselben Jahr wurden folglich auch erste Informationen zu einem langfristigen Ausbauziel von mehr als 30 GW zusammengefasst. Grundlage für den weiteren Offshore-Ausbau waren hierbei potenziell geeignete Flächen des zum Projektbeginn neu erschienenen Raumordnungsplans (Raumordnungsplan (ROP)) (BSH, 2021a).

Diese Annahmen waren die ursprüngliche Grundlage für die Analyse von darüber hinausgehenden Ausbaupotenzialen im Rahmen des Projekts. Im Zuge des Koalitionsvertrags und der erneuten Novelle des WindSeeG im Frühjahr 2022 wurden neue Ausbauziele von 30 GW in 2030, 40 GW in 2035 und 70 GW im Jahr 2045 festgelegt (Bundesregierung, 2020). Dieses stellt alle Stakeholder vor enorme Herausforderungen. Das Ziel entspricht den Notwendigkeiten der Erreichung der Pariser Klimaverträge. Ob und unter welchen Bedingungen dies mit den Flächen, die im Raumordnungsplan 2021 für Windenergienutzung vorgesehen sind, möglich ist, ist derzeit unklar. Die derzeitige Raumordnung stellt je nach Bebauungsdichte eine Kapazität von gut 50 GW zur Verfügung (Baumgärtner u. a., 2021).

Da alle verfügbaren Flächen in der Ausschließlichen Wirtschaftszone (Ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ)) Deutschlands bereits mindestens einer Nutzungsordnung zugeteilt sind, ging es im Rahmen der Untersuchungen vor allem auch darum zu erkunden, welche Möglichkeiten einer gemeinsamen Nutzung durch Windenergie und andere Nutzungsformen bestehen können. Eine solche gemeinsame Nutzung (Co-Nutzung) sollte zudem mögliche potenzielle technische Weiterentwicklungen der Windenergieanlagen und Windparks mit einbeziehen, die auch explizit darauf abzielen, die Co-Nutzung zu ermöglichen. Neben der Co-Nutzung stellt auch eine Modernisierung der Windenergieanlagen auf bereits in Betrieb befindlichen Flächen - das Repowering - ein mögliches Potenzial in der Ertragssteigerung dar. Dieses ist entsprechend ebenfalls Teil der Untersuchungen.

Die verschiedenen Ausbauszenarien - mit und ohne Co-Nutzung und Repowering wurden schließlich in verschiedenen Szenarienrechnungen detailliert untersucht. Hierzu wurden umfassende Rechnungen mit einem mesoskaligen Modell unter Berücksichtigung der Windparkeinflüsse für die Deutsche Bucht und die südliche Ostsee durchgeführt. Da das resultierende Windpotenzial in der deutschen auch von den Ausbauplänen in den Anrainerstaaten betroffen ist, wurden diese Flächen ebenfalls in die Betrachtungen einbezogen. So ist das übergeordnete Ziel dieser Studie einen um-

fassenden Einblick in die Problematik der Flächenverfügbarkeit der AWZ, den Möglichkeiten des Ausbaus der Offshore-Windenergie und den Potenzialen der Windenergieerzeugung auf diesen Flächen zu liefern - unter der Vorgabe, dass mindestens 70 GigaWatt (GW) installierte Leistung resultiert.

Der hier folgende Bericht fasst die Ergebnisse der Studie zusammen. In Kapitel 2 werden die verwendeten Methoden zur Berechnung und Evaluation von Co-Nutzungspotenzialen erläutert. Darauf folgen in Kapitel 3 die Ergebnisse von Referenzszenarien ohne Co-Nutzung. Kapitel 4 fasst die Ergebnisse von Stakeholder-Interviews zu Co-Nutzungsmöglichkeiten zusammen, die anschließend bezüglich ihres Windenergiepotenzials in 5 analysiert werden. Eine Zusammenfassung und Ausblick findet sich in 6.

2 Methodisches Vorgehen

Die Chancen zur Co-Nutzung sowie deren Hindernisse wurden in Interviews mit relevanten Stakeholdern ermittelt. Die Bewertung der Windparkerträge erfolgte im Anschluss für eine Reihe von Ausbauszenarien mit umfangreichen numerischen Modellrechnungen. Die Vorgehensweise und Ansätze werden in diesem Kapitel erläutert.

2.1 Interviews zur Analyse von Co-Nutzungspotenzialen und Hindernissen

Bisher ist die Politik bei der Verteilung der Offshore-Flächen recht strikt, sodass verschiedene Nutzungsformen in der Deutschen AWZ größtenteils getrennt gehalten werden. Jedoch gibt es auch diverse Gebiete mit multiplen Nutzungsformen, etwa zwischen Naturschutz und militärischer Nutzung. Der Flächenentwicklungsplan (BSH, 2020) sieht prinzipiell auch Nutzungsformen zwischen Militär und Windparks vor, so gibt es Überschneidungen mit Festlegungen von Gebieten des FEP und militärischen Übungsgebieten besonders im Bereich der Ostsee. Daneben wurden in den letzten Jahren auch einzelne Versuche eher wissenschaftlicher als wirtschaftlicher Natur zu Aquakulturen in Windparks (Gimpel, Stelzenmüller, Haslob u. a., 2020) durchgeführt. All diese Fälle sind bisher jedoch Co-Nutzungen mit eher geringer Beeinflussung untereinander. Wenn in Zukunft Flächen, die bisher anderen Nutzungsformen zugeordnet sind, auch durch Windenergie genutzt werden sollen, dann bedeutet dies, dass es ein viel engeres Eingehen auf die Bedürfnisse der Interessengruppen braucht. Letztendlich ist zu evaluieren, wie das Ziel eines möglichst ungestörten Windparkbetriebs mit den Zielen anderer Interessengruppen zusammengebracht werden kann. Dann wäre eine echte Co-Nutzung möglich.

Um Potenziale und Hindernisse zu evaluieren, wurde neben einer Literaturrecherche vor allem Gespräche mit verschiedenen Vertreter:innen der Interessengruppen abseits der Windenergie geführt. Je nach Stakeholdern kam es dabei zu einem oder mehreren Gesprächen. Generell wurden folgende Nutzungsformen betrachtet:

- Fischerei,
- Militärische Nutzung,
- Naturschutz,
- Schifffahrt.

Für die jeweils zu betrachtenden Flächen war das Vorgehen dabei unterschiedlich. Generell wurde im Rahmen der regelmäßigen Projekttreffen zunächst der Stand der Diskussion in Bezug auf die jeweiligen Interessengruppen mit den Auftraggebern der Studie (BWO/BDEW) abgeklärt. Der Kontakt der Windparkbetreiber zu den jeweiligen Interessengruppen ist sehr unterschiedlich, daher wurde der aktuelle Stand im Projektarbeitskreis zunächst abgeglichen, um einen bisherigen Stand von Diskussionen als Grundlage für die Interviews zu berücksichtigen.

In einem weiteren Schritt wurden Diskussionen mit Forschungsinstitutionen aus anderen Ländern geführt, um einen breiteren Blick für das Herangehen zur Thematik der Co-Nutzung in anderen Ländern zu gewinnen. Diskutiert wurde u.a. mit der Niederländische Organisation für Angewandte Naturwissenschaftliche Forschung (niederländisch: Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek) (TNO) mit einem Schwerpunkt auf Naturschutz sowie Dänemarks Technische Universität (dänisch: Danmarks Tekniske Universitet) (DTU) Offshore Renewable Energy Catapult (Windenergieforschungsinstitut) (ORE) im Vereinigten Königreich mit einem Schwerpunkt auf mögliche Kooperationen mit dem Militär.

Daneben hat das Fraunhofer IWES auch eine Sitzung "Wind energy, defence and aviation" auf der Wind Europe Electric City 2021 Conference in Kopenhagen im November 2021 besucht, bei der es um Kooperationen zwischen militärischen Akteuren und der Windenergiebranche ging. Dort gab es einen regen Austausch mit internationalen Vertreter:innen von militärischer Seite und der Windenergiebranche.

Generelles Ziel der Recherchen und Diskussionen war es dabei zu evaluieren, ob und unter welchen Bedingungen eine Co-Nutzung zwischen Windenergie und anderen Nutzungsformen deutlich über der bisher im FEP vorgesehenen möglich ist. Die Ergebnisse dieser Analysen sind in Kapitel 4 zusammengefasst.

2.2 Modellrechnungen zur Ertragspotenzialanalyse

Das Ertragspotenzial von Offshore-Windparks hängt neben den technischen Eigenschaften der Windenergieanlagen von den am Standort verfügbaren Windbedingungen ab. Diese sind zum einen geprägt von den atmosphärischen Bedingungen - der natürlichen Windressource -, zum anderen von den Abschattungseffekten der Windenergieanlagen und Windparks untereinander.

Die Abschattungseffekte - auch Nachlaufeffekte genannt - werden bereits seit der Errichtung erster Windparks untersucht und in Modellen abgebildet (Jensen, 1983). Diese oft stark vereinfachenden Modelle (Göçmen u. a., 2016) werden auch heute noch zur Planung von Offshore-Windparks verwendet. Mit der Errichtung von großen Offshore-Windparks treten jedoch vermehrt kumulative Windparkeffekte auf, die zu einer großräumigen Reduktion der Windressource führen, da große Offshore-Windparks der Strömung verhältnismäßig effizient viel Energie entziehen und zudem große Hindernisse für den Wind darstellen. Großräumigen Windparkeffekte sind ein aktuelles Thema der Windenergieforschung (IWES, 2019) und auch ein in der Industrie viel betrachteter Effekt (Ørsted, 2019).

2.2.1 Mesoskalige Windfeldmodellierung

In den vergangenen Jahren wurden verschiedene Modellierungsansätze entwickelt, um Windparkeffekte, wie sie in Windparkclustern auftreten, berechnen zu können. Auch stark vereinfachte Industriemodelle für die Windparkplanung wurden hinsichtlich sehr großer Windparks optimiert bzw. angepasst (Nygaard u. a., 2020). Diese für die Windparkplanung mit vielen Freiheitsgraden notwendigen schnellen Modelle sind jedoch noch nicht in der Lage großskalige atmosphärische Effekte, wie sie über 50 km und mehr auftreten, korrekt abzubilden (Brandis u. a., 2022). Hingegen sind hochauflösende regionale Wettermodelle dazu besonders geeignet großskalige Effekte wie z.B. Winddrehungen und die Zugbahnen von Tiefdruckgebieten abzubilden. Für diese - auch mesoskalige Modelle genannt - wurden in den letzten Jahren Modelle zur Abbildung von Windparkeffekten entwickelt (Fischereit u. a., 2022).

Im Rahmen der hier vorliegenden Potenzialstudie wurde das weltweit in Windenergieanwendungen stark etablierte Wettermodell (Weather Research and Forecasting Model - mesoskaliges Wettermodell (WRF)) verwendet (Skamarock u. a., 2021). Das im Rahmen der Studie verwendete Modellsetup wurde seitens des Fraunhofer IWES in den letzten Jahren umfangreich für verschiedene Offshore-Windenergieanwendungen optimiert. Der Einfluss der Windparks untereinander wurde im Modellierungsansatz mit der Fitch-Windparkparametrisierung (Fitch u. a., 2012) realisiert. Diese Parametrisierung modelliert die Windparks als Senke von Impuls und Quelle von Turbulenz in den Modellleveln (Höhen), in denen sich der Rotor der Windenergieanlagen befindet. Sie nutzt als Eingangsdaten neben den Nabenhöhen und Rotordurchmessern die Schub- und Leistungskurven der jeweiligen verwendeten Anlagentechnologie. Somit unterscheiden sich im Gegensatz zu stark vereinfachenden Ansätzen (Kleidon und L. M. Miller, 2020) auch Windparkflächen mit älteren und

neueren Anlagen. Eine Betrachtung von Einzelflächen wird generell ermöglicht, was zentral für folgenden Analysen im Rahmen der Studie ist (siehe Kapitel 3 und 5).

Da die Auflösung mesoskaliger Modelle im Bereich von wenigen Kilometern liegt, kommt es vor, dass sich mehrere Windenergieanlagen auf einer Gitterzelle des Modells befinden. Dann wird ein kumulativer Effekt der Anlagen über eine Turbinendichte berücksichtigt. Der verwendete Modellierungsansatz wurde in den vergangenen Jahren für Einzelsituationen (Siedersleben u. a., 2018) und zuletzt im Rahmen des BMWK-geförderten Vorhabens X-Wakes (IWES, 2019) erstmals offshore auch für lange Zeiträume in voll ausgebauten Windparkclustern der Deutschen Bucht validiert (B. Cañadillas u. a., 2022). Der Modellierungsansatz ist somit genau genug und geeignet, die Nachlaufeffekte und Erträge zu berechnen.

2.2.2 Windenergieanlagentechnologie und Flächenbeplanung

Offshore-Windenergieanlagen haben sich in den vergangenen Jahren kontinuierlich weiterentwickelt. Bestanden die ersten Offshore-Windparks in der Deutschen Bucht in den Jahren 2011-2015 vor allem aus Anlagen der 3 MW bis 5 MW-Klasse, so wurden in den letzten Jahren Anlagen mit Nennleistungen von 8 MW und mehr in Betrieb genommen. Prototypen mit bis zu 15 MW sind derzeit im Bau, sodass zu erwarten ist, dass Anlagen dieser Größe in wenigen Jahren in Betrieb genommen werden (Vestas, 2022).

Für die Analyse von Ausbauszenarien in der Zukunft wurden daher in Absprache mit dem Auftraggeber drei Ausbaustufen betrachtet. Für Flächen, die voraussichtlich bis ins Jahr 2030 in Betrieb gehen, wurden 15 MW Anlagen in den Simulationen verwendet, zwischen 2031 und 2035 - Anlagen mit 22 MW und ab 2036 Anlagen mit 30 MW Anlagen. Windparks, die bereits zurzeit in Betrieb sind oder deren Inbetriebnahme und Anlagentyp absehbar ist (bis 2027), wurden gemäß der technischen Eigenschaften dieser Anlagen berücksichtigt.

Tabelle 2.1 *Verwendete Anlagengenerationen auf zukünftigen Flächen.*

Jahr der Inbetriebnahme	Nennleistung [MW]	Rotordurchmesser [m]	Nabenhöhe [m]
2027-2030	15	240	150
2031-2035	22	290	175
>2035	30	338	193

Tabelle 2.1 fasst die Eigenschaften der simulierten Windenergieanlagen nach Jahr der voraussichtlichen Inbetriebnahme zusammen. Der Modellierungsansatz benötigt zur Berechnung der Erträge und Abschattungseffekte neben Nennleistungen, Nabenhöhen und Rotordurchmessern die Leistungs- und Schubkurven der Anlagen. Diese wurden basierend auf existierenden (generischen) Anlagen, wie der 15-MW NREL-Anlage (Gaertner u. a., 2020) entsprechend hochskaliert. Die großen Anlagen wurden in den Simulationen nicht nur für neue Flächen, sondern in einem Szenario auch zur Modernisierung (Repowering) auf Bestandsflächen verwendet.

Da Windparkeffekte über 50 km und in Einzelsituationen sogar bis 100 km auftreten können, wurden die benachbarten existierenden und geplanten Windparks der Niederlande und Dänemark (Deutsche Bucht) und Schweden und Dänemark (südliche Ostsee) jeweils mit berücksichtigt und mit den oben genannten Anlagentechnologien wurden die entsprechenden Flächen in Nord- und Ostsee beplant.

Abbildung 2.1 gibt einen Überblick über die verwendeten Flächen in den Ausbauszenarien. Die Flächen sind farblich jeweils zur Länderzugehörigkeit markiert. Die installierten Kapazitäten pro Fläche wurden in der Deutschen Bucht entsprechend je nach untersuchtem Ausbauzustand/Szenario va-



Abbildung 2.1 Geplante und ausgebaute Flächen in der Nord- und Ostsee. Flieder: Niederlande, grün/dunkelblau: Deutschland, hellblau: Dänemark, violett: Schweden. Die exakten Standorte der existierenden Windenergieanlagen sind durch blaue Punkte gegeben.

riert. Die Planungen der Nachbarländer wurden entsprechenden Flächenentwicklungsplänen oder Studien entnommen. Genauer lagen für die Niederlande das “Draft North Sea Programme” aus dem Herbst 2021 (Dutch Ministry of Infrastructure and Water Management, 2021) und für Dänemark zwei Studien zum potenziellen Ausbau (COWI, 2020a; COWI, 2020b) vor. Daneben wurden diverse Geodatenquellen für Dänemark und Schweden genutzt, wie die European Marine Observation and Data Network (EMODnet) und Daten der schwedischen Regionalverwaltungen (EMODnet, 2022; Länsstyrelserna, 2021).

Die Flächen in der Deutschen Bucht wurden in Co-Nutzungsszenarien darüber hinausgehend erweitert (siehe Abbildungen in Kapitel 5). Die Flächen und auch die installierte Leistung pro Fläche wurde in allen Szenarien in den Nachbarländern nicht variiert, sondern in allen Szenarien konstant gehalten. Abbildungen in den nachfolgenden Kapiteln zeigen diese Flächen teilweise nicht, sie wurden jedoch stets mit betrachtet und simuliert.

2.2.3 Studienspezifisches Modellsetup

Zur Berechnung der Windparkerträge in der Deutschen AWZ wurden zwei Rechengebiete zentriert über der Deutschen Bucht und der südlichen Ostsee verwendet. Diese wurden jeweils unveränderlich betrachtet. Der Modellierungsansatz verwendet dabei drei ineinander geschachtelte Domains, wobei die innerste eine Auflösung von 2 km aufweist.

Abbildung 2.2 zeigt beispielhaft die Verteilung der Modelldomains über der Nordsee. Entsprechend verschobene Domains wurden über der südlichen Ostsee verwendet. Für die Abbildung möglichst repräsentativer Windbedingungen über lange Zeiträume wäre es wünschenswert, eine möglichst lange Windklimatologie von 20 und mehr Jahren pro Szenario zu berechnen. Der Rechenaufwand hierzu ist jedoch auch mit modernen Großrechnern nicht zu bewerkstelligen, bzw. die Anzahl der Szenarien wäre sehr begrenzt. Daher wurde ein für die langjährigen Windbedingungen in Bezug auf zu erwartendem mittleren Ertrag, Windrichtung- und Windgeschwindigkeitsverteilung möglichst repräsentatives Windjahr selektiert. Die Studie der Agora Energiewende und Agora Verkehrswende,

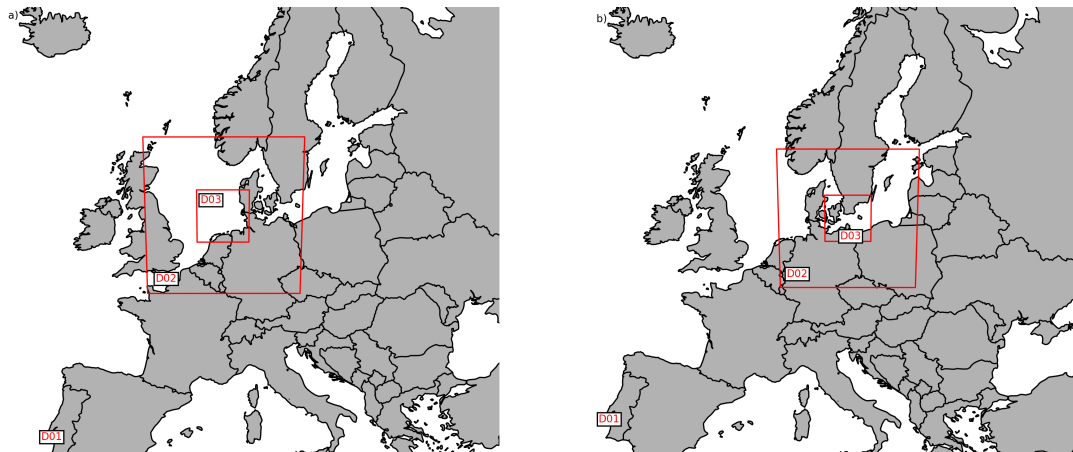


Abbildung 2.2 *Modelldomains für die Nord- (links) und Ostsee (rechts).*

2020 zu Offshore-Potenzialen hat das Jahr 2006 als besonders geeignet identifiziert, was im Rahmen der Berechnungen für den FEP2022 (Baumgärtner u. a., 2021) bestätigt wurde. Daher wurde in den Szenarien jeweils das identische Jahr 2006 simuliert. Eine zusätzliche Referenzsimulation ohne jegliche Windparks ermöglicht dann Vergleiche, um die Windgeschwindigkeitsreduktion auf der ganzen Fläche abzuleiten.

Daneben wurden zusammengefasst folgende relevanten Modellparameter verwendet: Als Randbedingungen wurden die Reanalysedaten der ERA5-Reanalyse (Hersbach u. a., 2020; Olauson, 2018) verwendet, in Kombination mit dem OSTIA (Donlon u. a., 2012) Datensatz für Wasseroberflächentemperaturen. Das Modell wurde mit diesen Daten mit dem Grid-Nudging Verfahren angetrieben. Jedes Szenario wurde dabei in Einzelsimulationen von 37 x 10 Tagen durchgeführt. Als Grenzschichtschema wurde die MYNN-Parametrisierung (Nakanishi und Niino, 2009) in Kombination mit der Fitch-Windparkparametrisierung (Fitch u. a., 2012) verwendet. Die Daten wurden auf einem 2 km Gitter in ca. 10 relevanten Höhen und 10-min zeitlicher Auflösung ausgegeben. Das Modellsetup ist angelehnt an umfangreichen Erfahrungen und Optimierungen seitens des Fraunhofer IWES (z.B. Martin Dörenkämper u. a., 2015; Gottschall und M. Dörenkämper, 2021; B. Cañadillas u. a., 2022).

2.2.4 Evaluationsparameter

Zur Bewertung der Ausbauszenarien werden anschließend diverse Parameter evaluiert, um die Ergebnisse der Szenarien miteinander zu vergleichen. Dieses sind:

- **Annual Energy Production (AEP) / Produktion [TWh]:** Die Annual Energy Production (Deutsch: Jahresenergieertrag) bezeichnet den mittleren zu erwartenden Jahresenergieertrag auf den genannten Flächen. Sie kann ein Maß für die Flächeneffizienz sein, wenn unterschiedliche Szenarien mit gleicher Gesamtfläche betrachtet werden.
- **Volllaststunden [h]:** Die Volllaststunden geben wieder, wie viele Stunden im Jahr ein Windpark in Volllast produzieren müsste, um auf die erreichte AEP zu kommen. Sie sind daher ein Maß für die Effizienz der Energieproduktion pro installierter Leistung und damit der Hauptfaktor für die Ermittlung der Kosteneffizienz als auch der Ressourceneffizienz der Energieerzeugung. Die Volllaststunden sind ein Maß für die energetische, jedoch kein Maß für die ökonomische Effizienz.
- **Installierte Leistungsdichte [MW/km²]:** Sie beschreibt die installierte Kapazität pro Fläche geteilt durch die Größe der Fläche und ist ein Maß dafür, wie dicht die Flächen mit Windenergieanlagen beplant sind. Hohe installierte Leistungsdichten führen entsprechend generell zu geringeren

Volllaststunden. Analog zu der Definition, die vom BSH genutzt wird (BSH, 2021b), wird in diesem Bericht die korrigierte Leistungsdichte dargestellt, die sich auf, durch einen Pufferabstand vergrößerte Fläche bezieht.

- **Kapazitätsfaktor [%]:** Der Kapazitätsfaktor ist ein anderes Maß der Effizienz eines Windparks. Er beschreibt den prozentualen Anteil der Auslastung der Nennleistung und wird oft analog zu den Volllaststunden verwendet werden.

Ertragsausfälle, die nicht auf Windbedingungen, sondern technische Gründe zurückzuführen sind, wurden in keinem der Szenarien berücksichtigt. Die angegebenen Effizienzen und Erträge beziehen sich somit nur auf die Effizienz der Energieerzeugung durch den Wind und die Nachlaufeffekte.

3 Basisszenarien

Um das Ertragspotenzial und die Energieerzeugungseffizienz in den nicht von Nutzungskonflikten betroffenen Gebieten der deutschen AWZ abzuschätzen, wurden vier verschiedene Basisszenarien gerechnet. Die Flächenkulisse dieser Szenarien ist zusammengesetzt aus dem Gebietszuschnitt des Vorentwurfs des Flächenentwicklungsplans vom 17. Dezember 2021 (BSH, 2021b), unter Zunahme eines Gebiets in der Schifffahrtsstraße SN10 und der Bebauung in den Gebieten EN13-Nord und EN17-Nord, analog zur den Annahmen in der 2021 veröffentlichten Wasserstoffpotenzialstudie der Deutschen Windguard (Borrmann, Kruse und Wallasch, 2021).

Wie in der Methodik erläutert, wurden Recherchen zum voraussichtlichen Ausbau der Offshore-Windenergie in den deutschen Nachbarländern durchgeführt und die resultierenden Annahmen in einen entsprechenden Ausbau umgesetzt (siehe Kapitel 2 und dort die Abbildung 2.1). Da dieser Ausbau in den Nachbarländern in allen Szenarien gleich bleibt, wird hier nicht weiter darauf eingegangen.

Die vier Basisszenarien unterscheiden sich bei gleichbleibender Flächenkulisse in installierter Kapazität und Turbinentechnologie. Explizit wurden folgende Annahmen getroffen. Die betroffenen Flächen sind in Abbildung 2.1 gegeben:

0. Basis - *Installierte Kapazität AWZ: 69 GW:*

Das Basisszenario basiert auf den Planungen im Vorentwurf des FEP (BSH, 2021b) und 10 GW installierter Kapazität im Gebiet SN10 positioniert zentral in der Mitte der Schifffahrtsstraße zwischen Zone 3 und Zone 4, sowie insgesamt 700 MW installierter Kapazität in den Gebieten EN17-Nord und EN13-Nord. Von den insgesamt 69 GW sind etwa 4 GW in der Ostsee positioniert.

1. Variante SN10 - *Installierte Kapazität AWZ: 63 GW:*

Im zweiten davon abgeleiteten Szenario wurde die Kapazität im Gebiet der Schifffahrtsstraße SN10 bei gleichem Flächenzuschnitt um 6 GW auf 4 GW reduziert, um die Sensitivität der installierten Kapazität in diesem Gebiet auf den Ertrag und die Energieerzeugungseffizienz in den benachbarten Gebieten zu untersuchen.

2. Variante höhere Volllaststunden - *Installierte Kapazität AWZ: 60,5 GW:*

Dieses Szenario basiert bereits aus Erkenntnissen aus dem ersten Basisszenario (0. Basis). Um die Energieerzeugungseffizienz in den beplanten Gebieten ausgeglichener zu gestalten, wurde die Kapazität in ausgewählten Gebieten reduziert. Ziel war eine Mindesteffizienz von 3000 Volllaststunden in allen Gebieten zu erreichen, wobei die durchschnittliche Effizienz in der Deutschen Bucht bei rund 3600 Volllaststunden liegen sollte. Dieses entspricht etwa der Volllaststundenzahl in zurzeit (2022) voll ausgebauten Windparkclustern in der Deutschen Bucht.

3. Variante Modernisierung Bestandsparks - *Installierte Kapazität AWZ: 69,0 GW:*

Das letzte Basisszenario arbeitet mit denselben Kapazitäten wie das erste Basisszenario (0. Basis), allerdings werden für alle Nordsee-Windparks, die vor 2022 in Betrieb gegangen sind, die Bestandsanlagen durch modernisierte Offshore-Windenergieanlagen ersetzt (Repowering). Die Turbinentechnologie ist dabei die 30-MW Windenergieanlage, die auch auf allen anderen Flächen mit Inbetriebnahme nach 2035 eingeplant ist. Da die Kapazität in den Windparks gleich bleibt, reduziert sich die Anzahl von Windenergieanlagen dementsprechend.

Die betrachteten Szenarien beinhalten dabei jeweils zwei Simulationen für die Nordsee und die Ostsee, wobei die Parameter im Bereich der Ostsee teilweise nicht geändert wurden. Abbildung 3.1

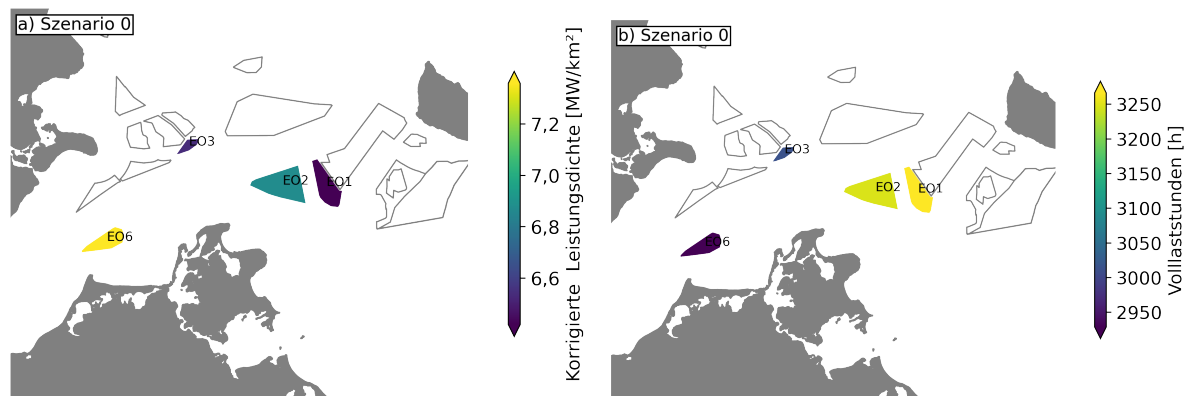


Abbildung 3.1 Korrigierte Leistungsdichte (links) und Volllaststunden (rechts) in den Windparks der Ostsee im Basisszenario (Szenario 0).

zeigt die Flächenkulisse der in der Ostsee betrachteten Flächen der Deutschen AWZ und deren Leistungsdichte und die resultierenden Volllaststunden im Szenario 0.

Die Flächen, die von Änderungen in den jeweiligen Szenarien, wie oben beschrieben betroffen sind, sind in Abbildung 3.2 für den Bereich der Deutschen Bucht markiert. Aus dieser Abbildung werden auch die veränderten korrigierten Leistungsdichten in den unterschiedlichen Szenarien ersichtlich.

Tabelle 3.1 fasst die Ergebnisse der Basisszenarien zusammen. Aus dem Vergleich der Kennzahlen der Szenarien ergeben sich unterschiedliche Erkenntnisse zur Bewertung des Offshore Ausbaus. Im Vergleich zwischen dem Szenario 0 zu den Szenarien 1 und 2 zeigt sich, dass eine Reduktion der installierten Kapazität auf gleichbleibender Fläche zu einer Reduktion des Ertrages und damit der Flächeneffizienz, allerdings gleichzeitig zu einer Erhöhung der Volllaststunden und damit der Kosteneffizienz, führt. Diese Abhängigkeiten wurden bereits in vorherigen Studien aufgezeigt (Agora Energiewende und Agora Verkehrswende, 2020; Borrmann, Kruse und Wallasch, 2021). Die Ergebnisse dieser Studie unterstützen die Aussage, dass bei den derzeit geplanten Leistungsdichten in Nord- und Ostsee keine Sättigung der Energieerzeugung stattfindet und eine Erhöhung der Leistungsdichte weiterhin zu einer Erhöhung der Energieerzeugung bei sinkender Kosteneffizienz führen würde.

Tabelle 3.1 Ergebnisse der Basisszenarien für die gesamte deutsche AWZ in Bezug auf die Evaluationsparameter.

Szenarien Nord und Ostsee	Inst. Leistung [GW]	Produktion [TWh]	Volllaststunden [h]
0 – Basisszenario	69,0	232,7	3372
1 – Variante SN10	63,0	215,1	3414
2 – Variante höhere Volllaststunden	60,5	216,7	3582
3 – Variante Modernisierung Bestandsparcs	69,0	237,9	3447

Der Vergleich zwischen den Szenarien 1 und 2 verdeutlicht, dass es Spielräume bei der Effizienz der Energieerzeugung durch eine Umverteilung der Erzeugungskapazität auf den Gebieten gibt. Der Energieertrag der Ausbauvariante in Szenario 2 ist um etwa 1 % höher als der Ertrag der Variante aus Szenario 1 bei 4 % geringerer installierter Gesamtleistung. In Szenario 1 wurde im Vergleich zum Basisszenario die Kapazität in dem Gebiet SN10 um 6 GW von einer Leistungsdichte von 8 MW/km²

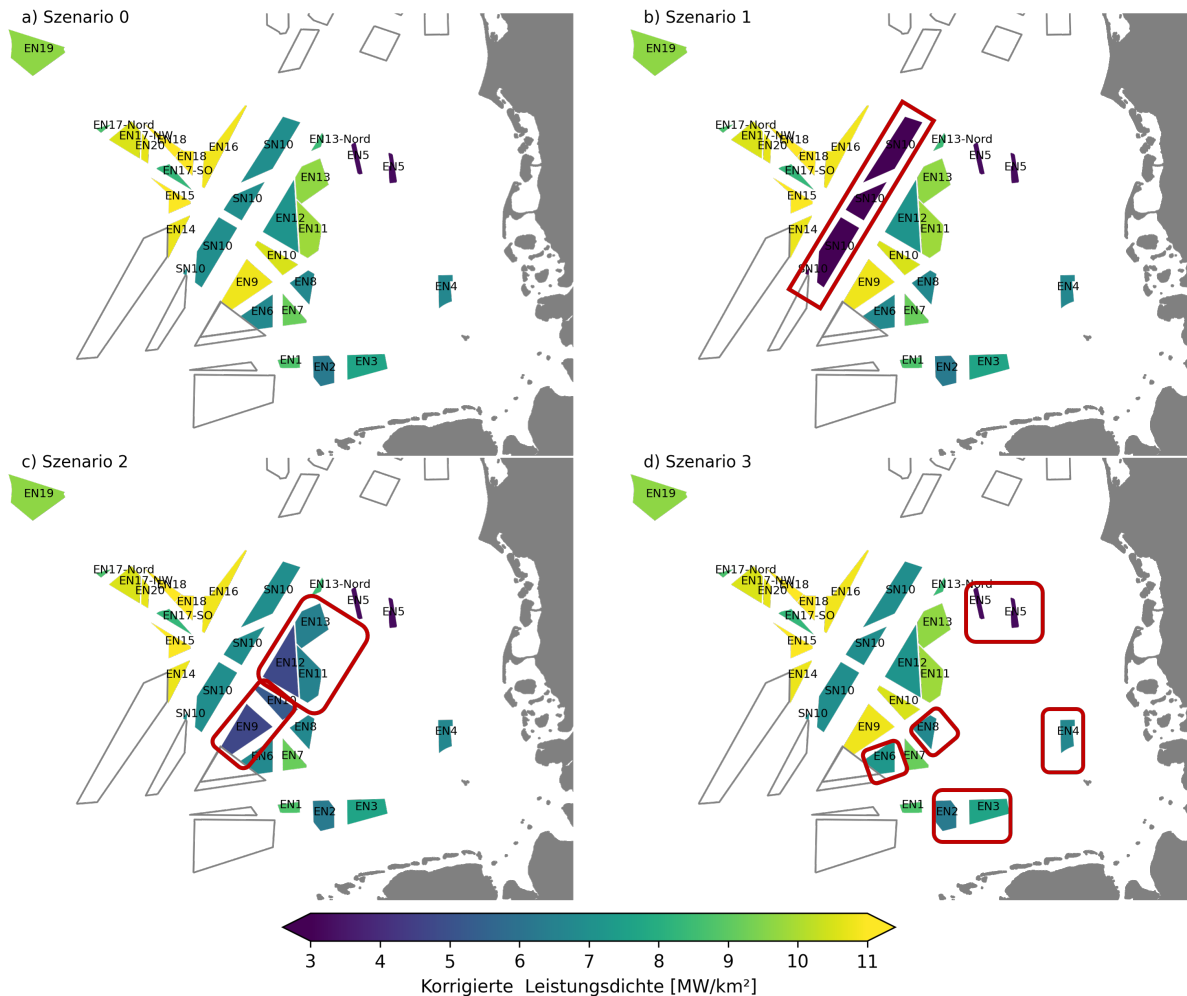


Abbildung 3.2 Korrigierte Leistungsdichte in den Windparks für die Basisszenarien. Rote Rahmen kennzeichnen die Flächen, in denen Veränderungen im Vergleich zum Ausgangsszenario (0. Basis - oben links) vorgenommen wurden.

auf 3,2 MW/km² reduziert (eine Leistungsdichte vergleichbar zu einigen anderen Ländern, etwa zu den Planungen in den Energy Islands in Dänemark). In Szenario 2 dagegen wurde eine Reduktion von insgesamt 8,5 GW in den Gebieten der Zone 3 vorgenommen. Dies entspricht einer Reduktion der Kapazität um mehr als 40 % bei einer jedoch deutlich unterproportionalen Reduktion in der Produktion und einer Erhöhung in den Volllaststunden.

Motivation für die deutliche Reduktion in der Kapazität war die geringe Energieerzeugungseffizienz unter 3000 Volllaststunden in den Gebieten der Zone 3 (vgl. Abbildung 3.3, bedingt durch die laut Vorentwurf FEP (BSH, 2021b) geplante hohe Leistungsdichte und die geringen Abstände zueinander und zu den geplanten Windparks in den Niederlanden. Der Vergleich zwischen den beiden Szenarien zeigt, dass es noch Optimierungspotenzial gibt, welches auch bei der bestehenden Flächenkulisse umgesetzt werden kann.

Das Szenario 3 deutet im Vergleich zum Basisszenario das erhöhte Energiepotenzial in den Flächen der Bestandwindparks allein durch eine Modernisierung der Windenergieanlagen an. Für die gesamte deutsche AWZ bedeutet die Modernisierung der Bestandwindparks eine Steigerung der AEP um 2,2 %. Wenn man nur die Gebiete betrachtet, auf denen die Modernisierung von den jetzigen 3 bis 8 MW Anlagen mit Turmhöhen um die 100 m auf die 30-MW-Anlage mit einer Turmhöhe

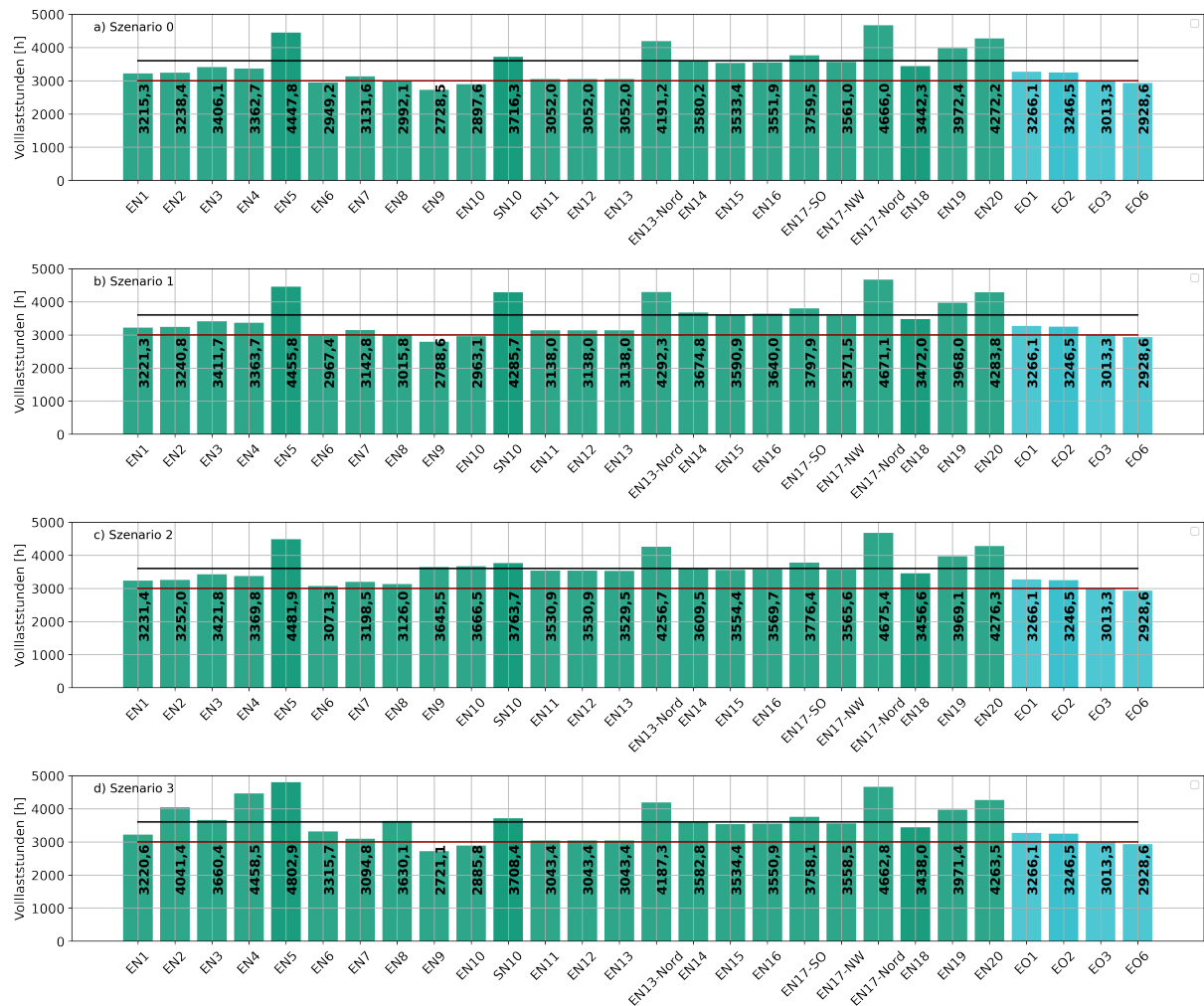


Abbildung 3.3 Volllaststunden in den einzelnen Windparks der Nord- und Ostsee für die Basisszenarien.

von 193 m und Rotordurchmessern von 338 m stattfindet, resultiert in diesen Flächen sogar einen Mehrertrag von 18 %.

Aus den Ergebnissen der Basisszenarien ergeben sich Ansätze, wie eine weitere Steigerung der Off-shore Windenergieerzeugung durch eine Erhöhung der Erzeugungskapazität erreicht werden kann. Eine Erhöhung der Kapazität in den bestehenden Flächen stellt insoweit eine Lösung dar, dass die Gesamtenergieerzeugung erhöht werden würde. Allerdings würde durch den stark abnehmenden Grenzertrag hinsichtlich der Gesamtenergieerzeugung bei höherer Energiedichte dabei eine Kostensteigerung und eine ineffizientere Nutzung der Materialien zum Bau eines Windparks in Kauf genommen werden.

Eine Alternative wäre eine Erweiterung der zur Windenergieerzeugung nutzbaren Flächen, um darauf neue Kapazitäten zu installieren. Die potenziellen Interessenkonflikte, die dabei zu lösen wären, werden im nächsten Kapitel erläutert.

4 Co-Nutzungspotenziale: Ergebnisse der Gespräche mit den Interessensgruppen in der AWZ

Die Flächen in der AWZ sind nach ROP (BSH, 2021a) ihren Nutzungsformen auch aus Gründen der Planbarkeit langfristig zugewiesen. Ein Großteil der Flächenvergaben erfolgen aufgrund gesetzlicher Regelungen, internationalen Abkommen und festgeschriebenen Verpflichtungen, die auch mittelfristig nicht veränderbar sind. Vor diesem Hintergrund sind Co-Nutzungsbedingungen zu diskutieren und evaluieren. Die vorliegende Studie definiert Co-Nutzung als eine Beibehaltung der jetzigen Nutzungsform bei gleichzeitiger Nutzung für die Windenergieerzeugung. Andere Co-Nutzungsoptionen wurden im Rahmen der Studie nicht betrachtet. Eine solche Co-Nutzung kann nicht trivial sein, sondern erfordert immer eine enge Abstimmung und Kooperation zwischen den Nutzenden. Vor diesem Hintergrund fanden Gespräche mit den jeweiligen Interessengruppen der derzeitigen Offshore-Flächennutzung statt.

In den im Rahmen der Studie geführten Gesprächen zu Co-Nutzungs-Optionen mit den verschiedenen Interessengruppen wurde schnell deutlich, dass die Umsetzung von Co-Nutzungen kein einfaches Unterfangen ist. Alle Nutzungsgruppen haben ihr berechtigtes Interesse in den Gebieten, die ihnen laut ROP zugewiesen sind (BSH, 2021a). Zum Teil gibt es auch klare rechtliche Grundlagen für die Existenz der ausschließlichen Nutzung in diesen Gebieten. Im Allgemeinen entstand daher der Eindruck, dass eine Co-Nutzung nur dann umgesetzt werden kann, wenn möglichst beide Seiten von den Bedingungen profitieren. Dieses lässt sich auch nur dann mittelfristig bewerkstelligen, wenn ein kontinuierlicher Kommunikationsprozess aufgebaut bzw. aufrechterhalten wird.

Nachfolgend wird auf die Ergebnisse der Diskussionen zu verschiedenen Co-Nutzungsoptionen je nach Nutzungsform in unterschiedlichen Abschnitten eingegangen.

4.1 Naturschutz

In Nord- und Ostsee gibt es weite Flächen, die aus Naturschutzgründen für eine Nutzung durch die Offshore-Windenergie im Moment gesperrt sind. Die Gründe in Bezug auf die jeweiligen Flächen sind jedoch recht unterschiedlich. Meist bezieht sich der Naturschutz, der auf Basis FFH-Richtlinie zum Teil als Natura 2000 Flächen (Der Rat der Europäischen Gemeinschaften, 1992) ausgewiesen wurde, auf ganz bestimmte Arten, die in dem jeweiligen Gebiet geschützt werden sollen und müssen.

In den Abbildungen 4.1 und 4.2 sind die durch Naturschutz geschützten Gebiete in der Deutschen Bucht und südlicher Ostsee aus dem GeoSeaPortal des BSH (BSH, 2022) gemäß ROP dargestellt.

Gespräche zu Co-Nutzungspotenzialen und Hindernissen wurden u.a. mit Vertreter:innen von verschiedenen Naturschutzverbänden geführt. Die wesentlichen Erkenntnisse aus diesen Gesprächen waren:

Die Biodiversität bei Meereslebewesen steht so stark unter Druck, dass eine weitere Einschränkung durch jedwede weitere Form von Nutzung wichtiger Flächen sofort existenzbedrohend, für bestimmte Arten werden kann. Vor diesem Hintergrund wurde eine direkte Form der Nutzung grundsätzlich abgelehnt, auch wenn grundsätzlich anerkannt wurde, dass die Offshore-Windenergienutzung ein zentrales Element der Energiewende und damit zur Begrenzung des Klimawandels ist. Dieser setzt schlussendlich gleichfalls die Biodiversität unter Druck.

Allerdings wurde in den Gesprächen auch angemerkt, dass es seitens der Verbände bzw. Stakeholder durchaus Flexibilität geben könnte, wenn Arten, die auch aus ganz anderen Gründen stark

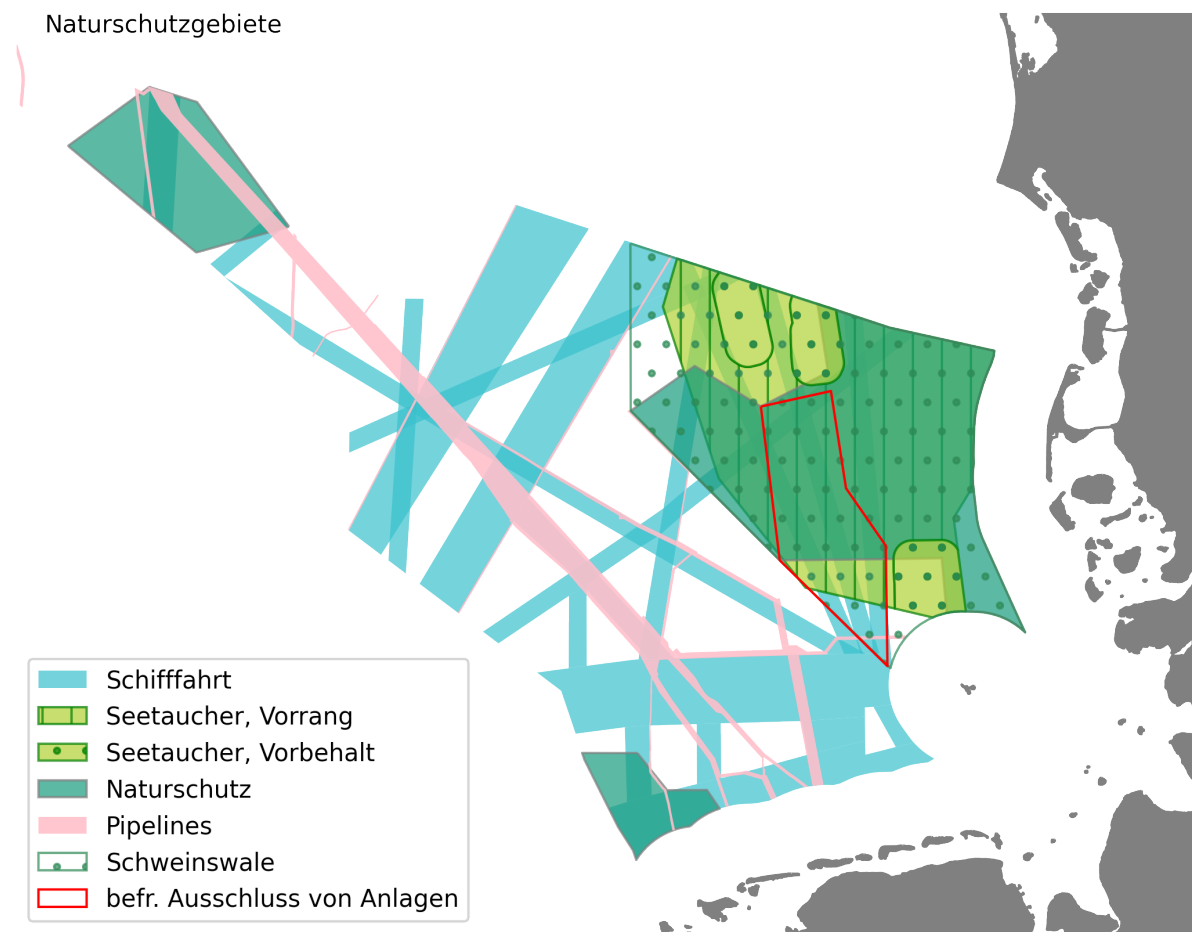


Abbildung 4.1 Durch Naturschutz geschützte Gebiete in der Nordsee gemäß Raumordnungsplan. Zur Orientierung sind Schifffahrtsstraßen und Gebiete von Pipelines mit eingeblendet.

unter Bestandsdruck stehen, an anderen Stellen deutlich entlastet würden. Als Möglichkeiten zur Verbesserung der Lebensbedingungen bedrohter Arten wurden unter anderem genannt:

- **Eutrophierung:** Eine deutliche Reduzierung der Eutrophierung der Meere und des Plastikeintrags. Durch den Eintrag aus den Flüssen besonders auch in der Deutschen Bucht und südlichen Ostsee verschlechtert sich die Wasserqualität erheblich. Eine Reduzierung könnte für viele Arten im Meer eine deutliche Verbesserung bedeuten, sodass Bestände sich erholen können.
- **Sedimente:** Eine klare Verringerung von Sedimentfahnen. Diese können auch beim Bau von Windenergieanlagen auftreten. Um dies zu vermeiden wäre entsprechender Forschungsaufwand nötig. Die Hauptquelle von Sedimentfahnen liegt jedoch beim Abbau von Sand bzw. der Verklappung von Baggergut.
- **Rohstoffabbau:** Eine Verringerung des Rohstoffabbaus im Meer, welcher u.a. beim Sandabbau einen massiven Eingriff für die Bodenlebewesen darstellt. Hier wäre eine deutliche Senkung des Verbrauchs an Sand anzustreben.
- **Fischerei:** Eine Verringerung der Schleppnetzfischerei.
- **Vogelarten:** Eine Verbesserung von Brutbedingungen von kritischen Vogelarten in ihren Brutgebieten. Dies bezieht sich auch auf Arten, die nicht in Deutschland brüten, aber trotzdem als geschützte Arten in der AWZ auftauchen, wie z.B. bestimmte Seetaucherarten.

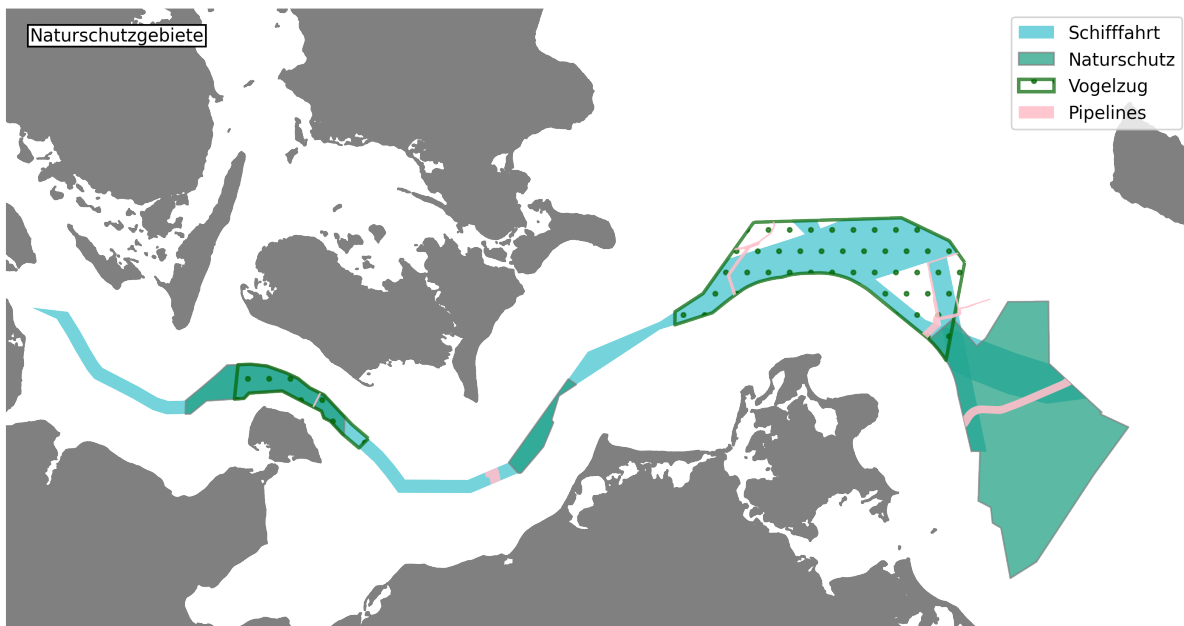


Abbildung 4.2 Durch Naturschutz geschützte Gebiete in der Ostsee gemäß Raumordnungsplan. Zur Orientierung sind Schifffahrtsstraßen und Gebiete von Pipelines mit eingeblendet.

- **Schiffsverkehr:** Eine Verminderung des Schiffsverkehrs in kritischen Gebieten durch eine bessere Lenkung des Verkehrs.

Gleichzeitig stellen all diese Bedingungen keinen Automatismus dar, nach dem dann in bisher geschützten Gebieten Windenergieanlagen gebaut werden können. Wie bspw. dem Bericht des Bundesamtes für Naturschutz zur "Doggerbank" zu entnehmen ist (Krause u. a., 2020), ist der Zustand des Gebiets im Moment in zentralen Bereichen schlechter als der anzustrebende Zustand. Erst, wenn durch allgemeine Verbesserungen und einem Plan, der eine wirklich dem Gebiet angepassten naturverträgliche Bebauung durch WEA ermöglicht, könnte die Nutzung in Betracht kommen. Dieses könnte beispielsweise für die technischen Anforderungen von zu installierenden WEA bedeuten:

1. Keine Rammungen von Monopiles, sondern die Verwendung anderer Gründungstechniken in den Gebieten,
2. Maßnahmen zur Minimierung von Sedimentaufwirbelungen,
3. Minimierung der eingreifenden Maßnahmen, die zum Abtransport der gewonnenen Energie führen. Dies kann sowohl eine reine Wasserstoffgewinnung ohne Netzanbeindung sein oder eine optimierte Kabelführung,
4. Maßnahmen zur Reduktion des Schiffsverkehrs im Windpark,
5. Bau in naturverträglichen Abschnitten,
6. Vermeidung von Doppelinstallationen,
7. Maßnahmen zur Vermeidung von Vogelschlag, insbesondere bei Zugvogelaktivitäten und
8. eine weitere Überlegung könnte sein, die Windparks so zu gestalten, dass die Natur mitgedacht wird. Hier könnte beispielsweise der Bewuchs durch Tiere an den Anlagen gezielt

gefördert, statt verhindert werden. Solch ein Vorgehen wurde aber nicht von allen geteilt, da ein Entfernen der Anlagen nach dem Betrieb wieder einen Eingriff in die Natur bedeuten würde.

Grundsätzlich wurde für den Bau aller Parks auch außerhalb der bisher geschützten Gebiete als wichtig gesehen, dass ein Eingriff in die Natur minimiert werden sollte, entsprechend der Forderungen Offshore Coalition for Energy and Nature (OCEaN) (OCEaN, 2021). Darin ist auch zentral der weitere Dialog zwischen den Akteursgruppen genannt, zu denen in Zukunft auch die Meeresbeauftragte Person des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) gehören sollte.

Vor diesem Hintergrund ist deutlich, dass eine Installation von Windparks in für den Naturschutz vorgesehenen Flächen problematisch ist, jedoch Bedingungen geschaffen werden könnten, die diese erlauben. So ist die Energiegewinnung aus Windenergie explizit als ein Ausnahmegrund für Projekte im Schutzgebiet "Doggerbank" in der Verordnung über die Festsetzung des Naturschutzgebiets "Doggerbank" in §5 genannt (Bundesgesetzblatt, 2017).

Die hier zusammengefasste Diskussion führte zu Co-Nutzungsszenarien unter der Berücksichtigung von Flächen, die derzeit der Nutzungsform Naturschutz zugeordnet sind (siehe Kapitel 5).

4.2 Militärische Nutzung

Weite Flächen in Nord- und Ostsee sind für eine militärische Nutzung vorgesehen. Diesen Gebieten sind grobe Nutzungsarten zugeschrieben, aus Gründen der militärisch notwendigen Geheimhaltung sind Details über die akute Nutzung nicht öffentlich bekannt. Auf dem "Wind energy, defence and aviation" Workshop der Wind Europe Konferenz in Kopenhagen sowie in dem Gespräch mit ORE Catapult wurde deutlich, dass es in Europa durchaus unterschiedliche Umgangsformen des Militärs mit den Windparkbetreibern gibt. Nach Angaben von ORE Catapult ist in Großbritannien sogar ein Offizier abgestellt, um den Kontakt zu halten und kritische Themen gemeinsam zu bearbeiten. Dieses gibt es in Deutschland bisher nicht.

In den Abbildungen 4.3 und 4.4 sind die durch militärisch genutzten Gebiete in der Deutschen Bucht und südlicher Ostsee aus dem GeoSeaPortal des BSH gemäß ROP dargestellt.

Im Rahmen der Studie wurden Gespräche mit einem Vertreter der Bundesmarine bzw. dessen Vertretung (ab Mai 2022) geführt. Es fanden mehrere Gespräche im Zeitraum von Januar bis Mai 2022 statt. Dabei gab es unterschiedliche Positionen vor dem Beginn des Krieges in der Ukraine und nach dem Beginn am 24.2.2022.

Grundsätzlich hat die Bundeswehr historisch aus ihrer Sicht schon viele Zugeständnisse in Bezug auf Flächen gemacht. Schließlich waren für die militärische Nutzung vor dem Beginn der Windenergienutzung deutlich weniger Einschränkungen vorhanden. Die Bundeswehr verfolgt dabei dennoch ihren verfassungsgemäßen Auftrag der Landesverteidigung. Diesen hat sie unbedingt zu erfüllen.

Grundsätzlich standen die Gesprächspartner der Bundeswehr vor diesem Hintergrund der Nutzung von Windenergie durchaus aufgeschlossen und positiv gegenüber, da die Dezentralität der Energieversorgung zu einer stärkeren Resilienz führt. Allerdings sind diesbezüglich die wenigen Anbindungspunkte der Offshore-Windenergie nachteilig. Es werden auch viele Synergiepunkte bei einer Co-Nutzung gesehen. Die Bundeswehr kann jedoch keine militärischen Geräte auf Offshore-Windanlagen installieren, da die AWZ kein deutsches Hoheitsgewässer ist. Jedoch könnte ein Zugriff auf Daten der Anlagen ein Potenzial für die Bundeswehr darstellen. Dies gilt sowohl für standardmäßig aufgezeichnete Wetterdaten, als auch für andere Sensorik. Eine eingehende gemeinsame

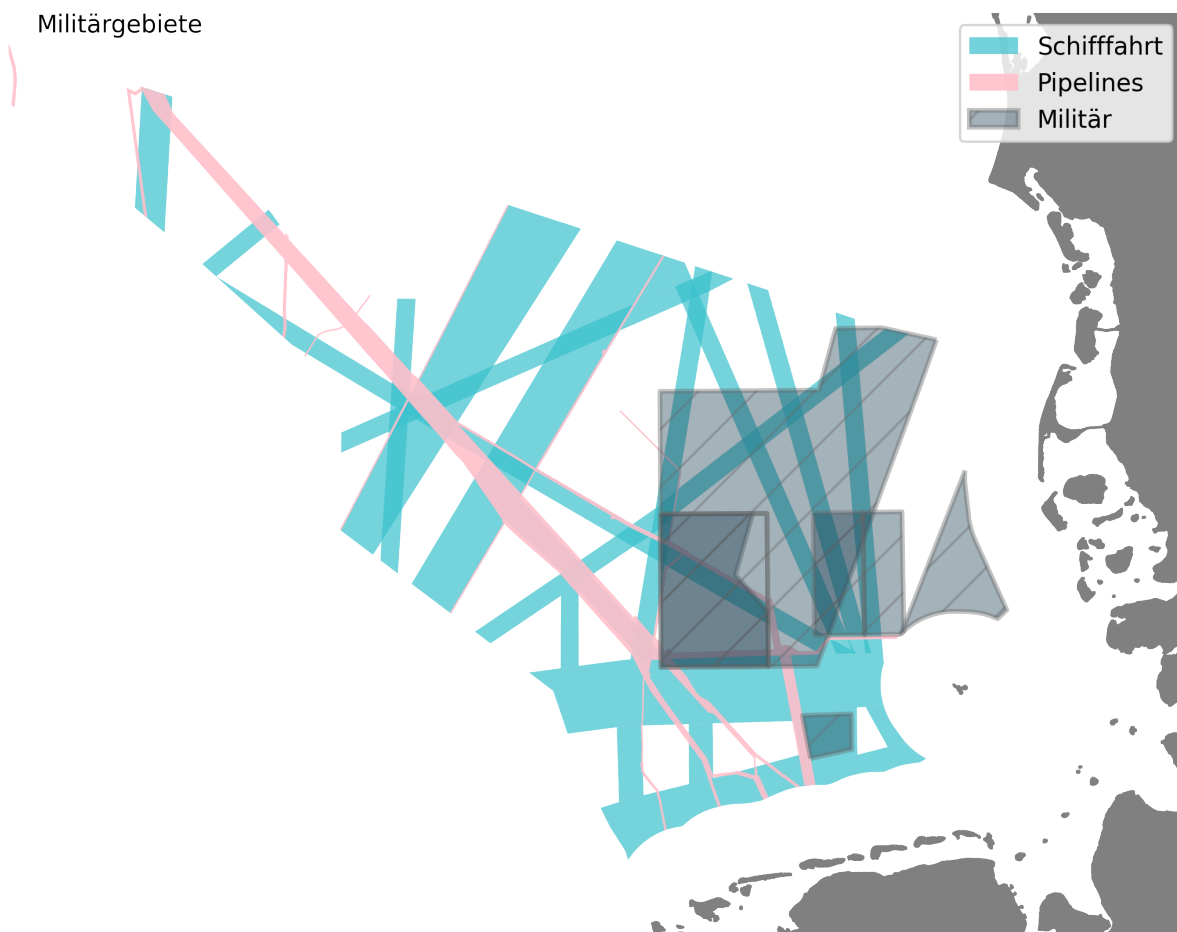


Abbildung 4.3 Militärisch genutzte Gebiete in der Nordsee nach Raumordnungsplan. Zur Orientierung sind Schifffahrtsstraßen und Gebiete von Pipelines mit eingeblendet.

Diskussion wird hier als sehr vielversprechend gesehen. Auch die Nutzung des Mobilfunkstandards 5G an den Standorten der Windparks ist für die Bundeswehr interessant.

Zudem wurde diskutiert, ob technische Anpassungen der Anlagen, die zum Teil vielleicht noch entwickelt werden müssen, die Möglichkeit einer Co-Nutzung eröffnen würden. Dies wurde in den Gesprächen vor Kriegsbeginn durchaus als eine Option gesehen. Technische Lösungen könnten sich bspw. für das Problem der Kabelführung in Bezug auf die U-Bootererkennung finden lassen. Die einzelnen Problemlagen der Bundeswehr brauchen jeweils eine vertiefte Diskussion, welche die technischen Möglichkeiten in der Windenergieentwicklung einbezieht und beides aufeinander abstimmt. Dies wurde als ein gangbarer Weg gesehen, wenn der politische Wille vorhanden ist.

Unklar ist jedoch, wie im Falle einer potenziellen Co-Nutzung mit Haftungsfragen umgegangen werden soll. Die Bundeswehr übt in den Gebieten unter anderem auch regelmäßig Extremsituationen, die unter Umständen nicht einfach zu kontrollieren sind. Dieses bedeutet auch, dass im Falle von Trainings durch die Windparks hindurchgeschossen wird. Hier müsste klar sein, wer für mögliche Schäden aufkommt.

Vorgesehen waren unter anderem Diskussionen einzelner konkreter Vorschläge. Durch den Einmarsch Russlands in der Ukraine gab es dann jedoch einen Wechsel der Politik. So steht das Verteidigungsministerium im Moment auf dem Standpunkt, dass eine Abgabe von Flächen derzeit

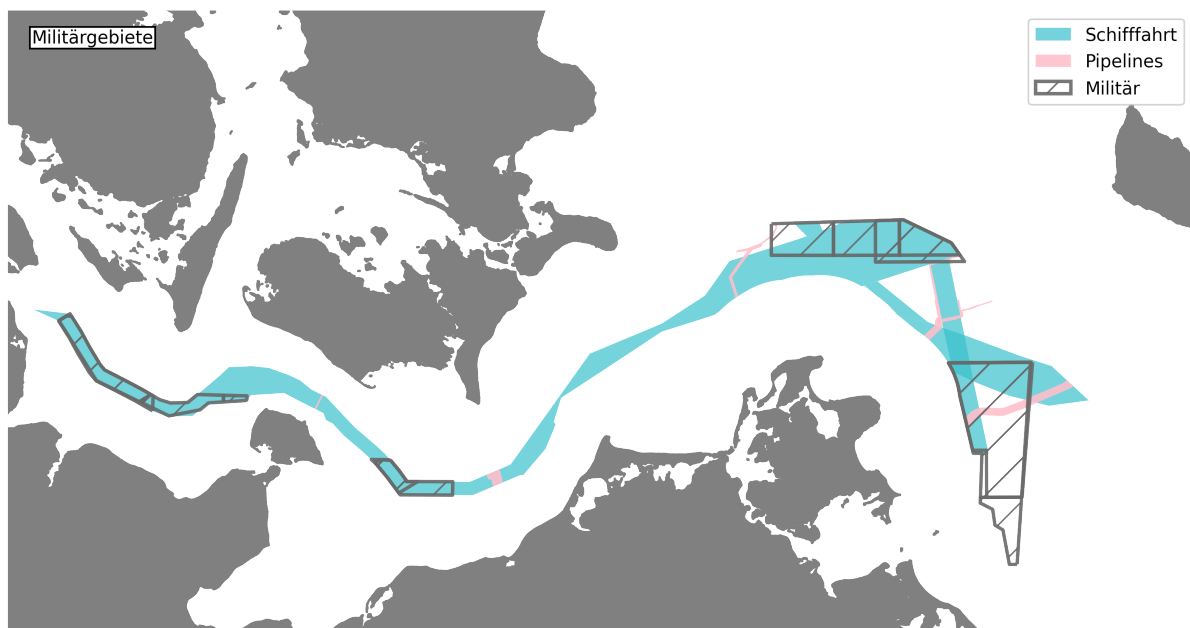


Abbildung 4.4 Militärisch genutzte Gebiete in der Ostsee nach Raumordnungsplan. Zur Orientierung sind Schifffahrtsstraßen und Gebiete von Pipelines mit eingeblendet.

nicht möglich sei, wobei unklar ist, was dies für eine echte Co-Nutzung heißen würde, welche der Bundeswehr weiterhin die Nutzung der Flächen erlauben würde.

Aufgrund der vielen möglichen Synergien, scheint aber eine weitere Diskussion für beide Seiten sinnvoll. Da es sich um Flächen handelt, die eher in 20 Jahren für einen Ausbau in Betracht gezogen würden und die Weltlage sich in dem Zeitraum wieder ändern kann, wurde die Position des Verteidigungsministeriums als eine Position für den jetzigen Zeitpunkt wahrgenommen, die weitere Gespräche erfordert. Allerdings wird auch in Zukunft eine weitere Co-Nutzung sehr klare Bedingungen der Bundeswehr erfüllen müssen.

Aus diesen Gründen wurde in den Co-Nutzungsszenarien auch Flächen der derzeitigen Nutzungsform Naturschutz betrachtet (siehe Kapitel 5).

4.3 Fischerei

In Bezug auf die Fischerei wurde mit einer Vertreterin des Johann Heinrich von Thünen Instituts gesprochen. Dazu hat das Fraunhofer IWES auch am Workshop "Human Stressors in the North Sea - Foresight Workshop" des Projekts "Multiple Stressors of North Sea Lives" (MuSSeL) am 28.3.2022 teilgenommen, welcher sich allgemein mit dem Problem der Interaktion von verschiedenen Nutzungen der Nordsee mit den dortigen Lebewesen beschäftigte.

Das Thünen Institut selbst führt Fischereiforschung durch. Das heißt, es erforscht zum Beispiel die Nutzung von Aquakulturen und deren Möglichkeiten und Technologiegrenzen (Galparsoro u. a., 2020; Gimpel, Stelzenmüller, Töpsch u. a., 2018). Der Hintergrund dazu liegt unter anderem darin, dass insbesondere die küstennahe Fischerei schon heute unter extrem prekären Bedingungen arbeiten muss. Starke internationale Konkurrenz durch die großen Hochseefischereischiffe steht stark unter Druck stehenden Beständen an Meerestieren in den küstennahen Gewässern gegenüber. Die Bestände werden daher von der EU durch Fangquoten geschützt, was die auf kontinuierliche Einnahmen angewiesene Fischerei wirtschaftlich noch mehr unter Druck setzt. So hat die Anzahl der Betriebe in den letzten Jahren stark abgenommen. Der Trend ist bisher ungebrochen.

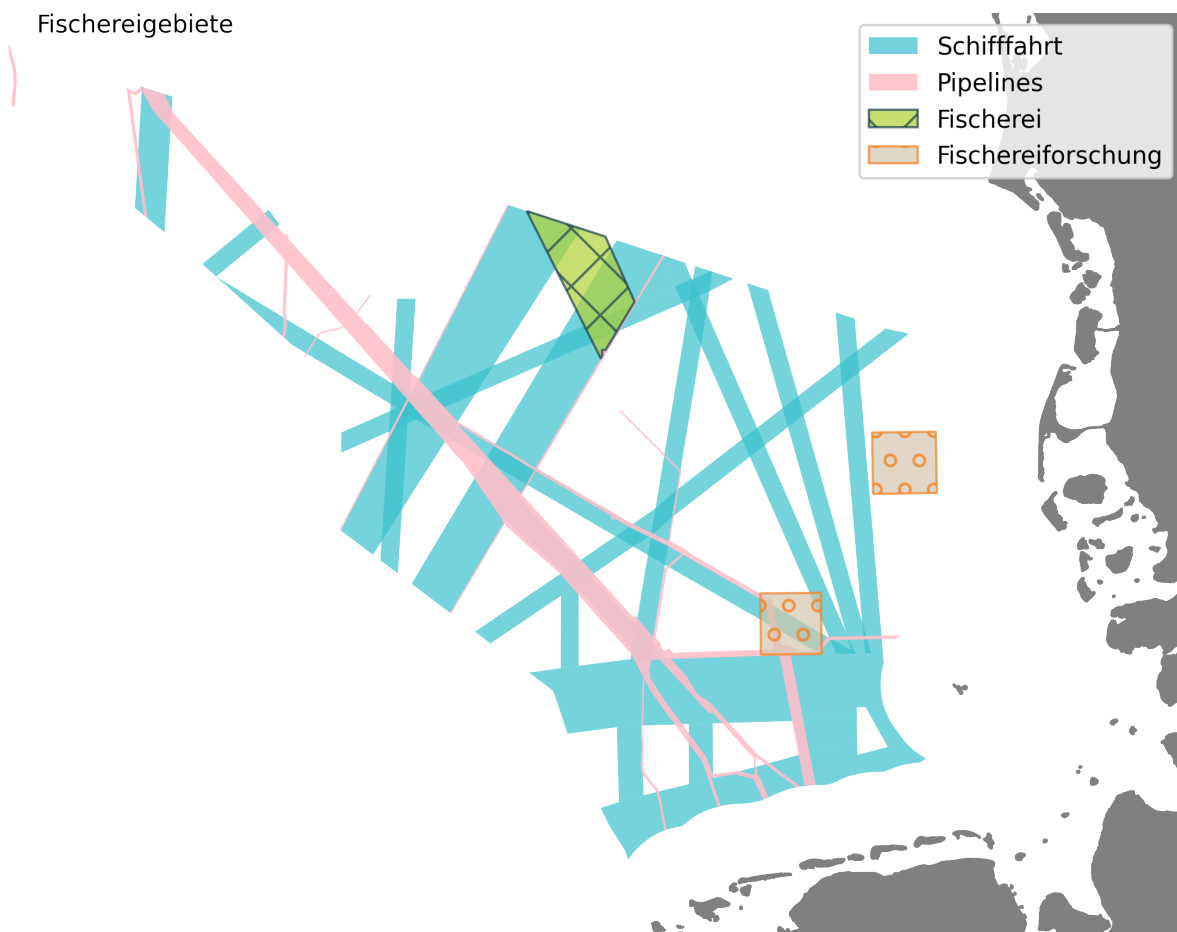


Abbildung 4.5 Durch Fischerei und Fischereiforschung genutzte Gebiete in der Nordsee gemäß Raumordnungsplan. Zur Orientierung sind Schifffahrtsstraßen und Gebiete von Pipelines mit eingeblendet.

In den Abbildungen 4.5 und 4.6 sind die durch Naturschutz geschützten Gebiete in der Deutschen Bucht und südlicher Ostsee aus dem GeoSeaPortal des BSH gemäß ROP dargestellt.

Unter diesen Bedingungen ist eine weitere Einschränkung der Fanggebiete oder Fangmethoden für viele Betriebe nicht einfach hinnehmbar. Allerdings ist allein durch die Fangquotenregelung und den Bestandsschutz der Arten unklar, ob diese Einschränkungen in den nächsten 10 Jahren unabhängig von der Windenergienutzung nicht doch kommen.

Vor diesem Hintergrund wurden vor allem zwei Optionen für eine Co-Nutzung durch Windenergie in Fischereigeieten diskutiert:

- Es wäre zu klären, ob Windparks nicht so planbar wären, dass die Einschränkung für die Fischerei auf ein Minimum reduzierbar wäre. Auch müsste geklärt werden, wann und unter welchen Bedingungen Fischereiboote sich wo in einem Windpark gefahrlos bewegen könnten.
- Wegen der schwierigen Bestände, wäre zu klären, ob nicht eine Nutzung der Windparks für Aquakulturen für das Auskommen der Fischereibetriebe die bessere Alternative wäre. Zwar würden dann andere Arten "befischt", jedoch könnte so auf komplizierte und ggf. doch Risiko behaftete Fischerei im Bereich von Windparks verzichtet werden. Gleichzeitig würde auch die von den Naturschutzverbänden als problematisch gesehene Bodenschleppnetzfischerei wegfallen.

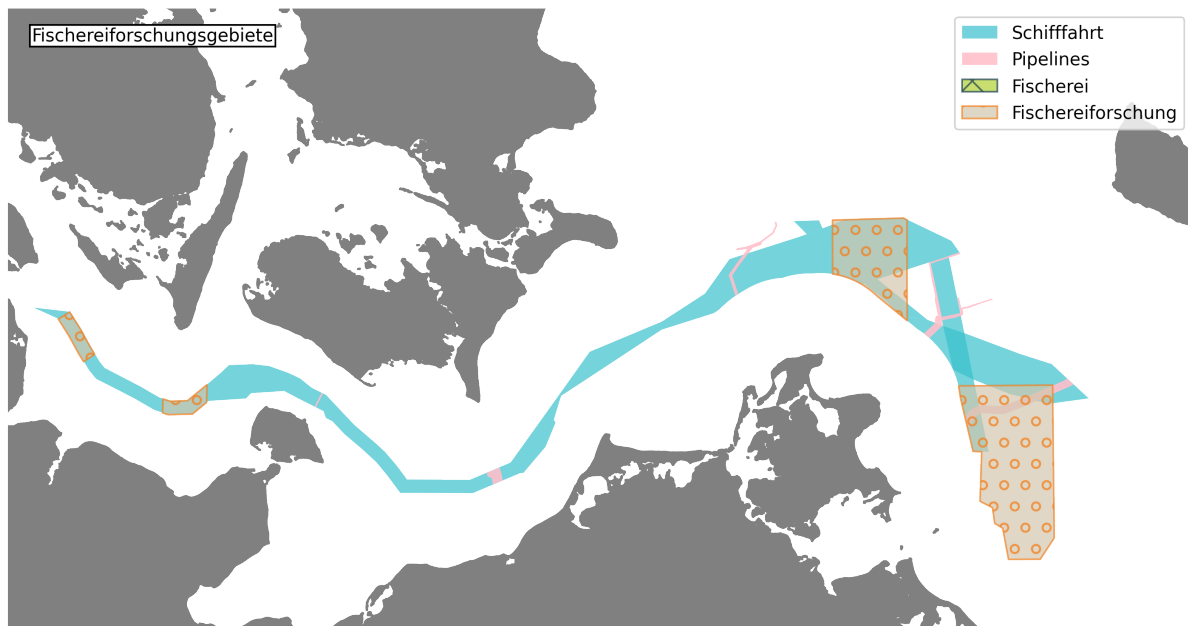


Abbildung 4.6 Durch Fischerei und Fischereiforschung genutzte Gebiete in der Ostsee gemäß Raumordnungsplan. Zur Orientierung sind Schifffahrtsstraßen und Gebiete von Pipelines mit eingeblendet.

Vor diesem Hintergrund ist auch die Forschung des Thünen Instituts und anderer internationaler Akteure zu verstehen. Tatsächlich ist die Co-Nutzung von Windparks mit Aquakultur, der Bereich der Co-Nutzung, in dem am meisten publiziert wurde. Hier kann also auf ein gewisses Basiswissen bereits zurückgegriffen werden.

Ein weiterer Diskussionspunkt war die Co-Nutzung im Bereich von Fischereiforschungsgebieten. Davon gibt es mehrere in der AWZ, sowohl in der Nord- als auch Ostsee. Diese gestaltet sich wiederum schwierig. Der Hintergrund ist, dass in den Gebieten langfristig durch immer gleiche Fangmethoden die Bestände und Zustände der verschiedenen Arten erhoben werden. Veränderungen im Ablauf könnten die wissenschaftlichen Ergebnisse gefährden. Allerdings wurde dem Problem in einem Gebiet schon dadurch begegnet, dass dort langfristig die Methode umgestellt wurde und die Zahlen gegenüber der alten Methode statistisch korreliert wurden. Daher ließe sich über einen längeren Zeitraum vermutlich auch in anderen Gebieten die wissenschaftliche Methodik umstellen.

4.4 Schifffahrt

In Bezug auf Schifffahrt gab es unabhängig von diesem Projekt schon Überlegungen zur Schifffahrtsstraße SN10, wie zum Beispiel auch in der Wasserstoff-Studie der Deutschen Windguard berücksichtigt (Borrmann, Kruse und Wallasch, 2021). Die Schifffahrtsstraßen sind in Abbildung 4.3 in Form von dunkelblauen Flächen hinterlegt.

Darüber hinausgehend wurde schnell klar, dass die Schifffahrtsstraßen Routen sind, welche durch internationale Vereinbarungen festgelegt wurden. Dabei besteht aus Sicherheitsgründen die Notwendigkeit eines bestimmten Mindestabstands zwischen Schifffahrtsstraße und Bauwerken, um Havarien zu vermeiden. Durch technische Neuerungen auf den Schiffen, kann dieser Abstand sich in Zukunft möglicherweise verringern, wodurch die Fläche SN10 als ein möglicher Bebauungsgrund für die Windenergienutzung in Betracht kommt. Daher wurde diese Fläche hier in allen Szenarien berücksichtigt. Weitere Flächen sind aber vor diesem Hintergrund auch langfristig nicht in Aussicht.

5 Potenziale bei erweiterten Flächen

In diesem Kapitel werden die Energieerzeugungspotenziale einer Erweiterung des Windenergieausbaus durch Co-Nutzung mit anderen Flächennutzern anhand von angenommenen potenziellen Szenarien berechnet. Die Szenarien sollen ausschließlich einer Ermittlung des zusätzlichen Potenzials dienen und stellen keinen Vorschlag zu einer konkreten Bebauung der Flächen mit Windenergieanlagen dar, weder in Teilen noch in ihrer Gesamtheit. Die Auswahl der Flächen erfolgte in Abstimmung mit den Auftraggebern (BWO/BDEW) anhand einer grundsätzlich gesehenen Möglichkeit einer Co-Nutzung auf diesen Flächen (siehe Kapitel 4), ohne dass die damit einhergehenden Schwierigkeiten und möglicherweise bestehenden Zielkonflikte annähernd abschließend geklärt werden konnten. Ziel der Untersuchungen war zu evaluieren, was eine Bebauung für das Ertragspotenzial und die Effizienz der Offshore-Windenergieversorgung bedeuten würde.

Die Potenzialflächen, welche in den unterschiedlichen Szenarien untersucht werden, wurden jeweils mit 8 MW/km^2 an installierter Leistung geplant. Basisszenario für die Szenarien zum erweiterten Potenzial ist eine Kombination aus Basisszenario 2 und einer Modernisierung der Windenergieanlagen in allen Bestandwindparks von 2022. Die installierte Kapazität dieses Szenarios liegt demnach analog zu der installierten Kapazität von Basisszenario 2 bei 60,5 GW in der deutschen AWZ. Konkret werden folgende Szenarien untersucht:

4. Potenzial Doggerbank - Installierte Kapazität AWZ: 71 GW:

Unter der Bedingung einer Minimierung des Natureingriffs bei gleichzeitig erfolgenden Maßnahmen zur Verbesserung der Lebensbedingungen der gefährdeten Arten insgesamt wurde die Co-Nutzung des Gebiets der Doggerbank evaluiert. Dieses Potenzialszenario betrachtet das Energiegewinnungspotenzial eines kompletten Ausbaus des Gebietes im Raum der Doggerbank zwischen den Windenergiegewinnungsgebieten EN17 und EN19 des Vorentwurfs des FEP (BSH, 2021b). Ausgespart wurden Korridore für Kabel und Schifffahrt. Unter der angenommenen Leistungsdichte von 8 MW/km^2 ergibt sich eine Gesamtkapazität in diesem Gebiet von 10,5 GW.

5. Potenzial U-Boot Tauchgebiet Ostsee und Teilnutzung Artillerieschießgebiet Nordsee - Installierte Kapazität AWZ: 73 GW:

Das vorherige Szenario mit dem zusätzlichen Potenzial in der Doggerbank wird erweitert

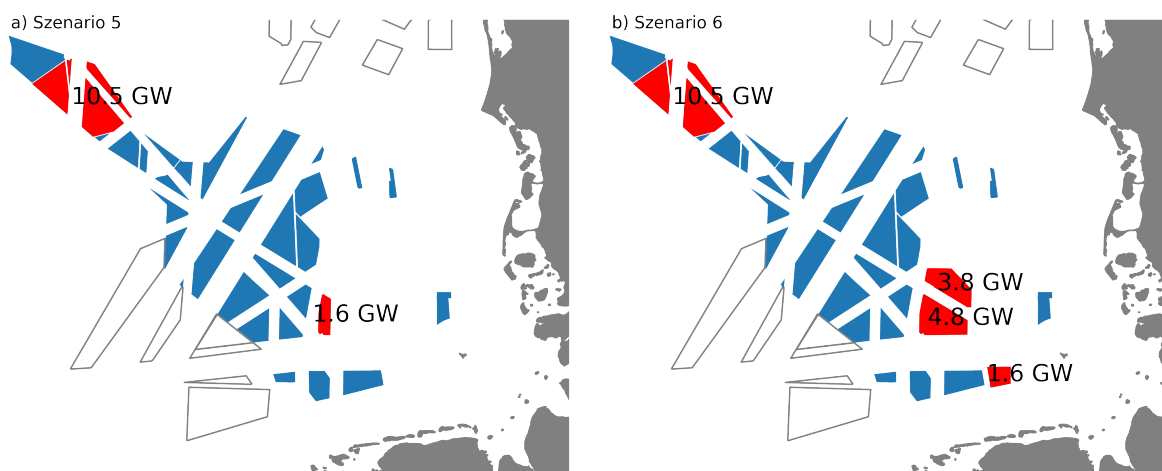


Abbildung 5.1 Zusätzliche Potenzialflächen im Szenario 5 (links, in rot) und im Szenario 6 (rechts, in rot). Im Szenario 4 wird nur der Ausbau von 10,5 GW im Gebiet der Doggerbank betrachtet.

durch einen Ausbau als Co-Nutzung von 1,6 GW im Artillerieschießgebiet der Nordsee (vgl. Abbildung 5.1), und einem U-Boot Tauchgebiet in der Ostsee, südlich des Windparks Baltic 2 (vgl. Abbildung 5.2). Insgesamt ergibt sich gegenüber dem Szenario "Potenzial Doggerbank" eine zusätzliche Kapazität durch Co-Nutzung mit militärischer Nutzung von 2 GW. Die Auswahl ergab sich aus der Einschätzung der besten technischen Möglichkeiten für eine Co-Nutzung zur militärischen Nutzung.

6. Potenzial Artillerieschießgebiete Nordsee - Installierte Kapazität AWZ: 81,6 GW:

Eine zusätzliche Kapazität von 8,6 GW wird in den beiden Artillerieschießgebieten der Bundeswehr östlich des Gebiets EN8 und im U-Boot Tauchgebiet Weser eingeplant. Dieses Co-Nutzungsszenario ist sehr ambitioniert, da die Gebiete ja weiterhin im Rahmen der Co-Nutzung für Verteidigungszwecke genutzt werden würden. Es ging jedoch darum, das mögliche Potenzial zu ergründen und insbesondere technische und rechtliche Fragestellungen, die dieser Co-Nutzung im Wege stehen, nachfolgend zu klären.

Abbildungen 5.1 und 5.2 (links) fassen die im Rahmen der Analyse zusätzlicher Co-Nutzungspotenziale betrachteten Flächen im Bereich der Deutschen Bucht und der südlichen Ostsee zusammen. Die gegenüber den Basisszenarien zusätzlich betrachteten Flächen sind rot markiert.

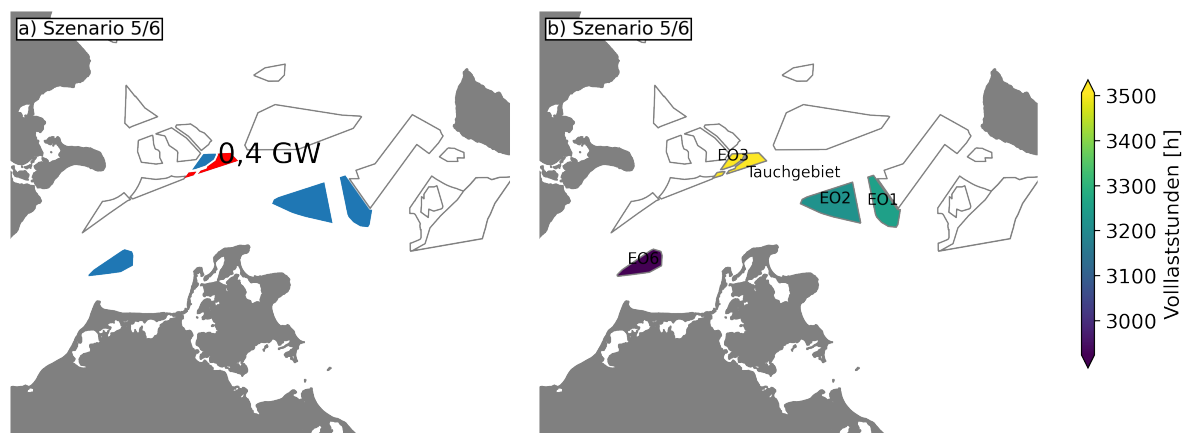


Abbildung 5.2 Zusätzliche Potenzialflächen (links, in rot) und resultierende Volllaststunden (rechts) in den Windparks der Ostsee für die Potenzialszenarien 5 und 6.

Die aus den Szenarien folgenden Volllaststunden auch im Vergleich zu den Flächen des FEP sind in Abbildung 5.4 als Balkendiagramm zusammengefasst. Die Ergebnisse des Szenario 4 zeigen isoliert das Energiegewinnungspotenzial im Bereich der Doggerbank (vgl. Abbildung 5.3). Die im Szenario in dem Gebiet erzielten Volllaststunden sind trotz der großen Größe des Gebiets und der hohen installierten Kapazität hoch und die Beeinflussung der angrenzenden Gebiete EN19 und EN17 relativ gering. So liegen die Volllaststunden mit 3560 Jahresstunden etwa zwischen den Werten für die beiden angrenzenden Gebiete. Die Volllaststunden in den Gebieten EN19 und EN17 reduzieren sich gegenüber dem Basisszenario nur um 5 % bzw. ca. 1 %. Dieses liegt vor allem an der Position der Doggerbank fernab von Küsteneinflüssen und somit in einem Bereich eines sehr hohen natürlichen Windpotenzials. Wie beispielsweise in Abbildung 5.1 erkennbar, liegen die Gebiete auf einer Süd-Ost zu Nord-West Achse. Da Süd-Ost Winde in der deutschen Nordsee selten auftreten, tritt in dieser Windrichtung nur eine geringe gegenseitige Abschattung auf. Nord-West Winde treten deutlich häufiger auf, allerdings ist die Windgeschwindigkeit, da vom freien Meer kommend, aus diesem Windsektor oft so hoch, dass Abschattungseffekte nur noch geringen Einfluss auf den Ertrag des Parks haben.

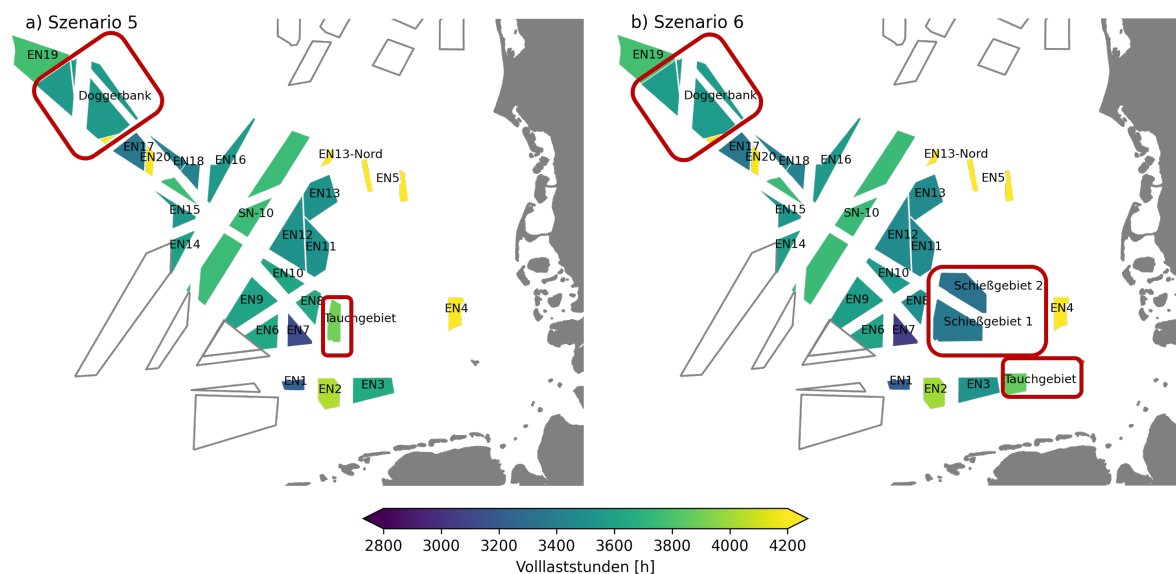


Abbildung 5.3 Erreichte Volllaststunden in den Simulationen der Windparks der Potenzialszenarien 5 (links) und 6 (rechts).

Das Energieerzeugungspotenzial in den militärischen Nutzgebieten, welches in zwei weiteren Szenarien (5 & 6) untersucht wurde, liegt bei insgesamt 32,1 TWh und würde daher die Energieerzeugung aus deutschem Offshore Wind um weitere 12 % erhöhen (vgl. Tabelle 5.1). Die beiden Artillerieschießgebiete in der Nordsee, die im Potenzialszenario 6 beispielhaft mit insgesamt 8,6 GW installierter Leistung geplant wurden, weisen eine geringere Effizienz auf als das weiter südlich liegende kleinere Gebiet im Tauchgebiet Weser mit einer Kapazität von 1,6 GW. Dies liegt zum einen an der größeren Dimension der Windparks, aber auch an der Abschattung durch die meist stromaufwärts liegenden Windparks aus den Gebieten EN6 bis EN13 und den niederländischen Windparks (vgl. Abbildung 2.1).

Tabelle 5.1 Ergebnisse der Basisszenarien sowie der Potenzialszenarien für die gesamte deutsche AWZ in Bezug auf die Evaluationsparameter.

Szenarien Nord und Ostsee	Inst. Leistung [GW]	Produktion [TWh]	Volllaststunden [h]
0 – Basisszenario	69,0	232,7	3372
1 – Variante SN10	63,0	215,1	3414
2 – Variante höhere Volllaststunden	60,5	216,7	3582
3 – Variante Modernisierung Bestandsparcs	69,0	237,9	3447
4 – Potential Doggerbank	71,0	260,0	3662
5 – Potential U-Boot Tauchgebiet Ostsee & Teilnutzung Artillerieschießgebiete	73,0	265,0	3630
6 – Potential Artillerieschießgebiete & U-Boot Tauchgebiete	81,6	292,1	3580

Insgesamt liegt die Energieerzeugungseffizienz der untersuchten Co-Nutzungs-Potenzialgebiete leicht unter der mittleren Effizienz aller andere Gebiete und reduziert daher die Kosteneffizienz der Energieerzeugung. Verglichen dazu würde eine Erhöhung der Leistungsdichte innerhalb der jetzi-

gen Flächenkulisse - ein anderer Ansatz zur Erhöhung der installierten Gesamtkapazität - allerdings in jedem Fall zu einer signifikant geringeren Kosteneffizienz führen. Die Erweiterung der Flächenkulisse führt somit zu einer kosten- und in Bezug auf den Materialeinsatz ressourceneffizienteren Erzeugung elektrischer Energie aus Wind als eine Erhöhung der Leistungsdichte auf bestehenden Flächen. Es führt dabei auch zu insgesamt höherem Energieertrag und damit zu einer deutlichen Erhöhung der Klimaschutzwirkung des Offshore-Ausbaus. Es zeigt sich vor allem, dass ein räumlich hoch konzentriertes Clustering von Multi-GW Windparks zu Effizienzverlusten führt und daher eine größere Verteilung der Nutzgebiete für Windenergie bei gleicher Flächennutzung aus Effizienz- und Kostengedanken erstrebenswert wäre.

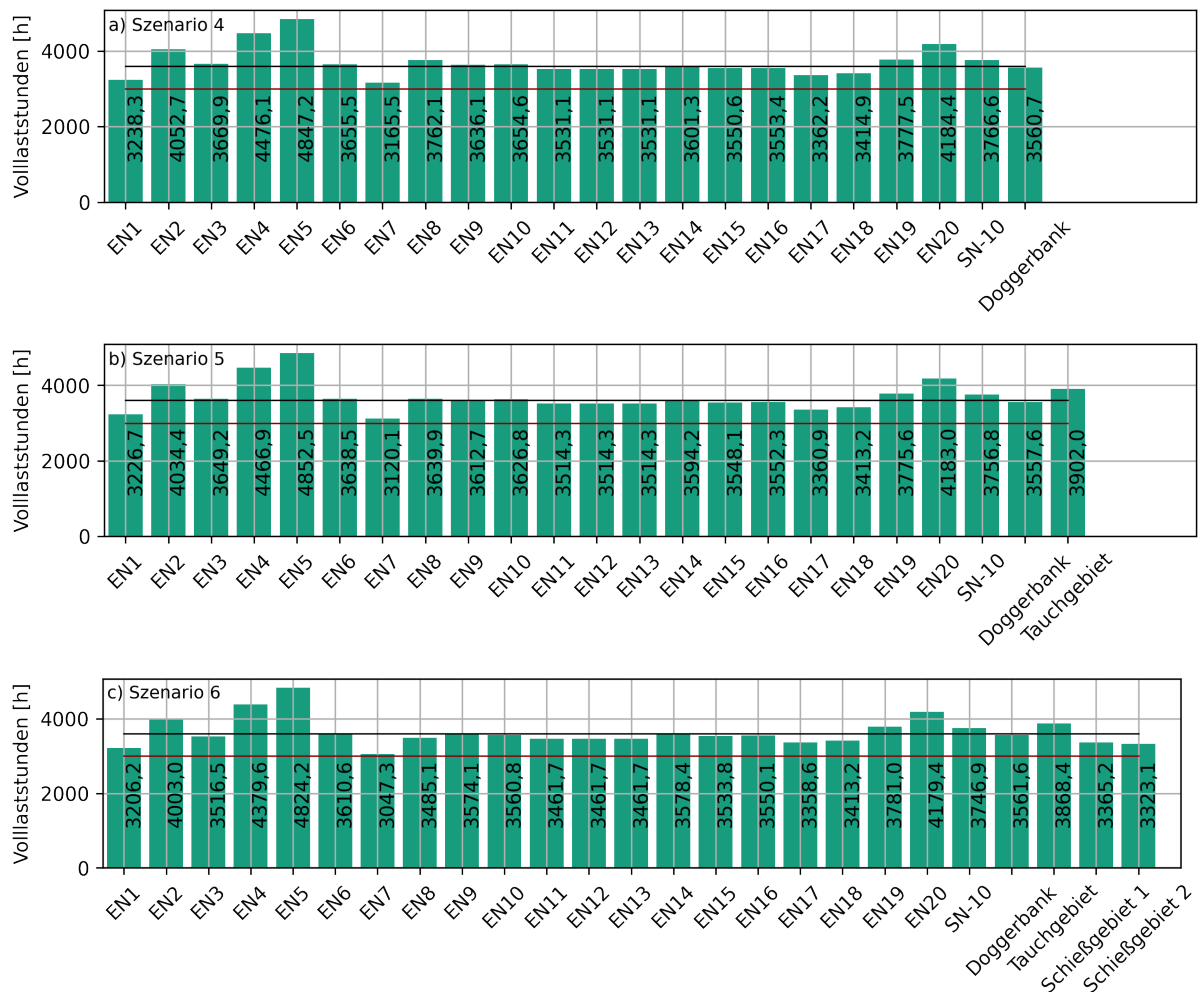


Abbildung 5.4 Volllaststunden in den einzelnen Windparks der Nordsee für die Potenzialszenarien 4 bis 6 (von oben nach unten).

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Projekts "Offshore Flächenpotenziale: Analyse der Energieerzeugungseffizienz in der deutschen AWZ" wurden diverse Ausbauszenarien für die Deutsche Bucht untersucht.

Dieses beinhaltete zunächst die Simulation von Referenzszenarien unter der Berücksichtigung der gemäß Raumordnungsplan verfügbaren Flächen sowie der Schifffahrtsstraße SN10, die bereits in anderen Studien als potenzielle Ausbaufäche betrachtet wurde. Diese Szenarien verdeutlichten, dass bei einer dichten Beplanung der Windparkflächen die Volllaststunden auch im Mittel deutlich unter die der heute voll ausgebauten Windparkclustern in der Deutschen Bucht absinken. In einigen Gebieten in der Deutschen Bucht können dann weniger als 3000 Volllaststunden realisiert werden. Eine Modernisierung der Anlagen (Repowering) auf den heute bereits betriebenen Flächen würde sich in Zukunft in jedem Fall positiv auf die Effizienzen und Erträge der betrachteten Windparkflächen der Referenzszenarien auswirken, da größere und höhere Windenergieanlagen das Windpotenzial in großen Höhen besser nutzen können.

Im Anschluss fanden Interviews mit Stakeholdern statt, die bisher die nicht der Windenergienutzung zugeordneten Flächen nutzen oder deren Nutzungsbedingungen überwachen. Dieses waren Repräsentanten aus dem Militär, Naturschutz sowie der Fischerei(-forschung). Daneben hat das Fraunhofer IWES an während der Projektlaufzeit laufenden relevanten Workshops teilgenommen. Evaluiert wurde, welche kritischen Punkte einer Co-Nutzung im Wege stehen und welche technischen Möglichkeiten es seitens der Windenergiebranche gibt, diesen Hindernissen der Co-Nutzung technisch entgegenzugehen. Des Weiteren wurde auch evaluiert, welche weiteren Bedingungen für eine Co-Nutzung erfüllt werden müssen.

Basierend auf den Ergebnissen dieser Interviews wurden gemeinsam mit den Auftraggebern zusätzliche Szenarien mit höherer gesamter installierter Kapazität durch Hinzunahme weiterer Flächen zur Co-Nutzung definiert, simuliert und deren Erträge und Effizienzen ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Szenarien zeigen, dass eine weniger dichte Bebauung in den momentan vorgesehenen Gebieten und Verlagerung dieser Kapazitäten in Co-Nutzungsgebiete zu einer deutlichen Erhöhung von Volllaststunden und Effizienzen der Windparks führen kann. So ließen sich Volllaststunden in ähnlicher Höhe wie bereits in heute voll ausgebauten Clustern auch beim weiteren zukünftigen Ausbau realisieren, wobei der Gesamtenergieertrag überproportional steigt.

Insgesamt wurden mehrere Co-Nutzungs-Szenarien, die die Ausbaupläne der Bundesregierung von 70 GW jeweils überschreiten, untersucht. Die Auswahl der Szenarien richtete sich dabei danach, die Erträge der Windparks hochzuhalten, um den Ressourcenverbrauch und Eingriff für die erzeugte Energie so gering wie möglich zu halten. Zudem erfolgt die Auswahl der Co-Nutzungsflächen in Abstimmung mit den Auftraggebern anhand von einer grundsätzlich gesehenen Möglichkeit der Co-Nutzung, ohne, dass dies schon mit allen Bedingungen ausgearbeitet werden konnte.

Insgesamt wurden drei Co-Nutzungs-Szenarien mit mehr als 70 GW installierter Leistung betrachtet. Bei einer installierten Leistung von 71 GW und einer Co-Nutzung mit dem Ziel des Naturschutzes auf der Doggerbank lägen die bei bis zu 260 TWh mit ca. 3662 Volllaststunden. Werden noch Flächen für 2 GW installierter Leistung aus verschiedenen bisher militärisch genutzten Gebieten mit genutzt, ließe sich der Ertrag auf 265 TWh steigern, wobei die Volllaststundenzahl leicht auf 3630 abnehmen würde. Bei einem Gesamtpotenzial von bis zu 81 GW installierter Leistung ließen sich gemäß den Ergebnissen der Untersuchungen Erträge von bis zu 292,1 TWh bei rund 3580 Volllaststunden in der Deutschen AWZ realisieren. Die Studie zeigt somit auf, dass die Co-Nutzung eine Möglichkeit zur Erhöhung der Offshore-Windenergieerträge in der Deutschen Bucht ist, und weitere Diskussionen hierzu aus energetischer Sicht sinnvoll erscheinen. Technische Ausfälle, die nicht auf den Wind und Nachlauseffekte zurückzuführen sind, wurden in keinem der Szenarien

berücksichtigt und sind entsprechend hinzuzunehmen. Diese hängen stark von Randbedingungen (z.B. Netzverfügbarkeiten und netzbedingte Drosselungen) ab, die für die Zukunft nur schwer vorhersagbar sind.

Die Studie kann zusammenfassend nur einen exemplarischen Ausblick auf Co-Nutzungspotenziale im Bereich der Deutschen Bucht geben und weitere Diskussionen dazu anstoßen. Wie in Kapitel 4 dargestellt, gibt es vielfältig denkbare Optionen, die jedoch weitere Diskussionen und teilweise auch technische Entwicklungen erfordern. Dieses setzt politischen Willen und technische Innovationen voraus, aber vor allem eine lösungsorientierte Diskussion zwischen den Beteiligten. Um diese zu ermöglichen, wäre ein Vorschlag, eine mediativ orientierte Koordinierungsstelle einzurichten, welche die Kommunikation zwischen den Gruppen zielführend moderiert und gemeinsam Lösungen erarbeitet.

Daneben könne auch technische Weiterentwicklungen Co-Nutzung erleichtern. Anlagen ohne Netzanbindung, z.B. zur Wasserstoffherzeugung, stellen z.B. einen geringeren Eingriff in die Natur dar. Auch die Entwicklung von Windenergieanlagen, die nicht gerammt werden müssen und im verhältnismäßig flachen Wasser der Deutschen Bucht schwimmen können, könnten eine Lösung sein, die Umwelt weiter zu schonen. Solche Technologien, sogenannte Flachwasser-Floater existieren jedoch noch nicht. Das Rammen der Gründungsstrukturen in der Installationsphase ist noch immer einer der größten Eingriffe in die Meeresumwelt. Hier ist entsprechend noch viel technisches Entwicklungspotenzial gegeben. Allerdings liegen die Zeiträume bis zur Realisierung weiterer Flächenpotenziale gemäß der aktuellen politischen Ausbauziele mit mehr als 20 Jahren auch noch weit in der Zukunft.

7 Literaturverzeichnis

- Agora Energiewende and Agora Verkehrswende (2020). *Making the Most of Offshore Wind - Re-Evaluating the Potential of Offshore Wind in the German North Sea*. Technischer Bericht, 84 Seiten. https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2019/Offshore_Potentials/176_A-EW_A-VW_Offshore-Potentials_Publication_WEB.pdf, letzter Aufruf: 02.09.2022. Technical University of Denmark und Max-Planck-Institute for Biogeochemistry.
- Baumgärtner, D. u. a. (2021). *Weiterentwicklung der Rahmenbedingungen zur Planung von Windenergieanlagen auf See und Netzanbindungssystemen*. Technischer Bericht - 102 Seiten 1. https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Meeresfachplanung/Flaechenentwicklungsplan/_Anlagen/Downloads/FEP_2022/Erster_Zwischenbericht_FEP.pdf, letzter Aufruf: 02.09.2022. Fraunhofer Institut für Windenergiesysteme (IWES).
- BMWi (2020). *Bundestag beschließt wichtige Windenergie-Gesetzesvorhaben*. Pressemitteilung vom 05.11.2020. <https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2020/20201105-bundestag-beschliesst-wichtige-windenergie-gesetzesvorhaben.html>, letzter Aufruf: 02.09.2022. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
- Borrmann, Rasmus, Dennis Kruse und Anna-Kathrin Wallasch (Sep. 2021). *Erzeugung von grünem Wasserstoff durch Windenergie auf See - Potential und Bedarf in Deutschland*. Techn. Ber. SP21006A0. https://www.offshore-stiftung.de/sites/offshorelink.de/files/documents/210922_Wasserstoffpotentialanalyse_Gesamtbericht.pdf, letzter Aufruf: 02.09.2022. Varel, Germany: Deutsche Windguard.
- Brandis, A. von u. a. (2022). „An investigation of mesoscale wind direction changes and their consideration in engineering models“. In: *Wind Energy Science Discussions* 2022, S. 1–28. DOI: 10.5194/wes-2022-21.
- BSH (2020). *Flächenentwicklungsplan 2020 für die deutsche Nord- und Ostsee*. Technischer Bericht, 204 Seiten. https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Meeresfachplanung/Fortschreibung/_Anlagen/Downloads/FEP_2020_Flaechenentwicklungsplan_2020.pdf, letzter Aufruf: 02.09.2022. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie.
- (2021a). *Raumordnungsplan für die deutsche ausschließliche Wirtschaftszone in der Nordsee und in der Ostsee*. Anlageband zum Bundesgesetzblatt Teil I, Nr. 58 - 44 Seiten. https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Meeresraumplanung/Raumordnungsplan_2021/_Anlagen/Downloads/Raumordnungsplan_2021.pdf. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie.
- (2021b). *Vorentwurf Flächenentwicklungsplan*. Technischer Bericht, 15 Seiten. https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Meeresfachplanung/Flaechenentwicklungsplan/_Anlagen/Downloads/FEP_2022/Vorentwurf_FEP.pdf, letzter Aufruf: 02.09.2022. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie.
- (2022). *GeoSeaPortal - Das Geodatenportal des BSH*. Online Ressource, <https://www.geoseaportal.de>, letzter Abruf 02.09.2022.
- Bundesgesetzblatt (2017). *Verordnung über die Festsetzung des Naturschutzgebiets "Doggerbank"*. NSGDgbV vom 22. September 2017, BGBl. I S. 3400. http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&jumpTo=bgbl117s3400.pdf, letzter Aufruf: 02.09.2022.
- Bundesregierung (2020). *Mehr Windenergie auf See - Beschleunigter Ausbau*. Online Ressource vom 08.07.2022. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/windenergie-auf-see-gesetz-2022968>, letzter Aufruf: 02.09.2022.
- Cañadillas, B. u. a. (2022). „Offshore wind farm cluster wakes as observed by long-range-scanning wind lidar measurements and mesoscale modeling“. In: *Wind Energy Science* 7.3, S. 1241–1262. DOI: 10.5194/wes-7-1241-2022.

- COWI (2020a). **VINDRESSOURCE, LAYOUTS OG ENERGIPRODUKTION FOR NORDSØEN I, HESSELØ OG KRIEGERES FLAK II**. Technischer Bericht (Dänisch), 58 Seiten. https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Vindenergi/1-3_vindressource_layouts_og_energiproduktion_for_nordsoeen_i_hesseloe_og_kriegers_flak_ii.pdf, letzter Aufruf: 02.09.2022. Kongens Lyngby, DK: COWI A/S.
- (2020b). **VINDRESSOURCE, LAYOUTS OG, ENERGIPRODUKTION FOR BORNHOLM I + II, NORDSØEN II + III OG OMRÅDET VEST FOR NORDSØEN II + III**. Technischer Bericht (Dänisch), 58 Seiten. https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Vindenergi/2-3_vindressource_layouts_og_energiproduktion.pdf, letzter Aufruf: 02.09.2022. Kongens Lyngby, DK: COWI A/S.
- Der Rat der Europäischen Gemeinschaften (1992). „Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen“. In: **Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, Reihe L** 206, S. 7–50.
- Donlon, Craig J u. a. (2012). „The operational sea surface temperature and sea ice analysis (OSTIA) system“. In: **Remote Sensing of Environment** 116, S. 140–158.
- Dörenkämper, Martin u. a. (2015). „On the Offshore Advection of Boundary-Layer Structures and the Influence on Offshore Wind Conditions“. In: **Boundary-Layer Meteorol.** 155.3, S. 459–482. DOI: 10.1007/s10546-015-0008-x.
- Dutch Ministry of Infrastructure and Water Management (Okt. 2021). **Additional Draft North Sea Programme 2022-2027**. Techn. Ber. <https://www.noordzeeloket.nl/publish/pages/197401/additional-draft-north-sea-programme-2022-2027.pdf>, letzter Aufruf: 02.09.2022.
- EMODnet (2022). **Wind Farms (Polygons)**. GIS Shapefiles - Online Ressource. <https://www.emodnet-humanactivities.eu/search-results.php?dataname=Wind+Farms+%28Polygons%29>, letzter Aufruf: 02.09.2022. The European Marine Observation und Data Network (EMODnet).
- Fischereit, Jana u. a. (2022). „Review of Mesoscale Wind-Farm Parametrizations and Their Applications“. In: **Boundary-Layer Meteorology** 182.2, S. 175–224. DOI: 10.1007/s10546-021-00652-y.
- Fitch, Anna C. u. a. (2012). „Local and Mesoscale Impacts of Wind Farms as Parameterized in a Mesoscale NWP Model“. In: **Monthly Weather Review** 140.9, S. 3017–3038. DOI: 10.1175/MWR-D-11-00352.1.
- Gaertner, Evan u. a. (2020). „Definition of the IEA 15-megawatt offshore reference wind turbine“. In: NREL/TP-5000-75698. <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/75698.pdf>, letzter Aufruf: 02.09.2022.
- Galparsoro, Ibon u. a. (2020). „Global stakeholder vision for ecosystem-based marine aquaculture expansion from coastal to offshore areas“. In: **Reviews in Aquaculture** 12.4, S. 2061–2079.
- Gimpel, Antje, Vanessa Stelzenmüller, Holger Haslob u. a. (Feb. 2020). „Offshore-Windparks: Chance für Fischerei und Naturschutz“. In: **Johann Heinrich von Thünen-Institut: Thünen à la carte** 7, S. 6. DOI: 10.3220/CA1580724472000.
- Gimpel, Antje, Vanessa Stelzenmüller, Sandra Töpsch u. a. (2018). „A GIS-based tool for an integrated assessment of spatial planning trade-offs with aquaculture“. In: **Science of the Total Environment** 627, S. 1644–1655.
- Göçmen, Tuhfe u. a. (2016). „Wind turbine wake models developed at the technical university of Denmark: A review“. In: **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 60, S. 752–769. DOI: 10.1016/j.rser.2016.01.113.
- Gottschall, J. und M. Dörenkämper (2021). „Understanding and mitigating the impact of data gaps on offshore wind resource estimates“. In: **Wind Energy Science** 6.2, S. 505–520. DOI: 10.5194/wes-6-505-2021.
- Hersbach, Hans u. a. (2020). „The ERA5 global reanalysis“. In: **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society** 146.730, S. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.

- IWES (2019). *X-Wakes – Interaction between the Wakes of Large Offshore Wind Farms and Wind Farm Clusters with the Marine Atmospheric Boundary Layer*. Projektsteckbrief - Online. <https://www.iwes.fraunhofer.de/en/research-projects/current-projects/x-wakes-.html>, letzter Aufruf: 02.09.2022. Fraunhofer Institut für Windenergiesysteme (IWES).
- Jensen, NO (1983). *Note on wind generator interaction.[Wakes]*. Technischer Bericht - 16 Seiten 2411. <https://orbit.dtu.dk/en/publications/a-note-on-wind-generator-interaction>, letzter Aufruf: 02.09.2022. Risø National Laboratory.
- Kleidon, A. und L. M. Miller (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“. In: *Geoscientific Model Development* 13.10, S. 4993–5005. DOI: 10.5194/gmd-13-4993-2020.
- Krause, J. u. a. (2020). *Managementplan für das Naturschutzgebiet "Doggerbank" (MPDgb)*. Technischer Bericht im Bundesanzeiger, 97 Seiten. <https://www.bundesanzeiger.de/pub/publication/acdrTrxusG1YN5e9L37/content/200411001716M001/BAAnzAT13052020B1000.pdf>, letzter Aufruf: 02.09.2022. Bundesamt für Naturschutz.
- Länsstyrelserna (2021). *LST Vindbrukskollen Vindkraftverk*. GIS Shapefiles - Online Ressource. <https://ext-geodatakatalog.lansstyrelsen.se/GeodataKatalogen/GetMetaDataById?id=ed5814b2-08bf-493a-a164-7819e1b590d6>, letzter Aufruf: 02.09.2022.
- Nakanishi, Mikio und Hiroshi Niino (2009). „Development of an Improved Turbulence Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer“. In: *Journal of the Meteorological Society of Japan* 87.5, S. 895–912. ISSN: 0026-1165. DOI: 10.2151/jmsj.87.895.
- Nygaard, Nicolai Gayle u. a. (2020). „Modelling cluster wakes and wind farm blockage“. In: *Journal of Physics: Conference Series*. Bd. 1618. 6, S. 062072. DOI: 10.1088/1742-6596/1618/6/062072.
- OCEaN (Okt. 2021). *Sechs Anforderungen für den naturverträglichen Ausbau von Offshore Windenergie*. Technischer Bericht, 9 Seiten. https://www.germanwatch.org/sites/default/files/20211014_positionpapier_german_wg_final.pdf, letzter Aufruf: 02.09.2022. Offshore Coalition for Energy und Nature (OCEaN).
- Olauson, Jon (2018). „ERA5: The new champion of wind power modelling?“. In: *Renewable Energy* 126, S. 322–331. DOI: 10.1016/j.renene.2018.03.056.
- Ørsted (Nov. 2019). *Ørsted presents update on its long-term financial targets*. Pressemitteilung - Online. <https://orsted.com/en/company-announcement-list/2019/10/1937002>, letzter Aufruf: 02.09.2022. Ørsted A/S.
- Siedersleben, Simon K u. a. (2018). „Evaluation of a wind farm parametrization for mesoscale atmospheric flow models with aircraft measurements“. In: *Meteorologische Zeitschrift* 27.5, S. 401–415. DOI: 10.1127/metz/2018/0900.
- Skamarock, W.C. u. a. (2021). *A description of the advanced research WRF version 4.3*. Technischer Bericht, 162 Seiten NCAR/TN-556+STR. Boulder, Colorado, USA: NCAR - National Center for Atmospheric Research. URL: <http://dx.doi.org/10.5065/1dfh-6p97>.
- Vestas (2022). *V236-15.0 MW prototype nacelle completed and ready for testing*. Pressemitteilung vom 23. August 2022. <https://www.vestas.com/en/products/offshore/V236-15MW/prototype/nacelle-completed>, letzter Aufruf: 02.09.2022. Vestas Wind Systems A/S.

8 Abkürzungen

AEP	Annual Energy Production
AWZ	Ausschließliche Wirtschaftszone
BDEW	Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft e.V.
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (ehemaliger Name des BMWK)
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BWO	Bundesverband der Windparkbetreiber Offshore e.V.
DTU	Dänemarks Technische Universität (dänisch: Danmarks Tekniske Universitet)
EMODnet	European Marine Observation and Data Network
FEP	Flächenentwicklungsplan
FFH-Richtlinie	Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen - Flora-Fauna-Habitat Richtlinie
h	Stunde
IWES	Fraunhofer Institut für Windenergiesysteme
GW	GigaWatt
km²	Quadratkilometer
MuSSEL	Multiple Stressors on North Sea Life
MW	MegaWatt
NEP	Netzentwicklungsplan
NREL	National Renewable Energy Laboratory
NSGDbV	Verordnung über die Festsetzung des Naturschutzgebietes "Doggerbank"
OCEaN	Offshore Coalition for Energy and Nature
ORE	Offshore Renewable Energy Catapult (Windenergieforschungsinstitut)
ROP	Raumordnungsplan
TNO	Niederländische Organisation für Angewandte Naturwissenschaftliche Forschung (niederländisch: Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek)
TWh	Terrawattstunden
WindSeeG	Gesetz zur Entwicklung und Förderung der Windenergie auf See
WRF	Weather Research and Forecasting Model - mesoskaliges Wettermodell

Abbildungsverzeichnis

2.1	Geplante und ausgebaute Flächen in der Nord- und Ostsee	17
2.2	Modelldomains für die Nord- (links) und Ostsee (rechts).	18
3.1	Korrigierte Leistungsdichte und Volllaststunden in den Windparks der Ostsee im Basisszenario	21
3.2	Korrigierte Leistungsdichte in den Windparks für die Basisszenarien	22
3.3	Volllaststunden in den einzelnen Windparks der Nord- und Ostsee für die Basisszenarien.	23
4.1	Durch Naturschutz geschützte Gebiete in der Nordsee gemäß Raumordnungsplan	25
4.2	Durch Naturschutz geschützte Gebiete in der Ostsee gemäß Raumordnungsplan	26
4.3	Militärisch genutzte Gebiete in der Nordsee gemäß Raumordnungsplan	28
4.4	Militärisch genutzte Gebiete in der Ostsee gemäß Raumordnungsplan	29
4.5	Durch Fischerei und Fischereiforschung genutzte Gebiete in der Nordsee gemäß Raumordnungsplan	30
4.6	Durch Fischerei und Fischereiforschung genutzte Gebiete in der Ostsee gemäß Raumordnungsplan	31
5.1	Zusätzliche Potenzialflächen im Szenario 5 und im Szenario 6	32
5.2	Zusätzliche Potenzialflächen und resultierende Volllaststunden in den Windparks der Ostsee für die Potenzialszenarien 5 und 6	33
5.3	Erreichte Volllaststunden in den Simulationen der Windparks der Potenzialszenarien 5 und 6	34
5.4	Volllaststunden in den einzelnen Windparks der Nordsee für die Potenzialszenarien 4 bis 6	35

Tabellenverzeichnis

II.1	Ergebnisse der Basisszenarien sowie der Potenzialszenarien für die gesamte deutsche AWZ in Bezug auf die Evaluationsparameter.	11
2.1	Verwendete Anlagengenerationen auf zukünftigen Flächen.	16
3.1	Ergebnisse der Basisszenarien für die gesamte deutsche AWZ in Bezug auf die Evaluationsparameter.	21
5.1	Ergebnisse der Basisszenarien sowie der Potenzialszenarien für die gesamte deutsche AWZ in Bezug auf die Evaluationsparameter.	34