

Abschlussbericht

BeBe0 „Bedarfsgerechte Befeuerung von Offshore Windenergieanlagen“

Förderkennzeichen 03EE3012A, 03EE3012B, 03EE3012C

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2019 – 31.10.2021



für das:

Forschungszentrum Jülich GmbH

Projektträger Jülich (PTJ), Wind offshore

52425 Jülich

Zuwendungsempfänger:

**Stiftung der deutschen Wirtschaft für die Nutzung und Erforschung der
Windenergie auf See (Stiftung OFFSHORE-WINDENERGIE; FKZ 03EE3012A)**

Deutsche WindGuard Offshore GmbH (FKZ 03EE3012B)

BioConsult SH GmbH & Co. KG (FKZ 03EE3012C)

***Für den Inhalt des Berichtes sind ausschließlich die Autoren
verantwortlich***

Autoren:

Dr. Matthias Wehkamp

Dr. Jorg Welcker

Jutta Simmering

Inhalt

1.	Einleitung.....	12
2.	Aufgabenstellung.....	13
3.	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	14
4.	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	15
5.	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	16
6.	Arbeitspakete und Ergebnisse.....	19
6.1	Projektkoordination (AP 1).....	19
6.2	Ermittlung des Status Quo (AP 2).....	19
6.2.1	Ermittlung unterschiedlicher Systeme (AP 2.1).....	20
6.2.2	Anforderungen an den Offshore-Einsatz (AP 2.2).....	21
6.2.3	Regulatorische Rahmenbedingungen zur bedarfsbefeuereten Nachtkennzeichnung in Deutschland und der AWZ (AP 2.3).....	22
6.3	OWP Auswahl (AP 3).....	25
6.3.1	Definition der Voraussetzungen (AP 3.1).....	26
6.3.2	Definition möglicher Windparks (AP 3.2).....	26
6.3.3	Auswahl von Offshore-Windparks (AP 3.3).....	27
6.4	Standortauswahl (AP 4).....	28
6.4.1	Definition der Anforderung an den Standort (AP 4.1).....	29
6.4.2	Standortauswahl (AP 4.2).....	29
6.5	Auswahl des Systems (AP 5).....	38
6.6	Einholung der erforderlichen Genehmigungen (AP 6).....	39
6.6.1	Bauantrag (AP 6.1).....	40
6.6.2	Anerkennung des Systems (AP 6.2).....	40
6.7	Aufbau und Praxistest (AP 7).....	41
6.7.1	Aufbau des Systems (AP 7.1).....	41
6.7.2	Praxistest des Systems (AP 7.2).....	44
6.7.3	Umsetzung und Implementierung von BNK in Offshore-Windparks.....	56
6.8	Naturschutzfachliche Begleitung (AP 8).....	58
6.8.1	Erstellung eines Studienkonzeptes (AP 8.1).....	59

6.8.2	Konzept zur technischen Umsetzung (AP 8.2)	66
6.8.3	Erfassung des Vogelzugs mit BNK-Radar (AP 8.3)	83
6.8.4	Feldstudie zur Anlockwirkung (AP 8.4).....	111
6.9	Erstellung eines Konzepts zur flächendeckenden BNK (AP 9).....	135
6.9.1	Theoretische Abdeckung mit Hilfe eines Radarsystems	136
6.9.2	Installation von Radarsystemen auf Konverter-Plattformen und Abdeckung nach Berechnung LoS	140
6.9.3	Ergebnisse	143
7.	Literatur	147
8.	Anlagen	151

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Umsetzungsfristen in den Zonen 1 – 5 der Nordsee	24
Abbildung 2: Umsetzungsfristen in der Ostsee	25
Abbildung 3: Karte Standorte Baltic 2 und Arkona (Eigene Darstellung)	28
Abbildung 4: Standort Helgoland (angenommene Reichweite des Radarsystems).....	31
Abbildung 5: Karte: Standort Fino (angenommene Reichweite des Radarsystems)	32
Abbildung 6: Berechnung der Reichweite eines Radarsystem Standort Rügen	33
Abbildung 7: Standort 1 „Ackerfläche“	35
Abbildung 8: Finaler Standort "Parkplatz am Nordufer" mit Position für das Radarsystem....	35
Abbildung 9: Insel Rügen mit Teststandorten „Ackerfläche“ und „Parkplatz am Nordufer“	36
Abbildung 10: Theoretische Abdeckung Scanner 4002 vom finalen Teststandort aus: Dunkelgrüne Fläche: Detektionsbereich; Blaugestrichelte Linie: Erweiterte warning zone; Rotgestrichelte Linie: warning zone.....	37
Abbildung 11: Beeinträchtigte Line of Sight (LoS) und Radarabdeckung am Teststandort ...	38
<i>Abbildung 12: Aufbau des Radarsystems 1</i>	42
Abbildung 13: Aufbau des Radarsystems 2.....	42
<i>Abbildung 14: Aufbau des Radarsystems 3</i>	43
Abbildung 15: Aufbau des Radarsystems 4.....	43
<i>Abbildung 16: Aufbau des Radarsystems 5</i>	44
<i>Abbildung 17: Eingesetztes Flugzeug vom Typ Rockwell Commander 114</i>	45
Abbildung 18: ADS-B (links) und GPS-Daten (rechts) des geflogenen Waffelmusters über Baltic 2	46
Abbildung 19: Darstellung der verschiedenen Flugmanöver	47
Abbildung 20: Darstellungsbeispiel eines von einem Aktivradar erfassten Flugtracks zur Auswertung der Probability of Detection (PD). Durchgängige Farbe (Lila, Blau, Orange): Flugtrack; Rot: Datenlücke.	49
Abbildung 21: Flug 1. Bei Neuinitiierung des Tracks wurde die Farbe des Tracks geändert, die Datenlücken sind rot gekennzeichnet. Die dünne Linie ist der GPS-Track, während die dicke Linie den Radartrack darstellt. Der blau eingefärbte Kreis ist die warning zone.	50
Abbildung 22: Flug 2: Bei Neuinitiierung des Tracks wird die Farbe des Tracks geändert, die Datenlücken sind rot gekennzeichnet. Der grün eingefärbte Kreis ist die warning zone.....	50
Abbildung 23: Waffelmuster in Süd-West/Nord-Ost-Richtung. Bei Neuinitiierung des Tracks wurde die Farbe des Tracks geändert, die Datenlücken sind rot gekennzeichnet. Die dünne Linie ist der GPS-Track, während die dicke Linie den Radartrack darstellt. Der grün eingefärbte Kreis ist die warning zone.....	52

Abbildung 24: Waffelmuster in Nord-West/Süd-Ost-Richtung. Bei Neuinitiiierung des Tracks wurde die Farbe des Tracks geändert, die Datenlücken sind rot gekennzeichnet. Die dünne Linie ist der GPS-Track, während die dicke Linie den Radartrack darstellt. Der rot eingefärbte Kreis ist die warning zone.....	53
Abbildung 25: Tangentialer Flug. Datenlücken im Track werden als rote Punkte dargestellt. Die dünne rote Linie repräsentiert die GPS-Daten des Flugzeugs. Die grün eingefärbte Fläche ist die warning zone des OWP Baltic II.....	54
Abbildung 26: Ergebnisse scharfe Wende: Die Datenlücken im Track werden als rote Punkte dargestellt. Die dünne rote Linie repräsentiert die GPS-Daten des Flugzeugs. Die grün eingefärbte Fläche ist die warning zone des OWP Baltic II.....	55
Abbildung 27: Zeichnung der LCU (Rittal-Schrank) für Netzwerkkomponenten. Die dargestellte Box besteht aus gepulvertem Stahl und hat eine IP-Schutzklasse 55. Je nach Installationsort wäre eine Anpassung der verwendeten Komponenten notwendig, um den Umweltbedingungen auf See Rechnung zu tragen.	58
Abbildung 28: Studiendesign mit zwei beteiligten Windparks (links), bei entsprechender Größe ist die Unterteilung eines einzelnen Windparks möglich (rechts).	61
Abbildung 29: Geplanter Ablauf der Beleuchtung der beiden an der Studie beteiligten Windparks über einen Zeitraum von 6 Wochen.	62
Abbildung 30: Illustration eines beispielhaften Verlaufs der Zugintensität an einem Windpark mit wechselndem Beleuchtungsregime.	63
Abbildung 31: Illustration eines beispielhaften Verlaufs der Zugintensität an zwei Windparks mit wechselndem Beleuchtungsregime.	64
Abbildung 32: Beispiel einer Anbringung eines Radargeräts zur Erfassung des Vogelzugs auf einer Umspannplattform.	68
Abbildung 33: Beispiel der Anbringung von Radargeräten zur Erfassung des Vogelzugs auf einer WEA-Zugangsplattform (A. horizontal drehende Antenne, B. vertikal drehende Antenne).	69
Abbildung 34: Stabilisierte und autarke Kleinstplattformen der Firma Akrocean (oben) und der Firma Ocergy (unten) mit der Möglichkeit zur Installation von Radargeräten und anderer Sensorik.	71
Abbildung 35: Antenne des Radarsystems „Max“ der Firma Robin Radar Systems.....	74
Abbildung 36: Vogelerfassungsradar MR1 der Firma Swiss Birdradar Solution.....	75
Abbildung 37: Song Meter SM4 der Firma Wildlife Acoustics.	78
Abbildung 38: Offshore-Mikrofonsystem der Firma BioConsult SH.....	80
Abbildung 39: Testaufbau des BNK-Radars (Terma Scanner 4002) in der Nähe von Putgarten auf Rügen.....	85

Abbildung 40: Standort des Testaufbaus des Radars auf Rügen (rotes Kreuz) und ungefährer Erfassungsbereich des Radars im Offshore-Bereich (ca. 60 km).....	86
Abbildung 41: Standort des BNK-Radars in der Nähe von Klintum im Landkreis Nordfriesland (rotes Kreuz) und ungefährer Erfassungsbereich des Radars (ca. 20 km).....	87
Abbildung 42: Histogramm der Anzahl der „Updates“ aus welchen sich die mit dem Radar Rügen (oben) sowie dem Radar Klintum (unten) aufgezeichneten Vogeltracks zusammensetzten.	89
Abbildung 43: Darstellung der Abdeckungsstärke des Erfassungsraums des Radars Rügen.	90
Abbildung 44: Histogramm der Länge der aufgezeichneten Vogeltracks des Radars Rügen (links) sowie des Radars Klintum (rechts).....	92
Abbildung 45: Beispielhafte Darstellung der vom Radar Rügen aufgezeichneten Vogeltracks in vier verschiedenen Nächten über einen Zeitraum von 2 h.	93
Abbildung 46: Beispielhafte Darstellung der vom Radar Klintum aufgezeichneten Vogeltracks in vier verschiedenen Nächten.	94
Abbildung 47: Zeitlicher Verlauf der Vogeltrackdichten des Radars Rügen (oben) und Klintum (unten) im jeweiligen Untersuchungszeitraum.	95
Abbildung 48: Tageszeitlicher Verlauf [%] der Anzahl der mit dem Radar Rügen (oben) bzw. dem Radar Klintum (unten) aufgezeichneten Vogelsignale.	97
Abbildung 49: Flugrichtungsverteilung der mit den BNK-Radaren auf Rügen bzw. in Klintum aufgezeichneten Vogelsignale.....	98
Abbildung 50: Räumliche Verteilung (5x5 km Raster) der mittleren Flugrichtungen am Standort Rügen und Klintum.....	99
Abbildung 51: Räumliche Verteilung (5x5 km Raster) der mittleren Vogeltrackdichte am Standort Rügen und Klintum.....	101
Abbildung 52: Abhängigkeit der Vogeltrackdichte von der Entfernung zum Radarstandort.	102
Abbildung 53: Abhängigkeit des minimalen von den Radargeräten detektierten Radarquerschnitts („radar cross-section“, RCS [m ²]) von der Entfernung zum Radarstandort	103
Abbildung 54: Vergleich des zeitgleich mit dem BNK-Radar Klintum sowie des Vogelradars am Standort Holzacker-Knorborg aufgezeichneten Vogelaufkommens.	104
Abbildung 55: Vergleich des tageszeitlichen Verlaufs des Vogelzugaufkommens zwischen der vorliegenden Studie (Radar Rügen, unten) und Ergebnissen der Studie ProBIRD	108
Abbildung 56: Vergleich der nächtlichen Flugrichtungsverteilung zwischen der vorliegenden Studie (Radar Rügen, unten) und Ergebnissen der FINOBIRD-Studie in der AWZ der Deutschen Bucht.....	110

Abbildung 57: Standort der Radarerfassung.....	114
Abbildung 58: Versuchsaufbau Enge-Sande: Die Antennen der beiden Radargeräte wurden vertikal drehend auf dem Dach der Servergarage der Windparks installiert.....	115
Abbildung 59: Beispiel eines Radar-Screenshots: Aufzeichnung vom 02.05.2021 um 00:01 Uhr im Bereich der dauerhaft nachtbefeuerten WEA.....	116
Abbildung 60: Distanzkorrektur Radar: per AIC ausgewählte Korrekturfunktionen und Modellparameter.	118
Abbildung 61: Kumulative Darstellung der nächtlich erfassten Vogelsignale (graue Punkte) im beleuchteten und unbeleuchteten Bereich.....	119
Abbildung 62: Kumulative Darstellung der nächtlich erfassten Vogelsignale und des verwendeten Nahbereichs einer dauerbeleuchteten und mit BNK ausgestatteten Windenergieanlage.	119
Abbildung 63: Histogramm der Zugintensität (MTR) bis in Höhe von 200 m (links) und der Logarithmus-transformierten Zugintensität ($\log+1$) bis 200 m Höhe (rechts).....	120
Abbildung 64: Vergleich der Zugintensitäten/Anzahl Vogelsignale zwischen den Radargeräten und dem dauerbeleuchteten („beleuchtet“) bzw. BNK-gesteuerten Windpark („dunkel“).	123
Abbildung 65: Vergleich der Differenz der Zugintensitäten/Anzahl Vogelsignale zwischen den Radargeräten im gesamten Untersuchungszeitraum („insgesamt“) sowie in den Zeiträumen, in welchen das Radar 1 im dauerbeleuchteten und Radar 2 im BNK-gesteuerten Windpark installiert waren („R1 beleuchtet“) und dem umgekehrten Fall („R1 dunkel“).	124
Abbildung 66: Vergleich der Differenz der medianen Zugintensitäten bis 1.000 m Höhe zwischen den Radargeräten und verschiedenen Beleuchtungsregimes für verschiedene Wetterbedingungen.	126
Abbildung 67: Vergleich der Differenz der medianen Zugintensitäten bis 200 m Höhe zwischen den Radargeräten und verschiedenen Beleuchtungsregimes für verschiedene Wetterbedingungen.	127
Abbildung 68: Vergleich der Differenz der mittlere Anzahl Vogelsignale im Nahbereich einer Turbine zwischen den Radargeräten und verschiedenen Beleuchtungsregimes für verschiedene Wetterbedingungen.	128
Abbildung 69: Vergleich der mittleren Anzahl Vogelsignale in Zeiträumen, in welchen die BNK-Anlagen beleuchtet wurden sowie jeweils eine halbe Stunde vorher und nachher.....	129
Abbildung 70: OWPs in der Deutschen Bucht, Quelle: Maximilian Dörrbecker (Chumwa) - Eigenes Werk, using data and information from these web sites: Global Offshore Wind Farms Database Bundesamt für Naturschutz OpenSeaMap TenneT Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrologie	135

Abbildung 71: Theoretische Abdeckung OWP's bei ausschließlicher Installation von Radar-Systemen an Land (Nordsee).....	137
Abbildung 72: Theoretische Abdeckung OWP's bei ausschließlicher Installation von Radar-Systemen an Land (Ostsee).....	138
Abbildung 73: Abdeckung OWP's bei Installation von Radar-Systemen an Land plus Konverter-Plattform (Nordsee).....	139
Abbildung 74: Abdeckung OWP's bei Installation von Radar-Systemen an Land plus 6 Konverter-Plattform (Nordsee).....	140
Abbildung 75: Darstellung Berechnung Radarhorizont und Zielsichtbarkeit. Quelle: https://www.translatorscafe.com/unit-converter/en-US/calculator/radar-horizon/	142
Abbildung 76: Abdeckung bis zur Wasseroberfläche.....	144
Abbildung 77: Abdeckung bis zu einer Höhe von 50 m AMSL.....	144
Abbildung 78: Abdeckung bis zu einer Höhe von 75 m AMSL.....	145

Tabellenverzeichnisverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der Standorte	34
Tabelle 2: Ergebnisse Waffelmuster	51
Tabelle 3: Detektionscharakteristik Baltic II	55
Tabelle 4: Anzahl und Länge der Vogeltracks, die mit den BNK-Radaren auf Rügen und in Klintum aufgezeichnet wurden.....	91
Tabelle 5: Kennzahlen der mit den Radargeräten ermittelten Zugintensitäten (MTR) bis 1.000 m und bis 200 m Höhe.	122
Tabelle 6: Ergebnisse des statistischen Vergleichs der Differenzen der Zugintensitäten (MTR) zwischen den Radargeräten und Beleuchtungsregimes.	125
Tabelle 7: Ergebnisse des statistischen Vergleichs der Differenzen der mittleren Anzahl Signale, in welchen die BNK-Anlagen beleuchtet wurden sowie jeweils eine halbe Stunde vorher und nachher.	129

Abkürzungsverzeichnis

ADS-B	Automatic Dependent Surveillance-Broadcast
AP	Arbeitspaket
AVV	Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Kennzeichnung von Luftfahrthindernissen
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BNetzA	Bundesnetzagentur
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
BWE	Bundeverband Windenergie
DAB	Digital Audio Broadcasting
DFS	Deutsche Flugsicherung
DVB-T	Digital Video Broadcastig - Terrestrial
EEG	Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien

FKZ	Förderkennzeichen
GPS	Global Positioning System
OWEA	Offshore-Windenergieanlage
OWP	Offshore-Windpark
PD	Probability of Detection
PSR.....	Primary Surveillance Radar
SOLF.....	Standard Offshore Luftfahrt
TerRES	TERma Radar Environment Simulator
WEA.....	Windenergieanlage

1. Einleitung

Bis 2050 sollen im Rahmen der Energiewende die erneuerbaren Energien den Großteil des Stromverbrauches abdecken. So sollen 2030 30 GW und 2045 75 GW installiert sein. Bereits 2030 soll der Anteil an erneuerbaren Energien 80 % im Energiemix betragen (Stand 10.2022). Ohne die Offshore-Windenergie sind diese Ziele und damit das Gelingen der Energiewende in Deutschland nicht erreichbar (KNORR et al. 2017). Für den weiteren Ausbau sind jedoch noch erhebliche technologische Innovationen erforderlich. Insbesondere die Projekte ab 2020, welche zum Teil ohne feste Einspeisevergütung betrieben werden sollen, wurden im Vertrauen auf erhebliche technologische Entwicklungen kalkuliert. Zudem entstehen durch den bislang erfolgreichen Ausbau und den ambitionierten Ausbauzielen der Bundesregierung ([DWG Windstatistik 2021](#)) in der Offshore-Windenergie neue Herausforderungen.

Das Risiko für Vögel, mit den Rotoren zu kollidieren, wird allgemein als der Faktor mit dem größten Konfliktpotential beim Ausbau der Offshore-Windenergienutzung für das Schutzgut Zugvögel angesehen. Dies wird auch durch die aktuellen Diskussionen zum Thema Zugvögel innerhalb der Branche und mit den zuständigen Behörden verdeutlicht. Vor dem Hintergrund bestehender Wissenslücken zur Häufigkeit von Kollisionen hat dies in Form der Nebenbestimmung 21 Eingang in die Genehmigungen (www.bsh.de) aller deutschen Offshore-Windparks (OWP) gefunden. In dieser Nebenbestimmung behält sich das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) als Genehmigungsbehörde vor, bei potenzieller Gefährdung des Vogelzugs Beweissicherungs- und Vermeidungsmaßnahmen anzuordnen, die auch Abschaltungen der Windenergieanlagen (WEA) einschließen können. Dies würde zu erheblichen negativen wirtschaftlichen Folgen für die Windparkbetreiber sowie zu Komplikationen für die Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) führen.

Während an Land bisher kein erhöhtes Kollisionsrisiko für nachts ziehende Vögel mit WEA festgestellt werden konnte und nur wenige nachts ziehende Vögel mit WEA kollidieren (KRIJGSVELD et al. 2009; GRÜNKORN et al. 2016; WELCKER et al. 2017), gilt dies für den Offshore-Bereich nicht, denn hohe Zahlen von Vogelkollisionen sind von zahlreichen Offshore-Installationen beschrieben. Sie werden zumeist in Zusammenhang mit der Beleuchtung der Installation gebracht, die Vögel insbesondere bei schlechten Wetterbedingungen bei Nacht anlocken kann. Der Nachtbefeuerung von Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) kann damit eine Schlüsselrolle für das Kollisionsrisiko von nachts ziehenden Vögeln zugeschrieben werden. Eine bedarfsgesteuerte Nachtkennzeichnung (BNK) von OWPs eröffnet die Möglichkeit, die nächtliche Beleuchtung der Anlagen auf ein Minimum, d.h. auf die kurzen Zeiträume zu beschränken, in denen die Flugsicherheit eine Befeuerung erfordert. Die Bezeichnung bedarfsgesteuerte Nachtkennzeichnung hat sich dabei erst im Laufe öffentlichen

Diskussion während der Projektlaufzeit etabliert und durchgesetzt. Sie wird synonym mit Begrifflichkeiten wie bedarfsgerechte Nachtkennzeichnung, oder der im Titel des Projektes verwendeten Bezeichnung Bedarfsgerechte Befeuerung verwendet.

Auch das Thema der Akzeptanz der Offshore-Windenergie ist bezüglich der Befeuerung der Anlagen von immer größer werdender Bedeutung. Durch die zunehmende Anzahl von OWEA häufen sich Beschwerden über die Lichtemission der Windparks bei Nacht. Diese sind von den Nordseeinseln und im Falle der OWPs in den Küstengewässern auch vom Festland aus gut sichtbar. Der Einsatz von bedarfsgerechter Befeuerung würde derartige Akzeptanzprobleme lösen.

2. Aufgabenstellung

Im Rahmen des hier beschriebenen Projektes sollte zunächst der Status Quo zur bedarfsgesteuerten Nachtkennzeichnung ermittelt werden. Dabei sollte z. B. auch zwischen der Antragstellung und dem Projektstart möglicherweise erfolgte technische oder regulatorische Entwicklungen berücksichtigt werden. Anschließend sollten geeignete OWPs ausgewählt werden, an welchen die bedarfsgesteuerte Nachtkennzeichnung getestet werden kann. In Abhängigkeit von den ausgewählten OWPs sollte ein geeignetes System ausgewählt und nach Möglichkeit für den Praxistest ausgeliehen werden. Parallel dazu sollte ein geeigneter Standort für den Praxistest des Systems ausgewählt werden. Dieser Einsatz des Systems kann auch als Grundlage für die generelle Anerkennung des Systems durch die Deutsche Flugsicherung (DFS) dienen. Auf Basis der OWP-Auswahl und des ausgewählten Systems sollte die Baugenehmigung für das Testsystem am späteren Teststandort beantragt werden.

Im Rahmen des Projektes BeBeO sollten erste Voruntersuchungen zur naturschutzfachlichen Begleitforschung durchgeführt werden. Diese beinhalten auch die Auswahl der im zweiten Projekt anzuschaffenden Radarsysteme zur Vogeldetektion. Abschließend wird ein Konzept für die bedarfsgesteuerte Nachtkennzeichnung von OWEA auf Basis der im Rahmen des Projektes behandelten Arbeitspakete (AP) erstellt.

Für ein Folgeprojekt, welches sich nach erfolgreich absolviertem erstem Projekt anschließen sollte, war geplant, ein Messsystem anzuschaffen und am endgültigen Einsatzort in Reichweite der ausgewählten OWPs zu installieren. Anschließend sollten die erforderlichen Maßnahmen zur Implementierung der Befeuerungsanlagen der OWPs vorgenommen und die eigentliche Erprobungsphase der bedarfsgerechten Befeuerung und die naturschutzfachliche Begleitforschung mit geeigneten Messsystemen für den Vogelzug durchgeführt werden.

Abschließend sollte eine Evaluierung mit einer Empfehlung für ein Konzept zur flächendeckenden bedarfsgerechten Befeuerung der gesamten deutschen Nord- und Ostsee erfolgen.

Aufgrund der Geschwindigkeitszunahme bei der Entwicklung und Implementierung von BNK-Systemen sehen die Projektpartner dieses Projektes jedoch von der Beantragung eines Folgeprojektes ab.

3. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Offshore-Windenergie ist in Deutschland nach wie vor eine vergleichsweise junge Technologie. Der erste Offshore-Windpark alpha ventus ist mit einer Kapazität von 60 MW als Testfeld 40 km vor Borkum im Jahr 2010 in Betrieb gegangen. Mitte 2019 haben in deutschen Gewässern bereits über 1.350 OWEA mit einer Gesamtleistung von über 6,6 GW Strom in das Netz eingespeist. Zum Projektende, Stand Dezember 2021, waren 1.501 OWEA mit einer Leistung von 7,8 GW in Betrieb. Im Kabinettsbeschluss <https://dserver.bundestag.de/btd/19/204/1920429.pdf> zum Windenergie-auf-See-Gesetz (WindSeeG) ist eine erhebliche Erhöhung der gesetzlichen [Ausbauziele für die Offshore-Windenergie](#) verankert und übersteigt den im WindSeeG Ende 2020 angepassten Ausbaupfad deutlich. So sollen mindestens 30 GW bis 2030 (statt 20 GW bis 2030), 40 GW bis 2035 (statt 40 GW bis 2040) und 70 GW bis 2045 ausgebaut werden. Unabhängig von der Erfolgsgeschichte dieser Technologie wird eine intensive Diskussion über die Kosten des Umstiegs unserer Energieversorgung auf erneuerbare Energien geführt. Damit ist auch die Wettbewerbsfähigkeit der Offshore-Windenergie verstärkt in den Blick der Öffentlichkeit getreten. Es besteht die Gefahr, dass die Entwicklung dieser jungen Technologie gestört wird, bevor die Potenziale zum Tragen kommen und Lerneffekte realisiert werden können. Aus diesem Grund ist es von entscheidender Bedeutung, dass vorhandene Kostentreiber bei Planung, Bau und Betrieb von OWPs möglichst effektiv reduziert werden, um die Stromgestehungskosten auf einem niedrigen Niveau zu halten.

Die BNK kann auf unterschiedliche und eher indirekte Weise dafür sorgen, dass die Stromgestehungskosten nicht weiter ansteigen: Es wird vermutet, dass durch die Einführung der BNK das Kollisionsrisiko von nachts ziehenden Vögeln mit OWEA stark reduziert wird. Vogelschlag an OWEA ist zunächst ein Naturschutzthema, aber auch ein Akzeptanzthema. Durch die Einhaltung oder Verbesserung von naturschutzfachlichen Vorgaben und dem damit verbundenen Schutz der Vogelwelt, geht automatisch eine Erhöhung der Akzeptanz in der Bevölkerung einher. Eine bessere Planbarkeit, schnellere Umsetzung und ein Betrieb mit

weniger Störungen sind die Folge. Die Stromgestehungskosten können so auf einem niedrigen Niveau gehalten werden. Eine weitere Verbesserung der Akzeptanz wird in der Reduktion der Lichtimmission gesehen. Hier gab es zahlreiche Beschwerden über die nächtliche Beleuchtung von OWPs.

Durch ein gut konzeptioniertes System zur bedarfsgerechten Befeuerung können weitere Kosten eingespart werden. So ist es technisch möglich, dass sich mehrere OWP-Betreiber in einem BNK-Verbund ein BNK-System z.B. auf Basis eines Aktivradars teilen und gemeinsam betreiben, um die Betriebs- und Installationskosten niedrig zu halten.

In diesem Projekt werden verschiedene Systeme betrachtet und auf ihre Möglichkeit für den Offshore-Einsatz untersucht. Es wird außerdem untersucht, ob es mit dem System möglich ist, Vogelmonitoring zu betreiben. Eine Geräteunion zwischen einem System zur BNK-Steuerung und dem für Betreiber verpflichtenden Vogelmonitoring wäre eine weitere Option der Kostenreduzierung.

4. Planung und Ablauf des Vorhabens

Wie in Kap. 2 erwähnt, sollte im vorliegenden Projekt zunächst der aktuelle Status Quo bezüglich der Technik und des regulatorischen Rahmens eruiert werden. Anschließend sollte ein OWP ermittelt werden, an dem ausgewählten System getestet, und Testflüge durchgeführt werden sollen.

In der Projektlaufzeit wurde ein Teststandort für die Errichtung und den Betrieb des Systems ermittelt. Zu Testzwecken wurde ein zur BNK-Steuerung fähiges Aktivradar geliehen und als autarke Containerlösung am Teststandort aufgestellt. Testflüge wurden durchgeführt, um zu ermitteln, ob eine Konformität zur Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Kennzeichnung von Luftfahrthindernisse (AVV) erreicht werden kann. Parallel dazu sollten naturschutzfachliche Untersuchungen durchgeführt werden.

Für die technische Umsetzung des Praxistests wurde nach einer öffentlichen Ausschreibung ein Unterauftrag vergeben (Bekanntmachungs-ID: CXP4YSBD7MJ). Die Ausschreibung wurde von der Firma Quantec Sensors GmbH gewonnen. Quantec Sensors wurde damit beauftragt, das Testsystem aufzubauen, zu betreiben und die erforderlichen Genehmigungen einzuholen. Die Datenaufnahme inklusive Testflug wurde im Auftrag von Quantec Sensors vom Hersteller des Radarsystems Terma A/S Dänemark durchgeführt.

5. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die bedarfsgesteuerte Nachtkennzeichnung stellt eine technische Möglichkeit dar, über eine Steuerung per Radar oder Transpondertechnologie, die Befeuerung der WEA nur dann zu aktivieren, wenn sich ein Luftfahrzeug nähert. Dazu sind bei Onshore-Windparks bereits unterschiedliche Systeme implementiert worden. Zum einen wurden Systeme mit aktivem Radar verwendet. Bei Aktivradarsystemen werden von Antennen elektromagnetische Impulse generiert, welche an Flugobjekten reflektiert und dann durch geeignete Sensoren erfasst werden. Bei passiven Radarsystemen werden mittels Dopplereffekt Reflexionen bestehender elektromagnetischer Wellen an WEA ausgewertet (FA WIND 2016).

Im Rahmen des Projektes PARASOL (BMW, FKZ 0325445) wurde an verschiedenen Onshore-WEA ein passives Radarsystem zur bedarfsgerechten Befeuerung eingesetzt. Hierbei wurde jedoch nur eine Reichweite von etwa 10 km erreicht und die Untersuchungen wurden lediglich an WEA mit Rotordurchmessern bis zu 82 m durchgeführt (FA WIND 2016). Dies ist für den Einsatz an OWPs nicht ausreichend.

Auch andere an Land getestete und von der DFS anerkannte Systeme wie z. B. Airspex von Enertrag Systemtechnik und Airbus Defence & Space (Reichweite bis zu 8 km) und die BNK von Nordex und Quantec mit Technik von Terma A/S (18 km) sind für den Einsatz an OWPs aufgrund der geringen Reichweite nicht geeignet. Gleiches gilt für das IntelliLight von Vestas Wind Systems A/S, dessen Reichweite einerseits unterhalb der des Termasystems (ca. 35 sm) liegt und andererseits bislang nur an Windturbinen von Vestas getestet und anerkannt wurde.

Durch die Installation eines Radarsystems an Land ist je nach Entfernung des OWPs eine Reichweite von bis zu 74 km notwendig. Die Installation des Systems ist dann auf einem Turm mit einer zu berechnenden Höhe erforderlich, um eine möglichst große Anzahl von OWPs erreichen zu können. Auf diese Weise kann das System zudem auch zusätzlich Onshore-WEA schalten, welche sich im Erfassungsbereich des Radars befinden.

Eine weitere Möglichkeit stellt die BNK mittels Transpondertechnologie dar. So werden Transpondergeräte bereits seit einiger Zeit in der deutschen Flugsicherheit eingesetzt. In den jeweiligen Luftfahrzeugen installierte Transpondergeräte senden hierbei mindestens alle 0,8 bis 1,2 Sekunden Signale aus. Radarsysteme am Boden können außerdem verschiedene Informationen zum Luftfahrzeug abfragen, die vom Transponder im Luftfahrzeug beantwortet werden, so z.B. die Flughöhe, Position und Geschwindigkeit. Zusätzlich dient die Technik heute auch der Kollisionsvermeidung, indem der Transponder, in dem einen Luftfahrzeug auf die Abfrage eines anderen Luftfahrzeuges antwortet.

Bei dem möglichen Einsatz von Transponder-Systemen werden in oder an der WEA Empfangsgeräte installiert. Diese empfangen die Transpondersignale, welche von den Luftfahrzeugen ausgesendet werden, ebenso wie die Antwort-Signale der Transponder auf Radarabfragen vom Boden sowie die Antwortsignale auf die Abfragen weiterer Luftfahrzeuge. Mit diesen Informationen lässt sich bestimmen, ob und wie sich Luftfahrzeuge einer WEA nähern. Dadurch lässt sich die Nachtkennzeichnung der Anlagen bedarfsgerecht steuern. Lanthan und Air Avionics hatten zum Zeitpunkt der Antragsstellung des vorliegenden Projektes gemeinsam technische Lösungen zur bedarfsgerechten Kennzeichnung von Hindernissen mittels Transpondertechnologie entwickelt und erprobt. Die Firma Reetec hatte angekündigt, künftig Systeme anzubieten, die ebenfalls auf Basis der Transpondertechnik kommunizieren. Die Deutsche Windtechnik hatte ein eigenes BNK-Transponder-System als Nachrüstung entwickelt, das unabhängig von der Parkinfrastruktur und dessen Kommunikations-Anbindung installiert werden kann. Die Transpondertechnologie, als von der technischen Ausstattung der Luftfahrzeuge abhängige Technik, war allerdings bislang nicht zur alleinigen Schaltung von BNK zugelassen.

In OWPs wurde bislang noch kein System für die bedarfsgesteuerte Nachtkennzeichnung eingesetzt. Erstmals haben Investoren und Betreiber des OWPs Nordergründe einen Auftrag vergeben, den gesamten Park mit insgesamt 18 WEA vom Typ Senvion 6.2M mit einem System zur bedarfsgesteuerten Nachtkennzeichnung auszurüsten. Für dieses Vorhaben soll auf eine Transponderlösung zurückgegriffen werden. Die Umrüstungsarbeiten sind für das Frühjahr 2022 geplant. Ergebnisse konnten somit im Rahmen dieses Vorhabens noch nicht berücksichtigt werden. Für die Flächen zur Nutzung der Windenergie auf See im Landesraumentwicklungsprogramm von Mecklenburg-Vorpommern (<https://www.regierung-mv.de/Landesregierung/wm/Raumordnung/Landesraumentwicklungsprogramm/aktuelles-Programm/>) war eine entsprechende Vorgabe zum Einsatz von bedarfsgerechter Befeuerung bereits vorhanden. Auch im Energiesammelgesetz wurden Vorgaben zur bedarfsgerechten Befeuerung aufgenommen. Entsprechend groß war der Druck, diese Technologie für den Einsatz an OWPs zu erproben.

Im Juli 2018 hat der Windparkbetreiber Vattenfall abgekündigt, in Dänemark ein System zur BNK des OWP Versterhav Syd/Nord zu testen. Bei dem OWP Versterhav Syd/Nord handelt es sich um einen Windpark mit einer Küstenentfernung von lediglich etwa 4 Kilometer. Der Windpark sollte nach Planungen des Betreibers Vattenfall 2020 in Betrieb gehen. Vattenfall plante für eine BNK den Einsatz eines Radarsystems mit einer relativ geringen Reichweite, hatte sich zu dem Zeitpunkt aber noch nicht auf ein konkretes System festgelegt. Solche Systeme werden bereits bei verschiedenen Onshore-Windparks eingesetzt.

Diese Systeme sind für die Verwendung in deutschen OWPs aufgrund der geringen Reichweite auch in Küstengewässern nicht geeignet. Im Rahmen des Projektes ist nach aktuellem Stand der Technik das System SCANTER 4002 das einzige am Markt verfügbare System mit einer ausreichenden Reichweite (der Hersteller gibt eine Reichweite von bis zu 40 Seemeilen, also bis zu 74 km an). Dieses System (und somit auch kein anderes System mit vergleichbarer Reichweite) wurde bislang noch nicht für die bedarfsgesteuerte Nachtkennzeichnung von Windparks eingesetzt und sollte im Rahmen des beantragten Projektes erstmals zu diesem Zweck getestet werden.

Der Wissensstand zum Kollisionsrisiko von ziehenden Vögeln an Windenergieanlagen auf See ist weiterhin gering, da die Erfassung der Kollisionsraten methodisch sehr schwierig ist. Nachts ziehende Vögel werden von künstlichen Lichtquellen angezogen (LOSS et al. 2015). Dabei scheinen die Lichtstärke und -farbe sowie die Blinkfrequenz eine Rolle zu spielen. Insbesondere hinsichtlich der Lichtfarbe und der Blinkfrequenz liegen jedoch unterschiedliche Studienergebnisse vor (BALLASUS et al. 2009; GEHRING et al. 2009; REBKE et al. 2019), so dass die Bedeutung dieser Faktoren nicht abschließend beurteilt werden kann. Unstrittig ist jedoch der große Einfluss der Wetterbedingungen auf die Anlockwirkung der Lichtquellen auf Zugvögel. Insbesondere bei schlechten Sichtbedingungen (Nebel, Niesel, niedrige Wolkendecke), welche die Orientierungsfähigkeit der Vögel einschränkt, ist von einer deutlich erhöhten Anziehung auszugehen (LARKIN 2000; BALLASUS et al. 2009). Weiterhin ist davon auszugehen, dass die anziehende Wirkung von Lichtquellen auf See stärker ausgeprägt ist als unter vergleichbaren Bedingungen an Land. Während erschöpfte Zugvögel an Land ihre Zugaktivität jederzeit unterbrechen und einen geeigneten Rastplatz aufsuchen können, ist dies für nachts ziehende Singvögel auf See nicht möglich. Zahlreiche Studien liegen vor, welche die besondere Anlockwirkung von Lichtquellen auf See bei schlechter Sicht oder anderer widriger Wetterbedingungen beschreiben und das damit verbundene stark erhöhte Kollisionsrisiko an den beleuchteten Strukturen dokumentieren (MÜLLER 1981; HÜPPOP et al. 2006; AUMÜLLER et al. 2011).

Im Rahmen des Projektes EKKO (BMU, FKZ 03MAP195) wurden bereits Untersuchungen hinsichtlich der naturschutzfachlichen Sicht auch zur Befeuern der OWEA von BioConsult SH durchgeführt. Die im Rahmen des Projektes durchgeführte Untersuchung kommt hinsichtlich des Einflusses der Befeuern zu dem Schluss, dass aus naturschutzfachlicher Sicht eine bedarfsgerechte Beleuchtung stark positiv zu beurteilen ist.

Im Projekt OASE (BMW, FKZ 0325711) wurde ein Systemkonzept für das Vogelmonitoring in OWPs mit multistatischem Radar mit dem Ziel entwickelt, Informationen zum Meideverhalten und zur Kollisionshäufigkeit von Zugvögeln innerhalb eines Windparks zu erhalten. Die an das

System gestellten Anforderungen konnten während der Konzepterstellung jedoch nur teilweise erreicht werden. Eine technische Umsetzung des Systems ist nach aktuellem Kenntnisstand nicht geplant.

6. Arbeitspakete und Ergebnisse

Im Folgenden sind die Inhalte des Projektes, unterteilt nach Arbeitspaketen, zu finden. Zu jedem AP wird zunächst die Arbeitspaketbeschreibung gemäß Projektantrag dargelegt. Es folgen dann die ausgeführten Arbeiten und gegebenenfalls die Abweichungen vom ursprünglichen Arbeitsplan. Die erzielten Ergebnisse befinden sich am Ende des jeweiligen Kapitels.

6.1 Projektkoordination (AP 1)

Die Projektkoordination wurde durch die Stiftung OFFSHORE-WINDENERGIE als Projektkoordinator durchgeführt. Neben den administrativen Aufgaben wie Berichtspflicht, Finanzplanung, Meilensteinmonitoring usw. wurden im Rahmen des AP der Aufbau und die Pflege einer Internetseite für den Informationsaustausch und die Verbreitung der Projektergebnisse umgesetzt. Auch die Veröffentlichung von Ergebnissen wurde im Rahmen dieses AP koordiniert. Die Beteiligung von verschiedenen Akteuren, sowohl als Projektpartner als auch als assoziierte Partner, erforderten einen erhöhten Koordinations- und Kommunikationsaufwand. Auch die Gründung einer projektbegleitenden Arbeitsgruppe (PAG) war vorgesehen. Insbesondere wurde eine enge Kooperation mit den zuständigen Ministerien und Behörden angestrebt. Die PAG bestand aus Mitgliedern, Angehörigen oder Mitarbeitern des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr, Bundesverband Offshore-Windenergie, Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung, Deutsche WindGuard GmbH, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Bundesamt für Naturschutz, Projektträger Jülich, Vattenfall GmbH, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Umweltbundesamt und der wpd GmbH. Ein jährliches Treffen des beratenden Expertengremiums wurde von der Stiftung OFFSHORE-WINDENERGIE koordiniert und durchgeführt. Das Gremium hatte auch den Zweck, die Inhalte und Ergebnisse in die entsprechenden Institutionen zu spiegeln.

6.2 Ermittlung des Status Quo (AP 2)

In diesem Arbeitspaket war eine intensive Recherche der am Markt verfügbaren Systeme und der dazugehörigen technischen Spezifikationen zum Zeitpunkt des Projektstarts vorgesehen.

Es war vorgesehen, dadurch auch technische und regulatorische Entwicklungen nach der Antragstellung zu berücksichtigen. Insbesondere auch die Eignung der verschiedenen am Markt verfügbaren und in den OWPs eingesetzten Befeuerungssysteme für die Integration in das System sollten Bestandteil der Untersuchungen sein.

Es sollten auch nochmals die in Onshore-Windparks bereits eingesetzten Verfahren zur bedarfsgesteuerten Nachtkennzeichnung untersucht werden, um neueste Entwicklungen zu berücksichtigen. Von hoher Bedeutung ist die Prüfung, inwieweit die Anforderungen für OWPs sich von denen für WEA an Land unterscheiden (abgesehen von der offensichtlichen Anforderung hinsichtlich der Reichweite).

6.2.1 Ermittlung unterschiedlicher Systeme (AP 2.1)

Zunächst sollten die am Markt verfügbaren und im Rahmen von Forschungsvorhaben verwendeten Systeme ermittelt werden. Hierbei waren die verschiedenen Radarsysteme (aktiv und passiv) und die Transpondertechnologie zu berücksichtigen aber auch ggfls. andere geeignete Technologien. Das AP 2 wurde von der Deutschen WindGuard Offshore geleitet und koordiniert. Hierbei hat die DWO vor allem die technischen Anforderungen bearbeitet. Folgende Ergebnisse wurden ermittelt und während der Projektlaufzeit weiter ergänzt. Mit der Novellierung der AVV (Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Kennzeichnung von Luftfahrthindernissen) im April 2020 gab es insgesamt drei verschiedene Systeme, die für die BNK zugelassen waren: die aktiven und passiven Radarsysteme, sowie die Transpondertechnologie.

Die Transpondertechnologie setzt voraus, dass alle Luftfahrzeuge, die in den Bereich der warning zone eines Windparks fliegen, mit einem Transponder ausgerüstet sind. Der Transponder der Luftfahrzeuge sendet alle 0,8 bis 1,2 Sekunden Signale aus, die von Empfängern am Boden aufgenommen und zur BNK genutzt werden. Zu Beginn des Vorhabens waren erste und bis dato einzige auf dem Markt verfügbare Transpondersystem das von Lanthan Safe Sky. Mittlerweile sind viele verschiedene Firmen in den Markt eingestiegen und bieten Transponder Systeme an.

Bei den Radar-Systemen sind seit geraumer Zeit zwei verschiedene System in der Anwendung, die auf unterschiedlichen Technologien basieren und für die BNK genutzt werden. Wird von einem Radargerät gesprochen, handelt es sich im Allgemeinen um ein Aktiv-Radarsystem. Die Entdeckung und Entwicklung der Radartechnik begann schon im 19. Jahrhundert und kann als Anhäufung vieler Entwicklungen und Verfeinerungen angesehen werden an den Wissenschaftler mehrerer Nationen Anteil hatten. Durch die Entwicklung von

Luftwaffen zu bedeutenden Leistungsträgern erfährt die Radartechnik im 2. Weltkrieg einen starken Entwicklungsschub. Heute ist eine zivile Nutzung von Radaranwendungen zum Alltag geworden.

Im Rahmen der Nutzung für ein BNK-System strahlt das Aktivradar mit hochfrequenter Energie das im Luftraum des Windparks befindliche Flugobjekt an. Dort wird die Energie reflektiert und im Radargerät wieder empfangen. Die elektromagnetische Energie, die durch die Antenne empfangen wird, wird Echosignal genannt. Die hochfrequente Energie wird durch einen leistungsfähigen Sender erzeugt und mit einem hochempfindlichen Empfänger wieder empfangen. 2019 wurden Aktivradar-Systeme von den Fa. Quantec und Dark Sky angeboten, beide erfüllten die Systemanforderungen der seinerzeit gültigen AVV.

Das Passivradar wird ausschließlich von der Fa. Parasol GmbH & Co. KG angeboten und nutzt im Gegensatz zu klassischen (aktiven Radarsystemen) die Rundfunksignale der digitalen Netze DVB-T und DAB+, die in Deutschland flächendeckend vorhanden sind. DVB-T Signale sind im Vergleich zu anderen Rundfunk- und Kommunikationssignalen besonders geeignet für die passiven Radarsensoren, da die Rundfunksender ihre Signalenergie bei niedrigen Höhen unter 1000 Meter Bündeln und die ausgesendeten Signalformen und Verarbeitungsalgorithmen sich gut zur Unterscheidung unterschiedlicher Objekte eignen. Der sendende Mast kann bis zu 80 Kilometer entfernt sein: Die Parasol-Sensoren empfangen sowohl das Ursprungssignal als auch dessen Echo durch ein Flugobjekt. Das System errechnet aus der Relation der beiden Signale den genauen Standort des Zielobjekts.

6.2.2 Anforderungen an den Offshore-Einsatz (AP 2.2)

Die Anforderungen für den Einsatz in Offshore-Windparks sind andere als für den Einsatz in Onshore-Windparks (Umgebungsbedingungen, Entfernungen, Zugänglichkeit usw.). Im Rahmen des AP 2.2 sollten diese Anforderungen ermittelt werden.

Im Rahmen dieses APs wurde eine intensive Internetrecherche und verschiedene Gespräche mit Offshore Experten vorgenommen. Unter anderem wurden bei Herstellern der Beleuchtungsanlagen und der verschiedenen BNK-Systemanbietern Informationen abgefragt und mit Behördenvertretern zum Thema Störungen im Bereich der Leichtigkeit und der Sicherheit des Schiffsverkehrs gesprochen.

Die Anforderungen eines BNK-Systems offshore sind deutlich höher als bei einem Einsatz an Land. Die Umweltbedingungen auf See sind häufig extrem und wechselhaft. Das System muss daher Extremwetter resistent sein und den Einfluss von Salzgehalt und Wasser ertragen können. Außerdem muss das System eine hohe Reichweite haben, um auf See implementiert

zu werden. Auch ist im Offshore Einsatz die Schifffahrt zu beachten. So müssen Windenergieanlagen zum Beispiel grundsätzlich mit AIS-Schifffahrtszeichengeräten (AIS-AtoN) gekennzeichnet sein. Diese dürfen nicht von den Signalen der BNK beeinflusst werden.

6.2.3 Regulatorische Rahmenbedingungen zur bedarfsbefeierten Nachtkennzeichnung in Deutschland und der AWZ (AP 2.3)

Die regulatorischen Rahmenbedingungen zur bedarfsgesteuerten Nachtkennzeichnung waren zum Zeitpunkt der Antragsstellung im Wandel begriffen (Energiesammelgesetz, Überarbeitung der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Kennzeichnung von Luftfahrthindernissen). Der aktuelle Stand zum Zeitpunkt der Bewertung der verschiedenen Systeme kann eine erhebliche Rolle bei der Auswahl spielen und sollte in diesem Arbeitspaket ermittelt werden.

Die gesetzliche Grundlage für die bedarfsgesteuerte Nachtkennzeichnung findet sich in § 9 Abs. 8 EEG und in der Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Kennzeichnung von Luftfahrthindernissen. Hier heißt es: ... *„(8) Betreiber von Windenergieanlagen an Land, die nach den Vorgaben des Luftverkehrsrechts zur Nachtkennzeichnung verpflichtet sind, müssen ihre Anlagen mit einer Einrichtung zur bedarfsgesteuerten Nachtkennzeichnung von Luftfahrthindernissen ausstatten. Auf Betreiber von Windenergieanlagen auf See ist Satz 1 anzuwenden, wenn sich die Windenergieanlage befindet: 1. im Küstenmeer, 2. in der Zone 1 der ausschließlichen Wirtschaftszone der Nordsee wie sie in dem nach den §§ 17b und 17c des Energiewirtschaftsgesetzes durch die Bundesnetzagentur bestätigten Offshore-Netzentwicklungsplan 2017-2030 ausgewiesen wird, 3. in der ausschließlichen Wirtschaftszone der Ostsee.*

Die Pflicht nach Satz 1 gilt ab dem 1. Juli 2020. Die Pflicht nach Satz 1 kann auch durch eine Einrichtung zur Nutzung von Signalen von Transpondern von Luftverkehrsfahrzeugen erfüllt werden. Von der Pflicht nach Satz 1 kann die Bundesnetzagentur auf Antrag im Einzelfall, insbesondere für kleine Windparks Ausnahmen zulassen, sofern die Erfüllung der Pflicht wirtschaftlich unzumutbar ist.“ Adressaten von § 9 Abs. 8 sind Betreiber von Windenergieanlagen, welche nach Luftverkehrsrecht zur Nachtkennzeichnung verpflichtet sind.

Die Ausstattungspflicht mit BNK-Systemen gilt grundsätzlich für alle Bestands- und Neuanlagen. Laut Bundesnetzagentur (BNetzA) kann die Ausstattungspflicht nur durch den *„nach Luftverkehrsrecht zulässigen Betrieb einer BNK-Einrichtung erfüllt werden. Die BNK-Ausstattungspflicht umfasst somit alle erforderlichen Schritte für einen zulässigen BNK-Betrieb“* (Henrike Almeling, BWE Praxistag BNK, 17.03.2020). Ausnahmen zur

Ausstattungspflicht bestehen bei wirtschaftlicher Unzumutbarkeit (3%-Regel). Eine wirtschaftliche Unzumutbarkeit wäre gegeben „wenn die bedarfsgesteuerte Nachtkennzeichnung im konkreten Fall eine solche wirtschaftliche Härte darstellen würde, dass der Betrieb von Windenergieanlagen nicht mehr wirtschaftlich möglich wäre (BT-Drs. 19/6155, S114). Die 3%-Regel ist hierbei eine Vermutungsregel und soll als Beweiserleichterung dienen. Die Regel besagt, dass eine wirtschaftliche Unzumutbarkeit gegeben ist, wenn die Kosten einer BNK-Ausstattung 3% der Umsatzerlöse bis zum Ende der Förderdauer der WEA überschreiten. Außerdem bestehen Ausnahmen bei Altanlagen, für die der Zahlungsanspruch nach EEG innerhalb von 3 Jahren ab Beginn der BNK-Pflicht endet. Zur Verfahrensvereinfachung sind in solchen Fällen kein Ausnahmeantrag bei der BNetzA oder weitere Nachweise erforderlich. Jedoch wäre eine entsprechende Mitteilung empfehlenswert.

Es besteht keine Ausstattungspflicht, wenn die Verwendung eines BNK-Systems unzulässig, also luftverkehrsrechtlich untersagt ist (z.B. in der Nähe von Flughäfen / Flugplätzen). Da hier der Fall der rechtlichen Unmöglichkeit eintritt, können und müssen in solchen Fällen auch keine Ausnahmegenehmigungen durch die BNetzA erteilt werden. Eine entsprechende Bescheinigung der zuständigen Genehmigungs- oder Luftfahrtbehörde gegenüber dem Netzbetreiber ist hier ausreichend (BWE Praxistag BNK, 17.03.2020). Die Legimitation zur Bescheidung von Ausnahmeanträgen erhält die BNetzA durch § 9 Abs. 8 EEG.

Die Frist zur Umsetzung wurde durch die BNetzA zunächst bis zum 30.06.2021 (Az. BK6-19-142) verlängert. Mit Beschluss vom 05.11.2020 hat die BNetzA (Az. BK6-20-207) nach starker Kritik seitens der Windbranche die Frist zur Ausstattung mit BNK für Windenergieanlagen an Land bis zum 31.12.2022 verlängert. Offshore-Windenergie erhalten eine Fristverlängerung bis zum 31.12.2023. Die Festlegungskompetenz dazu erhält die BNetzA aus § 85 Abs. 2 Satz 1a EEG. Bei Verstoß gegen § 9 Abs. 8 entfällt der Anspruch auf die EEG-Vergütung für den Zeitraum des Verstoßes. § 52 Abs. 2 Nr. 1a EEG 2017: „Der anzulegende Wert verringert sich auf den Monatsmarktwert, ... solange der Anlagenbetreiber gegen § 9 Abs. 8 verstößt“.

Die Fristen zur Umsetzung sind bei OWP's abhängig vom Standort. Im Flächenentwicklungsplan (FEP) 2020 für die deutsche Nord- und Ostsee wurde als Grundlage für die Bewertung der räumlichen Nähe zur Küste das Vorgehen des Offshore-Netzentwicklungsplanes (O-NEP) für die Bereiche der Nord- und Ostsee – eine Aufteilung in Entfernungszonen – übernommen. Die Zonen weisen eine räumliche Tiefe von etwa 50 bis 100 km auf. Das Küstenmeer und die deutsche AWZ der Nordsee werden in fünf Zonen eingeteilt. Die räumliche Tiefe der Zone 1 in der Nord- und Ostsee liegt dergestalt miteinander im Einklang, sodass bei Übertragung der räumlichen Ausdehnung der Zone 1 der Nordsee die gesamte Fläche des Küstenmeers und der AWZ der Ostsee abgedeckt werden. Im Ergebnis

liegen damit das Küstenmeer und die deutsche AWZ der Ostsee vollständig in der in der Entfernungszone 1 (Abb. 1 und 2).

Die Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Kennzeichnung von Luftfahrthindernissen (AVV) ist in ihrer aktuellen Form für den terrestrischen Bereich entworfen worden. Eine für die BNK notwendige Anpassung für den Bereich über den deutschen Gewässern von Nord- und Ostsee wurde während der Projektlaufzeit in Form des „Standard Offshore Luftfahrt“ (SOLF) von den zuständigen Referaten des BMDV und des BSH erarbeitet.

Mit dem Erlass vom 15.08.2022 hat das Bundesministerium für Digitales und Verkehr das BSH angewiesen, den Standard Offshore-Luftfahrt für die deutsche AWZ in den Zulassungs- und Vollzugsverfahren des BSH ab sofort anzuwenden.

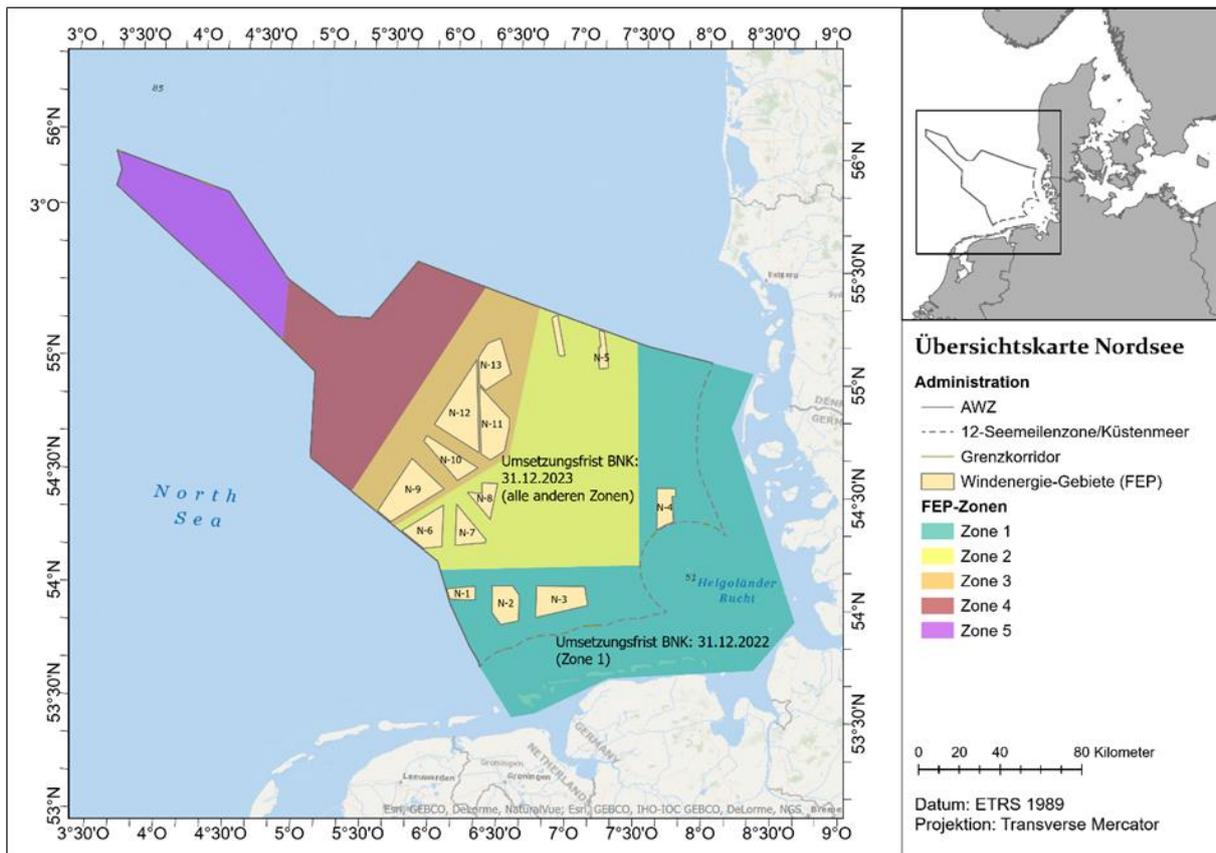


Abbildung 1: Umsetzungsfristen in den Zonen 1 – 5 der Nordsee

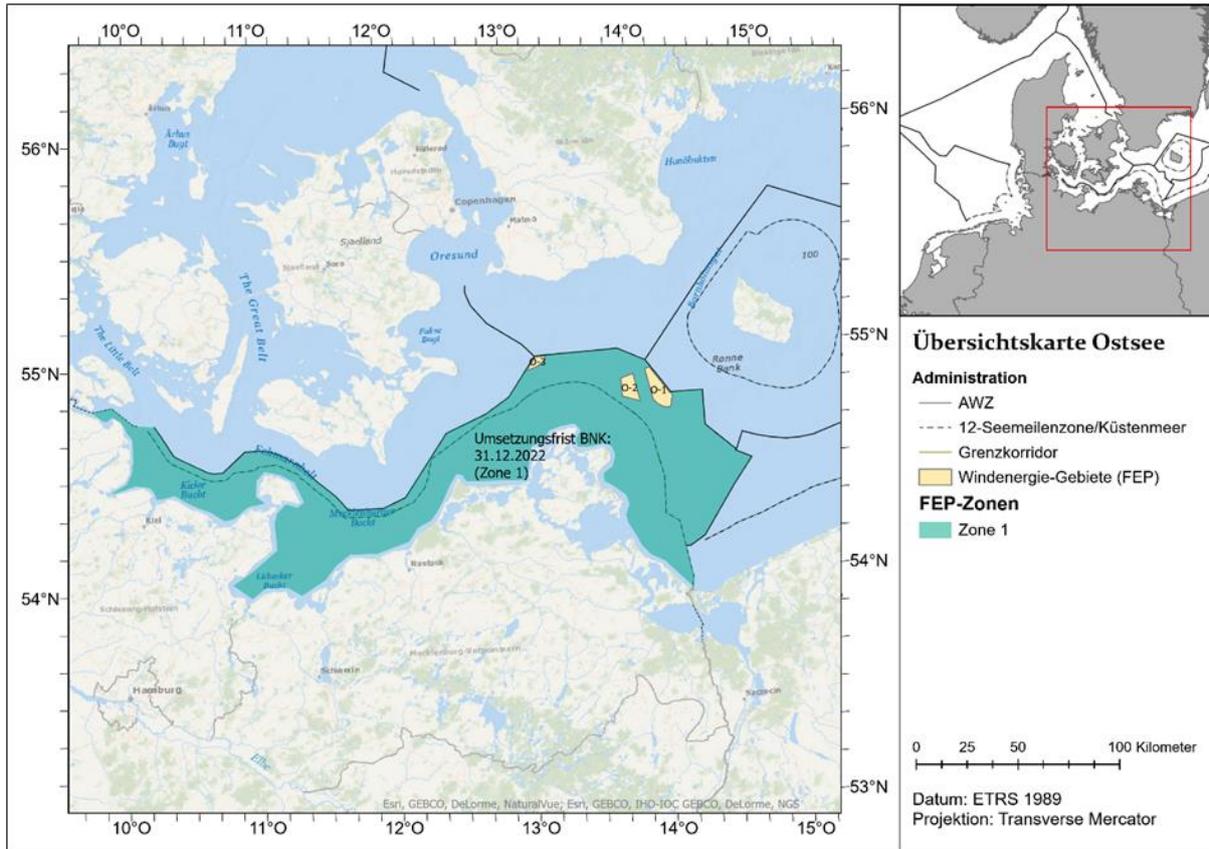


Abbildung 2: Umsetzungsfristen in der Ostsee

6.3 OWP Auswahl (AP 3)

Nach der Ermittlung des Status Quo war die Auswahl der OWPs geplant, an denen die bedarfsgesteuerte Nachtkennzeichnung im Folgeprojekt implementiert werden soll. Hierbei sind Aspekte wie die Küstenentfernung der OWPs, die Entfernung der OWPs zueinander, die dort eingesetzten Befeuerungsanlagen, die Anzahl der OWEAs, die Nähe zu Schutzgebieten, das Zugvogelaufkommen usw. zu berücksichtigen. Für das Folgeprojekt war geplant, zwei OWPs in das System zu implementieren. Auf diese Weise kann der Einfluss auf den Vogelzug untersucht werden, indem jeweils bei einem OWP die Befeuerung lediglich bedarfsweise und bei dem anderen auf herkömmliche Weise (also permanent) eingeschaltet wird. Sollte es aufgrund der Entfernungen zwischen den Windparks oder aufgrund anderer Umstände lediglich gelingen, einen OWP zu implementieren, so könnte auf die gleiche Weise mit zwei Hälften des einen OWPs verfahren werden. Die Projektidee wurde bereits mit zahlreichen OWP-Betreibern diskutiert. Hierbei zeigten mehrere Betreiber großes Interesse an der Projektidee, welches auch durch mehrere Letters of Intent belegt ist.

6.3.1 Definition der Voraussetzungen (AP 3.1)

Zunächst waren die Voraussetzungen für die Offshore-Windparks zu definieren. Hierzu gehören z. B. die Entfernung zwischen den Windparks, die Größe der jeweiligen Windparkfläche, die Abstände zwischen den einzelnen OWEA, die Küstenentfernung, die Nähe zu Schutzgebieten, die Anlagentypen, die technische Infrastruktur und die eingesetzten Befeuersanlagen.

Im Arbeitspaket 3 (OWP-Auswahl) wurden von der Deutschen WindGuard Offshore die technischen Anforderungen, sowie die standortbezogenen Gegebenheiten verschiedener Windparks analysiert. Dies erfolgte durch intensive Internetrecherche und Gesprächen mit Vertretern der Firmen, welche die verschiedenen BNK-Systeme anbieten, da die Auswahl der für das Forschungsvorhaben geeigneten OWPs in engem Zusammenhang mit der Auswahl des BNK-Systems steht.

Aufgrund des naturschutzfachlichen Schwerpunktes im Projekt und der darin implementierten Vogelerfassung mit Hilfe eines Radargerätes scheidet Transponder- und Passivradarsysteme aus. Da die Installation eines Radargerätes im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nur an Land möglich war, spielte die Küstennähe des OWPs eine entscheidende Bedeutung.

6.3.2 Definition möglicher Windparks (AP 3.2)

Auf Basis der Ergebnisse des AP 3.2 sollten geeignete Offshore-Windparks ausgewählt werden. Dies sollte in einer Matrix mit den entsprechenden Randbedingungen aus AP 3.1 erfolgen. Dadurch könnte idealerweise auch eine Priorisierung der Windparks erfolgen.

Auf Grundlage der in AP 2 und 3.1 ermittelten Daten wurde eine Bewertungsmatrix mit den Anforderungen und deren Gewichtung erstellt (siehe Anhang). Es wurden unter anderen die Größe der Windparks, die Küstenentfernung, die technische Infrastruktur, die Nähe zu anderen Windparks und die Nähe zu Naturschutzzonen analysiert. Windparks mit zu hoher Entfernung zum Festland wurden bereits im Voraus ausgeschlossen werden. Aus jedem Cluster wurde ein OWP ausgewählt. Als „Cluster für Offshore-Windparks“ definiert der Offshore-Netzplan räumlich zusammenhängende und abgrenzbare Planungen für Offshore-Windenergieanlagen (BSH 2017). Die folgenden Windparks aus Nord- und Ostsee wurden anhand der Bewertungsmatrix mit einem Ranking versehen: Arkona, Wikinger, EnBW Baltic 1, EnBW Baltic 2, Nordergründe, Meerwind Süd/Ost, Nordsee Ost, Gode Wind I und II, Nordsee One, EnBW Hohe See, Sandbank, Borkum Riffgrund 1 und Bard Offshore.

Durch die Auswertung der Matrix haben sich folgende OWPs für das Vorhaben als optimal herausgestellt: In der Ostsee wurden die OWPs Windparks Arkona, Wikinger, Baltic I und

Baltic 2 als sehr geeignet angesehen, in der Nordsee die Parks Nordergründe, Meerwind Süd/Ost und Nordsee Ost.

6.3.3 Auswahl von Offshore-Windparks (AP 3.3)

Auf Basis der Matrix aus AP 3.2 sollte die Ansprache der Betreiber der geeigneten Offshore-Windparks erfolgen. Hierbei gilt es, die Anforderungen bezüglich der technischen Umsetzung und die Bereitschaft der jeweiligen Betreiber zu ermitteln. Eine Ansprache der Betreiber erfolgte nicht, da zunächst die Datenqualität hinsichtlich des Vogelzugs, die Reichweite (Detektionsraum) und der zu leistende Aufwand erfasst werden sollte.

Für die konkrete Auswahl der OWP's Baltic 2 und Arkona wurden neben der erstellten Matrix weitere Faktoren berücksichtigt. Vor allem ein möglicher Standort (siehe Kap. 6.4) zur Installation des ausgewählten Systems und die technischen Eigenschaften des geeigneten Systems führten letztendlich zur Entscheidung. Es wurde deutlich, dass die Arbeitspakete 3,4, und 5 sehr eng miteinander verknüpft werden mussten, um allen Anforderungen gerecht zu werden.

Der Windpark Baltic 2 liegt in der Ostsee, 32 km nördlich der Insel Rügen und vereinnahmt mit 80 OWEA des Typs Siemens SWT-3,6-120, eine Fläche von ca. 27 km². Die Wassertiefe beträgt im Windparkgebiet 23-44 m. Der OWP Baltic 2 ging am 21. September 2015 offiziell in Betrieb. Baltic 2 wird vom Energieversorgungsunternehmen EnBW betrieben.

Der Windpark Arkona liegt 35 km nordöstlich der Insel Rügen in der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone und wurde im Jahr 2019 von der RWE in Betrieb genommen. Im OWEA Arkona sind 60 OWEA installiert, damit verfügt Arkona über eine Leistung von 385 MW.

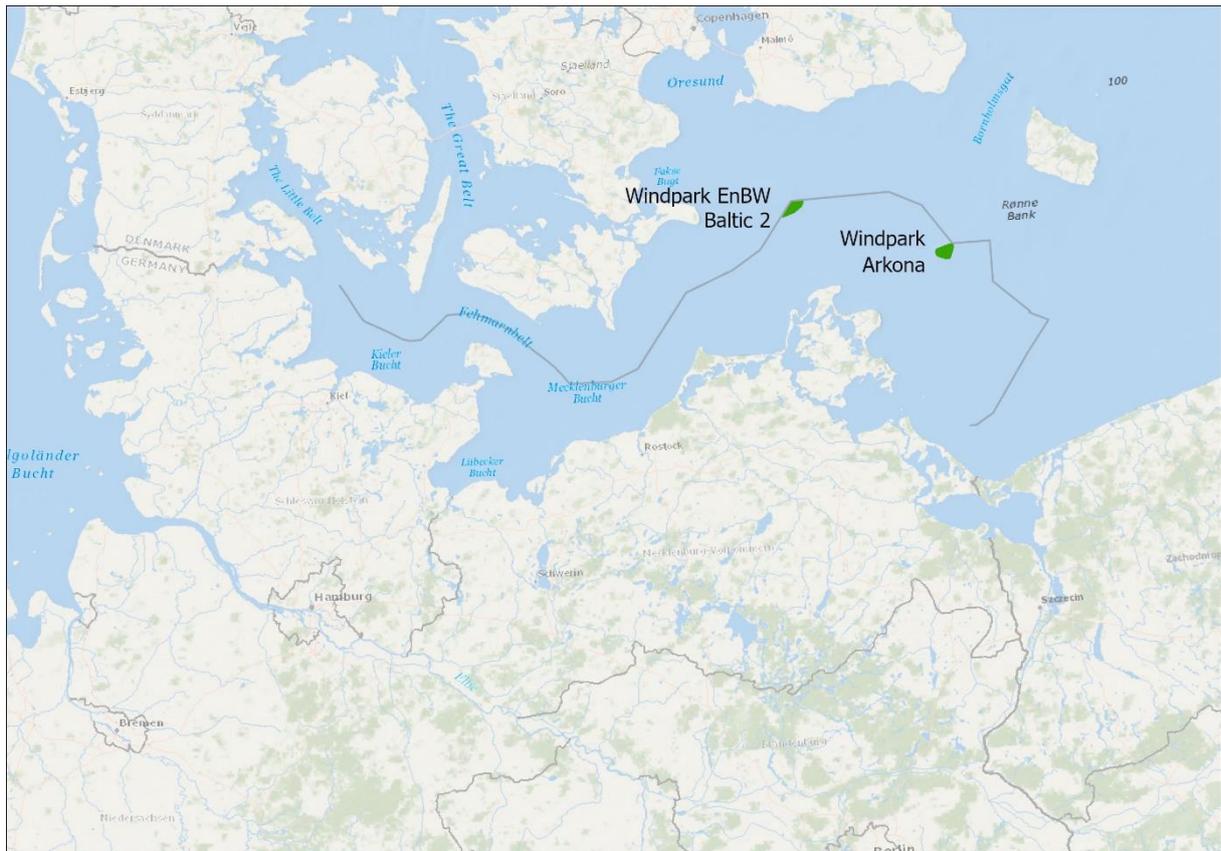


Abbildung 3: Karte Standorte Baltic 2 und Arkona (Eigene Darstellung)

6.4 Standortauswahl (AP 4)

Nach der Auswahl der OWPs sollte die Standortauswahl für das Radarsystem für die zweite Projektlaufzeit erfolgen. Um einen sogenannten Schweigekegel innerhalb des Windparks zu vermeiden, sollte das Radarsystem außerhalb des Windparks auf einer geeigneten Fläche an Land aufgestellt werden. Ein Mindestabstand von 1.500 m zur nächsten Windenergieanlage musste bei der Flächenwahl eingehalten werden damit Störungen durch die drehenden Rotorblätter der Windkraftanlagen vermieden werden. Mit diesem Abstand soll das System in der Lage sein, Flugobjekte hinter den Windenergieanlagen zu erkennen. Bei der Standortauswahl sollten Aspekte wie die Entfernung zu den OWPs, ein eventueller Schutzstatus der untersuchten Fläche für die Aufstellung des Radarsystems, Akzeptanzaspekte für die Errichtung eines Radarturmes usw. berücksichtigt werden. Der Radarturm ist erforderlich, um durch einen höheren Standort des Systems die erforderliche Reichweite zu erzielen.

Für den Fall, dass in AP 5 die Auswahl auf eine andere Technologie als ein Radarsystem fällt (z. B. Transpondertechnologie) sollten auch für diesen Fall die Anforderungen an den Standort

bzw. die Einbausituation an den jeweiligen OWEA ermittelt werden. Die AP 4 und 5 sollten weitestgehend parallel bearbeitet werden, so dass die Ergebnisse der Auswahl des Systems aus AP 5 in die Definitionen der Anforderungen an den Standort einfließen konnten.

6.4.1 Definition der Anforderung an den Standort (AP 4.1)

Je nach Auswahl des einzusetzenden Systems ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an den Standort. Im Falle eines Radarsystems mit ausreichender Reichweite kann die Installation des Systems z. B. an Land erfolgen, so dass von dort die Windparks abgedeckt werden können. Im Falle des Einsatzes von Transpondersystemen wird die Installation solcher Systeme voraussichtlich auf jeder einzelnen OWEA erforderlich sein.

Wie schon erwähnt, fand eine intensive Verknüpfung der Arbeitspakete 3, 4 und 5 statt. Da aufgrund des naturschutzfachlichen Aspektes die Entscheidung für ein Radar-System schon früh im Verlauf des Vorhabens gefallen war, galt es nun die optimalen Bedingungen für ein solches System zu bestimmen. Dazu erfolgte eine intensive Abstimmung mit dem Hersteller des geeigneten Radarsystems und im AP 4.2 eine Ermittlung bzgl. der Reichweite und der möglichen zu erfassenden OWPs mit Hilfe eines Geografischen Informations-Systems (GIS).

Als Anforderungen an den Standort konnten folgende Kriterien als ausschlaggebend ermittelt werden:

- Entfernung zu den ausgewählten Offshore-Windparks
- Vorhandene Antennen/Masten, an denen eine Befestigung des Systems möglich ist
- Möglichkeiten zum Aufbau des Systems (Erreichbarkeit, Logistik, ggf. Schutzstatus des Gebietes, Genehmigungsfähigkeit zum Aufbau, Akzeptanz der Bevölkerung)
- Gefährdung des Flug- und Schiffsverkehrs
- Beeinflussung weiterer Radar-Systeme
- Sichtlinie in Richtung der OWPs

6.4.2 Standortauswahl (AP 4.2)

Auf Basis der Auswahl der Windparks und des Systems sowie der Definition der Anforderungen an den Standort sollte die Standortauswahl erfolgen. Im Falle des Einsatzes eines Radarsystems an Land waren hierbei z.B. auch Aspekte der Flugsicherheit (Nähe zu Flughäfen), Schutzgebiete oder der Aspekte der Akzeptanz (z.B. in touristisch genutzten Standorten) zu berücksichtigen. Wichtigster Aspekt für die Auswahl des Standortes war die

Entfernung zu den ausgewählten OWPs. Nach intensiver Diskussion im gesamten Projektteam kamen drei konkrete Vorschläge in die nähere Auswahl:

1. Helgoland
2. Fino 1
3. Rügen

Diese drei Standorte wurden unter anderem mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems (GIS) und Abdeckungsberechnungen hinsichtlich ihrer Eignung untersucht.

Helgoland

Die Windparks vor Helgoland haben eine Entfernung von ca. 25 bis 60 km zum möglichen Standort des Radarsystems. Auf Helgoland gibt es relativ viele Schutzgebiete, wie unter anderem das Naturschutzgebiet (NSG) Lummenfelsen, das NSG Helgoländer Felssockel oder das Gebiet der Fauna-Flora-Habitatrichtlinie (FFH) Helgoländer Düne. Dies könnte die Akzeptanz einschränken. Allerdings existieren auf der Insel zwei Masten, die eventuell für eine Anbringung des Radars geeignet wären. Zum einen existiert ein Sendeturm auf dem Oberland mit einer Höhe von ca. 113 m. Dieser wird schon als Fernmeldeturm und Rundfunksender verwendet. Eine weitere Möglichkeit wäre der Leuchtturm Helgoland mit Antennenanlagen für Radar, Flugfeuer, See- und Richtfunk. Dieser ist ca. 35 m hoch. Da also wahrscheinlich kein zusätzlicher Mast errichtet werden muss, sind Akzeptanzprobleme in der Bevölkerung vermutlich gering. Helgoland liegt ca. 50 km vor der deutschen Nordseeküste. Somit ist bei eventuellen Defekten oder Ausfall des Systems eine schnelle Lösung des Problems nicht möglich, da die Insel nur mit einem Schiff oder Luftfahrzeug erreichbar ist. Mit dem Radargerät auf Helgoland könnten folgende Windparks erfasst werden: Meerwind Süd/Ost, Nordsee Ost, Amrumbank West und Gode Wind 01+02. Weitere Windparks (Kaskasi, Gode Wind 03) sind genehmigt. Die Windparks stehen in unmittelbarer Nähe zueinander.

Es gibt einen kleinen Flugplatz, an dem vor allem Propellerflugzeuge und kleine Motorflugzeuge starten und landen. Diese dienen als Transportmittel zum Festland. Ansonsten wird der Flugplatz für Rundflüge genutzt. Die folgende Karte zeigt, welche Windparks bei einer

Installation des Radarsystems auf dem Oberland von Helgoland erfasst werden würden, bei rein theoretisch angesetzten Reichweiten von 50 und 60 km.

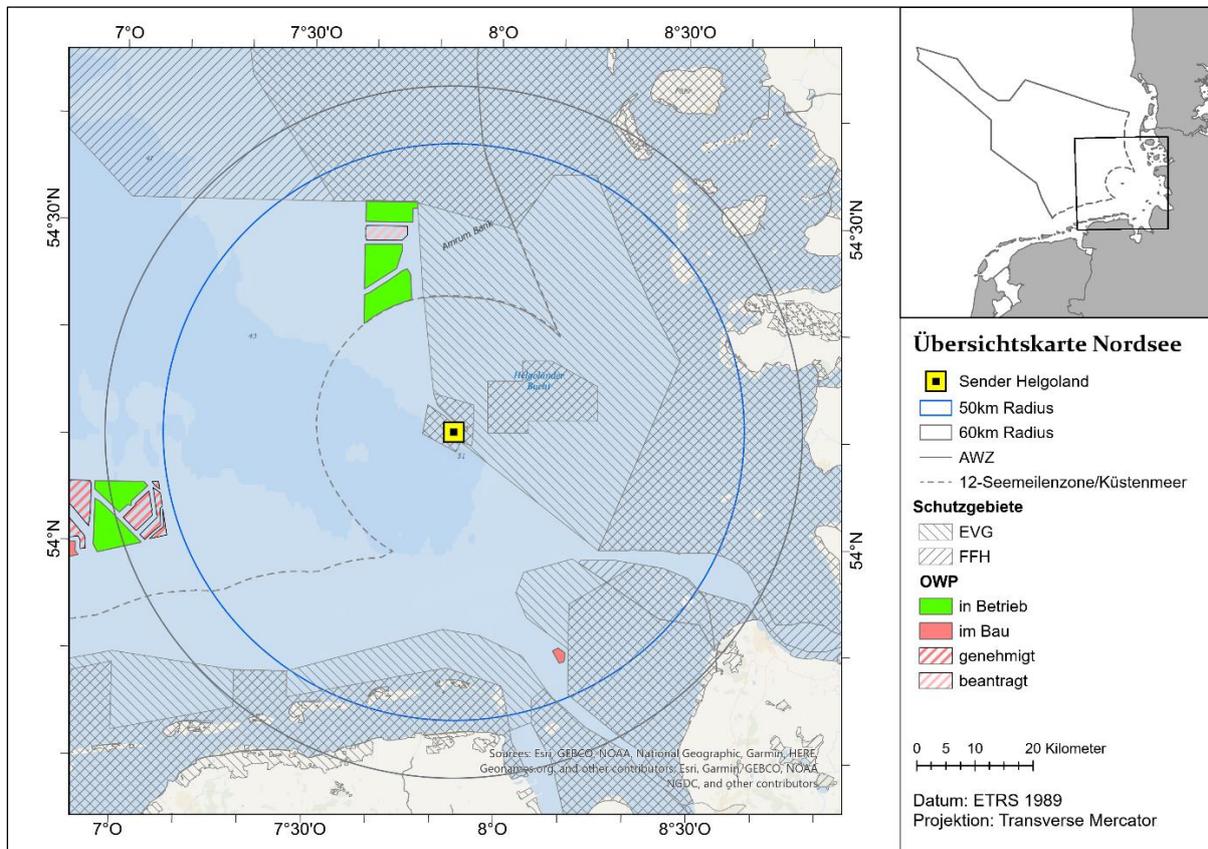


Abbildung 4: Standort Helgoland (angenommene Reichweite des Radarsystems)

Fino 1

Die Fino 1 ist eine Forschungsplattform in der Nordsee. Die Windparks nahe Fino 1 sind ca. 740 m bis 35 km von dem Standort entfernt. Der Mindestabstand zu den nächsten OWEAs von 1.500 m ist also teilweise nicht gegeben und das Radarsystem könnte von den Rotorblättern gestört werden. Es befindet sich ein Vogelschutzgebiet in der Nähe der Plattform. Auf der Plattform Fino 1 gibt es einen 80 m hohen Mast, welcher sich für die Anbringung des Radarsystems eignet. Daher müsste kein weiterer Mast errichtet werden. Die Akzeptanz wird hoch sein, da sich die Plattform ca. 45 km vor Borkum befindet und keiner weiteren Bebauung bedarf. Die Fino 1 ist allerdings sehr schwer zu erreichen und die Anreise zeitweise nur mit einem Hubschrauber möglich. Außerdem muss beachtet werden, dass das BNK Radar nicht mit vorhandenen Radarsignalen interferiert. Die Fino 1 erreicht die meisten Windparks: alpha ventus, Merkur Offshore, Borkum Riffgrund 1+2, Trianel Windpark Borkum I, Nordsee One, Gode Wind 01+02 und Riffgat. Die Windparks Trianel Windpark Borkum II, OWP Delta Nordsee 1+2, Nordsee Two+ Three, Borkum Riffgrund West I, OWP West und

Gode Wind 04+03 befinden sind in der Bau- oder Genehmigungsphase. Auf der Fino 1 gibt es einen eigenen Hubschrauberlandeplatz. Die folgende Karte zeigt, welche Windparks bei rein theoretisch angesetzten Reichweiten von 50 und 60 km erfasst werden würden.

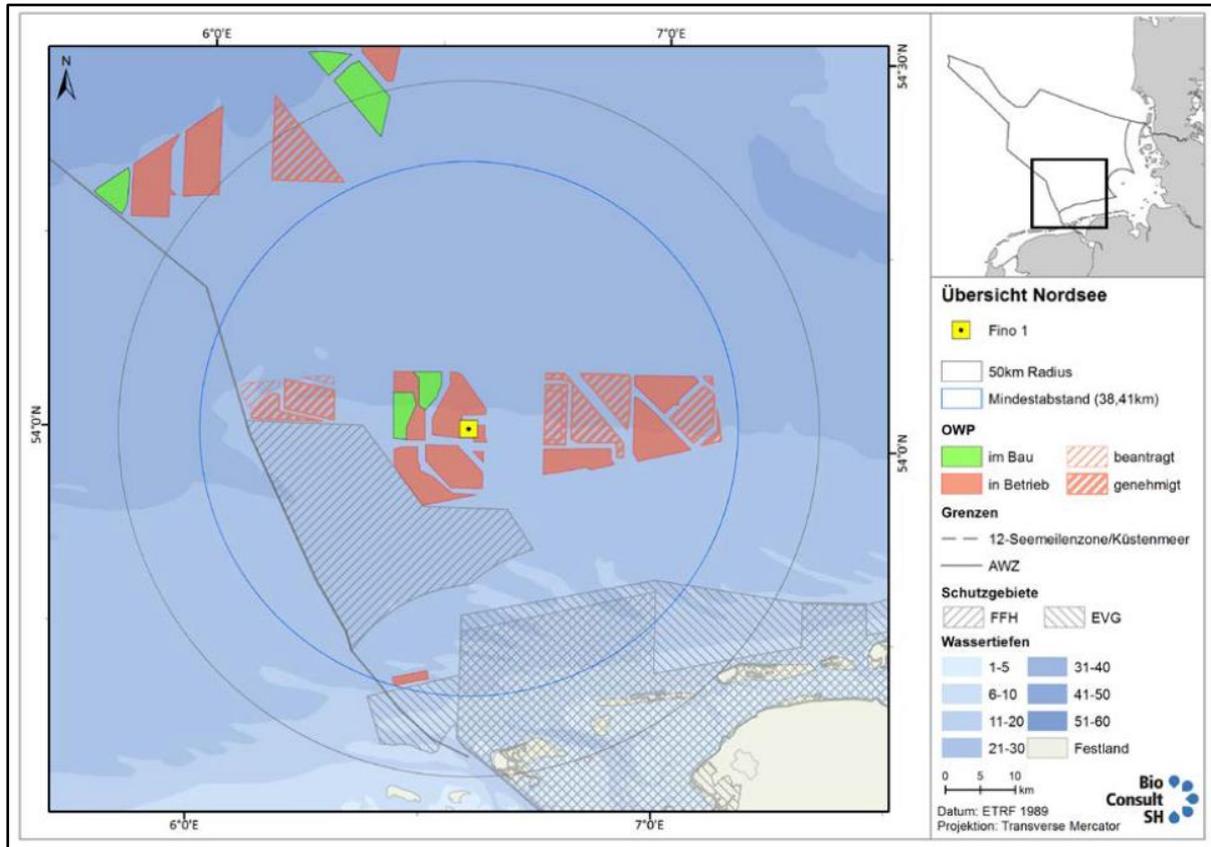


Abbildung 5: Karte: Standort Fino (angenommene Reichweite des Radarsystems)

Rügen

Rügen liegt ca. 32 bis 35 km von den Windparks Baltic 2 und Arkona entfernt. Auch auf Rügen gibt es relativ viele Schutzgebiete, wie den Nationalpark Vorpommersche Boddenlandschaft, den Nationalpark Jasmund und das Biosphärenreservat Süd-Ost Rügen, die bei der exakten Standortauswahl beachtet werden müssen. Außerdem müsste für die Installation des Radarsystems noch ein Turm errichtet werden, was zu Akzeptanzproblemen führen könnte. Rügen ist mit ca. 7,2 Millionen Übernachtungen im Jahr 2019 ein sehr beliebtes Tourismusgebiet. Auch dadurch könnten weitere Akzeptanzprobleme auftreten. Das System wäre im Falle eines Defektes auf Rügen gut und schnell zu erreichen, da die Insel mit den Brücken Rügendammbücke und Rügenbrücke über feste Verbindungen mit dem Festland verfügt. Somit wird kein Schiff oder Luftfahrzeug benötigt, um an den Standort zu kommen. Mit dem Standort Rügen können folgende Windparks erfasst werden: EnBW Baltic 1+2,

Wikinger und Arkona. Die Windparks Arcadis Ost 1, Baltic Eagle, und Wikinger Süd sind in Planung oder Stand Projektende in Errichtung.

Auch Rügen besitzt einen Flugplatz. Dieser ist jedoch begrenzt auf Luftfahrzeuge mit einem Maximalgewicht von 5,7 t. Auch dort werden vor allem Rundflüge in kleinen Flugzeugen angeboten.

Das folgende Bild zeigt eine Berechnung zu den erfassten OWP's durch ein Radar, welches auf einem Standort im Norden des Insel Rügen installiert wird.

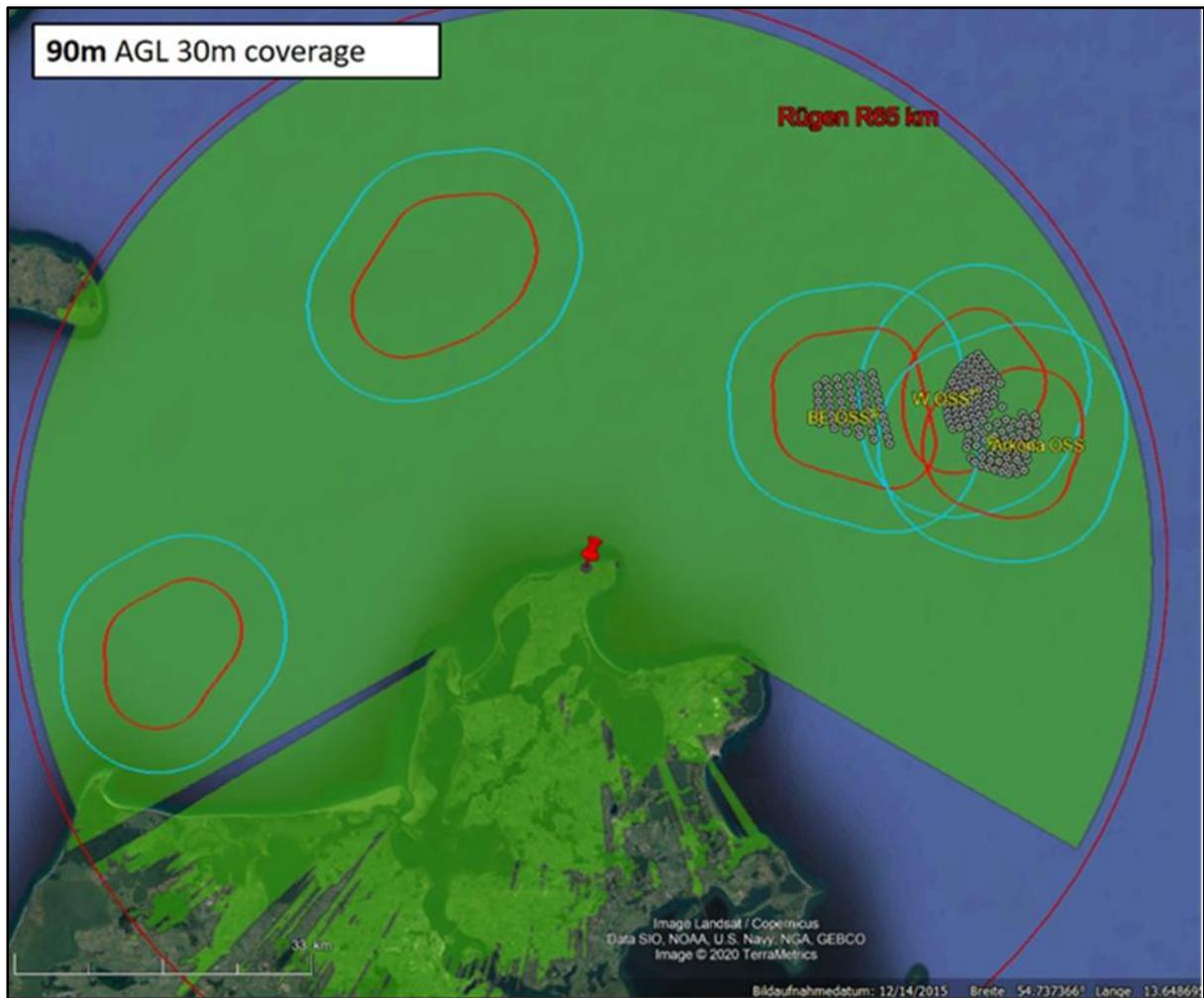


Abbildung 6: Berechnung der Reichweite eines Radarsystem Standort Rügen

Tabelle 1: Vergleich der Standorte

Standort/ Kriterium	Entfernung zu den OWPs	Schutzstatus des Standortes	Höhe des Mastes	Akzeptanz für Errichtung	Erreichbar- keit
Helgoland	Ca. 25 bis 60km	NSG Lummenfelsen, NSG Helgoländer Felssockel, FFH Gebiet Helgoländer Düne	113m oder 35m (bereits vorhanden)	Tourismus- gebiet; eventuell niedrige Akzeptanz	Mittlere Erreichbar- keit
Rügen	Ca. 32 bis 35 km	Nationalpark Vorpommersche Boddenlandschaft, Biosphären Reservat Süd-Ost Rügen	90m hoher Gittermast (muss erbaut werden)	Tourismus- gebiet; eventuell niedrige Akzeptanz	Bessere Erreichbar- keit
FINO 1	Ca. 740m bis 35km	Kein Nationalpark, aber Nähe zu Vogelschutzgebiet	Über 80m (bereits vorhanden)	Wahrschein- lich hoch da Offshore	Schwer

Auf Grundlage von Tabelle 1 wurde der Standort Rügen ausgewählt. Die genaue Position zur Errichtung des Radarsystems erfolgte anhand verschiedener Kriterien. Als erster Standort (Standort Ackerfläche) wurde ein Standort an der Küste mit idealer LoS in Richtung des Offshore-Windparks Baltic II und einer Gesamthöhe von ca. 20 m (Standort ca. 12 m ü.N. plus 8 m Aufbau des Radarsystems) ausgewählt (Abbildung 7). Das Logistikteam des Radarsystemherstellers TERMA meldete jedoch Zweifel zur guten Erreichbarkeit des Standortes an. LKW und Kran hätten den Standort nur über die landwirtschaftlich genutzte Fläche erreichen können. Die Zuwegung wäre damit wetterabhängig gewesen, und der sichere Transport des sensiblen Systems wäre nicht zu gewährleisten. Zusammen mit den Experten der Fa. TERMA wurde deshalb eine weitere Ortsbegehung unternommen. Eine im Anschluss erfolgte gemeinsame Analyse ergab den zweiten und finalen Standort „Parkplatz am Nordufer“ (Abbildung 8). Der neue Standort „Parkplatz“ liegt in der Gemeinde Puttgarten auf der Insel Rügen, ist etwa 1.700 m vom - Standort Ackerfläche entfernt und hat eine Entfernung von 34 km zum OWP Baltic II. Die minimalen Unterschiede zum ersten Standort bezüglich Höhe der Antenne und Entfernung zum Windpark Baltic II sind für den Test zu vernachlässigen



Abbildung 7: Standort 1 „Ackerfläche“



Abbildung 8: Finaler Standort "Parkplatz am Nordufer" mit Position für das Radarsystem.

Ausschlaggebend für die Wahl des finalen Standortes war die gesicherte Zuwegung für schweres Gerät über einen betonierten Weg. Allerdings war die Vegetation im Gegensatz zum ersten Standort Ackerfläche höher und deutlich stärker ausgeprägt, wodurch die Line of Sight (LoS) beeinträchtigt werden könnte. Eine Analyse seitens TERMA ergab, dass dennoch eine gute Detektionswahrscheinlichkeit (Probability of Detection; PD) erreicht werden kann. Aufgrund der besseren logistischen Anbindung und der erreichbaren PD wurde der Standort „Parkplatz am Nordufer“ schließlich als Standort für den Radartest finalisiert.

Eine Vorab-Simulation zur theoretischen Radarabdeckung vom ausgewählten Standort aus (Abbildung 10) ergab eine ausreichende Reichweite für den OWP Baltic II sowie für den OWP Arkona (die blau umrandete Fläche in Abbildung 10 ist die im Test betrachtete Detektionsfläche).

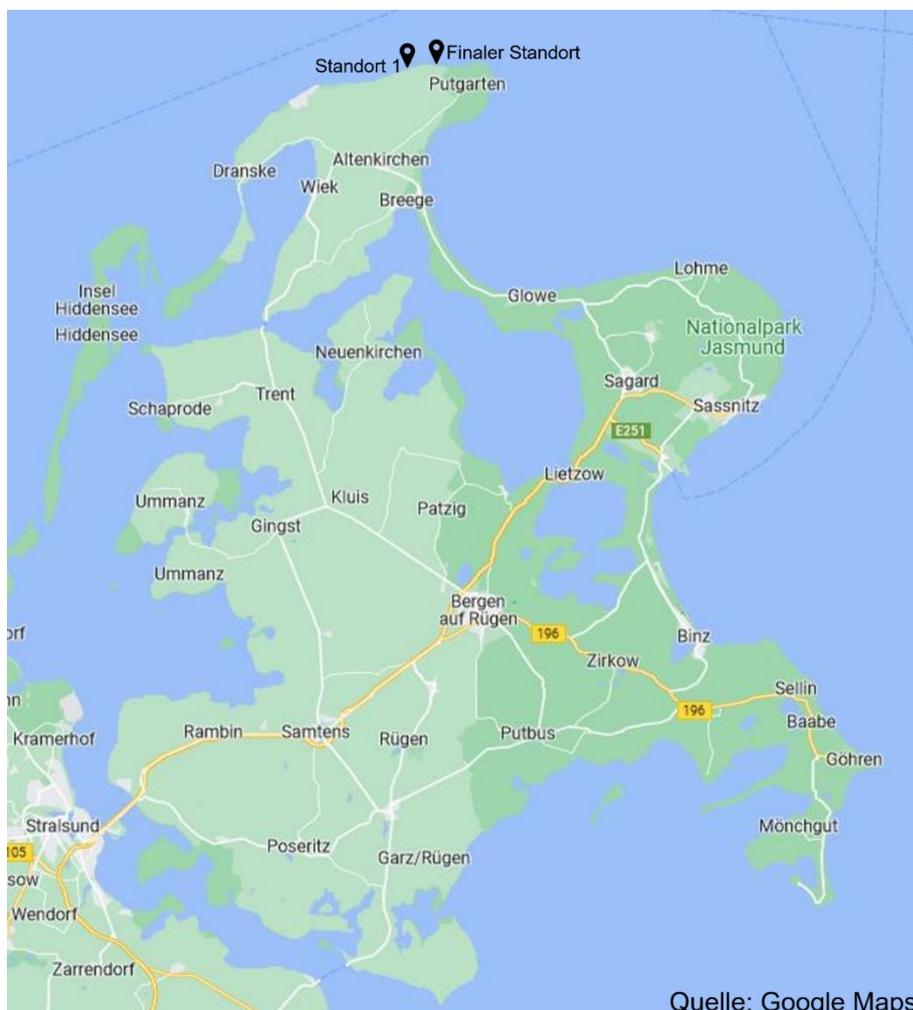


Abbildung 9: Insel Rügen mit Teststandorten „Ackerfläche“ und „Parkplatz am Nordufer“

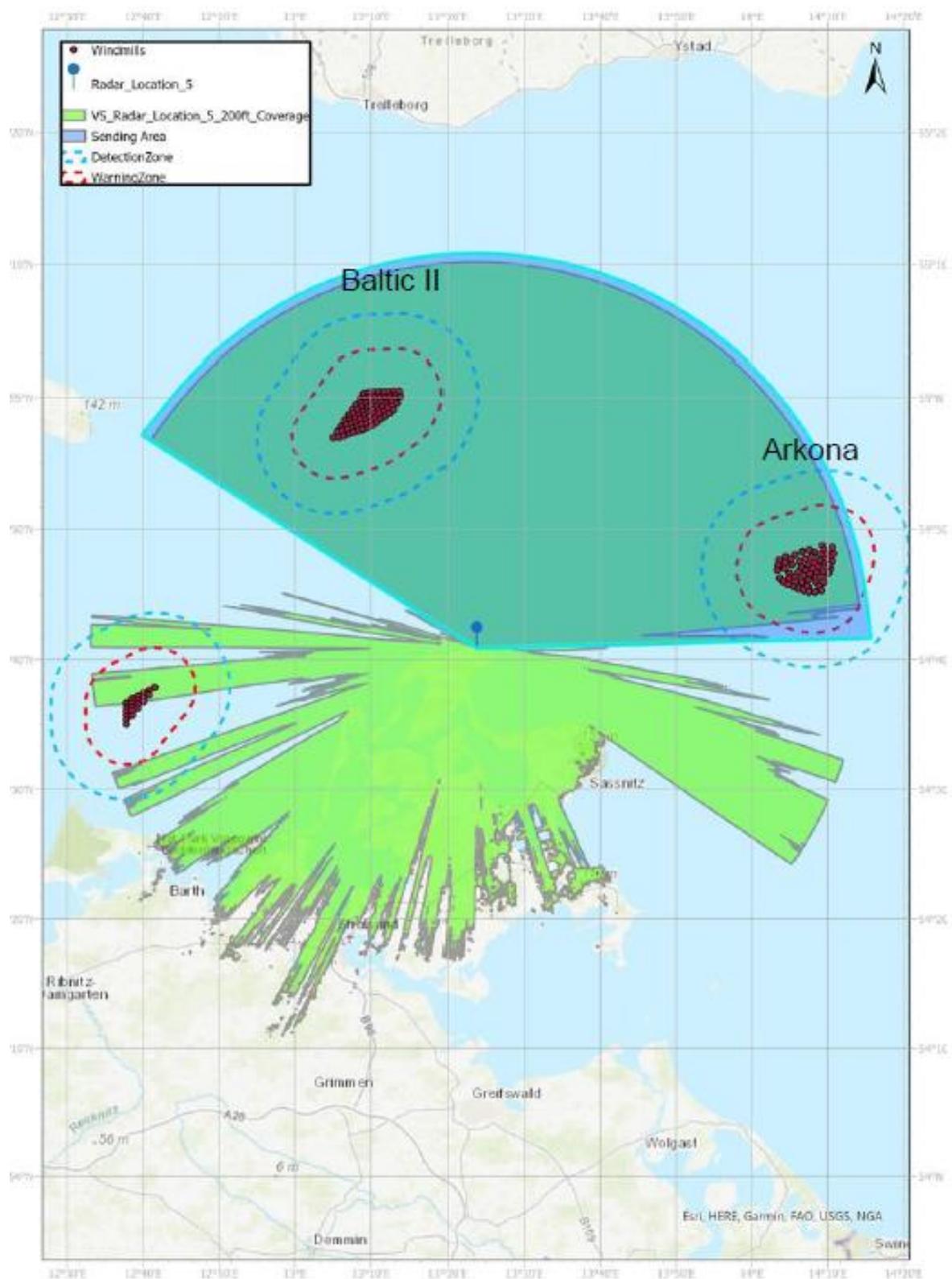


Abbildung 10: Theoretische Abdeckung Scanner 4002 vom finalen Teststandort aus: Dunkelgrüne Fläche: Detektionsbereich; Blaugestrichelte Linie: Erweiterte warning zone; Rotgestrichelte Linie: warning zone

In Abbildung 11 wird allerdings die nicht die ideale LoS in einem ersten Radarbild sichtbar. Eine gute und starke Detektion wird durch die helle, gelbliche Färbung dargestellt, während die dunklere Färbung auf eine schwächere Detektion durch eine beeinträchtigte LoS hindeutet. Diese kann von Hindernissen wie zum Beispiel Bäumen, Masten, Wänden oder Ähnlichem hervorgerufen werden. Im Testfall waren es dichte Bäume und hohe Sträucher in unmittelbarer Nähe des Radarsystems. Eine bessere LoS kann jedoch leicht über die Erhöhung der Radarantenne erreicht werden.

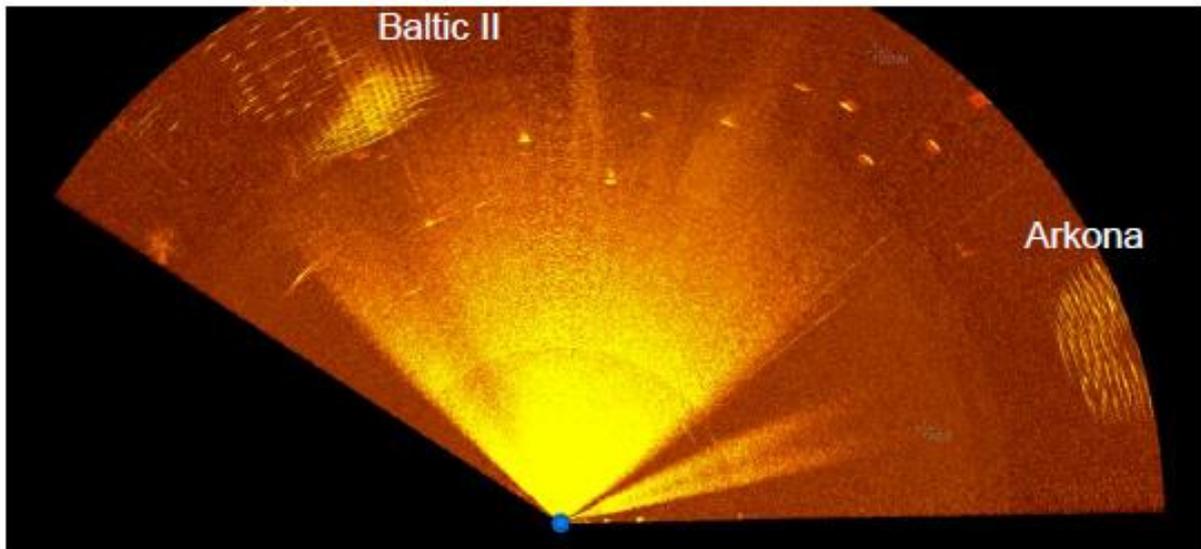


Abbildung 11: Beeinträchtigte Line of Sight (LoS) und Radarabdeckung am Teststandort

Abbildung 11 ist zu entnehmen, dass in den Gebieten südwestlich von Baltic II sowie südlich von Arkona eine Abschwächung der Detektionsfähigkeiten zu erwarten ist. Weitere mittlere Abschwächungen sind über der westlichen Hälfte des OWP Baltic II zu erkennen. Der später durchgeführte Praxistest mit Testflug (Kap. 6.7.2) bestätigte jedoch, dass die LoS des ausgewählten Standortes ausreichend ist und die Anforderungen zur Detektionswahrscheinlichkeit zum Teil sogar übererfüllt.

6.5 Auswahl des Systems (AP 5)

Auf Basis der AP 2, 3 und 4 sollte ein geeignetes System für die BNK ausgewählt werden. Hierfür kamen nach (seinerzeit) aktuellem Kenntnisstand lediglich radarbasierte (aktiv oder passiv) und Transpondersysteme in Frage. Im Falle des Einsatzes eines Radarsystems ist für die Eignung insbesondere die Reichweite des Radarsystems von besonderer Bedeutung. Nach jetzigem Kenntnisstand gewährleistet z. B. das Messsystem Terma Scanter 4002 der

Firma Quantec die erforderliche Reichweite für Offshore-Windparks. Aktuell werden Reichweiten von bis zu 42,5 NM (entspr. 78,71 km) angegeben.

Bei der Auswahl ist zu berücksichtigen, ob das ausgewählte System bereits im Bereich Flughafenradar, Küstenüberwachung oder/und im Verteidigungs- und Sicherheitsbereich seine Eignung unter Beweis stellen konnte und ob ein Anerkennungsverfahren durch die Deutsche Flugsicherung (DFS, AP 6) erfolgreich möglich ist. Dies würde auch für den Einsatz eines Transpondersystems oder einer anderen Technologie zutreffen.

Da nur mit Hilfe eines Aktivradargerätes auch eine Vogeldetektion erfolgen konnte wurde die Entscheidung für ein solches System schon frühzeitig getroffen. Im Zuge einer öffentlichen Ausschreibung wurde ein Radarsystem annonciert. Der einzige Bewerber war die Terma A/S, die sich gemeinsam mit der Fa. Quantec Sensors GmbH für die Durchführung des Praxistests beworben hat. Terma verfügt als einziger Hersteller über eines für die BNK verwendbaren Gerätes, dem Scanter 4002 mit einer Reichweite bis zu 42,5 NM (entspricht 78,71 km).

6.6 Einholung der erforderlichen Genehmigungen (AP 6)

Die Kommunikation mit den Eigentümern, um die Einwilligung auf deren Ackerfeld (Standort 1) den Test durchführen zu dürfen, erfolgte sehr einvernehmlich und kooperativ. Der Standort 1 „Ackerfläche“ lag bauordnungsrechtlich jedoch im sogenannten Außenbereich. Nach der Bauordnung von Mecklenburg-Vorpommern hätte hierfür eine komplette Baugenehmigung trotz des nur temporären Tests von zwei Wochen erfolgen müssen, da der für den Test zum Einsatz kommende 20 Fuß Seecontainer (6 m x 2,4 m, Länge x Breite) die Ausnahmeregelung von 10 m² Grundfläche übersteigt. Auch auf telefonische Nachfrage bei den zuständigen Sachbearbeitern beharrte man mehrmals auf ein Genehmigungsverfahren. Erst nach schriftlichem Antrag auf eine Ausnahmegenehmigung beim Landrat, bei der unter anderem die wohlwollende Zustimmung der Tourismusgesellschaft Kap Arkona mit eingereicht und der Fokus auf den Forschungsaspekt des Vorhabens gelegt wurde, hat die Fachbehörde des Landkreises dem Vorhaben zugestimmt und von einem komplett zu durchlaufenden Genehmigungsverfahren abgesehen.

Für den neuen Standort 2 „Parkplatz“ war ebenfalls eine Ausnahmegenehmigung von der Gemeinde Puttgarten notwendig, da es sich baurechtlich um ein Sondergebiet handelte. Aufgrund der bereits guten bestehenden Kontakte vor Ort und einer sehr zuvorkommenden Bauamtsleiterin der Gemeinde Puttgarten wurde diese Ausnahmegenehmigung schnell erbracht und die notwendigen Vorkehrungen für die Testphase erfüllt.

Für die Nutzung einer Testfrequenz zum Betreiben des hier verwendeten Radarsystems ist eine Zusage der Bundesnetzagentur (BNetzA) notwendig, welche für dieses Projekt über eine Versuchsfunkanwendung für zwei Monate erteilt wurde. Für dauerhafte BNK-Installationen werden Frequenzzuteilungen über nichtnavigatorischen Ortungsfunk für Identifizierungszwecke mit einer Laufzeit von zehn Jahren ausgestellt. Ein Mast für die Radarantenne musste nicht, wie ursprünglich angedacht, installiert werden. Ein Bauantrag dafür ist entsprechend entfallen.

6.6.1 Bauantrag (AP 6.1)

Siehe Kap. 6.6

6.6.2 Anerkennung des Systems (AP 6.2)

Für einen dauerhaften und ordnungsgemäßen Betrieb des Aktivradarsystems Scanter 4002 sind mehrere rechtliche Voraussetzungen zu schaffen, welche generell an das System gebunden, als auch individuell an einzelne Standorte anzupassen sind. Die rechtlichen Voraussetzungen, wie die Baugenehmigung oder Frequenzzusage der BNetzA, sind individuell für jeden Standort neu zu bewerten und einzuholen. Die generelle Anerkennung des Systems bezieht sich auf die AVV, welche am 24. April 2020 in neuer Fassung verabschiedet wurde. Entsprechend ist Offshore der „Standard Offshore-Luftfahrt, Teil 5: Kennzeichnung von Luftfahrthindernissen in der AWZ“ (SOLF) anzuwenden. Inhaltlich sind beide Regelwerke weitestgehend identisch. Im Folgenden wird der Einfachheit halber weiter auf die AVV verwiesen.

An dieser Stelle ist auf die Einschränkung hinzuweisen, dass die Flugtests für BeBeO in einer Flughöhe von 1.000 Fuß (304,8 m) durchgeführt wurden, wohingegen in der AVV (05/2020), Anhang 6, Absatz 1, der Wirkungsraum der BNK vom Boden bis zu einer Höhe von nicht weniger als 600 m über dem Hindernis definiert ist. Bei bereits anerkannten BNK-Systemen nach der AVV (05/2020) wurde diese Definition aufgeweicht und an die Sichtlinie des Piloten zur Hindernisbefeuerung in der jeweiligen OWEA angepasst. Darüber hinaus ist im Offshore-Bereich noch nicht klar definiert wie „vom Boden“ in diesem Zusammenhang zu verstehen ist. Aufgrund der Gezeiten sowie unterschiedlicher Wellenhöhen ist eine klare Definition für die Formulierung „vom Boden“ schwierig und steht seitens der Behörden noch aus. Ferner sind Neuinstallationen von BNK-Systemen, die bereits eine Anerkennung nach der AVV a.F. (Banz AT 01.09.2015 B4) erhalten haben, noch fünf Jahre ab Inkrafttreten der AVV n.F. (Banz AT 30.04.2020 B4) zulässig.

6.7 Aufbau und Praxistest (AP 7)

6.7.1 Aufbau des Systems (AP 7.1)

Das Messsystem bestand aus zwei aufeinander gestapelten 20 Fuß Seecontainern sowie dem darauf platzierten Aktivradarsystem in ca. 8 m Höhe (

Abbildung 12 –

Abbildung 16). In den Seecontainern befand sich die Messtechnik sowie Laptop und Datenträger zum Aufzeichnen der Daten. Neben den Seecontainern wurden das Stromaggregat sowie der Dieseltank aufgestellt. Die Anlage wurde komplett eingezäunt. Da das Radarsystem im 24/7-Betrieb für eine vollumfängliche Datenanalyse betrieben wurde, war beim Stromaggregat die Beschaffung eines geeigneten Aggregats deutlich erschwert. Am Ende gab es nur einen Dienstleister, der über eine Speziallösung die gewünschte Konfiguration mit einem Stromaggregat sowie einem direkt verbundenen Dieseltank bereitstellen konnte. Trotz des Dieseltanks mit 1.300 Liter Fassungsvermögen musste dieser während der Testphase zwei Mal nachbetankt werden. Für die Kommunikation mit dem System wurde ein Modem plus SIM-Karte mit ausreichend starker Geschwindigkeit (4G) und unbegrenztem Datenvolumen installiert.



Abbildung 12: Aufbau des Radarsystems 1



Abbildung 13: Aufbau des Radarsystems 2



Abbildung 14: Aufbau des Radarsystems 3



Abbildung 15: Aufbau des Radarsystems 4



Abbildung 16: Aufbau des Radarsystems 5

6.7.2 Praxistest des Systems (AP 7.2)

Die Testphase erstreckte sich über zwei Wochen in den Monaten August und September 2021. Das Radarsystem wurde so konfiguriert, dass die Radarstrahlung ausschließlich zwischen 303 und 89 Grad, also in Richtung OWP Baltic II und OWP-Arkona ausgesendet wurde (Abbildung 10). Eine Radarstrahlung landeinwärts fand nicht statt.

Um die Detektion des Aktivradarsystems SCANTER 4002 offshore testen zu können, wurden mehrere Testflüge mit einem eigens gecharterten Flugzeug des Typs Rockwell Commander 114 (

Abbildung 17) durchgeführt. Die Testflüge erstreckten sich über zwei Tage am 24. Und 25. August 2021. Um die anfallende Datenmenge zu reduzieren, wurde der Test in zwei Segmente aufgeteilt. Die Aufteilung in zwei Flüge war außerdem nötig, da das Flugzeug aufgrund des Umfangs des Tests zum Tanken zwischenlanden musste. Die Testmanöver über den OWPs wurden aus Sicherheitsgründen in 1.000 Fuß (304,8 m) über NN durchgeführt. Die Testflüge wurden unter anderem am Rand der Detektionsreichweite durchgeführt, um die Effektivität des SCANTER 4002 Radarsystems in höheren Reichweiten zu testen, als für die OWP Überwachung notwendig wären.



Abbildung 17: Eingesetztes Flugzeug vom Typ Rockwell Commander 114

6.7.2.1 Datenmanagement

Die Daten des Flugtests wurden auf unterschiedliche Arten aufgezeichnet: Per Fernzugriff über ein 4G-Modem und lokal auf einem PC, der das System überwacht und die Fernverbindung steuert. Zusätzlich wurden ASTERIX-Tracks direkt auf dem Tracker-PC aufgezeichnet. Darüber hinaus wurde das SATD-Protokoll in Teilen des Tests eingerichtet und aktiviert. Zusätzlich wurden mit TerRES (TERma Radar Environment Simulator) die Rohdaten der Testflüge aufgezeichnet. Mit einem TerRES können Rohdaten aufgezeichnet und später mit verschiedenen Verarbeitungsparametern wiedergegeben werden, um die Auswirkungen verschiedener Einstellungen zu testen und analysieren zu können. Zur Verifizierung der Radardaten wurden zusätzlich die öffentlich einsehbaren Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) - Transponderdaten sowie die GPS-Daten des Flugzeugs selbst aufgezeichnet. Die ADS-B-Daten konnten jedoch aufgrund ihrer hohen Ungenauigkeit nicht zur Verifizierung des Tests verwendet werden.

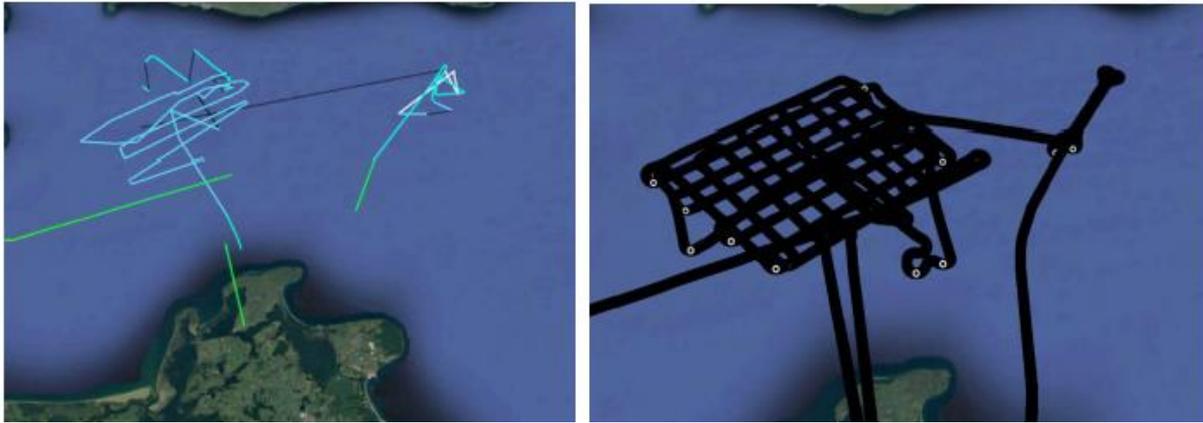


Abbildung 18: ADS-B (links) und GPS-Daten (rechts) des geflogenen Waffelmusters über Baltic 2

6.7.2.2 Flugmanöver

In den Flugtests wurden verschiedene Muster und Manöver geflogen, um die Detektion von Luftfahrzeugen in verschiedenen Szenarien dokumentieren zu können. Folgende Flüge wurden durchgeführt:

- Ein Flug Ost-West und Nord-Süd im Waffelmuster über dem OWP Baltic II.
- Ein tangentialer Flug (tangential zum Radar) über einer möglichst großen Anzahl OWEA von Baltic II.
- Eine scharfe Wende direkt über einer OWEA.
- Zwei radiale Flüge von 25 sm bis zu 35 sm (2-mal von innen und 2-mal von außen kommend).

Ein Waffelflugmuster ist gut geeignet, um einen Überblick über die komplette Radarabdeckung über einem bestimmten Gebiet zu erhalten und mögliche Detektionsschatten aufzudecken.

Der Flug tangential zum Radar wird genutzt, um die Detektionswahrscheinlichkeit unter den für das Radar schwierigsten Bedingungen zu überprüfen.

Die scharfe Wende wird geflogen, um zu bestimmen, wie gut die Flugbahn des Flugzeugs verfolgt und aufrechterhalten werden kann. Das Manöver soll außerdem dabei helfen, die Fähigkeiten zur Unterscheidung zwischen dem eigentlichen Ziel (dem Flugzeug) und den umliegenden Objekten (den OWEA) zu bestimmen.

Die Radialflüge wurden durchgeführt, um die Radarreichweite in drei verschiedenen Höhen zu testen. Die verschiedenen Flugmanöver sind in Abbildung 19 dargestellt.

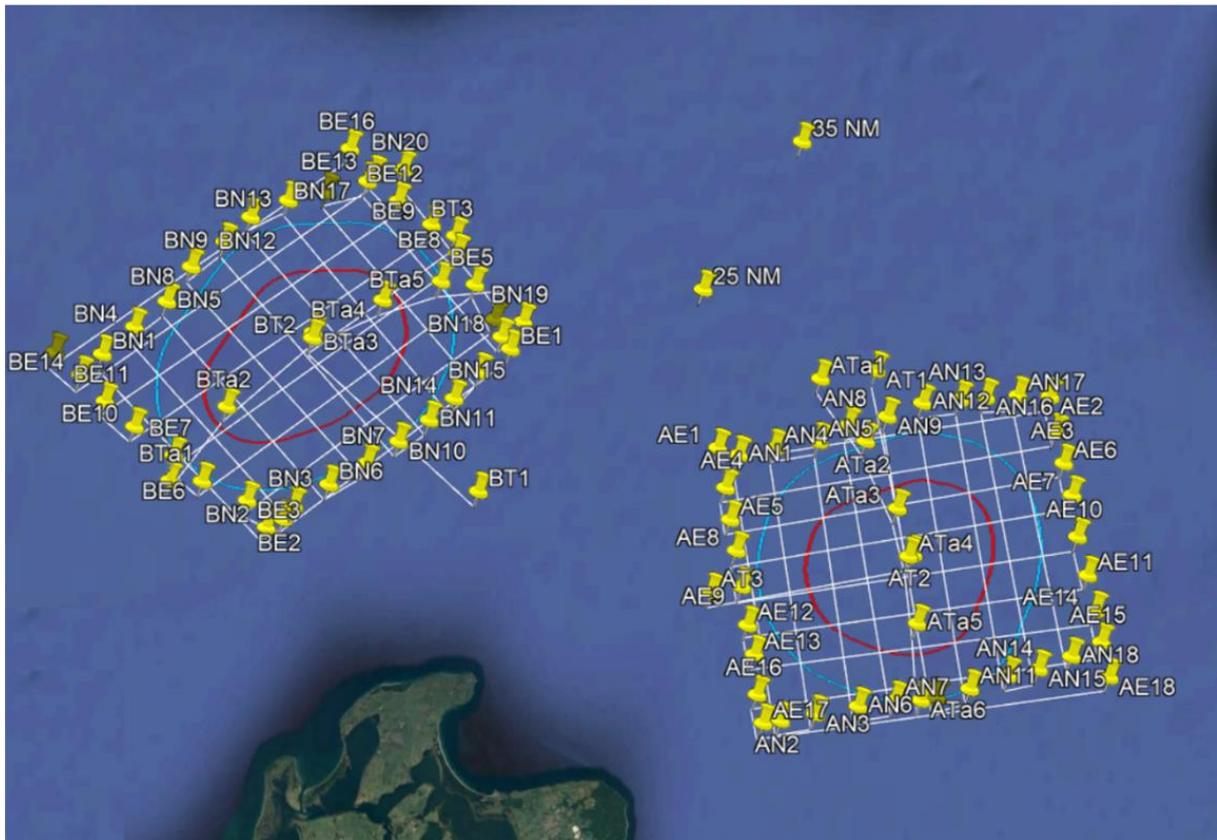


Abbildung 19: Darstellung der verschiedenen Flugmanöver

Neben den gelben Pins zur Darstellung der Wegpunkte (Abbildung 19) sind in Abbildung 19 die warning zone (rote Linie) und die erweiterte warning zone (blaue Linie) eingezeichnet. Die 4 km-warning zone um den OWP ist die Entfernung zum Park, ab der die Befeuerung des Windparks vorschriftsgemäß blinken muss, falls ein Luftfahrzeug erkannt wurde. Die erweiterte warning zone ist der Bereich, welcher als „Sicherheitszuschlag“ zu der warning zone addiert wird, um die Verzögerung des Steuerungssignals zu kompensieren.

Grundsätzlich gibt es bei der Aktivierung der Befeuerung Signalverzögerungen sowohl auf Seite der Detektion als auch auf Seite der Aktivierung der Befeuerung. Die radarbedingte Verzögerung bei der Detektion von Luftfahrzeugen basiert unter anderem auf der Rotation der Radarantenne, der Datenverarbeitung und der Einstellung des Neigungsbereichs. Bei der Aktivierung der Befeuerung, also bei der Umwandlung der Radarinformation in die Beleuchtungssignale, kann die Art der Datenübertragung (Funk oder Internet) weitere Verzögerung verursachen.

Die technikbedingte Verzögerung in der Signalübermittlung kann in Distanzen umgerechnet werden, welche ein Luftfahrzeug in der ermittelten Zeit maximal zurücklegen könnte. So berechnete Fa. Terma S/A in ihrem BeBeO-Projektbericht (siehe Anhang) 830 m für die

radarbedingte Verzögerung und 926 m für die Verzögerung bei der Aktivierung der Beleuchtung. Addiert mit der warning zone von 4000 m (rote Linie Abbildung 19), wurde somit eine erweiterte warning zone von 5756 m um den Windpark herum berechnet (blaue Linie Abbildung 19). Dieses Vorgehen folgt den Bestimmungen zur warning zone der AVV, Anhang 6 bzw. SOLF, Teil 5, Anhang 6.

6.7.2.3 Ergebnisse AP 7.2

6.7.2.4 Erläuterungen zur technischen Funktionsweise des Radars

Um die Resultate besser einordnen zu können, ist es notwendig die technische Funktionsweise des Aktivradarsystems SCANTER 4002 bei der Behandlung von Flugtracks, also der Verfolgung von sich bewegenden Luftfahrzeugen und dem damit zusammenhängenden Fehlen von einzelnen Signalen innerhalb eines Tracks zu erläutern.

Die Ergebnisse der verschiedenen Testanordnungen bei dem Flugtest werden in "Probability of Detection (PD)" = Erkennungswahrscheinlichkeit, angegeben. Die PD (in %) ist eine gängige Methode, um den Wirkungsgrad von Aktivradarsystemen zu messen und zu evaluieren. Unter PD versteht man die Wahrscheinlichkeit, mit welcher die vom Aktivradar ausgesandten Signale vom erfassten Objekt reflektiert und vom Radar wieder empfangen und verarbeitet werden. Das Aktivradar sendet bei jeder Umdrehung der Antenne ein Signal aus, und erwartet pro gesendetes Signal ein von einem Objekt reflektiertes Signal zurück. Eine PD von 97 % bedeutet also nicht, dass 3 % der Luftfahrzeuge nicht erkannt werden, sondern dass innerhalb eines Tracks von 100 gesendeten Signalen 97 vom Objekt reflektierte Signale wieder vom Radarsystem erfasst und verarbeitet werden. Die Summe der Signale wird zu einem Track zusammengefasst während fehlende, nicht wieder empfangene Signal interpoliert und zum Track addiert werden. Ein Vorgang, bestehend aus einer Antennendrehung plus einmal Signal senden, empfangen und verarbeiten wird (Daten)Update genannt. Bei einer im Test verwendeten Umdrehungsgeschwindigkeit von 15 revolutions per minute (RPM; Umdrehungen pro Minute) wird entsprechend alle vier Sekunden ein Datenupdate durchgeführt. Für primäre Überwachungsradarsysteme, wie z.B. an Flughäfen, verlangt EUROCONTROL eine PD von >90 %

Abbildung 20 zeigt ein Darstellungsbeispiel eines von einem Aktivradar erfassten Flugtracks zur Erfassung der PD. Bei der Präsentation der Daten hat der Track des Flugzeugs eine durchgängige Farbe. Falls ein Signal innerhalb eines Tracks verloren geht, wird dieses von der Radarsoftware unter der Annahme interpoliert, dass das Zielobjekt mit der gleichen Geschwindigkeit weiterfliegt. Ein reflektiertes Signal, welches erwartet, aber nicht detektiert

wird, wird in der Farbe Rot dargestellt und im Folgenden als Datenlücke bezeichnet. Falls ein Track, z.B. aufgrund zu vieler Datenlücken komplett verloren geht, wird ein neuer Track initiiert und mit einer anderen Farbe versehen. Eine neue Farbe wird auch gewählt, wenn ein Track plangemäß abgeschlossen und ein neuer Track initiiert wurde. In Abbildung 20 sind drei abgeschlossene Tracks abgebildet, von denen zwei Tracks (blau und orange) keine verlorenen Signale innerhalb des Tracks aufweisen. Der dritte Track (lila) hat fünf fehlende Signale. Trotz der Datenlücken wurde der Track in diesem Beispiel durchgängig verfolgt.

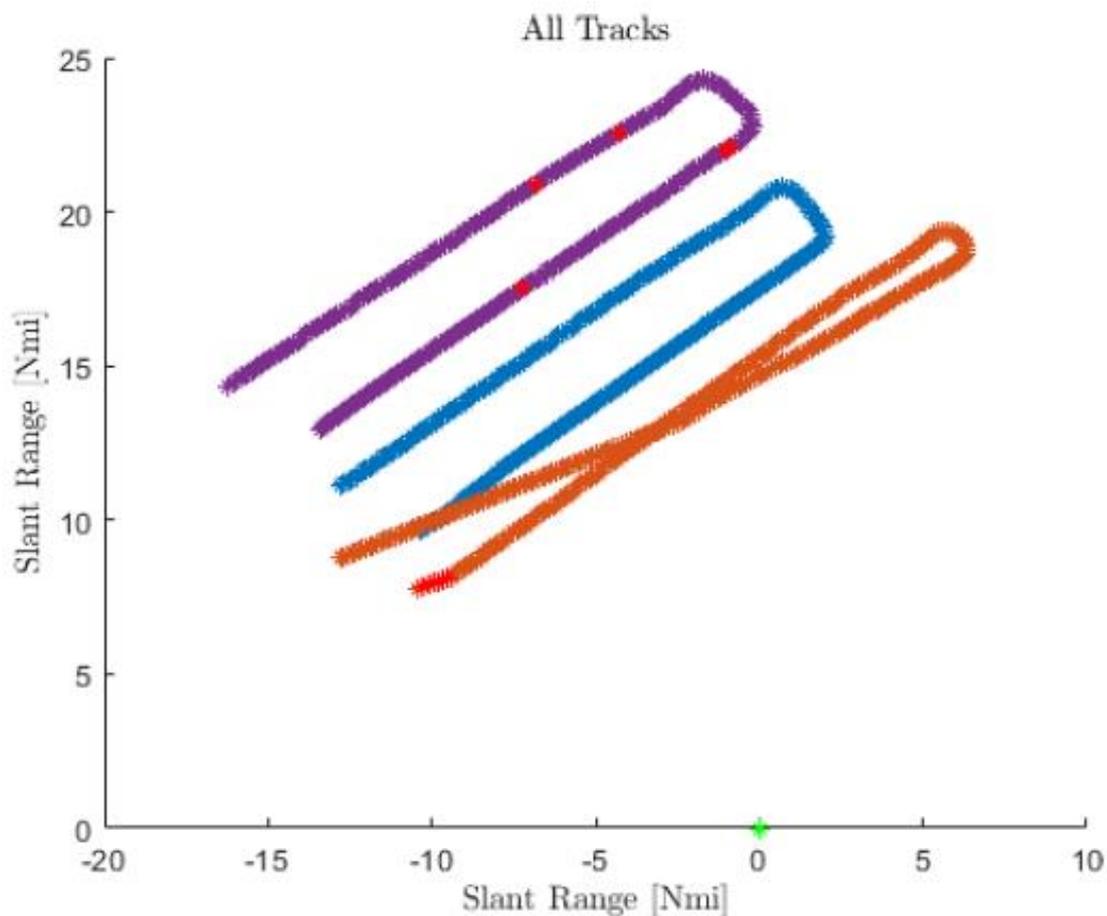


Abbildung 20: Darstellungsbeispiel eines von einem Aktivradar erfassten Flugtracks zur Auswertung der Probability of Detection (PD). Durchgängige Farbe (Lila, Blau, Orange): Flugtrack; Rot: Datenlücke.

6.7.2.5 Ergebnisse Waffelmuster

Um die Qualität der Radarabdeckung über Baltic II zu ermitteln, wurde ein zuvor definiertes Waffelmuster in 1.000 Fuß Höhe abgeflogen. Aus Gründen des Datenmanagement und der Fluglogistik (es musste zwischengebetankt werden), wurde der Flug in zwei Teilen geflogen (erster Flug: Abbildung 21; zweiter Flug: Abbildung 22). Zunächst wurde das Waffelmuster in

Süd-West/Nord-Ost (Abbildung 23), dann in Nord-West/Süd-Ost-Richtung (Abbildung 24) geflogen.

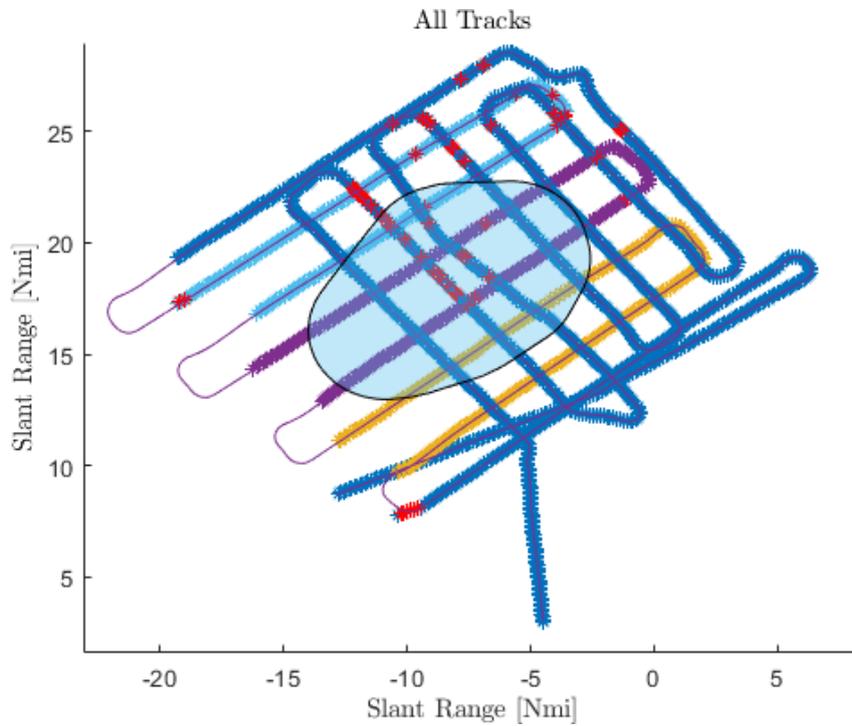


Abbildung 21: Flug 1. Bei Neuinitiiierung des Tracks wurde die Farbe des Tracks geändert, die Datenlücken sind rot gekennzeichnet. Die dünne Linie ist der GPS-Track, während die dicke Linie den Radartrack darstellt. Der blau eingefärbte Kreis ist die warning zone.

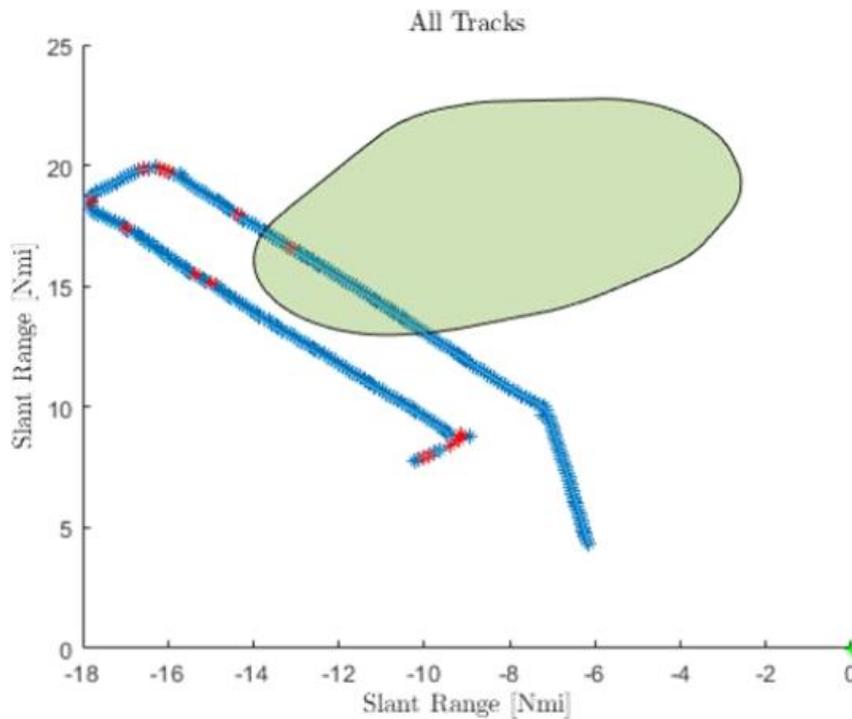


Abbildung 22: Flug 2: Bei Neuinitiiierung des Tracks wird die Farbe des Tracks geändert, die Datenlücken sind rot gekennzeichnet. Der grün eingefärbte Kreis ist die warning zone.

Zur besseren Veranschaulichung werden die gesamten Waffelmuster Daten in zwei Datensets unterteilt betrachtet: Datenset 1 stellt die kumulierten Radardaten des Testfluges in Süd-West/Nord-Ost-Richtung dar (Abbildung 21), während das zweite Datenset (Abbildung 22) die Radardaten des Testfluges in Nord-West/Süd-Ost-Richtung darstellt.

Insgesamt hat das Aktivradarsystem während des Flugs in Richtung S-W/NO-O 379 Updates durchgeführt. Dabei gab es lediglich drei Datenlücken im Track innerhalb der in der Abbildung 23 grün dargestellten warning zone mit einer daraus resultierenden PD von >99 %. Der Track des Flugzeugs blieb dabei innerhalb der warning zone stets erhalten und wurde durchgängig verfolgt. Zusammen in beiden Datensets wurden 670 Updates mit insgesamt 20 Datenlücken innerhalb der warning zone des OWP Baltic II vom Radarsystem ausgeführt und verzeichnet. Zusammengenommen über beide Datensets ergibt sich damit eine PD von 97 %. Es wurden maximal zwei aufeinander folgende Datenlücken innerhalb eines Datensets erkannt. Bei einer Umdrehungsgeschwindigkeit von 15 RPM ergibt das eine Datenlücke von 8 Sekunden. Während des gesamten Waffelmuster-Testflug ist innerhalb der warning zone der Track nie verloren gegangen.

Tabelle 2: Ergebnisse Waffelmuster

Datenset	Updates warning zone	Datenlücken warning zone	PD	Wahrscheinlichkeit, Track innerhalb der warning zone zu verfolgen
NO-SW Datenset 1	379	3	99,21 %	100,00 %
NW-SO Datenset 2	291	17	94,16 %	100,00 %
Gesamt	670	20	97,01 %	100,00 %

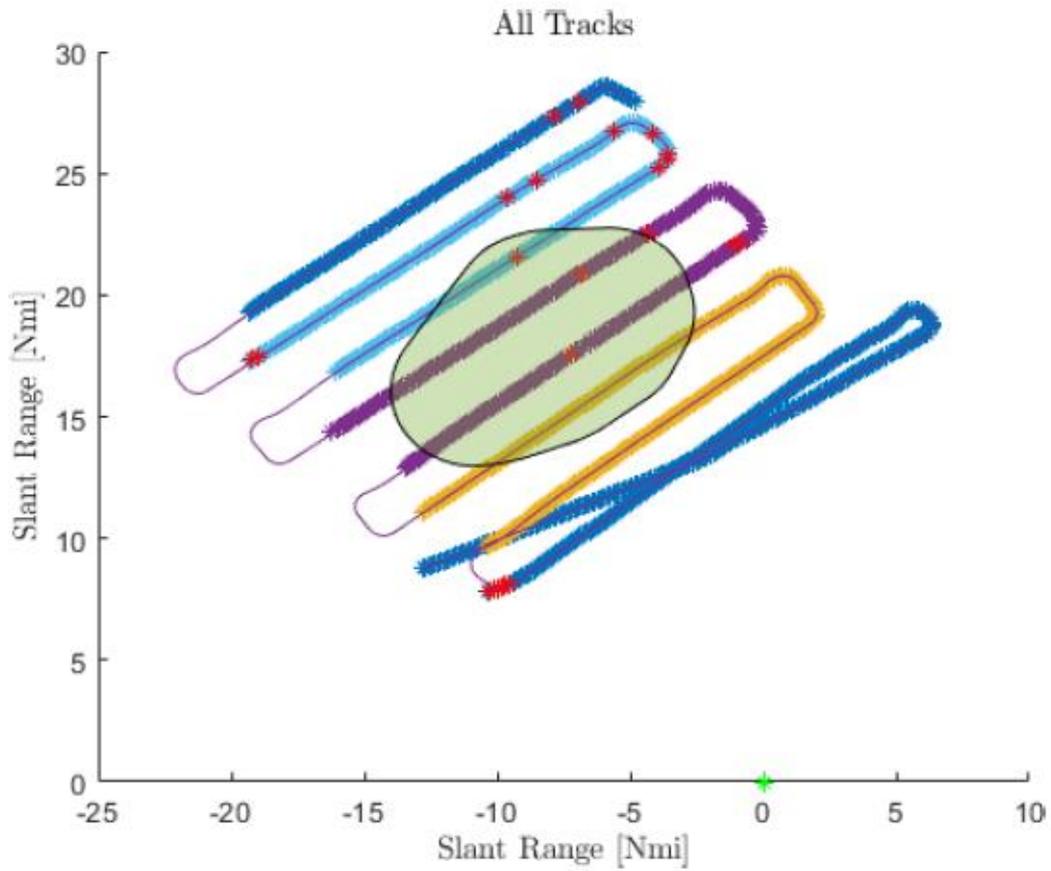


Abbildung 23: Waffelmuster in Süd-West/Nord-Ost-Richtung. Bei Neuintiierung des Tracks wurde die Farbe des Tracks geändert, die Datenlücken sind rot gekennzeichnet. Die dünne Linie ist der GPS-Track, während die dicke Linie den Radartrack darstellt. Der grün eingefärbte Kreis ist die warning zone.

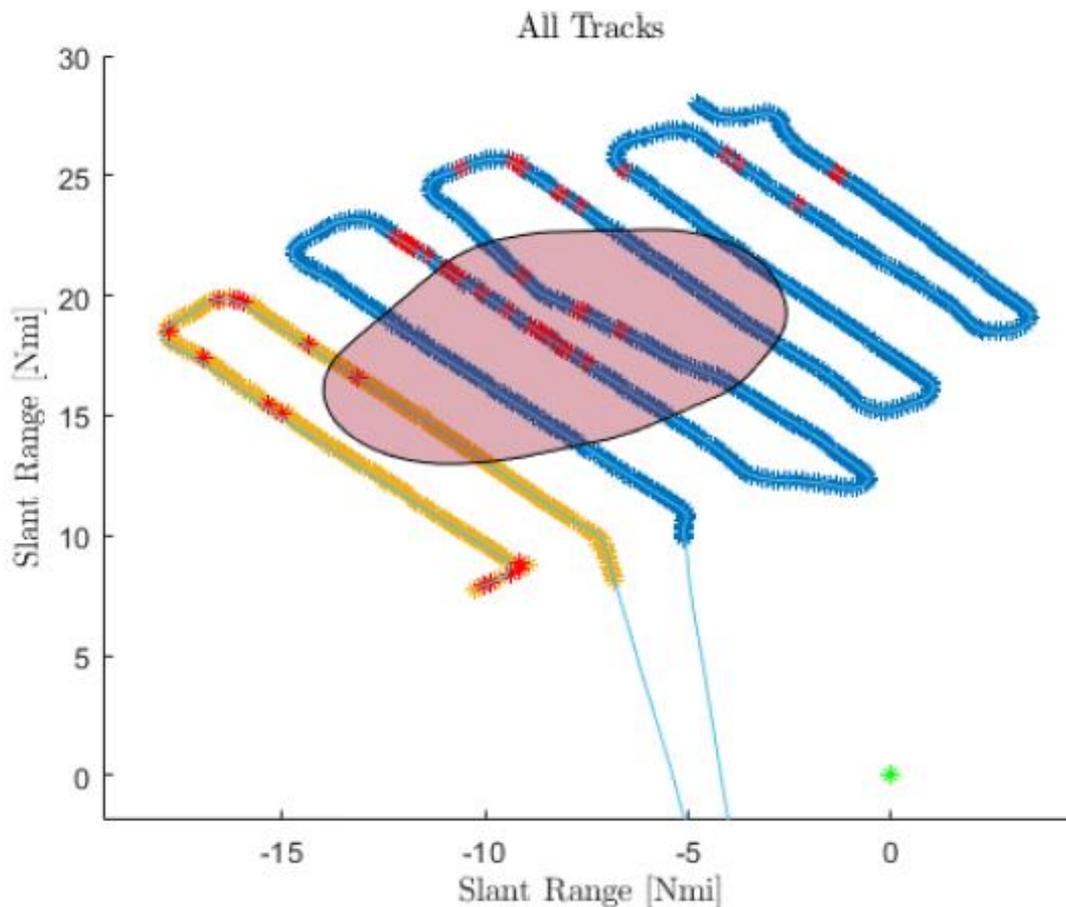


Abbildung 24: Waffelmuster in Nord-West/Süd-Ost-Richtung. Bei Neuinitialisierung des Tracks wurde die Farbe des Tracks geändert, die Datenlücken sind rot gekennzeichnet. Die dünne Linie ist der GPS-Track, während die dicke Linie den Radartrack darstellt. Der rot eingefärbte Kreis ist die warning zone.

6.7.2.6 Ergebnisse Tangentialflug

Es wurde ein tangentialer Flug (tangential zum Radar) über einer möglichst großen Anzahl OWEA von Baltic II ausgeführt, um die Detektionswahrscheinlichkeit unter den für das Radar schwierigsten Bedingungen zu überprüfen (Abbildung 25).

Während des Manövers wurden innerhalb der warning zone 96 Updates durchgeführt. Dabei wurde eine Datenlücke registriert, sodass eine PD von 98,9 % verzeichnet werden kann. Der Track des Flugzeugs ging während der gesamten Testphase nicht verloren.

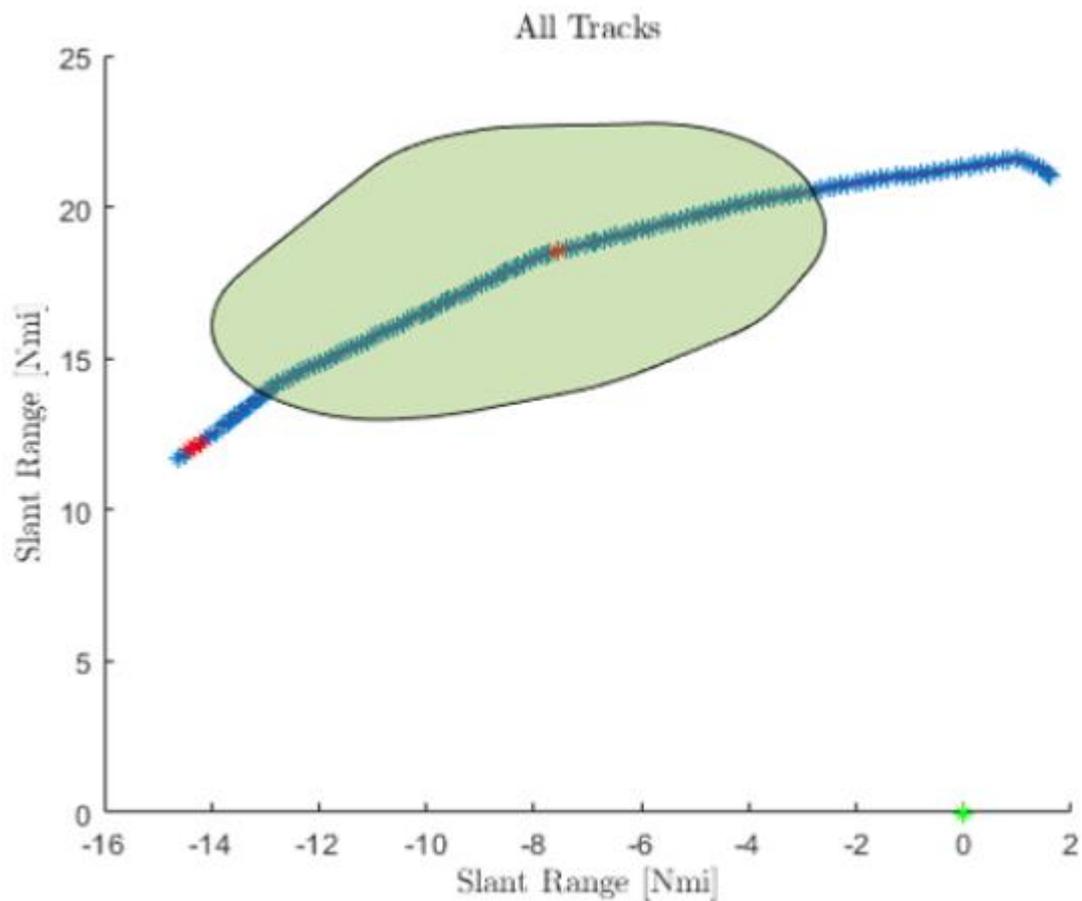


Abbildung 25: Tangentialer Flug. Datenlücken im Track werden als rote Punkte dargestellt. Die dünne rote Linie repräsentiert die GPS-Daten des Flugzeugs. Die grün eingefärbte Fläche ist die warning zone des OWP Baltic II.

6.7.2.7 Ergebnisse scharfe Wende

Im Flugtest zur scharfen Wende sind neun Datenlücken im Track innerhalb der warning zone aufgetreten, wobei 73 Updates durch das Aktivradarsystem durchgeführt wurden. Diese Werte bedeuten eine Erkennungswahrscheinlichkeit (PD) von 87,67 %. Das Flugzeug wurde durchgängig verfolgt und der Track während des Tests ging nicht verloren, obwohl gerade bei der scharfen Wende mehrere Datenlücken in der Verfolgung des Flugtracks aufgetreten sind. Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Abbildung 16 zu sehen.

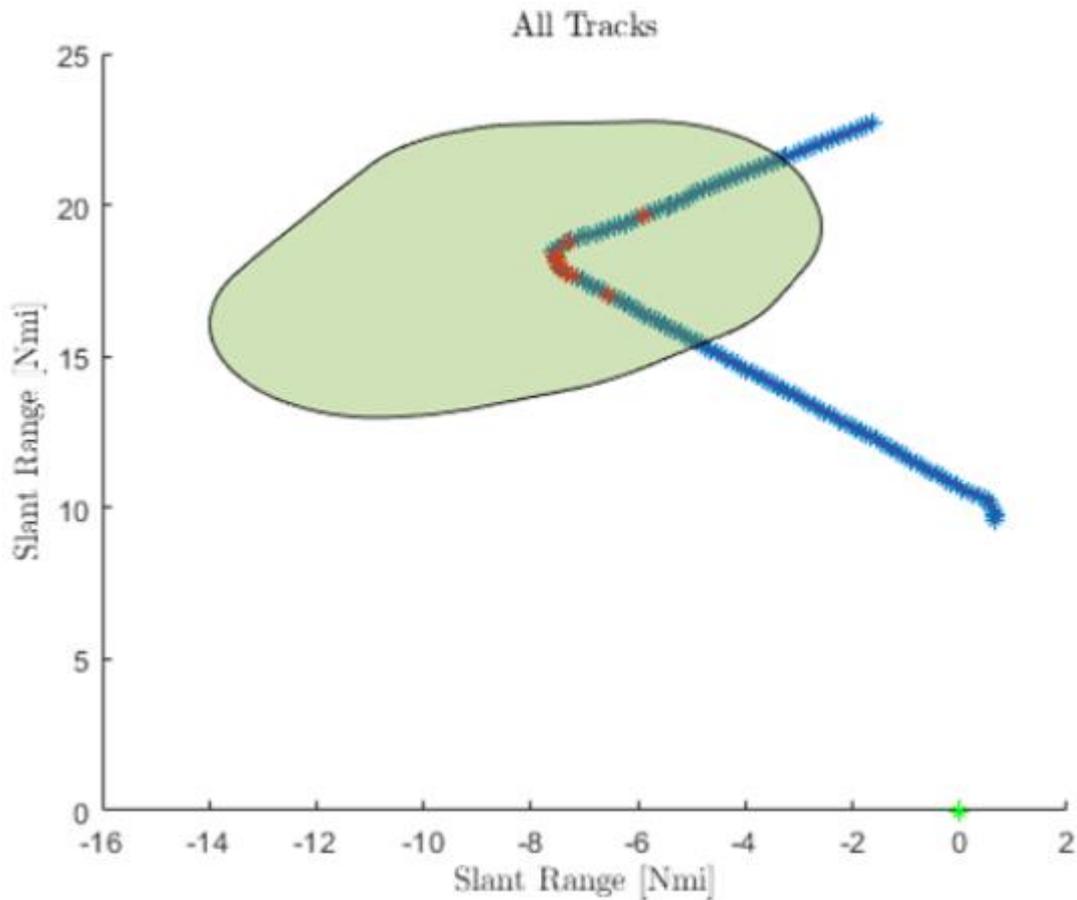


Abbildung 26: Ergebnisse scharfe Wende: Die Datenlücken im Track werden als rote Punkte dargestellt. Die dünne rote Linie repräsentiert die GPS-Daten des Flugzeugs. Die grün eingefärbte Fläche ist die warning zone des OWP Baltic II.

6.7.2.8 Schlussfolgerungen aus Waffelflug, Tangentialflug und scharfer Wende

Die Ergebnisse der verschiedenen Flugmanöver sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Detektionscharakteristik Baltic II

Flugmanöver	Updates in der warning zone	Datenlücken in der warning zone	Erkennungswahrscheinlichkeit [PD %]	Wahrscheinlichkeit, den Flugtrack innerhalb der warning zone zu verfolgen (%)
Waffelmuster	670	20	97.01	100,00
Tangentialflug	96	1	98.86	100,00
Scharfe Wende	73	9	87.67	100,00

Die Testergebnisse werden dabei in einer berechneten PD zusammengefasst und zeigen an, ob der Track des Flugzeugs verloren wurde oder nicht. Mit der PD lässt sich feststellen, wie zuverlässig das Radarsystem ein Ziel erkennen kann und ist somit eine gute Möglichkeit, die Radarleistung zu messen. Die PD ist aber nicht die am besten geeignete Methode, um die Leistung eines BNK-Systems zu bestimmen.

Die Leistung eines BNK-Systems lässt sich vermutlich am besten an der Fähigkeit messen, den Track eines Flugzeugs zu verfolgen und aufrecht zu erhalten. Das BNK-System muss innerhalb des zu überwachenden Gebietes einen Flugtrack initiieren und diesen aufrecht erhalten, um die Kontrolle über die Lichter zu optimieren. Der Track des Testflugzeugs wurde während des gesamten Tests kontinuierlich aufrechterhalten und ging innerhalb der warning zone nie verloren. Dies würde eine BNK-Effizienz des BNK-Systems von 100 % bedeuten. Die Befeuerung des Windparks wäre also nur dann eingeschaltet worden, wenn sich das Flugzeug innerhalb der warning zone befunden hätte, und wäre wieder ausgeschaltet worden, wenn das Flugzeug die warning zone verlässt.

Im Waffelflug ging der Flugtrack verloren, als das Flugzeug in das Gebiet südwestlich von Baltic II einflog, was durch die beeinträchtigte LoS verursacht wurde. Jedes Mal, wenn sich das Flugzeug in dieses Gebiet hinein- und wieder herausbewegte, wurde jedoch ein neuer Flugtrack initiiert. Die ausgeprägte Fähigkeit des Aktivradarsystems zur Initiierung des Flugtracks sorgt dabei für einen hohen Grad an Sicherheit.

Der tangentielle Flugtest kann als Worst-Case-Analyse der Radarerfassung angesehen werden, da er die Radarerfassung ohne die Hilfe der Doppler-Verarbeitung umfasst. Beim Tangentialflug wies das Ziel nur eine Datenlücke auf, was auf eine gute Detektion selbst im ungünstigsten Fall hindeutet.

Nach den EUROCONTROL-Richtlinien für die Detektion mit PSR (Primary Surveillance Radar), gilt eine PD >90 % als ausreichend. Die Testergebnisse zeigen, dass das System über den EUROCONTROL-Richtlinien liegt. Für BNK-Anwendungen ist das hier getestete Radarsystem Scanter 4002 dementsprechend vollumfänglich geeignet.

6.7.3 Umsetzung und Implementierung von BNK in Offshore-Windparks

Eine Umsetzung der hier gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse mit einer technischen Implementierung einer BNK an OWPs war nicht Teil des Projektes und müsste in einem gesonderten Projekt beantragt und genehmigt werden.

Für einen dauerhaften und ordnungsgemäßen Betrieb des Aktivradarsystems Scanter 4002 wären mehrere rechtliche Voraussetzungen zu schaffen, welche sowohl an das System

gebunden als auch individuell an einzelne Standorte anzupassen sind. Rechtliche Voraussetzungen, wie Baugenehmigung oder Frequenzzusage der BNetzA sind individuell für jeden Standort neu zu bewerten und einzuholen. In der Vergangenheit wurden für Onshore-BNK von Quantec Sensors bereits BNK-Radarmasten mit 61 m Höhe projektiert und umgesetzt. Für ein windparkübergreifendes Konzept der BNK-Abdeckung für Nord- und Ostsee ergeben sich daraus vielfältige Standortmöglichkeiten. Die generelle Anerkennung des Systems bezieht sich dabei auf die AVV, welche am 24. April 2020 in neuer Fassung verabschiedet wurde. Offshore gilt SOLF entsprechend. Inhaltlich sind beide Regelwerke weitestgehend identisch, so dass im Folgenden, wenn auf die AVV verwiesen wird, die gleichlautende Regelung des SOLF mit abgedeckt ist (Stand Projektende).

Die Flugtests für das Projekt BeBeO wurden in einer Flughöhe von 1.000 Fuß (304,8 m) durchgeführt, wohingegen in der AVV (05/2020), Anhang 6, Absatz 1, der Wirkungsraum der BNK vom Boden bis zu einer Höhe von nicht weniger als 600 m über dem Hindernis definiert ist. Bei bereits anerkannten BNK-Systemen nach der AVV (05/2020) wurde diese Definition aufgeweicht und an die LoS des Piloten zur Hindernisbefeuereung in der jeweiligen OWEA angepasst. Darüber hinaus ist im Offshore-Bereich noch nicht klar definiert wie „vom Boden“ in diesem Zusammenhang zu verstehen ist. Aufgrund von Gezeiten und unterschiedlicher Wellenhöhen wurde die Formulierung „vom Boden“ bisher nicht weiter definiert. Eine solche Definition des Begriffs „vom Boden“ steht behördenseitig für Offshore-BNK noch aus.

Auf Rückfrage beim BSH zum o.g. Thema wurde an die oberste Luftfahrtbehörde im BMDV (Referat LF15) verwiesen und von dort kam am 12.11.2021 folgende Antwort:

„Mit Erlass vom 17.08.2020 hat das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie angewiesen, den Teil 5 des Standards Offshore-Luftfahrt (SOLF) „Kennzeichnung von Luftfahrthindernissen“ in Verfahren zur Planfeststellung und zur Genehmigung der Anlage und des Betriebs von Offshore-Anlagen anzuwenden“. Der Standard wurde seitdem nicht angepasst.

Der Begriff "Boden" im Anhang 6 zum SOLF Teil 5 ist gleichzusetzen mit der Wasseroberfläche. Allerdings steht das Konsultationsverfahren des gesamten SOLF 5 noch aus (Stand Projektende).

Ferner sind Neuinstallationen von BNK-Systemen, die bereits eine Anerkennung nach der AVV a.F. (BAnz AT 01.09.2015 B4) erhalten haben, noch fünf Jahre ab Inkrafttreten der AVV n.F. (BAnz AT 30.04.2020 B4) zulässig.

Wie das Aktivradarsystem SCANTER 4002 als BNK-Lösung an den OWPs angeschlossen werden kann, um ein dauerhaftes An- bzw. Ausschaltsignal der Befeuereung zu erhalten, ist

individuell und anlagenabhängig zu prüfen und individuell vertraglich zu vereinbaren. Der sich im Markt durchsetzende Standard beinhaltet eine gesicherte VPN-Verbindung über Internet. Die netzwerktechnische Anbindung hierzu kann ähnlich wie bei Onshore-Windparks erfolgen, wobei die erhöhten Anforderungen an verbaute Komponenten durch die exponierte Lage offshore zu berücksichtigen sind. So werden zum Beispiel für Onshore-BNK-Lösungen über Aktivradarsysteme die Komponenten in der sogenannten LCU in einem Rittal-Schrank (Abbildung 27) verbaut. Für die Radarantenne, den Radarsensor und die sonstigen Bestandteile des Detektionssystems liegen bereits offshore taugliche Konstruktionen vor, da sich das System bereits für andere Anwendungen im Offshore-Einsatz befindet.



Abbildung 27: Zeichnung der LCU (Rittal-Schrank) für Netzwerkkomponenten. Die dargestellte Box besteht aus gepulvertem Stahl und hat eine IP-Schutzklasse 55. Je nach Installationsort wäre eine Anpassung der verwendeten Komponenten notwendig, um den Umweltbedingungen auf See Rechnung zu tragen.

6.8 Naturschutzfachliche Begleitung (AP 8)

Die naturschutzfachliche Begleitforschung wurde vor dem Hintergrund durchgeführt, dass der Anlockwirkung von künstlichen Lichtquellen eine Schlüsselrolle beim Kollisionsrisiko von nachts ziehenden Vögeln an OWEA zukommen könnte.

Ursache hierfür ist, dass nachts ziehende Vögel von künstlichen Lichtquellen angezogen werden können (LOSS et al. 2015; VAN DOREN et al. 2017). Eine solche Anlockwirkung geht in der Regel mit einem erhöhten Kollisionsrisiko an den beleuchteten Strukturen einher (EVANS OGDEN 1996). Großen Einfluss auf das Ausmaß des Anlockeffekts wird den Wetterbedingungen zugeschrieben. Insbesondere bei unsichtigem Wetter (Nebel, Niesel, niedrige Wolkendecke), welches die Orientierungsfähigkeit der Vögel einschränkt, ist von einer deutlich erhöhten Anlockwirkung auszugehen (LARKIN 2000; BALLASUS et al. 2009). Weiterhin ist davon auszugehen, dass die anziehende Wirkung von Lichtquellen auf See stärker

ausgeprägt ist als unter vergleichbaren Bedingungen an Land. Während orientierungslos gewordene Zugvögel an Land ihre Zugaktivität jederzeit unterbrechen und einen geeigneten Rastplatz aufsuchen können, ist dies für nachts ziehende Singvögel auf See nicht möglich. Durch eine deutliche Verringerung der Lichtemissionen durch die Einführung von BNK an OWEA könnte somit eine deutliche Reduzierung des Kollisionsrisikos dieser Vögel erzielt werden.

Die naturschutzfachliche Begleitforschung umfasste mehrere Teilarbeitspakete. Im AP 8.1 wurde ein Studienkonzept erstellt, auf dessen Basis die Anlockwirkung der Nachtkennzeichnung von OWEA auf Nachtzieher quantifiziert werden kann. Ziel war es hier, ein experimentelles Studiendesign zu entwickeln, das dazu geeignet ist, an einem offshore Standort umgesetzt zu werden. AP 8.2 umfasste die Entwicklung eines dazugehörigen technischen Konzepts, welches die für die Studie notwendige Datenaufnahme ermöglicht. Dies beinhaltete die Sichtung und Auswahl geeigneter Erfassungssysteme, ggf. notwendige Anpassungen für den offshore Einsatz sowie deren mögliche Integration in OWPs.

In AP 8.3 wurde geprüft, inwiefern mit den für die BNK-Steuerung eingesetzten Aktivradarsystemen auch Vogelzug systematisch erfasst werden kann. Eine solche Machbarkeitsstudie wurde sowohl mit dem im Praxistest auf Rügen verwendeten Radar (Scanter 4002) als auch mit einem BNK-Radar an einem onshore-Standort durchgeführt.

Des Weiteren wurde in AP 8.4 eine Feldstudie an einem onshore-Standort durchgeführt, welche die Anlockwirkung der Nachtkennzeichnung von onshore-WEA auf Zugvögel untersuchte. Diese Studie kann als Vergleichsstudie zu zukünftigen Untersuchungen zur Anlockwirkung an OWEA dienen.

6.8.1 Erstellung eines Studienkonzeptes (AP 8.1)

6.8.1.1 Hintergrund

Das übergeordnete Ziel der zu entwickelnden Studie ist die Quantifizierung der Anlockwirkung der nächtlichen Beleuchtung von OWEA auf den nächtlichen Vogelzug, insbesondere nachts ziehende Singvögel. Aus den Ergebnissen sollen Rückschlüsse auf die Auswirkungen einer bedarfsgesteuerten Nachtkennzeichnung auf das Kollisionsrisiko dieser Vögel gezogen werden.

Der nächtliche Vogelzug findet in der Regel als sogenannter Breitfrontenzug statt. Die Vögel ziehen dabei weitgehend unabhängig von topografischen Strukturen. Sie bewegen sich stattdessen „in breiter Front“ einer spezifischen Zugrichtung folgend und überqueren dabei auch ausgedehnte Wasserflächen wie beispielsweise die deutsche Nord- und Ostsee. Der

Vogelzug ist in dieser geographischen Region hauptsächlich auf die Hauptzugzeiten im Frühjahr (v.a. März bis Mai) und Herbst (v.a. August bis November) konzentriert. Innerhalb dieser Zugzeiten ist das lokale Zuggeschehen jedoch von hoher Variabilität geprägt. Nahezu alle die Zugaktivität charakterisierenden Parameter (Zugintensität, Flugrichtung, Höhenverteilung und Artzusammensetzung) unterliegen hoher tag-zu-tag sowie hoher interannueller Variation. Ein Großteil dieser Variation ist auf die starke Wetterabhängigkeit des Vogelzugs zurückzuführen (ZEHNDER et al. 2001; ERNI et al. 2002; VAN BELLE et al. 2007; VAN DOREN & HORTON 2018; WELCKER & VILELA 2018, 2019). Die hohe Variabilität ist ein wichtiger, beim Studiendesign zu berücksichtigender Faktor.

6.8.1.2 Untersuchungskonzept

Es wird ein experimentelles Studiendesign vorgeschlagen, bei dem das Beleuchtungsregime zweier OWP in regelmäßigen Abständen und alternierend geändert wird. Gleichzeitig wird über spezialisierte Vogelerfassungssysteme der Vogelzug in beiden Windparks umfassend aufgezeichnet. Aus Änderungen verschiedener Parameter des Zuggeschehens als Folge der Änderung der Beleuchtung können Rückschlüsse auf den Effekt der Nachtkennzeichnung auf den nächtlichen Vogelzug gezogen werden.

6.8.1.2.1 Windparks

Insgesamt wird das Studiendesign als robust hinsichtlich der Eigenschaften der beteiligten Windparks angesehen. Bei der Wahl des Studienstandorts sind jedoch einige Punkte zu berücksichtigen, um die Erfolgsaussichten der Untersuchung zu maximieren.

- Es sind Standorte zu bevorzugen, an denen generell mit hohen Zugintensitäten zu rechnen ist. Dies trifft nach bisherigem Kenntnisstand auf die gesamte deutsche AWZ der Ostsee, sowie auf die küstennahen Bereiche der Nordsee zu.
- Um äußere Einflüsse zu minimieren, sollten die beteiligten Windparks möglichst isoliert von weiteren Windparks bzw. anderen stärkeren künstlichen Lichtquellen liegen. Einzelstehende OWPs sind daher gegenüber Windparks innerhalb von Windpark-Clustern zu präferieren. Insbesondere bei Lage innerhalb eines Clusters ist mit Effekten der zusätzlichen Beleuchtung zu rechnen.
- Die beteiligten Windparks sollten in möglichst geringem Abstand zueinanderstehen. Auf diese Weise wird das Auftreten größerer räumlicher Variation im Zuggeschehen zwischen den Standorten ausgeschlossen und somit bessere Grundbedingungen für

die statistische Auswertung der Daten geschaffen (höhere Power statistischer Tests bei geringerer Varianz der Daten).

- Als Grundvoraussetzung ist selbstverständlich das Einverständnis und die Unterstützung der Windparkbetreiber zu sehen.

Die Beteiligung zweier Windparks ist zwar aus fachlicher Sicht als optimale Lösung anzusehen, sie ist jedoch auch mit einem erheblichen logistischen und organisatorischen Mehraufwand verbunden. Alternativ ist deshalb in Erwägung zu ziehen, die Studie in nur einem einzelnen Windpark durchzuführen. In diesem Fall wären die Anlagen dieses Windparks in zwei gleich große Gruppen zu unterteilen und im Weiteren jeweils wie ein eigenständiger Windpark zu behandeln (Abbildung 28). Da es sich bei der überwiegenden Anzahl der OWPs um Windparks mit zahlreichen einzelnen Turbinen handelt, ist mit einer wesentlichen Einschränkung der Aussagekraft der Studienergebnisse durch ein solches Vorgehen nicht zu rechnen. In der praktischen Durchführung kann dies jedoch zu deutlichen Erleichterungen führen.

Im Folgenden wird zur Vereinfachung weiterhin von zwei Windparks gesprochen; dies schließt die Durchführung innerhalb eines Windparks wie oben beschrieben mit ein.

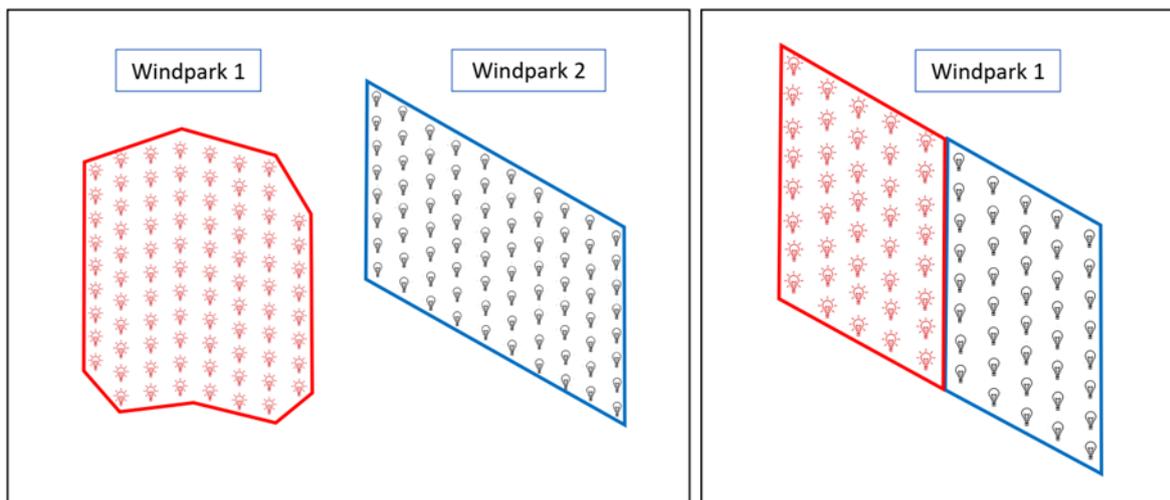


Abbildung 28: Studiendesign mit zwei beteiligten Windparks (links), bei entsprechender Größe ist die Unterteilung eines einzelnen Windparks möglich (rechts).

6.8.1.3 Schaltung der Beleuchtung

Der Studienablauf besteht aus einer alternierenden Schaltung der Nachtkennzeichnung der beteiligten Windparks (Abbildung 29). Es wird dabei in regelmäßigen, ca. einwöchigen Abständen zwischen dauerhafter Nachtkennzeichnung und bedarfsgesteuerten

Nachtkennzeichnung (d.h. nahezu dauerhaft ausgeschalteter Beleuchtung) gewechselt. Zudem ist vor jedem Durchlauf eine Kontrollphase geplant, in der beide Windparks bedarfsgerecht geschaltet sind.

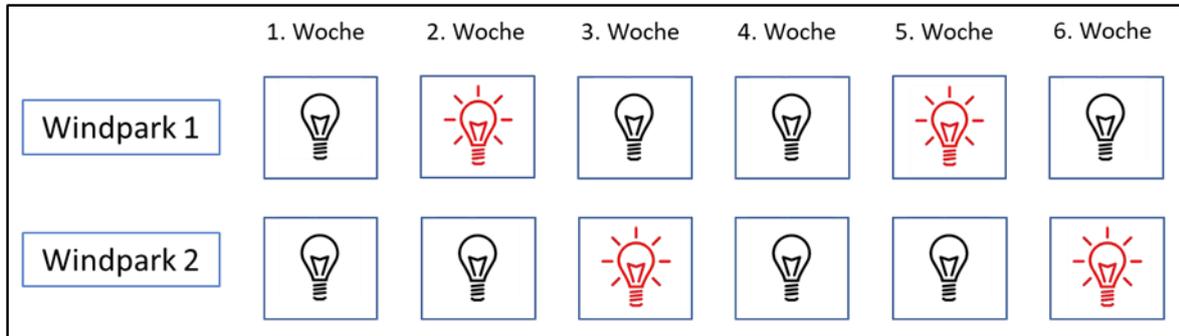


Abbildung 29: Geplanter Ablauf der Beleuchtung der beiden an der Studie beteiligten Windparks über einen Zeitraum von 6 Wochen.  = bedarfsgesteuerte Nachtkennzeichnung;  = Dauerbeleuchtung.

Das vorgeschlagene Studiendesign berücksichtigt insbesondere die hohe zeitliche Variabilität des Zuggeschehens. Die hohe Grundvariabilität führt dazu, dass Veränderungen der Zugintensität bei Änderungen des Lichtregimes nicht ohne Weiteres kausal auf die geänderte Beleuchtung zurückgeführt werden können, da zahlreiche weitere Faktoren den Verlauf des nächtlichen Vogelzugs beeinflussen. Dies wird beispielhaft in Abbildung 30 in vereinfachter Form illustriert. Hier ist ein möglicher Verlauf der Zugintensität an einem einzelnen Windpark bei Änderungen der Nachtkennzeichnung dargestellt. Die Zugintensität ist hierbei jedoch nicht nur von der Beleuchtung, sondern auch von weiteren Faktoren wie beispielsweise dem Wetter u.a. abhängig. Die auf Basis eines einzelnen Windparks gewonnenen Daten lassen somit keine belastbaren Rückschlüsse auf den Effekt der Beleuchtung auf den Vogelzug zu. So nimmt in dem in Abbildung 31 dargestellten Szenario die Zugintensität beim Wechsel von bedarfsgerechter auf dauerhafte Beleuchtung in Woche 2 ab, in Woche 5 jedoch zu.

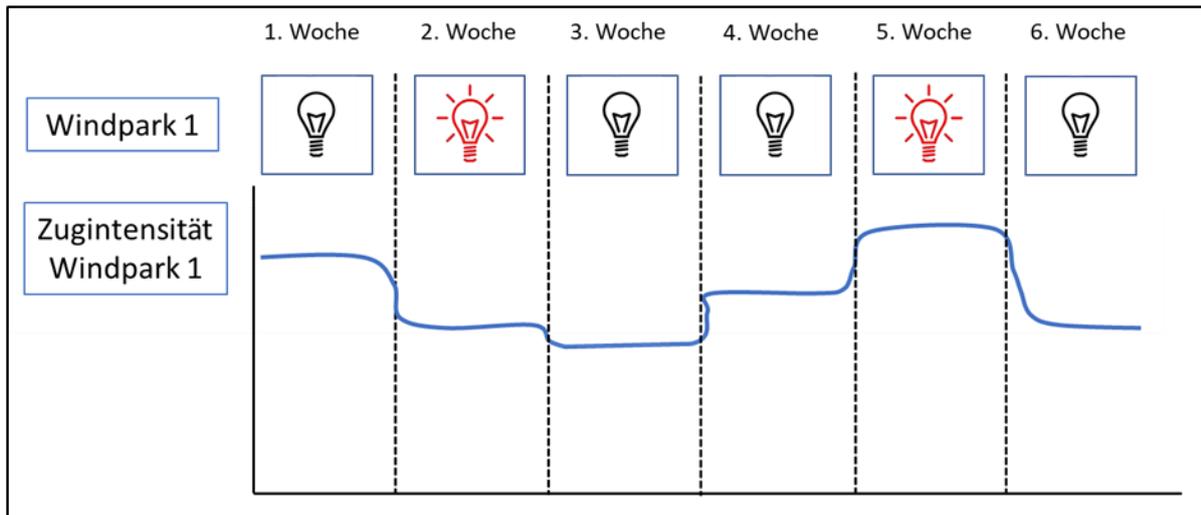


Abbildung 30: Illustration eines beispielhaften Verlaufs der Zugintensität an einem Windpark mit wechselndem Beleuchtungsregime.

Erst mit Hinzunahme eines zweiten Windparks kann auf einen möglichen Effekt der Nachtkennzeichnung geschlossen werden (Abbildung 31). Die Kontrollphasen mit beiderseitig ausgeschalteter (bedarfsgesteuerter) Nachtkennzeichnung dienen dabei zur Etablierung eines möglichen systematischen Unterschieds im Zugaufkommen der beteiligten Windparks (1. und 4. Woche in Abbildung 31). Die Veränderung dieses Unterschieds lässt dann Schlussfolgerungen hinsichtlich des Effekts der Beleuchtung zu. Im Beispiel in Abbildung 31 nimmt der Unterschied zwischen den Windparks bei Dauerbeleuchtung des Windparks 1 zu, während die Differenz zwischen den Windparks bei Dauerbeleuchtung von Windpark 2 abnimmt bzw. sich umkehrt. Ein solcher Verlauf der Zugintensität wäre bei einer deutlichen Anlockwirkung durch die Nachtkennzeichnung zu erwarten.

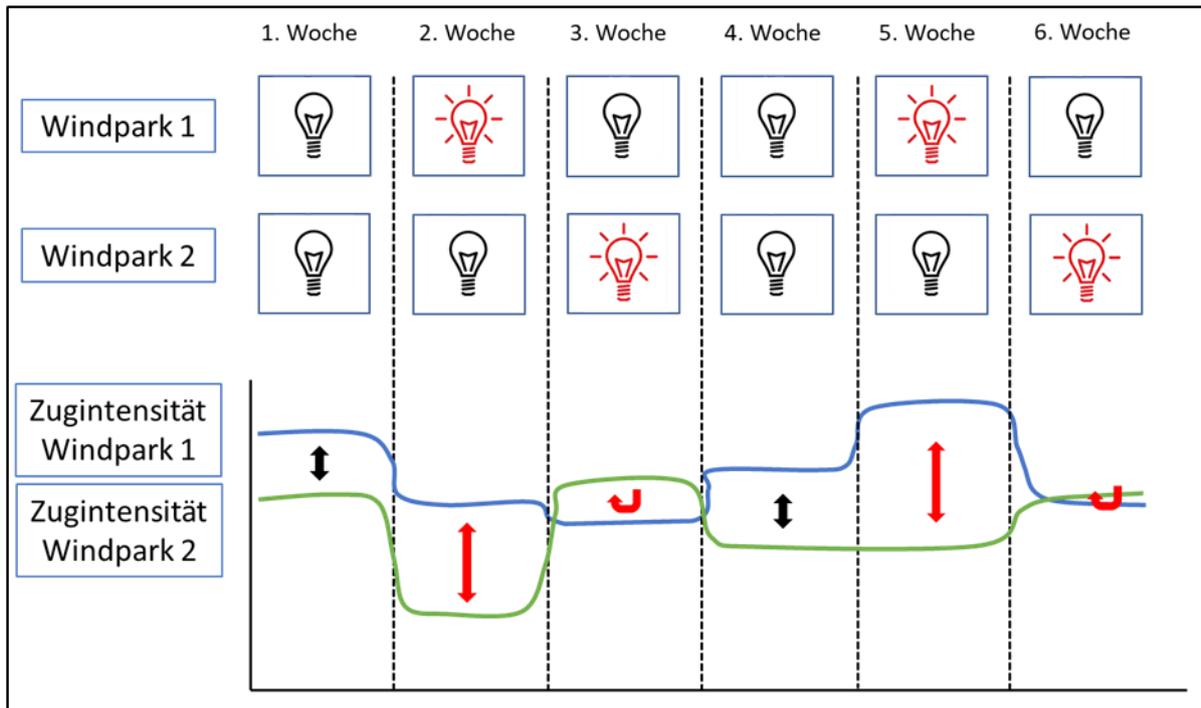


Abbildung 31: Illustration eines beispielhaften Verlaufs der Zugintensität an zwei Windparks mit wechselndem Beleuchtungsregime.

6.8.1.3.1 Aufzunehmende Parameter

Im Folgenden sind die im Untersuchungszeitraum zu erfassenden Daten erläutert, das technische Konzept (Kap. 6.8.2) gibt Aufschluss darüber, welche technischen Hilfsmittel für die Datenaufnahme zum Einsatz kommen sollen.

Zugintensität

Die Zugintensität ist der grundlegende Parameter, der in beiden beteiligten Windparks gleichzeitig und durchgängig gemessen werden sollte. Grundsätzlich ist zu erwarten, dass eine Anlockwirkung mit einem erhöhten Zugaufkommen im jeweils beleuchteten Windpark verbunden ist. Da die räumliche Ausdehnung einer möglichen Anlockwirkung unbekannt ist, muss die Zugintensität innerhalb der Windparks gemessen werden. Zudem ist wichtig, dass der erfasste Höhenbereich die Rotoren miteinschließt.

Höhenverteilung

Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Flughöhe der Zugvögel. Es ist denkbar, dass die Beleuchtung nicht (nur) die Anzahl der Vögel an sich beeinflusst, sondern auch deren Höhenverteilung. Es sollte also erfasst werden, ob sich der Anteil der Flugbewegungen auf Höhe der Beleuchtung in Abhängigkeit des Beleuchtungsregimes ändert.

Rufintensität

Für die durchgehende Erfassung der Zugintensität sowie der Flughöhenverteilung des Nachtzugs ist der Einsatz von Radargeräten notwendig (siehe Kap. 6.8.2). Ein wesentlicher Nachteil dieser Erfassungsmethode ist deren fehlende Möglichkeit zur Artunterscheidung. Auch mit spezialisierten Radargeräten, die in der Lage sind, die Flügelschlagfrequenz aufzunehmen, kann lediglich eine Unterscheidung weniger grober Artgruppen erfolgen (ZAUGG et al. 2008).

Um artspezifische Daten zu erhalten, sollten die Zugrufe der Nachtzieher aufgezeichnet werden. Viele nachziehende Vogelarten emittieren Zugrufe, deren eigentliche Funktion noch nicht voll-ständig geklärt ist (FARNSWORTH 2005, 2007). Es ist jedoch zu beachten, dass eine Reihe von Nachtziehern keine oder nur selten Flugrufe emittieren; und somit mit dieser Methode nur ein Teil der nachziehenden Arten erfasst werden kann. Nichtsdestotrotz lassen sich mit diesen Daten mögliche artspezifische Unterschiede in der Reaktion der Vögel auf die Beleuchtung evaluieren.

Flugaktivität im Rotorbereich/Rotordurchflüge

Um gesicherte Rückschlüsse auf den Effekt der Nachtkennzeichnung auf das Kollisionsrisiko der Zugvögel ziehen zu können, ist eine Erfassung der Flugaktivität im Rotorbereich bzw. eine Erfassung der Rotordurchflüge notwendig. Bisherige Daten weisen darauf hin, dass ein hoher Prozentsatz der Vögel, die weder den gesamten Windpark großräumig meiden („macro-avoidance“), noch die einzelnen Turbinen in größerem Abstand umfliegen („meso-avoidance“), jedoch eine Ausweichbewegung in unmittelbarer Nähe der Rotoren durchführen und somit eine Kollision vermeiden (z. B. SKOV et al. 2018).

Mit Hilfe der Erfassung der Rotordurchflüge kann daher abgeschätzt werden, inwiefern eine Änderung der Zugintensität bzw. der Flughöhe zu einer Änderung des Kollisionsrisikos führt. Die Flugaktivität im Rotorbereich kann durch Wärmebild- bzw. Infrarotlichtkameras aufgezeichnet werden (siehe Kap. 6.8.2).

Wetter-/Sichtbedingungen

Wetterparameter wie Windstärke und -richtung, Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck, sowie insbesondere die Sichtbedingungen sind durchgängig mitzuerfassen. Dies ist erforderlich, da nahezu alle Aspekte des Zuggeschehens (Zugintensität, Flughöhe, Zugrichtung etc.) sehr stark von den vorherrschenden Wetterbedingungen abhängig sind (VAN BELLE et al. 2007; WELCKER & VILELA 2018, 2019). Für die Anlockwirkung der Beleuchtung können darüber hinaus die Sichtbedingungen eine wesentliche Rolle spielen. So wird allgemein davon ausgegangen, dass Vögel insbesondere bei unsichtigem Wetter, wie Nebel,

Niesel und dichter Bewölkung, von künstlichen Lichtquellen angezogen werden. Die Berücksichtigung der Wetterverhältnisse ist daher für die Interpretation der Daten unablässig.

6.8.1.3.2 Dauer der Felderfassungen

Bei der Dauer der Datenerhebungen sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Die hohe temporäre Variabilität des lokalen Zugeschehens
- Die vermutete Abhängigkeit der Reaktion der Vögel von den äußeren Bedingungen, insbesondere der Sichtbedingungen
- Mögliche artspezifische und saisonale Unterschiede der Auswirkungen der Nachtkennzeichnung

Dies hat zur Folge, dass für belastbare Ergebnisse längere Erfassungszeiträume notwendig sein werden. Es wird daher empfohlen, die Felderfassungen sowohl im Frühjahr als auch im Herbst durchzuführen und diese über einen Zeitraum von mindestens zwei Jahren auszudehnen. Pro Zugsaison sollte jeweils für einen Zeitraum von 12 Wochen erfasst werden, d.h. jeweils zwei Durchläufe des alternierenden Beleuchtungsregimes, wie in Abbildung 29 dargestellt, durchzuführen. Die Erfassungszeiträume sollten jeweils in die Hauptzugzeiten der Saison fallen, d.h. im Frühjahr in die Zeit zwischen Anfang März bis Ende Mai, im Herbst zwischen Mitte/Ende August bis Mitte/Ende November.

6.8.2 Konzept zur technischen Umsetzung (AP 8.2)

Im Folgenden werden die technischen Möglichkeiten zur Vogelerfassung per Radar, der Aufzeichnung von Zugrufen und der Erfassung der Flugaktivität im Rotorbereich dargelegt sowie mögliche installationsstandorte der technischen Systeme erläutert.

6.8.2.1 Radarerfassung

Zu erfassende Parameter:

- Zugintensität (MTR)
- Flughöhenverteilung
- Nützliche Zusatzinformationen:
 - Flügelschlagfrequenz zur Unterscheidung von Artgruppen
 - Flugrichtung

Anforderungen:

- Durchgängige, automatisierte Erfassung der lokalen Zugintensität
- Abzudeckender Höhenbereich: untere Rotorkante bis ca. 1000 m Höhe
- Erfassung in MTR (Signale*km⁻¹*h⁻¹)
- Dauerhaft offshore-taugliches System
- Durchgehende Datenspeicherung und Online-Zugriff

Standort:

Der Aufstellungsort des Radargeräts muss innerhalb des jeweiligen Windparks liegen. Dies liegt primär darin begründet, dass die räumliche Ausdehnung einer möglichen Anlockwirkung der Beleuchtung über die Grenze der Windparks nicht prognostiziert werden kann. Ein Standort möglichst zentral innerhalb des Windparks ist daher zu bevorzugen.

Als Aufstellungsorte sind prinzipiell drei Alternativen denkbar:

1. Umspannplattform (OSS):

Die Umspannplattformen der Offshore-Windparks liegen in der Regel innerhalb der Windparks und sind daher generell als Standorte für die Radargeräte geeignet (Abbildung 32). Dies gilt jedoch nur für den Fall, dass die Studie in zwei Windparks mit alternierendem Beleuchtungsregime durchgeführt wird.

Als Vorteile eines Radarstandorts auf einer OSS sind die leichte Zugänglichkeit und die damit verbundene einfache Wartung der Geräte sowie deren einfache Anbindung an das Strom- und Datennetz zu nennen.

Nachteile einer OSS sind mögliche Interferenzen der Strukturen mit den Radargeräten sowie in Abhängigkeit des gewählten Radartyps (siehe unten) die relativ große Anbringungshöhe über dem Meeresspiegel. Zudem kann es je nach Örtlichkeit zu Konflikten mit HSE-Bestimmungen auf den Plattformen kommen. Zudem muss sichergestellt sein, dass die eigene Beleuchtung der Plattform nicht stark variiert, da sonst eine Beeinflussung der Daten nicht ausgeschlossen werden kann.



Abbildung 32: Beispiel einer Anbringung eines Radargeräts zur Erfassung des Vogelzugs auf einer Umspannplattform.

2. Zugangsplattform WEA:

Die Zugangsplattformen der einzelnen WEA sind trotz ihrer geringen Größe als Aufstellungsorte der Radargeräte generell als geeignet anzusehen (Abbildung 33). Dies wurde bereits in anderen Projekten nachgewiesen (z. B. SKOV et al. 2018; KULIK et al. 2020).

Durch die direkte Nähe zu Turm, Gondel und Rotoren der Anlagen ist bei diesem Aufstellungsort jedoch mit größeren Interferenzen mit den Radargeräten zu rechnen. Insbesondere bei Radartypen mit nach oben gerichtetem Erfassungsbereich (siehe unten) ist eine Aufstellung auf der Zugangsplattform nur möglich, wenn die Ausrichtung der Radarkeule stark verändert und damit weitreichende Anpassungen am Gesamtsystem vorgenommen

werden. Zudem ist die Erreichbarkeit der Zugangsplattformen im Vergleich zu Umspannplattformen in der Regel wesentlich stärker von der Wellenhöhe abhängig.

Vorteilhaft ist die niedrige Installationshöhe auf den Zugangsplattformen. Dies ist insbesondere für Radartypen mit nach oben gerichtetem Erfassungsbereich von Bedeutung. Des Weiteren sollten sich an diesem Aufstellungsort keine Konflikte mit den HSE-Bestimmungen der Betreiber ergeben.

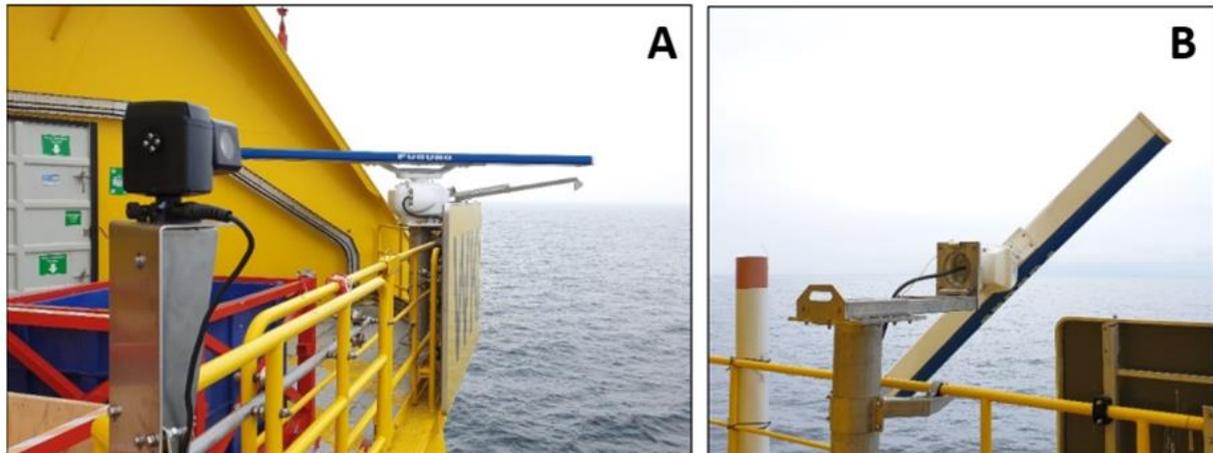


Abbildung 33: Beispiel der Anbringung von Radargeräten zur Erfassung des Vogelzugs auf einer WEA-Zugangsplattform (A. horizontal drehende Antenne, B. vertikal drehende Antenne). Entnommen aus KULIK et al. (2020).

3. Eigene schwimmende Plattform:

Eine weiterer, alternativer Anbringungsort wäre eine eigene schwimmende Plattform, die an einer geeigneten Stelle innerhalb des Windparks verankert werden kann. Kommerzielle Anbieter von stabilisierten Kleinstplattformen mit eigener Stromversorgung sind beispielsweise die Firma Akrocean (<http://www.akrocean.com/>) oder die Firma Ocergy (<https://ocg-data.com/>). Die Plattformen sind für den Offshore-Bereich bis Wassertiefen von etwa 100 m konzipiert und erlauben die Installation von Radargeräten und weiterer Sensorik (Abbildung 34).

Ein wesentlicher Vorteil einer eigenen Plattform ist die hohe Flexibilität hinsichtlich der konkreten Platzierung innerhalb des Windparks. Dadurch kann auch ein Einsatzort gewählt werden, an dem Interferenzen mit den WEA oder der Umspannplattform vermieden werden können. Es kann zudem eine geringe Installationshöhe der Radargeräte verwirklicht werden, so dass mit allen Radartypen der gesamte relevante Höhenbereich erfasst werden kann. HSE-Konflikte durch die Radarstrahlung sind weitgehend ausgeschlossen.

Der Einsatz eigener Plattformen wäre jedoch auch mit höheren Kosten verbunden, da hier eine komplett neue Infrastruktur zur Verfügung gestellt werden müsste. Eigene Erfahrungswerte hinsichtlich der Stabilität der Plattformen sowie der Zuverlässigkeit der Stromversorgung liegen bisher nicht vor. Starke Schwankungen bei hohem Wellengang könnten zu Problemen bei der Signalerkennung der Radarsysteme führen.

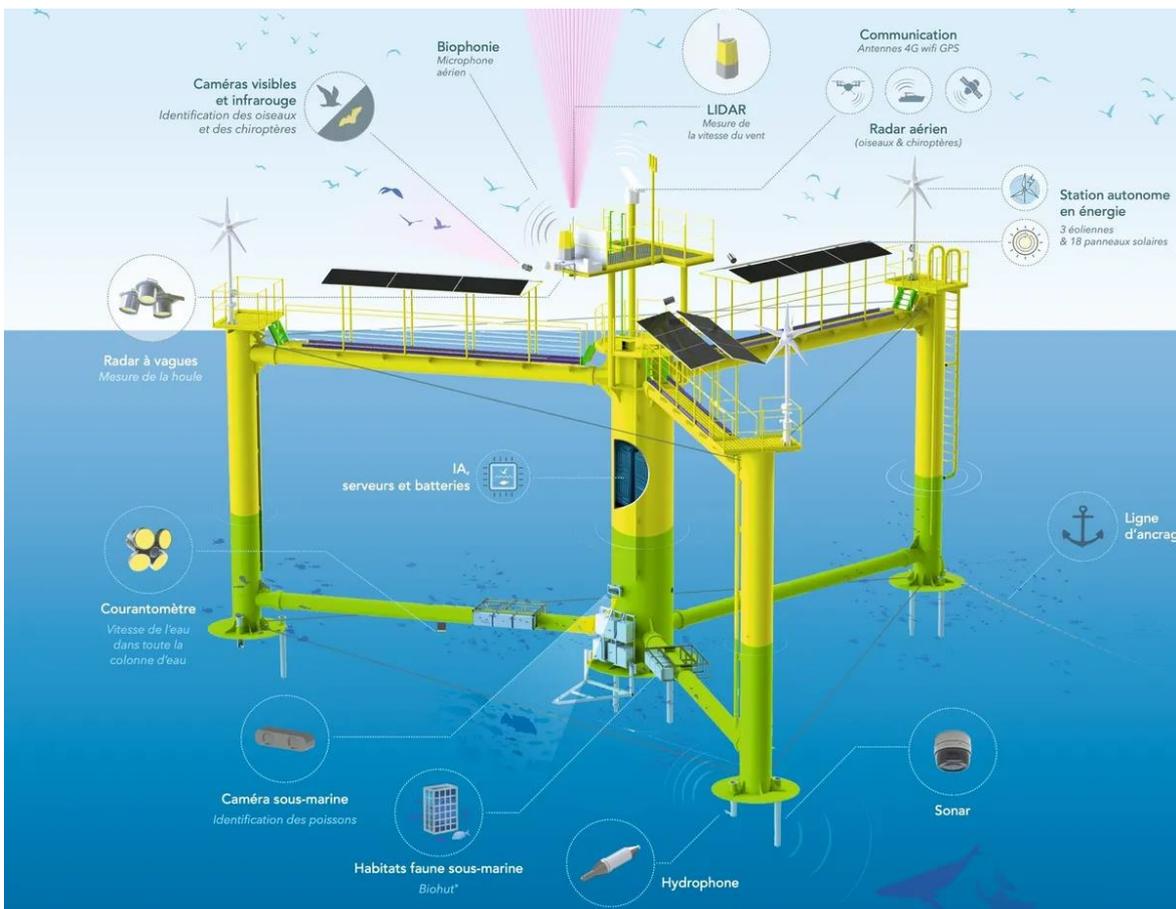


Abbildung 34: Stabilisierte und autarke Kleinstplattformen der Firma Akrocean (oben) und der Firma Ocery (unten) mit der Möglichkeit zur Installation von Radargeräten und anderer Sensorik.

Radarsysteme:

Es gibt eine Vielzahl von Radarsystemen, die in der Lage sind, Vögel systematisch zu detektieren (siehe z. B. LIECHTI et al. 2018; NILSSON et al. 2018). Im Folgenden werden drei Systeme, die für die geplante BNK-Studie als besonders geeignet erachtet werden, näher beschrieben.

1. Schiffsradar mit vertikal drehender Antenne:

Ein im Rahmen von Vogelzugmonitoring in der deutschen AWZ standardmäßig eingesetztes Radarsystem besteht aus handelsüblichen Schiffsradaren (Marine Surveillance Radar) mit einer vertikal drehenden Balkenantenne (Abbildung 32). Solche Radargeräte werden von verschiedenen Herstellern vertrieben. Die technischen Anforderungen an die Geräte sowie weitere Vorgaben für eine standardisierte Erfassungen von Vögeln sind im Standarduntersuchungskonzept des BSH (StUK 4; BSH 2013) aufgeführt. Die Aufzeichnung der Radarsignale erfolgt bei diesem System über das regelmäßige Speichern von Screenshots des Radarbildschirms und die spätere Digitalisierung der als Vogelsignale erkannten Radarechos. Vor der Berechnung der Zugintensität ist bei dieser Methodik zusätzlich eine Korrektur für die Detektionswahrscheinlichkeit von Vögeln vorzunehmen, die von der Entfernung zum Radargerät abhängt (HÜPPOP et al. 2002; WELCKER et al. 2017; WELCKER 2019). Das System ist in der Lage, den Vogelzug bis in 1000 m Höhe zu erfassen sowie detaillierte Höhenverteilungen aufzuzeigen.

Die Vorteile des Systems liegen in der Bewährung in einer Vielzahl von Projekten im Offshore-Bereich. Zudem sind die Anschaffungskosten des Systems vergleichsweise gering. Schiffsradargeräte sind jedoch anfällig gegenüber Störungen durch WEA, die sich im oder nahe des Erfassungsbereichs befinden. Dies ist bei der Wahl des Standorts und der Ausrichtung des Radarstrahls zu berücksichtigen. Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Detektionswahrscheinlichkeit von Vögeln durch Radar neben der Entfernung noch von weiteren Faktoren abhängig ist, die bei diesem Radarsystem nicht berücksichtigt werden können (z.B. Anstrahlwinkel). Da zudem eine unabhängige Validierung der Daten kaum möglich ist, ist weiterhin unklar, inwieweit die mit Schiffsradargeräten gemessenen Zugintensitäten den tatsächlichen Zugintensitäten entsprechen. Weiterhin ist zu beachten, dass die Identifikation von Vogelsignalen bei diesem Radarsystem auf einer von Radarornithologen vorgenommenen visuellen Einschätzung beruht. Diese ist somit nicht frei von Subjektivität, so dass die ermittelten Zugintensitäten durch einen „Beobachtereffekt“ beeinflusst werden können. Dies ist bei der Auswertung der Daten zu berücksichtigen.

Schiffsradargeräte sind nicht in der Lage, Flügelschlagfrequenzen der erfassten Vögel zu messen. Daher ist eine Unterscheidung von Artgruppen mit diesen Systemen nicht möglich.

2. Vogelerfassungsradar „Max“ von Robin Radar Systems:

Bei dem Radarsystem „Max“ der Firma Robin Radar Systems (Den Haag, Niederlande) handelt es sich um ein automatisiertes Vogelerfassungsradar mit schnell drehender Antenne (60 rpm) und fächerartiger Ausstrahlung der Radarwellen. Dies ermöglicht die dreidimensionale Erfassung der Flugtracks von Vögeln im gesamten 360°-Erfassungsbereich des Radars. „Max“ berechnet zudem automatisiert standardisierte Zugintensitäten in Echtzeit. Flughöhen, Phänologien und weitere Parameter werden vom System zur Verfügung gestellt. Zudem erfolgt eine Unterteilung der Signale in drei Größenklassen sowie die Kennzeichnung von „Trupps“. Das System arbeitet vollständig autonom und kann über einen Online-Zugang gesteuert werden.

Durch den hohen Grad an Automatisierung ist der Aufwand für die Datenanalyse im Vergleich zu den Schiffsradargeräten deutlich reduziert. Der große 360°-Erfassungsraum (maximal werden 15 km angegeben, für Kleinvögel etwa 3 km) in Kombination mit der 3D-Erfassung könnte eine Analyse der Reaktion der Vögel auf den beleuchteten/unbeleuchteten Windpark ermöglichen. So könnten auf Basis der aufgezeichneten Vogeltracks Rückschlüsse auf horizontales oder vertikales Ausweichen bzw. Anlockverhalten gezogen werden.

Als ein wesentlicher Nachteil sind die vergleichsweise hohen Kosten des Systems zu nennen. Weiterhin ist zu beachten, dass es bislang keine Erfahrungsberichte mit diesem Radarsystem aus dem Offshore-Bereich gibt. Hier wäre zunächst zu klären, ob das Gerät hinsichtlich des Korrosions- und Witterungsschutzes ohne zusätzliche Maßnahmen für einen längeren Offshore-Einsatz gerüstet ist. Auch hinsichtlich der Funktionsweise sind bei Erfassungen im Offshore-Bereich weitere Faktoren zu berücksichtigen. So sind insbesondere die Auswirkungen durch Seaclutter bislang unklar. Während das Gerät bei Anwendungen an Land automatisiert sogenannte „Cluttermaps“ erstellt und dadurch statische Störungen beispielsweise durch Gebäude, Masten oder Bäume bei der Vogelerkennung berücksichtigt werden können, ist dies bei dynamischen Störungen durch Seaclutter (Reflexionen der Radarstrahlen durch die Meeresoberfläche) weitaus schwieriger. Dies könnte eine reduzierte Detektionswahrscheinlichkeit von Vögeln in unteren Höhenbereichen zur Folge haben. Zudem ist die Erfassbarkeit von Vögeln im Nahbereich der Windenergieanlagen reduziert, da deren Signale von den wesentlich stärkeren Radarechos der Anlagen überlagert werden. Der Aufwand zur Berücksichtigung dieses Faktors bei der Berechnung von Zugintensitäten und Höhenprofilen wird jedoch als gering erachtet.



Abbildung 35: Antenne des Radarsystems „Max“ der Firma Robin Radar Systems.

3. Vogelerfassungsradar „MR1“ von Swiss Birdradar:

Das MR1 der Swiss Birdradar Solution AG (Winterthur, Schweiz) ist ebenfalls ein spezialisiertes Vogelerfassungsradar. Dabei handelt es sich um ein sogenanntes Vertical-Looking Radar (VLR), das durch eine stehende (nicht rotierende) Hornantenne einen kegelförmigen Erfassungsbereich oberhalb des Radarstandorts erfasst. Ein interner Klassifizierungs-Algorithmus ist dabei in der Lage, die Radarechos von Insekten und Vögeln einerseits, sowie zwischen drei Untergruppen von Vögeln (Singvögel, Watvögel, Großvögel) andererseits zu unterscheiden. Eine solche Unterscheidung wird möglich, da durch das nicht-rotierende System Flügelschlagfrequenzen sowie die Länge der Flügelschlagphasen und -pausen und somit das Flügelschlagmuster abgeleitet werden kann. Ein Operationsmodus mit nutzierender Antenne (2°) erlaubt zudem die Erfassung von Fluggeschwindigkeit und Flugrichtung. Vergleichbar mit dem „Max“ von Robin Radar ermittelt das MR1 standardisierte Zugintensitäten und Höhenprofile in Echtzeit und ist über einen Online-Zugang vollständig steuerbar.

Auch beim MR1 entsteht durch die starke Automatisierung ein wesentlich geringerer Aufwand für die Datenanalyse im Vergleich zum Schiffsradar. Eine spezielle Ausrüstung für den Einsatz

unter Offshore-Bedingungen ist bereits vorhanden. Störungen durch Seaclutter sind durch den nach oben gerichteten Erfassungsbereich nicht vorhanden.

Diese Eigenschaft ist jedoch auch mit Einschränkungen verbunden. So weist das MR1 ein unteres Höhenlimit der Vogelerfassung von etwa 25 m auf. Zudem muss der Erfassungsbereich frei von Strukturen wie WEA oder Teile der Umspannplattform sein. Dies hat zur Folge, dass bei einer Installation auf einer OSS nur ein Standort auf einem oberen Deck möglich wäre und damit das untere Höhenlimit weiter ansteigen würde. Eine vollständige Erfassung des Vogelzugs auf Rotorebene ist bei Anbringung auf einer OSS somit kaum zu verwirklichen.



Abbildung 36: Vogelerfassungsradar MR1 der Firma Swiss Birdradar Solution.

4. Weitere Radargeräte:

Darüber hinaus sind weitere Radarsysteme erhältlich, die entweder speziell für die Erfassung von Vögeln entwickelt wurden (z. B. MERLIN™ Avian Radar System, DeTect Inc., Panama City, USA) oder für die Erfassung von Vögeln prinzipiell geeignet sind (z. B. SCANTER 5000 Series, Terma A/S, Lystrup, Dänemark). Gegenüber den oben beschriebenen Systemen haben diese Geräte in Hinblick auf die Anforderungen der Studie keine wesentlichen Vorteile und werden daher nicht näher beschrieben.

6.8.2.2 Erfassung der Zugrufe

Zu erfassende Parameter:

- Anzahl der Rufe pro Stunde (Rufintensität)
- Artübergreifend und art(gruppen)-spezifisch

Anforderungen:

- Durchgängige (nachts), automatisierte Aufzeichnung der Flugrufe
- Sensitivität der Mikrofone sollte unter Normalbedingungen Aufzeichnung der Flugrufe im Höhenbereich der Rotoren ermöglichen
- Dauerhaft offshore-taugliches System
- Durchgehende Datenspeicherung

Standort:

Da die Zugrufe vieler Nachtzieher nur über relativ geringe Distanzen hörbar sind, müssen die Ruferfassungen zwingend innerhalb des Windparks durchgeführt werden. Da starke Nebengeräusche die Aufzeichnungen beeinträchtigen können, ist ein relativ geräuscharmer Standort zu bevorzugen.

Analog zu den Radargeräten sind auch bei den Ruferfassungen drei alternative Aufstellungsorte denkbar:

1. Umspannplattform (OSS):

Die Umspannplattformen der Offshore-Windparks sind grundsätzlich als geeigneter Standort für Zugruferfassungen anzusehen, da sie leicht zugänglich sind und in der Regel innerhalb der Windparks liegen. Zudem zeigen hier die bisherigen Erfahrungen, dass nebengeräuscharme Standorte vorhanden sind und genutzt werden können. Auch hier gilt jedoch, dass die OSS als Erfassungsstandort nur für den Fall in Betracht kommt, wenn die Studie in zwei separaten Windparks durchgeführt wird und damit eine OSS je Beleuchtungsregime zur Verfügung steht.

Darüber hinaus ist bei diesem Standort zu beachten, dass die Entfernung zu den nächstgelegenen Windturbinen von der OSS meist mehrere hundert Meter betragen. Hinzu kommt, dass die Umspannplattformen über eine eigene Beleuchtung verfügen, die unabhängig des Beleuchtungsregimes der WEA Zugvögel beeinflussen könnte. Diesen

Faktoren muss bei plattformbasierten Zugruferfassungen durch den spezifischen Anbringungsort, sowie der Art und Ausrichtung der Mikrofone Rechnung getragen werden.

2. Zugangsplattform WEA:

Erfahrungen mit Zugangsplattformen der einzelnen WEA als Standort für Zugruferfassungen stehen bislang aus. Aufgrund des geringen Platzbedarfs für die dafür notwendigen Geräte (siehe unten) sind sie grundsätzlich für diese Art der Erfassung als geeignet anzusehen. Insbesondere das umlaufende Geländer der Zugangsplattformen kann als Anbringungsort dienen.

Die geringe Nähe der Zugangsplattform zu den Rotoren der Anlagen und somit die Möglichkeit direkt im relevanten Bereich zu erfassen, ist als Vorteil für diesen Standort zu werten. Insbesondere durch die Nähe zu den Rotoren ist andererseits jedoch mit einem stark erhöhten Nebengeräuschpegel zu rechnen. Inwiefern diese relativ gleichmäßigen Geräusche die Aufzeichnung von Vogelrufen beeinträchtigen oder evtl. herausgefiltert werden können, wäre durch entsprechende Tests an Onshore-Windenergieanlagen zu prüfen. Als weiterer Nachteil gilt auch für die Zugruferfassungen die begrenzte Zugänglichkeit im Vergleich zur OSS. Dies gilt v. a. da eine Online-Steuerung der Geräte nicht oder nur eingeschränkt möglich ist (siehe unten).

3. Eigene schwimmende Plattform:

Bei Einsatz einer eigenen Plattform für die Radargeräte, kann diese auch als Standort für die Zugruferfassungen genutzt werden. Die im Hinblick auf die Installation von Radargeräten oben genannten Vor- und Nachteile dieser Plattformen haben im Allgemeinen auch für die Zugruferfassungen Gültigkeit.

Der Stromverbrauch für die Aufzeichnungssysteme von Flugrufen ist gering, so dass dies voraussichtlich nur geringe Auswirkungen auf den Gesamtstrombedarf der autarken Plattformen hat. Der Einfluss von Nebengeräuschen wird trotz der aufgrund der geringen Entfernung zur Wasseroberfläche zu erwartenden Wellengeräusche als unproblematisch eingestuft.

Aufzeichnungssysteme von Flugrufen:

Im Folgenden werden ein kommerziell erhältliches, speziell für die Erfassung von Vögeln (und anderer Tiere) ausgelegtes Audio-Aufzeichnungssystem sowie ein von BioConsult SH für die

Aufzeichnung von Flugrufen im Offshore-Bereich entwickeltes System näher vorgestellt. Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl von Audioaufnahmegeräten, die prinzipiell für die Erfassung von nächtlichen Zugrufen im Offshore-Bereich geeignet wären.

1. Song Meter SM4 von Wildlife Acoustics:

Der SM4 der Firma Wildlife Acoustics Inc. (Maynard, USA) ist ein im Handel frei erhältliches Aufnahmesystem, das für die Erfassung von Tiergeräuschen in freier Wildbahn entwickelt wurde. Das System besteht aus zwei hochqualitativen Mikrofonen, die wahlweise direkt am Gehäuse des Geräts angebracht sind (

Abbildung 37), oder flexibel über Kabel damit verbunden werden können. Das kompakte Gehäuse ist witterungsbeständig. Die interne Software erlaubt die Programmierung der Aufnahmezeiten (z.B. Sonnenuntergang bis Sonnenaufgang). Das Gerät kann batteriebetrieben bis zu 650 h aufzeichnen, es kann jedoch auch an eine externe Stromversorgung angeschlossen werden.

Die wesentlichen Vorteile des Systems bestehen neben der sehr hohen Soundqualität der Aufnahmen im sehr geringen Platzbedarf und die sich daraus ergebende hohe Flexibilität des Anbringungsorts. Diese wird auch durch den geringen Wartungsbedarf gestützt. Allerdings muss beachtet werden, dass ein Online-Zugang zu dem System ohne weitere Entwicklungsarbeit nicht möglich ist. Da Erfahrungswerte für eine Anwendung im Offshore-Bereich bislang fehlen, sind Aussagen zur Zuverlässigkeit des Systems unter diesen Bedingungen noch nicht möglich.



Abbildung 37: Song Meter SM4 der Firma Wildlife Acoustics.

2. Offshore-Mikrofonsystem von BioConsult SH:

Dieses von BioConsult SH in Eigenleistung für die Erfassung von nächtlichen Zugrufen im Offshore-Bereich entwickelte System besteht aus zwei Mikrofonen, die witterungsgeschützt in Boxen untergebracht sind (

Abbildung 38). Die Boxen wurden für eine Anbringung an Geländern, z.B. auf Schiffen, einer OSS oder Zugangsplattform, optimiert. Die Mikrofonboxen werden über Kabel flexibler Länge an einen Laptop angeschlossen, der die Audiosignale verarbeitet und speichert. Dabei kommt die Audiosoftware AROMA zum Einsatz. Diese nimmt eine Filterung des Audiostreams mit dem Ziel vor, ausschließlich Vogelrufe zu speichern. Die Aufnahme von Nebengeräuschen, die primär durch Wind und Regen verursacht werden, aber auch technische Nebengeräusche, soll weitgehend verhindert werden. Die durch die Software als potenzielle Vogelrufe klassifizierten Geräusche werden als kurze Audiodatei mit Zeitstempel abgespeichert. Diese Methode entspricht den Vorgaben des Standarduntersuchungskonzepts des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH 2013) zum Umweltmonitoring in Verbindung mit der Planung, dem Bau und Betrieb von Offshore-Windparks in der deutschen AWZ und wurde bereits mehrfach erfolgreich angewendet.

Das System kann bei bestehender Internetanbindung remote gesteuert und die anfallenden Daten regelmäßig übertragen werden. Es kann jedoch auch offline betrieben werden, sofern dies erforderlich ist. Im Vergleich zum SM4 ist dieses kostengünstige System bereits im Offshore-Bereich getestet und etabliert. Es ist durch den etwas größeren Platzbedarf und den notwendigen Stromanschluss etwas weniger flexibel. Zudem ist eine Weiterentwicklung der Mikrofone erforderlich, um eine mit dem SM4 vergleichbare Soundqualität zu erreichen.



Abbildung 38: Offshore-Mikrofonsystem der Firma BioConsult SH.

6.8.2.3 Flugaktivität im Rotorbereich

Zu erfassende Parameter:

- Anzahl der Flugbewegungen im unmittelbaren Rotorbereich bzw. Anzahl Rotordurchflüge
- Nützliche Zusatzinformationen (wenn technisch möglich):
 - Unterscheidung von Arten/Artgruppen anhand Videomaterial
 - Positionsbestimmung des Vogels im Rotorbereich

Anforderungen:

- Durchgängige, automatisierte Erfassung von nächtlichen Flugbewegungen von Zugvögeln im Rotorbereich durch Kamerasystem.
- Aufzeichnung der Videosequenzen für Art- bzw. Artgruppenbestimmung
- Entfernungsmessung zur Bestimmung, ob Vogelbewegung innerhalb oder außerhalb des Rotorbereichs

- Dauerhaft offshore-taugliches System
- Lokale Datenspeicherung und Online-Zugriff

Standort:

Kamerasysteme zur Erfassung von Flugbewegungen im Rotorbereich müssen direkt an den Windenergieanlagen installiert werden. Da die Systeme in der Lage sein müssen, auch Vögel von nur etwa 10 cm Größe nachts im Rotorbereich zu detektieren, müssen die Kameras im direkten Nahbereich der Anlagen installiert werden. Entfernungen mehrerer hundert Meter, wie beispielsweise bei Installation auf einer Umspannplattform oder schwimmenden Plattform gegeben, sind nach derzeitigem Stand der Technik nicht praktikabel.

Als Aufstellungsorte sind daher prinzipiell zwei Alternativen denkbar:

1. Gondel der WEA:

Die Gondel einer WEA wäre der zu präferierende Installationsort eines Kamerasystems. Die wesentlichen, damit verbundenen Vorteile sind zum einen die Tatsache, dass sich das Kamerasystem bei wechselnden Windrichtungen immer mit der Gondel mit dreht und somit dauerhaft die optimale Ausrichtung der Kameras auf den direkten Rotorbereich erreicht werden kann. Zum anderen wird dadurch die Distanz zu den Rotoren minimiert und somit eine Erfassung auch von Kleinvögeln bei Nacht technisch umsetzbar. Eine Anbringung der Kameras seitlich an der Gondel wäre zu bevorzugen, so dass der Erfassungsraum sowohl Bereich oberhalb als auch unterhalb der Nabhöhe einschließt, die sich aufgrund der zu erwartenden Höhenverteilung im Zugvogelaufkommen unterscheiden können.

Als Nachteil einer Kamera-Anbringung im Gondelbereich ist vor allem der damit verbundene Eingriff in einen sensiblen Bereich der WEA anzusehen und der dadurch bedingte erhöhte Abstimmungsbedarf und logistische Aufwand. Prinzipiell ist eine solche Anbringung nach Aussage von Windparkbetreibern aber möglich.

2. Zugangsplattform WEA/Turmfuß:

Alternativ können Kamerasysteme zur Überwachung des Rotorbereichs auch auf der Zugangsplattform von WEAs installiert werden. Dies hätte allerdings zur Folge, dass für eine Erfassung des gesamten Rotorbereichs aufgrund der variablen Gondelstellungen, mehrere Kamerasysteme notwendig wären. Zudem wäre am Turmfuß mit negativen Auswirkungen

durch erhöhte Salzwasserbelastung und - durch den nach oben gerichteten Blickwinkel der Kameras – mit stärkeren Beeinträchtigungen bei schlechtem Wetter, insbesondere bei Niederschlag, zu rechnen. Eine Anbringung der Kameras auf der Zugangsplattform wäre jedoch mit geringeren baulichen Eingriffen in die WEAs und somit mit reduziertem logistischem und finanziellem Aufwand verbunden.

Kamerasysteme zur Aufzeichnung von Flugbewegungen im Rotorbereich:

Bislang gibt es keine kommerziellen Anbieter von Kamerasystemen, die die oben genannten spezifischen Anforderungen zur Erfassung der Flugaktivität im Rotorbereich erfüllen. In einem vom Bundesumweltministerium von 2006 – 2009 geförderten (FKZ 0327560) Projekt wurde ein Kamerasystem entwickelt (Visual Automatic Recording System - „VARS“; SCHULZ et al. 2009, 2013), welches in der Lage ist, in Verbindung mit einer Bewegungsanalyse-Software, auch Singvögel bei Nacht bis in 50 m Entfernung in Echtzeit zu detektieren und aufzuzeichnen. Dieses System kam auch bereits im Rahmen des StUKplus-Vorhabens (FKZ 0327689A) im Windpark „alpha ventus“ zum Einsatz (SCHULZ et al. 2014).

Dieses System bringt jedoch wesentliche Nachteile mit sich. So ist der Bildausschnitt durch den relativ geringen Öffnungswinkel des Objektivs von 20° stark eingeschränkt. Dies erfordert den Einsatz mehrerer Systeme, um einen größeren Anteil des Rotorbereichs abzudecken. Darüber hinaus fehlt eine Möglichkeit der Entfernungsabschätzung bzw. -messung und damit der Bestimmung, ob ein Vogel innerhalb oder außerhalb des Rotorbereichs fliegt. Versuche, den Rotor selbst mit in den Bildausschnitt aufzunehmen, wurde aufgrund von Problemen mit der Bewegungserkennungssoftware verworfen. Die Verwendung eines solchen Systems scheint daher ohne eine grundlegende Überarbeitung nicht zielführend.

BioConsult SH entwickelt derzeit, teilweise unterstützt durch die WT.SH (Wirtschaftsförderung und Technologietransfer Schleswig-Holstein) ein Kamerasystem, das den oben genannten Anforderungskatalog vollständig erfüllt. Das System beruht auf einer Anordnung mehrerer Stereokameras mit großem Öffnungswinkel und hoher Auflösung. Dies ermöglicht eine präzise Entfernungsmessung aller fliegenden Objekte bis zur Größe eines Kleinvogels bis in etwa 120 m Entfernung. Durch die Zusammenführung mehrerer Kameras sowie den großen Öffnungswinkel ist bereits ein einzelnes System in der Lage, einen repräsentativen Ausschnitt von etwa 180° des Rotorbereichs zu erfassen. Eine neu entwickelte, auf künstlicher Intelligenz beruhende, Erkennungssoftware ermöglicht es zudem, den Rotorbereich direkt zu erfassen. Es wird damit gerechnet, dass die Entwicklung des Systems im Laufe des Jahres 2022 abgeschlossen und ein uneingeschränkter Einsatz im Offshore-Bereich möglich ist.

6.8.3 Erfassung des Vogelzugs mit BNK-Radar (AP 8.3)

6.8.3.1 Einleitung

Ziel des AP 8.3 war es, im Rahmen einer Machbarkeitsstudie zu überprüfen, inwiefern zur BNK-Steuerung verwendete Aktivradarsysteme dazu geeignet sind, systematisch Vogelzug bzw. Vogelflugbewegungen zu erfassen.

BNK-Radar verwenden in der Regel Radarfrequenzen im X-Band Bereich (8 – 12 GHz), der sich ebenfalls sehr gut für die Erfassung von Vögeln eignet. Es ist daher davon auszugehen, dass sich BNK-Radare prinzipiell für die Erfassung von Vögeln eignen und Vogelsignale bei einer BNK-Anwendung als unerwünschte Störsignale gefiltert werden. Eine Unterscheidung von Vogelsignalen und Radarechos von Luftfahrzeugen erscheint sogar zwingend erforderlich, da sonst eine sinnvolle Steuerung der BNK der Windenergieanlagen nicht möglich wäre.

Eine ähnliche Situation ist von Wetterradaren bekannt, die für Niederschlagsmessungen und -vorhersagen verwendet werden. Auch mit diesen Systemen werden Vögel detektiert und müssen für den eigentlichen Verwendungszweck erkannt und gefiltert werden. Die auf diese Weise „ausgefilterten“ Vogeldetektionen stellen dann jedoch eine hervorragende Datenquelle für zahlreiche Forschungsprojekte zum Vogelzug dar (DOKTER et al. 2011; LIECHTI et al. 2018; VAN DOREN & HORTON 2018; WEISSHAUPT et al. 2022).

Eine Eignung von BNK-Radargeräten zur Nutzung von Vogelerfassungen könnte mehrere interessante Anwendungsmöglichkeiten insbesondere im Offshore-Bereich eröffnen. Aufgrund des sehr großen Erfassungsbereichs (bis zu >60 km) eines Offshore-BNK-Radars könnten so umfangreiche Daten zu wesentlichen Kenntnislücken beispielsweise hinsichtlich der räumlichen Verteilung des Vogelzugs in der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) der Nord- und Ostsee gesammelt werden. Ebenso könnten möglicherweise Ausweichbewegungen von Vögeln als Reaktion auf Offshore-Windparks systematisch erfasst und quantifiziert werden. Als eine weitere Anwendung käme ein Langzeit-Monitoring des Vogelzugs in Betracht, das sämtliche Betriebsphasen eines Offshore-Windparks (Basis, Bau und Betrieb) oder anderer (Infrastruktur-) Projekte abdecken könnte.

Im Rahmen der naturschutzfachlichen Begleitforschung im Projekt BeBeO konnte in getrennten Untersuchungen die Verwendbarkeit von zwei BNK-Aktivradarsystemen für die Vogelerfassung geprüft werden. Im Folgenden werden die Ergebnisse beider Studien zusammenfassend beschrieben.

6.8.3.2 Material und Methoden

6.8.3.2.1 Datenaufnahme

In der vorliegenden Studie wurden zwei verschiedene BNK-Radare auf deren Eignung für die systematische Vogelerfassung überprüft. Dabei handelte es sich zum einen um ein Radar des Typs Scanter 4002 der Firma Terma A/S, Lystrup, Dänemark. Dieses Radargerät wurde im Rahmen des BeBeO-Projekts als long-range BNK-Radar für den Offshore-Bereich auf der Insel Rügen getestet (

Abbildung 39, siehe auch detaillierte Beschreibung des Testaufbaus in Kap. 6.7). Dieses Radargerät wird im Folgenden vereinfacht „Radar Rügen“ genannt. Das Gerät wurde für die BNK-Steuerung mit einem Erfassungsbereich (in Abhängigkeit der Installationshöhe) von etwa 60 -70 km konzipiert. Für den Teststandort in der Nähe von Putgarten an der Nordspitze von Rügen bedeutete dies die Abdeckung eines Großteils der Ostsee zwischen den Inseln Rügen, Bornholm und Møn sowie der Küste Südschwedens (*Abbildung 40*).

Innerhalb des 4-wöchigen Testzeitraums im August/September 2021 (siehe Kap. 6.7) wurden mit diesem Radargerät an insgesamt neun Tagen Vogeltracks aufgezeichnet. Die Datenaufnahme fand dabei sowohl während der Nacht- als auch während der Tagesstunden statt.



Abbildung 39: Testaufbau des BNK-Radars (Terma Scanner 4002) in der Nähe von Putgarten auf Rügen.



Abbildung 41: Standort des BNK-Radars in der Nähe von Klintum im Landkreis Nordfriesland (rotes Kreuz) und ungefährer Erfassungsbereich des Radars (ca. 20 km). Der Standort der zur Vogelerfassung verwendeten marinen Navigationsradare in etwa 6 km Abstand zum BNK-Radar ist ebenfalls kenntlich gemacht (rotes Rechteck).

Während des Testlaufs des Radars auf Rügen wurde für die Vogelerfassung ein eigener Kanal eingerichtet, um die ungefilterten Rohdaten zugänglich zu machen. Diese Daten durchliefen anschließend einen hersteller-internen Klassifizierungsalgorithmus, der für alle empfangenen Radarsignale die Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit in verschiedene Objektklassen berechnete. Alle Radarsignale, die auf Basis dieses Vorgangs mit der höchsten Wahrscheinlichkeit als Vögel eingestuft wurden, wurden für die weitere Analyse verwendet.

Bei dem bereits in Betrieb befindlichen BNK-Radar am Standort Klintum (im Folgenden zur Vereinfachung „Radar Klintum“ genannt), konnte kein eigener Kanal für die Vogelerfassung eingerichtet werden. Stattdessen konnten in diesem Fall nur Daten genutzt werden, die bereits eine erste Filterung durch die Transceiver-Software durchlaufen hatten. In diesem Filtervorgang wurde bereits ein Teil der Vogelsignale aus dem Datensatz entfernt. Nichtsdestotrotz enthielten die zur Verfügung stehenden Daten eine ausreichende Anzahl Vogeldetektionen, um die vorgesehenen Analysen durchzuführen und einen qualitativen

Vergleich mit zeitgleich in einem nahegelegenen Windpark erhobenen Radardaten zum Vogelzug vorzunehmen (siehe Kap. 6.8.3.3.8 und Kap. 6.8.4).

6.8.3.2.2 Datenaufnahme

Jeder einzelne Vogeltrack bestand aus mehreren einzelnen Radarsignalen, die mit jeder Umdrehung der Radarantenne aufgenommen wurden. Aufgrund der Rotationsgeschwindigkeit der Antenne (Rügen: 15 rpm, Klintum: 24 rpm) wurde daher in der Regel alle 4 bzw. 2,5 sec einem Vogeltrack eine neue Position zugeordnet. Im Mittel bestanden die Vogeltracks des Radars Rügen aus 40,6 Signalen („Updates“, Median: 23,0), die maximale Tracklänge bestand aus 1.212 Updates. Die entsprechenden Werte des Radars Klintum lagen mit 14,0 (Mittelwert), 15,0 (Median) und 304 (Maximalwert) trotz höherer Antennenrotationsgeschwindigkeit etwas niedriger (siehe auch Abbildung 42).

Die Anfangs- und Endkoordinaten jedes Vogeltracks wurden dazu verwendet, die Flugrichtung des Vogels zu berechnen. Etwaige Änderungen der Flugrichtung innerhalb des aufgezeichneten Tracks wurden dabei nicht berücksichtigt. Zudem wurde für jeden Vogeltrack die durchschnittliche Fluggeschwindigkeit (über Grund) sowie der mittlere Radarquerschnitt berechnet. Beide Parameter werden routinemäßig von den BNK-Radaren erfasst. Der Radarquerschnitt („radar cross-section“, RCS) bezieht sich dabei auf die Größe der Rückstrahlfläche des detektierten Objekts bzw. dessen effektive Reflexionsfläche. Der Radarquerschnitt eines Vogels ist wesentlich von der Größe des Vogelkörpers abhängig, insbesondere der Körperteile mit hohem Wassergehalt.

Die vom internen Algorithmus als Vögel klassifizierten Tracks wurden, basierend auf den berechneten mittleren Fluggeschwindigkeiten und Radarquerschnitten einer weiteren Filterung unterzogen. Tracks mit einer Fluggeschwindigkeit <5 m/s bzw. >30 m/s wurden ebenso verworfen wie Tracks mit einem Radarquerschnitt $<0,0005$ m² bzw. >5 m² (siehe Kap. 6.8.3.4).

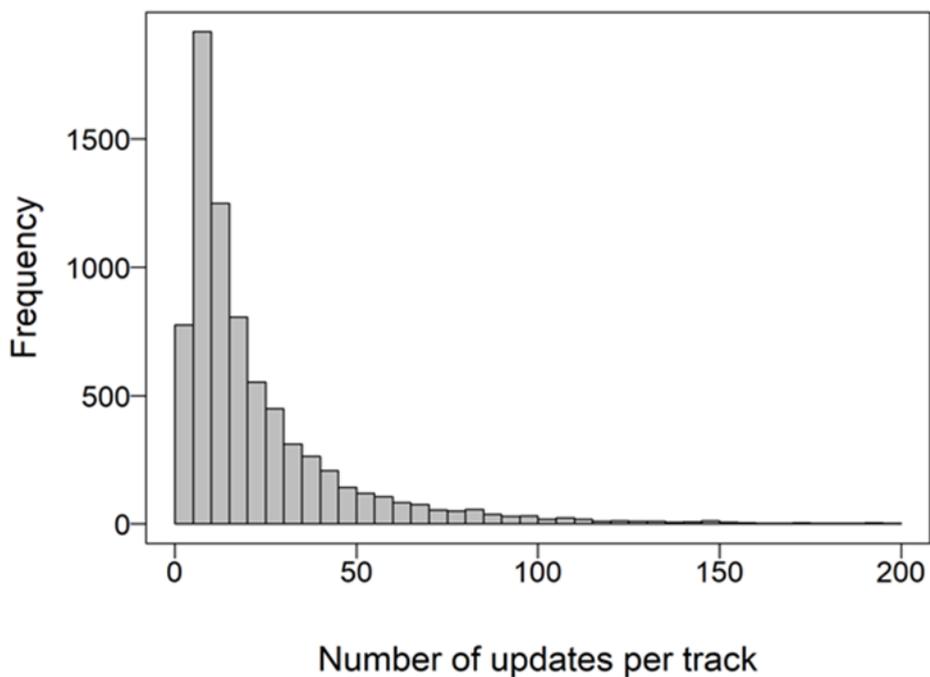
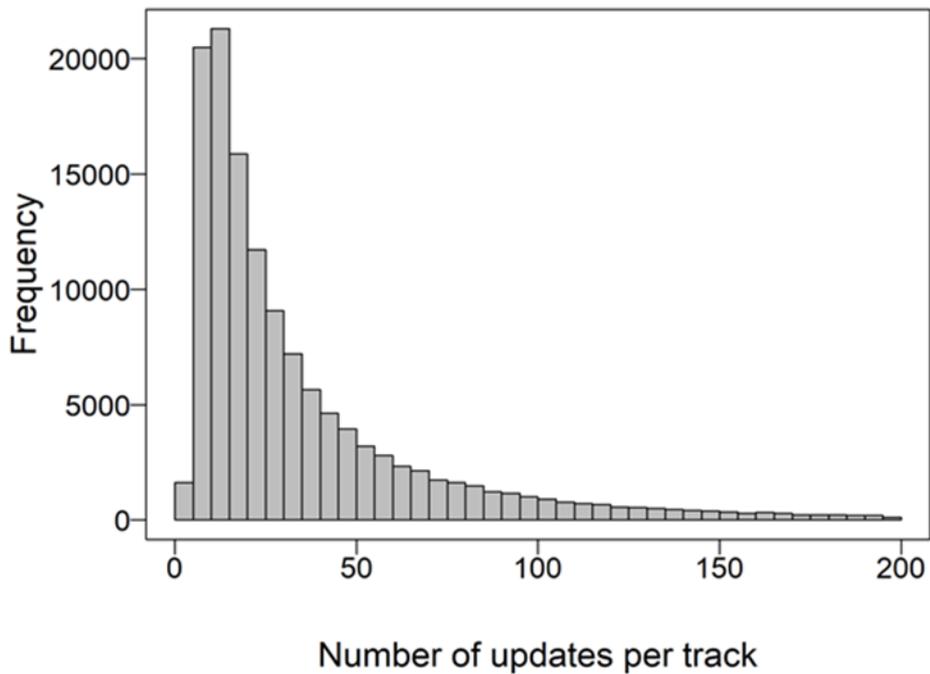


Abbildung 42: Histogramm der Anzahl der „Updates“ aus welchen sich die mit dem Radar Rügen (oben) sowie dem Radar Klintum (unten) aufgezeichneten Vogeltracks zusammensetzten. Im Median bestand ein Vogeltrack aus 23 (Rügen) bzw. 15 (Klintum) Updates.

Durch die logistisch bedingte geringe Installationshöhe der Antenne beim Testaufbau des Radars Rügen waren Teile des Erfassungsraums durch Störungen beeinträchtigt. Diese Störungen wurden primär durch Bäume verursacht, die sich in der „Line-of-Sight“ des Radars

befanden (Abbildung 43). Dies führte insbesondere im südöstlichen Erfassungsbereich auch zu Behinderungen der Vogelerfassung. Dieser Bereich wurde daher von der Datenanalyse ausgeschlossen (Abbildung 43).

Für die weiteren Auswertungsschritt wurden für beide BNK-Radare aus der Anzahl der erfassten Tracks stündliche Vogeltrackdichten berechnet ($\text{Tracks}/\text{km}^2/\text{h}$). Dies erfolgte zum einen auf Basis des gesamten Radarerfassungsraums. Für die Analyse der räumlichen Verteilung der Vogeltrackdichten wurden diese zusätzlich für jede Zelle eines 5-km Rasters berechnet.

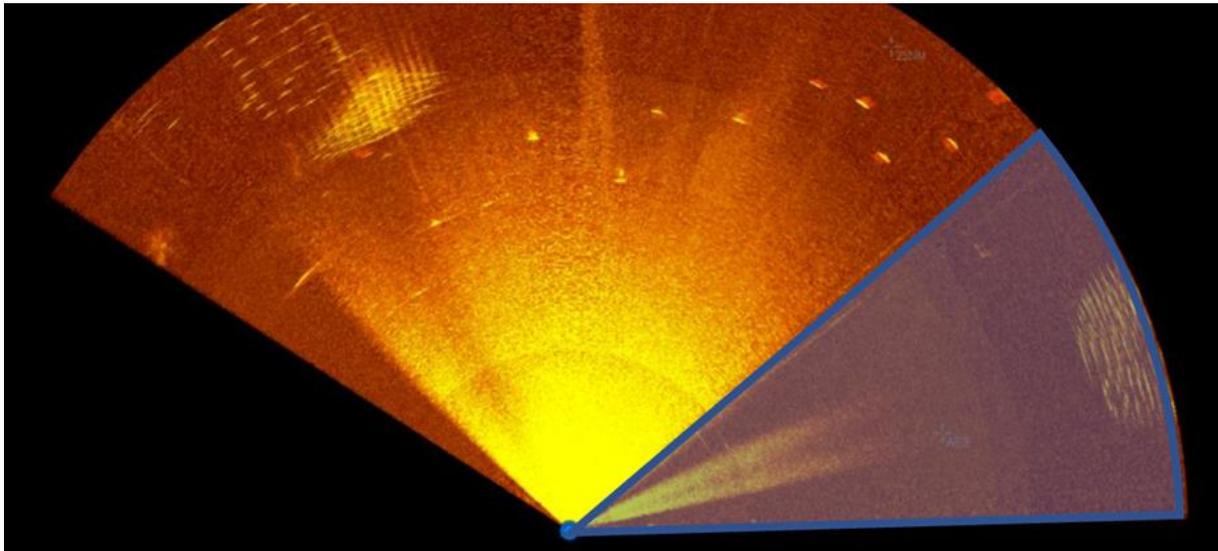


Abbildung 43: Darstellung der Abdeckungsstärke des Erfassungsbereichs des Radars Rügen. Die Helligkeit der Farbe kennzeichnet die Empfangsstärke des Radars. Der blau gekennzeichnete Bereich mit stark unterschiedlichem Abdeckungsgrad wurde von der Analyse ausgeschlossen.

Für den Erfassungszeitraum des Radars Klintum standen zudem Vergleichsdaten von Radargeräten zur Verfügung, die zur Erfassung des Vogelzugs im Rahmen des AP 8.4 aufgenommen wurden. Eine detaillierte Beschreibung der Aufnahme und Auswertung dieser Daten befindet sich in Kap. 6.8.4 dieses Berichts. Der Standort dieser Radarerfassungen befand sich im Bürgerwindpark Holzacker-Knorborg in 6,3 km Entfernung zum BNK-Radar Klintum (siehe Abbildung 41). Es wurden dort marine Navigationsradare zur Vogelerfassung nach der im Standarduntersuchungskonzept des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie beschriebenen Methode verwendet (StUK 4; BSH 2013). Im Rahmen der Datenauswertung in AP 8.4 wurden auf Basis der aufgenommenen Radardaten die stündliche Zugintensität (MTR, migration traffic rate, Signale pro Kilometer und Stunde) berechnet und mit den vorliegenden Vogeltrackdichten des BNK-Radars Klintum verglichen. Der statistische

Vergleich erfolgte mit Hilfe einer Spearman Rangkorrelationsanalyse. Für alle Auswertungsschritte wurde die Statistik-Software R 3.6 verwendet (R CORE TEAM 2019).

6.8.3.3 Ergebnisse

6.8.3.3.1 Aufgezeichnete Vogeltracks

Für das Radargerät Rügen lagen insgesamt 131.321 Vogeltracks für die weitere Analyse zur Verfügung, die in insgesamt 180 Stunden im Zeitraum zwischen dem 25.08. – 06.09.2021 aufgezeichnet wurden. Davon entfielen 68,2 % (89.510 Tracks) auf die Hellphase; 31,8 % (41.811 Tracks) auf die Nacht (Tabelle 4). Mit dem Radargerät Klintum konnten insgesamt 7.502 Vogelsignale innerhalb von 66 Stunden im Zeitraum 07.10. – 14.10.2021 aufgezeichnet werden. Mit diesem Radar wurden ausschließlich während der Dunkelphase Vogelsignale erfasst.

Die Länge der aufgezeichneten Tracks lag im Median bei 1.030 m (Rügen) bzw. 780 m (Klintum, siehe Tabelle 4 und Abbildung 44). Maximal konnten Vögel über knapp 53 km (Rügen) bzw. 17 km (Klintum) verfolgt werden.

Tabelle 4: Anzahl und Länge der Vogeltracks, die mit den BNK-Radaren auf Rügen und in Klintum aufgezeichnet wurden.

Vogeltracks		Radar Rügen	Radar Klintum
Anzahl Tracks	Tag	89.510	
	Nacht	41.811	7.502
Länge Tracks [km]	Median	1,03	0,78
	Mittelwert	2,03	1.35
	Maximum	52,75	16,86

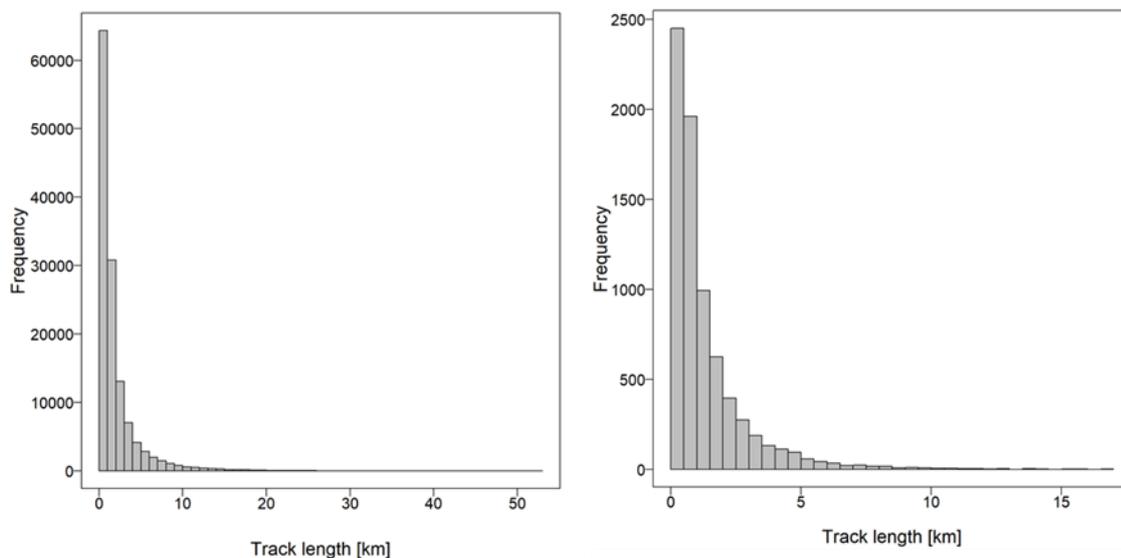


Abbildung 44: Histogramm der Länge der aufgezeichneten Vogeltracks des Radars Rügen (links) sowie des Radars Klintum (rechts). 90% der Tracks hatten eine Länge <4,6 km (Rügen) bzw. <3,1 km (Klintum).

In Abbildung 45 und Abbildung 46 sind beispielhaft die erfassten Vogeltracks für ausgewählte Nachtstunden (Rügen) bzw. Nächte (Klintum) dargestellt. Die Vogeltracks von Rügen zeigten überwiegend eine stark konzentrierte Ausrichtung nach Südwesten, die auf dem Herbstzug präferierte Zugrichtung der Vögel. In einzelnen Zeitperioden überwog jedoch eine westliche Ausrichtung der Tracks (siehe Abbildung 45). Westliche Zugrichtungen sind insbesondere von Nicht-Singvögeln im Herbst im Untersuchungsraum bekannt. Ebenso verdeutlichen die beispielhaften Darstellungen das unterschiedlich starke Vogelaufkommen in einzelnen Nächten.

Die Darstellung der Daten einzelner Nächte des Radars Klintum zeigt ebenfalls Unterschiede in der Ausrichtung sowie der Anzahl der Vogeltracks (Abbildung 46). In der Mehrzahl der Nächte wurden hauptsächlich westlich gerichtete Tracks aufgezeichnet, in einzelnen Zeitabschnitten überwogen hingegen südwestliche (Abbildung 46 unten rechts) bzw. südliche Ausrichtungen (Abbildung 46 unten links).

Für beide Radargeräte lag keine Gleichverteilung der Vogeltracks im jeweiligen Erfassungsbereich vor. In einzelnen Bereichen des Erfassungsraums lag eine reduzierte Detektionswahrscheinlichkeit von Vögeln vor.

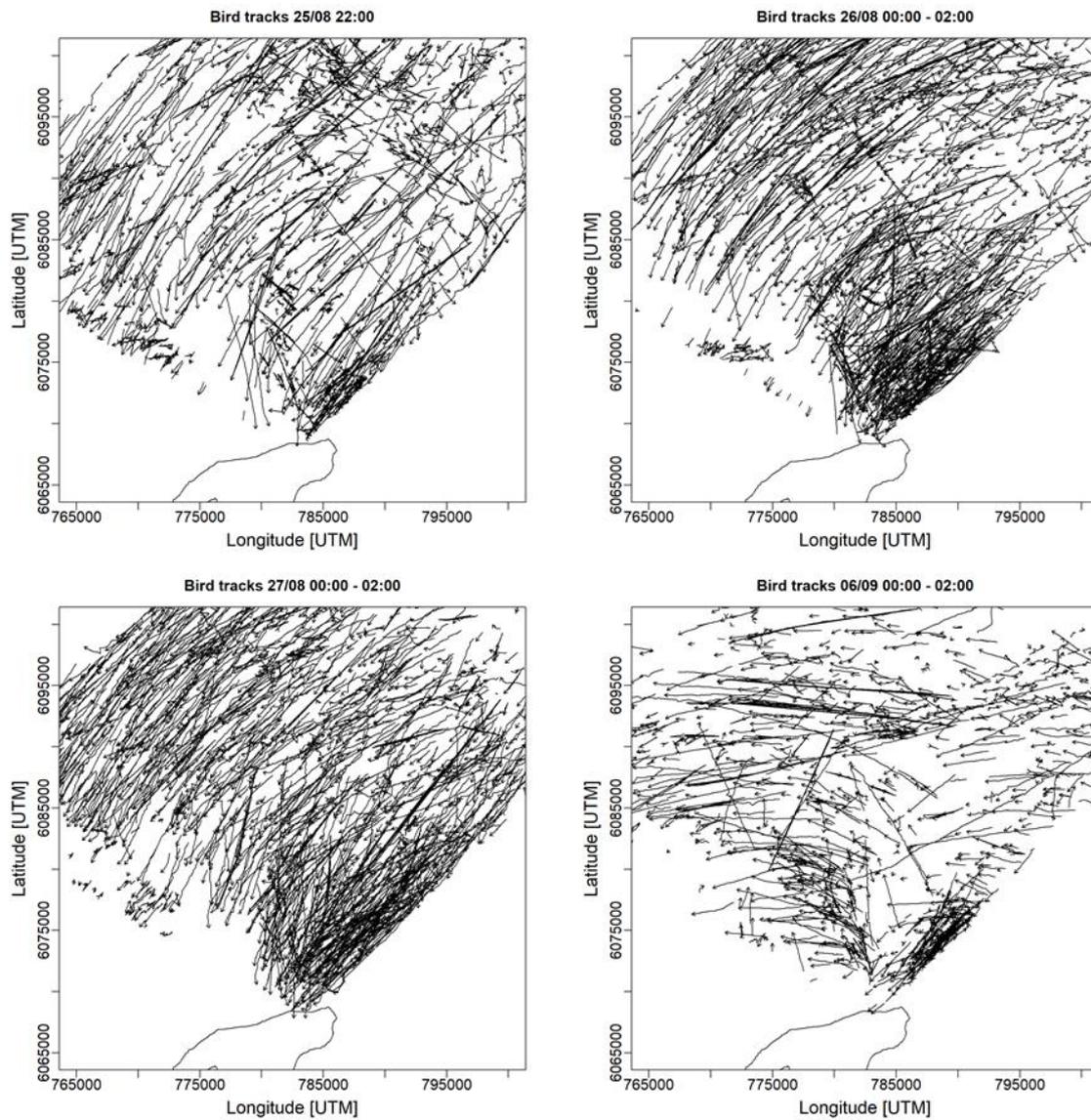


Abbildung 45: Beispielhafte Darstellung der vom Radar Rügen aufgezeichneten Vogeltracks in vier verschiedenen Nächten über einen Zeitraum von 2 h. Die verschiedenen Nächte zeichneten sich durch unterschiedliches Aufkommen an Vogelbewegungen (vgl. Abb. links oben und unten) sowie unterschiedlicher Flugrichtungen (vgl. Abb. unten links und rechts) aus.

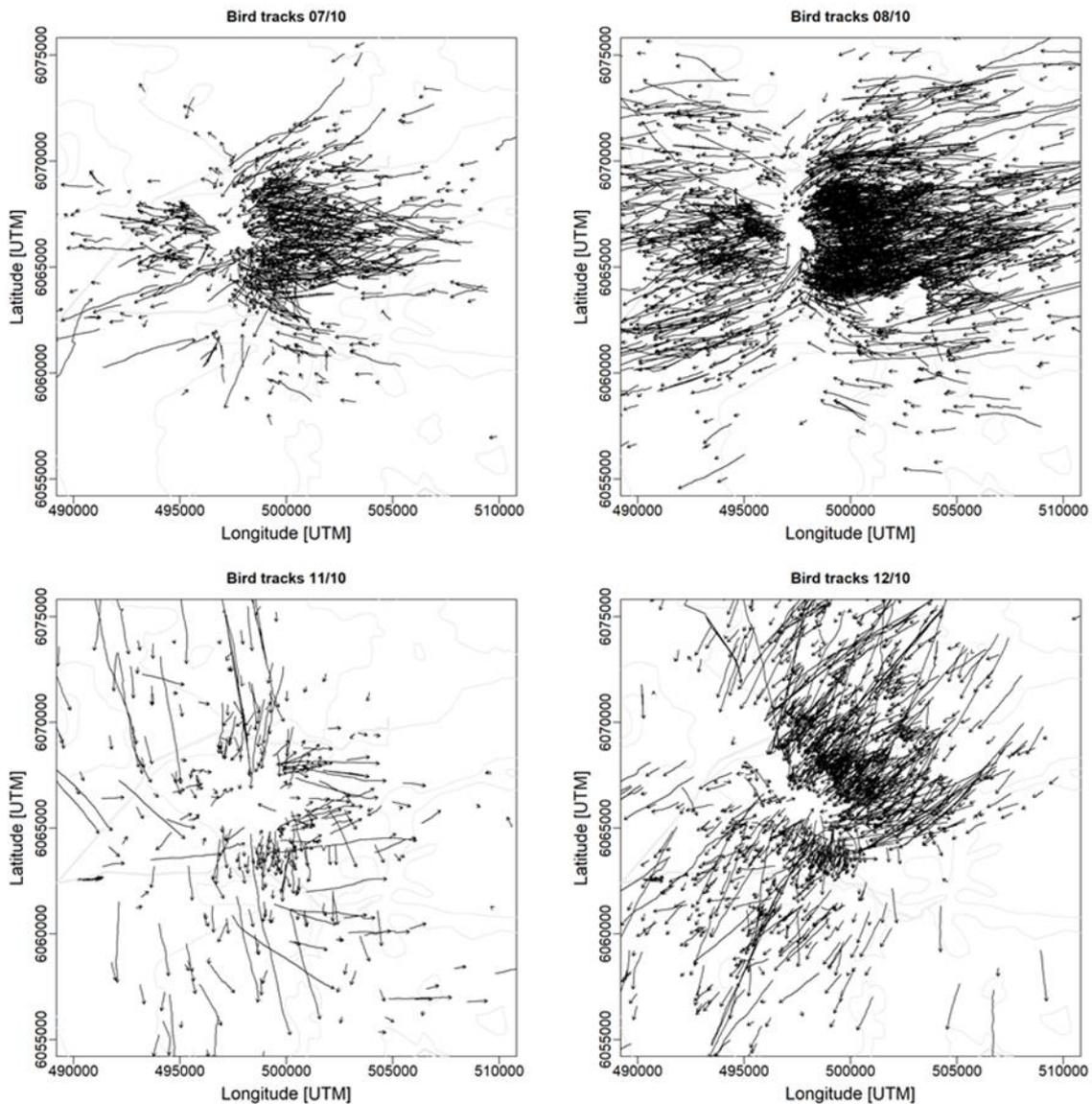


Abbildung 46: Beispielhafte Darstellung der vom Radar Klintum aufgezeichneten Vogeltracks in vier verschiedenen Nächten. Die verschiedenen Nächte zeichneten sich auch an diesem Standort durch unterschiedliches Aufkommen an Vogelbewegungen (vgl. Abb. oben links und rechts) sowie unterschiedlicher Flugrichtungen (vgl. Abb. unten und oben) aus.

6.8.3.3.2 Zeitlicher Verlauf

Das Radargerät Rügen zeichnete durchgehend Daten auf mit einer Unterbrechung zwischen dem 28.08. und dem 02.09.2021 (Abbildung 47). Die Dichte der Vogeltracks im Erfassungsraum zeigte in diesem Zeitraum die für den Vogelzug charakteristische hohe zeitliche Variabilität. Die maximalen Trackdichten lagen an einzelnen Tagen rund 4-mal höher als an anderen Tagen. Generell wurden die höchsten Vogeldichten in den Nacht- sowie insbesondere den Vormittagsstunden verzeichnet. Auch das Radar Klintum wies eine hohe

Variation der aufgezeichneten Vogelsichten zwischen und innerhalb der einzelnen Erfassungsnächte auf (Abbildung 47 unten).

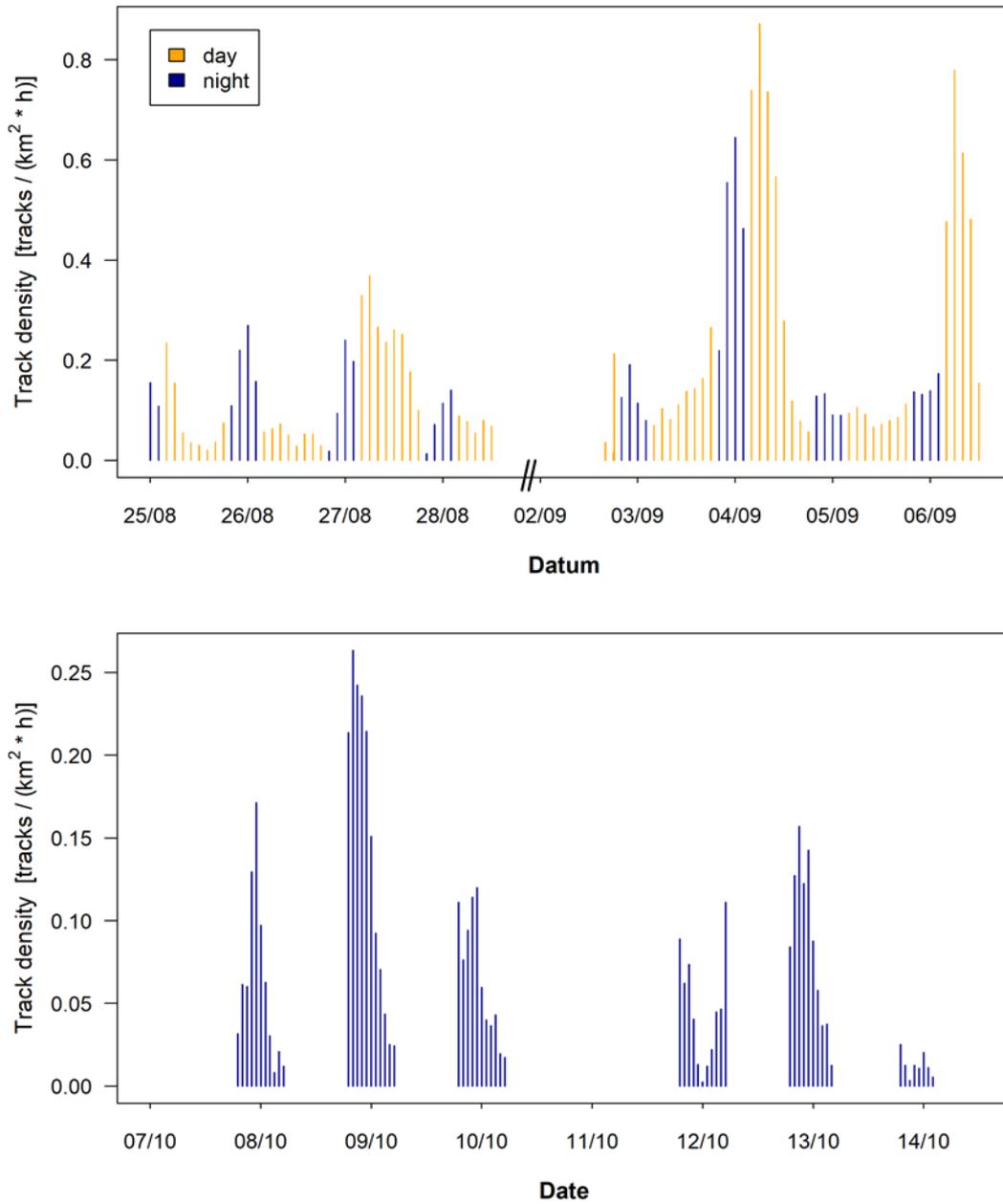


Abbildung 47: Zeitlicher Verlauf der Vogeltrackdichten des Radars Rügen (oben) und Klintum (unten) im jeweiligen Untersuchungszeitraum.

6.8.3.3.3 Tageszeitlicher Verlauf

Die mit dem Radar Rügen erfassten Vogeltracks wiesen einen ausgeprägten tageszeitlichen Verlauf auf (Abbildung 48). Die Anzahl der Vogelsignale nahm nach Sonnenuntergang deutlich zu, nahm in der zweiten Nachthälfte jedoch wieder geringfügig ab. Um Sonnenaufgang wurde ein weiterer deutlicher Anstieg verzeichnet, die maximale Anzahl Vogeltracks wurde ca. 2 Stunden nach Sonnenaufgang erreicht. Während der weiteren Hellphase war eine deutliche Abnahme der Anzahl Vogeltracks zu verzeichnen.

Der nächtliche Verlauf des mit dem Radar Klintum erfassten Vogelauftommens wies Ähnlichkeiten mit den Daten des Radar Rügen auf (Abbildung 48 unten). In der ersten Nachthälfte wurde eine steigende Anzahl Vogeltracks verzeichnet. Nach dem Maximum um ca. 23:00 Uhr nahm die Anzahl Vogelsignale im weiteren Nachtverlauf ab.

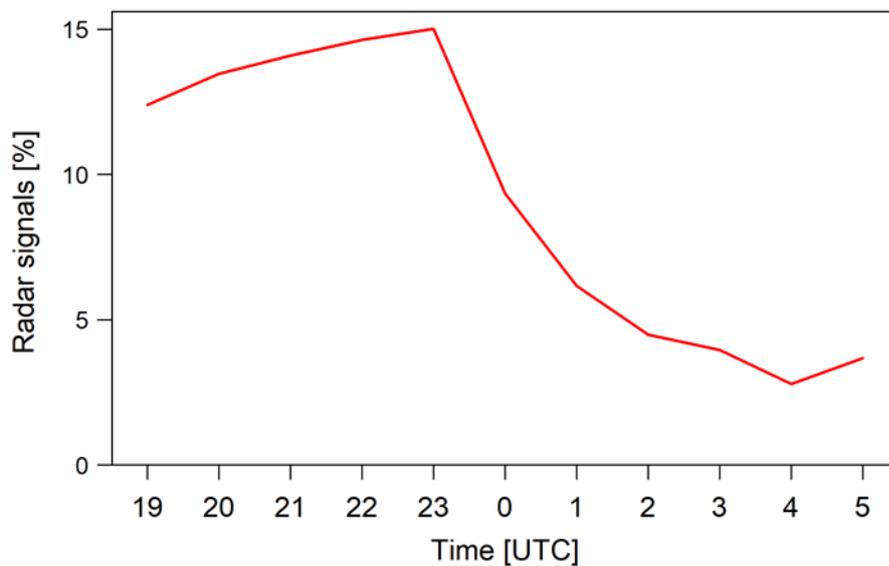
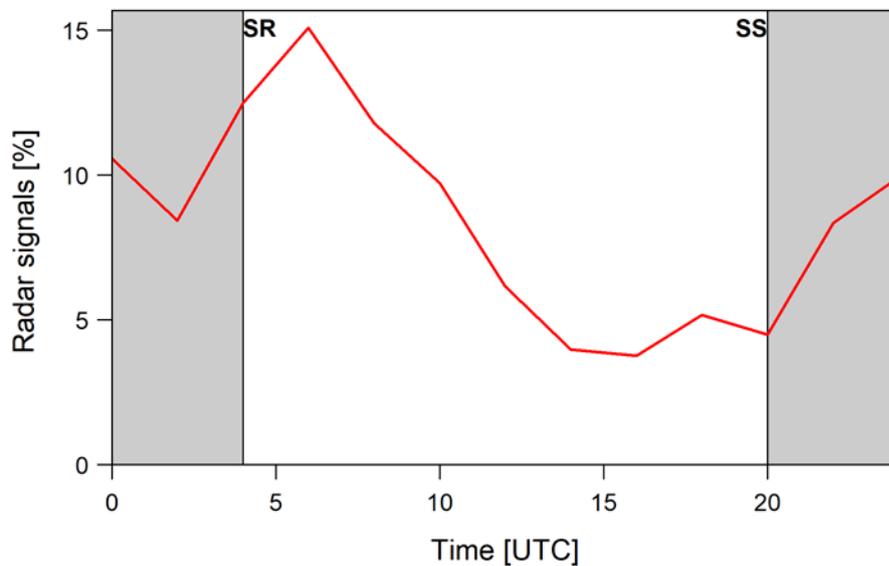


Abbildung 48: Tageszeitlicher Verlauf [%] der Anzahl der mit dem Radar Rügen (oben) bzw. dem Radar Klintum (unten) aufgezeichneten Vogelsignale. In der oberen Abbildung ist der Zeitpunkt des Sonnenaufgangs (SR, „sunrise“) und des Sonnenuntergangs (SS, „sunset“) markiert.

6.8.3.3.4 Flugrichtungsverteilung

Die Flugrichtungsverteilung der aufgezeichneten Vogeltracks entsprach weitgehend den zu erwartenden Hauptzugrichtungen in den Untersuchungszeiträumen. Auf Rügen überwogen insgesamt westsüdwestliche Flugrichtungen (Abbildung 49 oben links). Tagsüber war dabei

der Anteil westlicher Flugrichtungen höher (Abbildung 49 unten links); während der Nacht wurde ein höherer Anteil südwestlicher Flugrichtungen verzeichnet (Abbildung 49 unten rechts).

Im Erfassungsbereich des Radars Klintum war insgesamt eine starke Präferenz westlicher Flugrichtungen festzustellen, wenn auch in einzelnen Nächten südwestliche bzw. südliche Richtungen überwogen (siehe Abbildung 46).

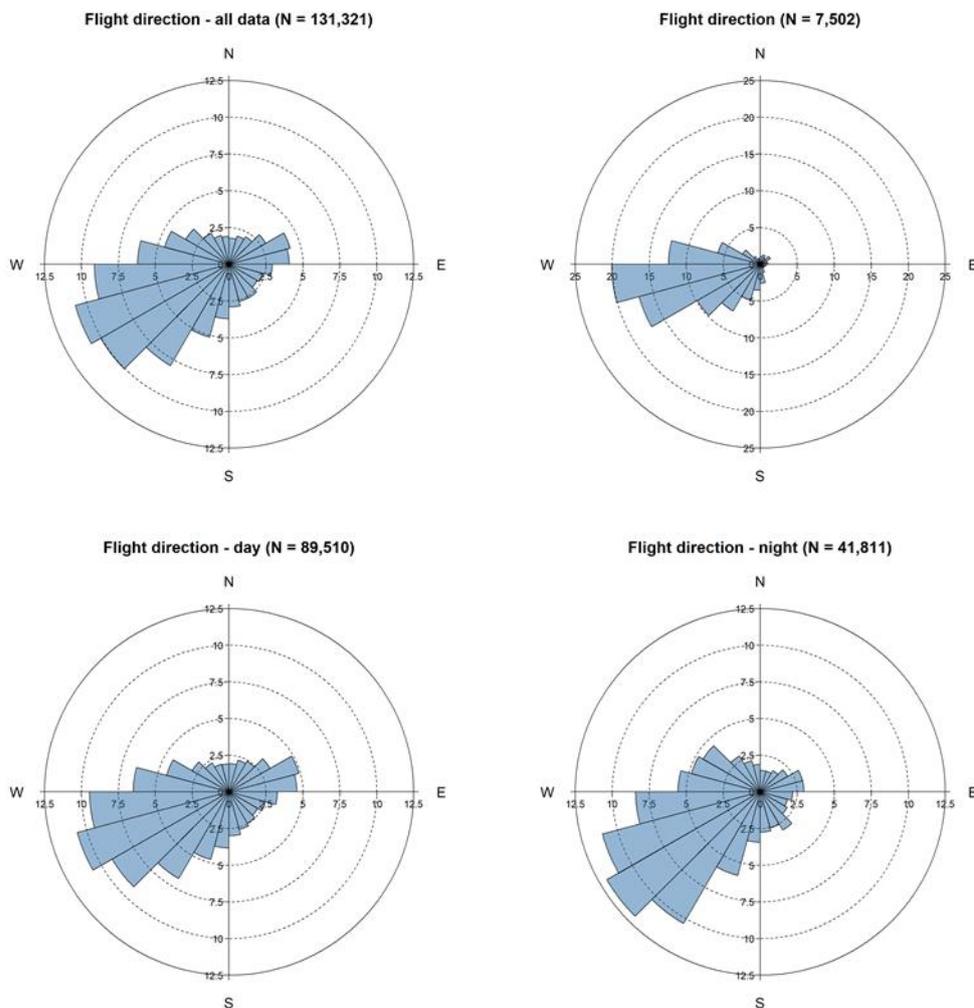


Abbildung 49: Flugrichtungsverteilung der mit den BNK-Radaren auf Rügen bzw. in Klintum aufgezeichneten Vogelsignale. Die Flugrichtungsverteilung der gesamten Daten (Tag und Nacht) des Radars Rügen sind oben links dargestellt, die entsprechenden Verteilungen des Tag- und Nachtzugs sind unten links bzw. rechts dargestellt. Die Abbildung oben rechts zeigt die Flugrichtungsverteilung der Vogeltracks des Radars Klintum.

6.8.3.3.5 Räumliche Verteilung der Flugrichtungen

Die räumliche Betrachtung der mittleren Flugrichtungen zeigte insbesondere beim Radar Rügen eine weitgehende Uniformität im gesamten Erfassungsbereich (Abbildung 50 oben links). Lediglich im südöstlichen Randbereich des Erfassungsraums wurden vom generellen Muster abweichende mittlere Flugrichtungen festgestellt. Dies war sowohl tagsüber (Abbildung 50 unten links) als auch nachts der Fall (Abbildung 50 unten rechts).

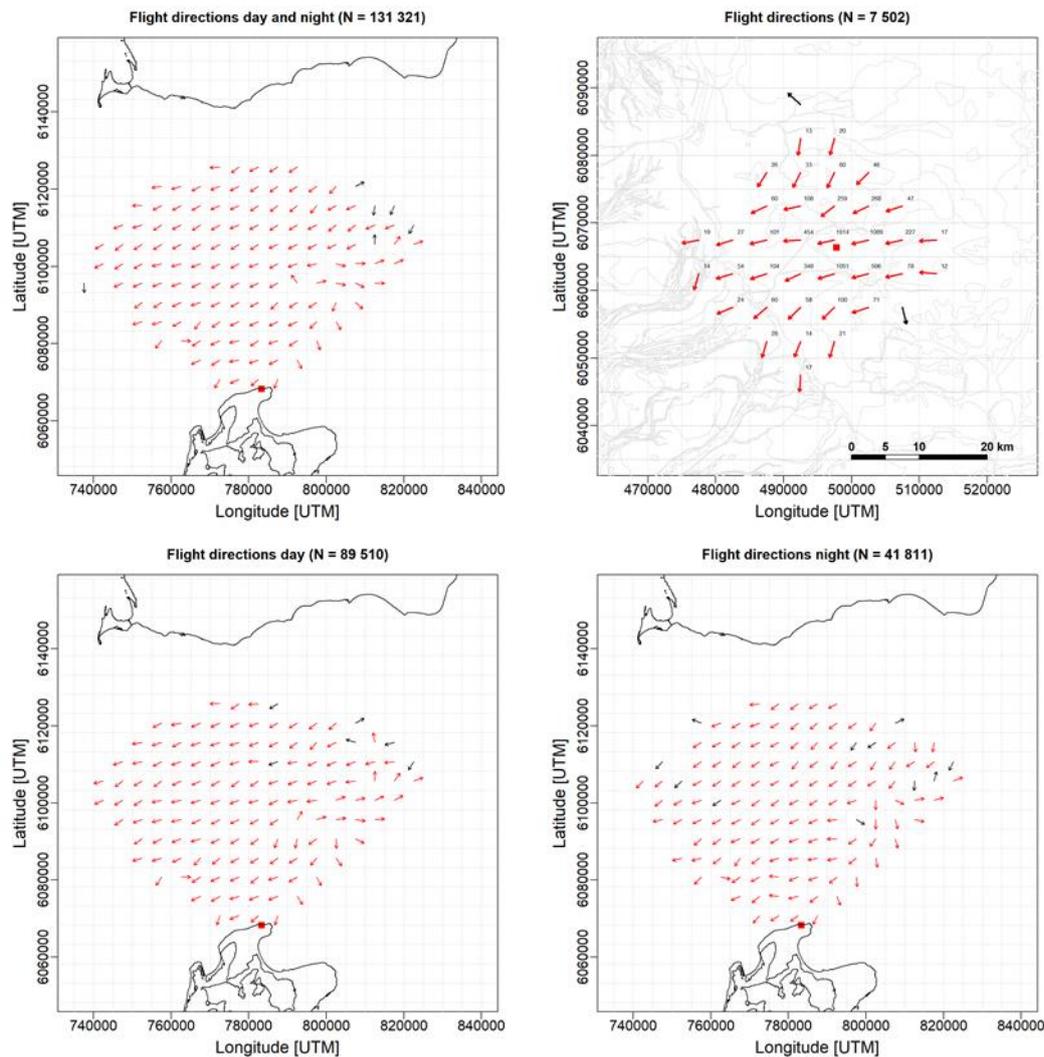


Abbildung 50: Räumliche Verteilung (5x5 km Raster) der mittleren Flugrichtungen am Standort Rügen und Klintum. Die Flugrichtungsverteilung der gesamten Daten (Tag und Nacht) des Radars Rügen sind oben links dargestellt, die entsprechenden Verteilungen des Tag- und Nachtzugs sind unten links bzw. rechts dargestellt. Die Abbildung oben rechts zeigt die räumliche Verteilung der Flugrichtungen der Vogeltracks des Radars Klintum. Rot dargestellte mittlere Flugrichtungen waren signifikant (nach Rayleigh-Test, $p < 0,05$), schwarze nicht signifikant ($p > 0,05$).

Das Radar Klintum wies höhere räumliche Unterschiede der mittleren Flugrichtungen auf (Abbildung 50 oben rechts). Während im nördlichen und südlichen Erfassungsbereich südliche Flugrichtungen überwogen, wurden im mittleren Erfassungsraum primär westliche Richtungen verzeichnet.

6.8.3.3.6 Räumliche Verteilung der Vogeltrackdichten

Insgesamt lagen die vom Radar Rügen erfassten Vogeldichten tagsüber mit im Mittel $0,60 \text{ Tracks*km}^{-1}\text{*h}^{-1}$ deutlich höher als nachts (Mittel: $0,28 \text{ Tracks*km}^{-1}\text{*h}^{-1}$). Die Dichte der Vogeltracks wies dabei deutliche räumliche Unterschiede auf (Abbildung 51 und Abbildung 52). Sowohl tagsüber als auch nachts nahm die Dichte deutlich mit zunehmender Entfernung vom Radargerät ab (Abbildung 52 unten links und rechts). Auch in randlichen Bereichen des Erfassungsraums wurden geringere Dichten erfasst als im zentralen Bereich (Abbildung 51).

Das Radar Klintum wies ein vergleichbares räumliches Muster auf mit einer deutlichen Abnahme der Vogeltrackdichten mit zunehmender Entfernung (Abbildung 52 oben rechts). Die Abnahme war dabei deutlicher ausgeprägt als beim Radar Rügen. Während die Dichten in Klintum bereits bei etwa 12 km Entfernung auf etwa $1/10$ der maximalen Dichten abnahm, war dies beim Radar Rügen erst bei etwa 40 km der Fall.

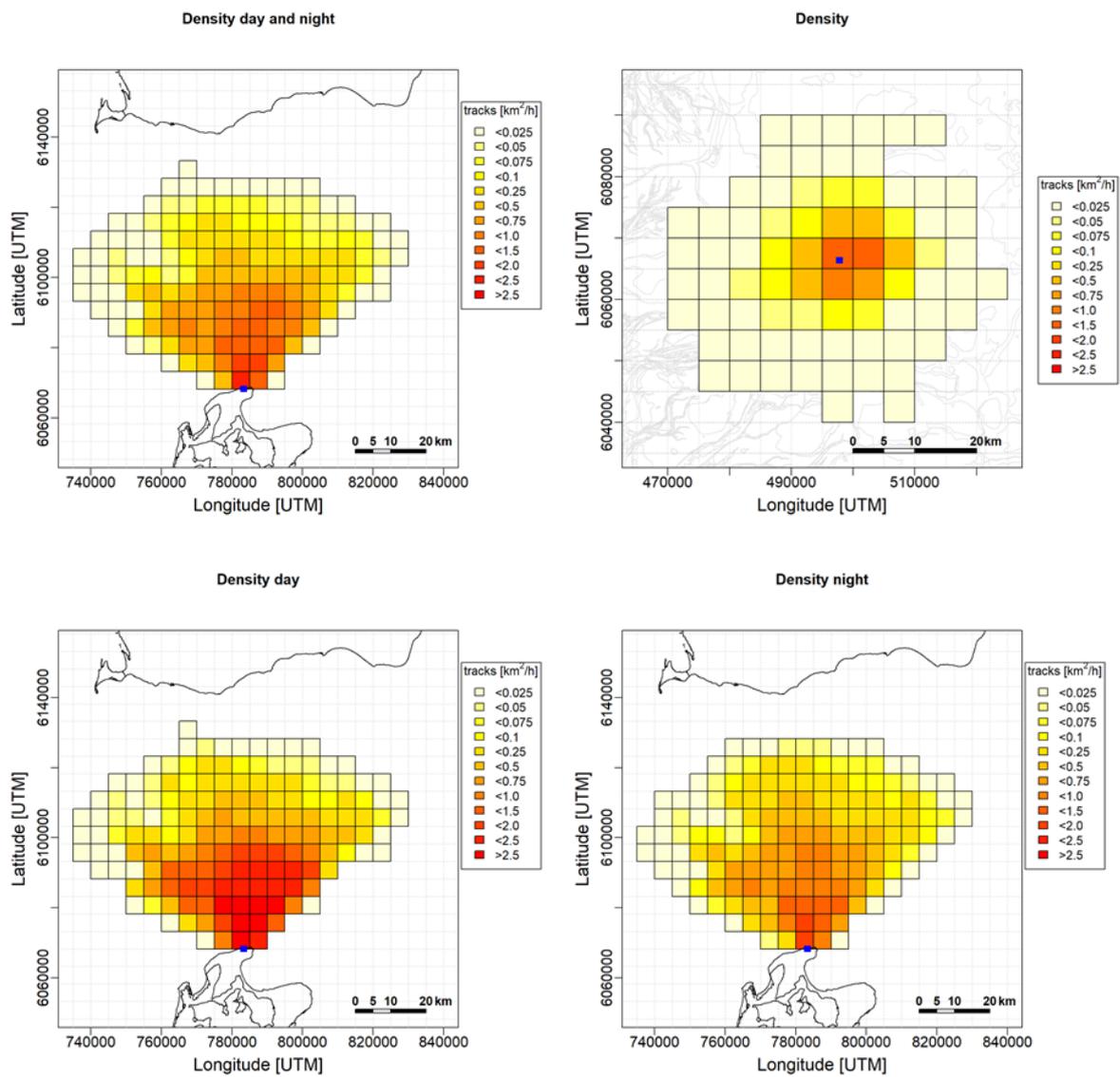


Abbildung 51: Räumliche Verteilung (5x5 km Raster) der mittleren Vogeltrackdichte am Standort Rügen und Klintum. Die Dichteverteilung der gesamten Daten (Tag und Nacht) des Radars Rügen sind oben links dargestellt, die entsprechenden Verteilungen des Tag- und Nachtzugs sind unten links bzw. rechts dargestellt. Die Abbildung oben rechts zeigt die räumliche Verteilung der Trackdichten des Radars Klintum.

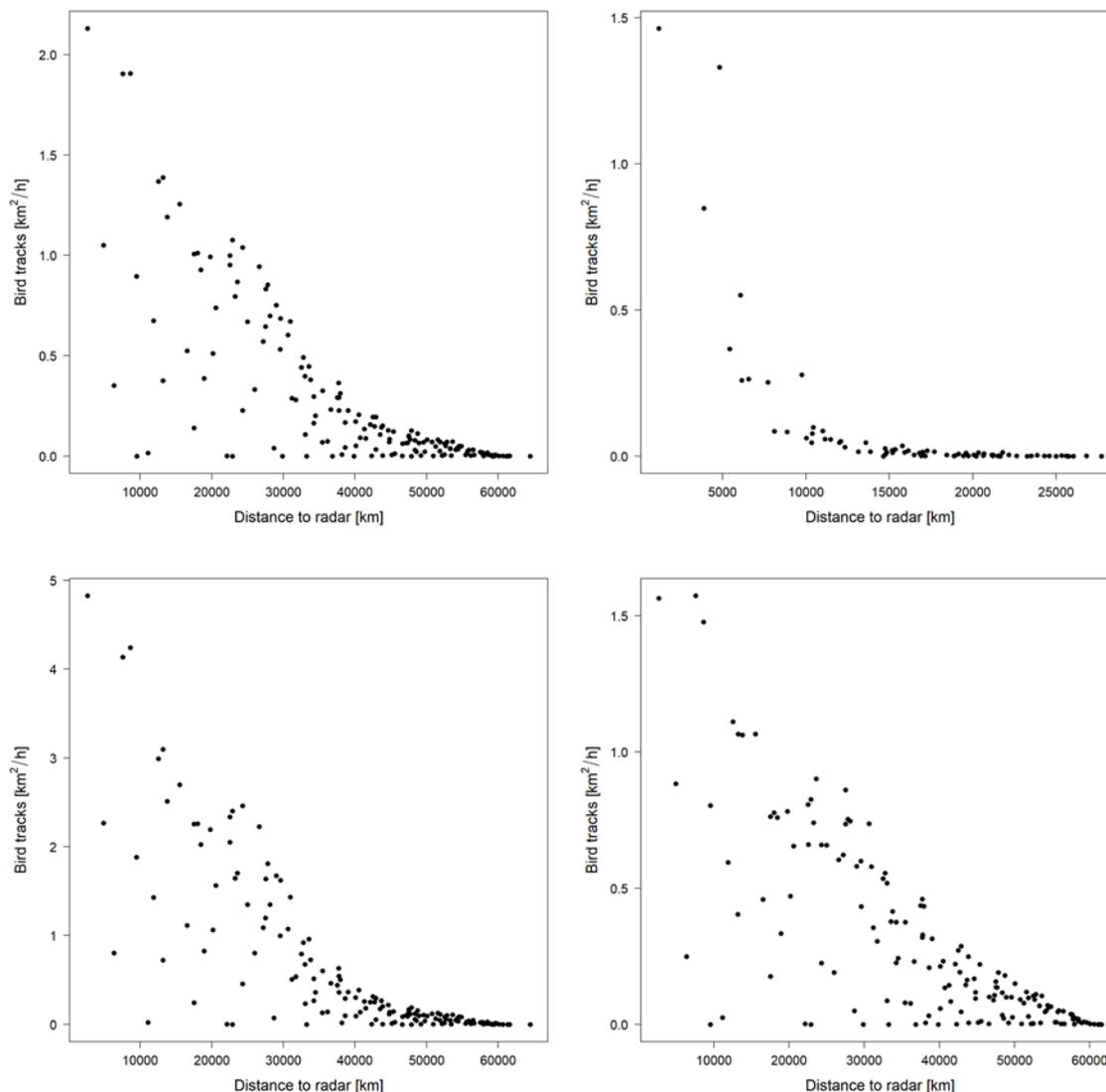


Abbildung 52: Abhängigkeit der Vogeltrackdichte von der Entfernung zum Radarstandort (oben links: Radar Rügen Tag- und Nacht, unten links: Radar Rügen Tag, unten rechts: Radar Rügen Nacht, oben rechts: Radar Klintum).

6.8.3.3.7 Minimal erfasster Radarquerschnitt

Der Radarquerschnitt (RCS) kann unter Einschränkungen als Maß für die Größe der erfassten Vögel dienen. Der minimale von den Radaren erfasste RCS der Vogelsignale nahm bei beiden Geräten mit zunehmender Entfernung exponentiell zu (Abbildung 53). Der minimal erfasste RCS des Radars Rügen betrug bis zu einer Entfernung von ca. 8 km etwa 10 cm^2 . Dies entspricht etwa einem kleinen Singvogel. Ein minimaler Radarquerschnitt von ca. 100 cm^2 (etwa Größe einer Großmöwe) wurde bei ca. 18 km erreicht. Die größten, häufig im Untersuchungsgebiet zu erwartenden Vogel mit einem Radarquerschnitt von etwa 1.000 cm^2 (Gänse, Schwäne) können nach den Messungen bis in eine Entfernung von ca. 40 km erfasst

werden. Vogeldetektionen in größeren Entfernungen und damit größerem minimalen RCS stammten demnach wahrscheinlich von Vogeltrupps, d.h. von Tracks, die aus mehr als einem Individuum bestanden.

Die entsprechenden Werte des Radars Klintum lagen niedriger. Die Erfassungsgrenze für Vögel mit einem RCS von ca. 10 cm^2 lag bei diesem Radar bei etwa 3 km. Vögel mit 100 cm^2 RCS wurden bis in etwa 7 km Entfernung detektiert. Die Detektionsgrenze einzelner Großvögel bis 1.000 cm^2 RCS wie beispielsweise Gänse, lag bei etwa 13 km. Alle Vogelerfassungen in größerer Entfernung waren bei diesem Radargerät wahrscheinlich auf Vogeltrupps zurückzuführen.

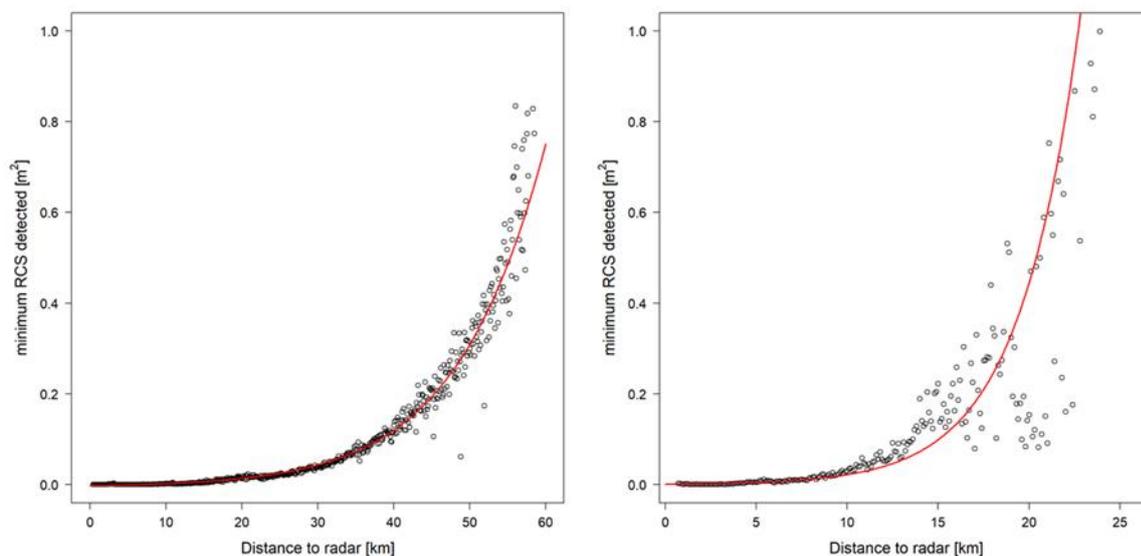


Abbildung 53: Abhängigkeit des minimalen von den Radargeräten detektierten Radarquerschnitts („radar cross-section“, RCS [m^2]) von der Entfernung zum Radarstandort (links: Radar Rügen, rechts: Radar Klintum).

6.8.3.3.8 Vergleich BNK-Radar mit Vogelradar

Für insgesamt sechs Nächte lagen vergleichbare Daten des BNK-Radars Klintum sowie der Vogelerfassungsradare im Windpark Holzacker-Knorborg vor. Der relative Vergleich der Vogeltrackdichten am Standort Klintum mit den MTR-Werten in Holzacker-Knorborg zeigte eine hohe Übereinstimmung (Abbildung 54). Die Spearman Rangkorrelation der Werte war hochsignifikant (Korrelationskoeffizient $\rho = 0,58$, $p < 0,0001$).

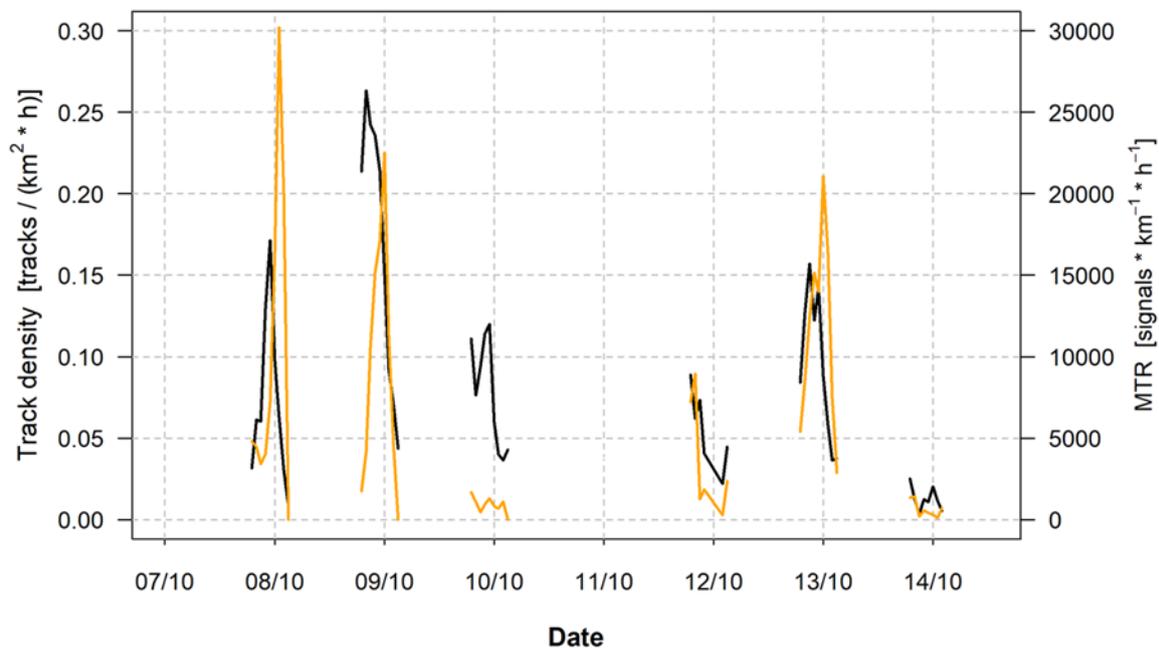


Abbildung 54: Vergleich des zeitgleich mit dem BNK-Radar Klintum sowie des Vogelradars am Standort Holzacker-Knorburg aufgezeichneten Vogelaufkommens. Die Vogeltrackdichten des Radars Klintum sind schwarz dargestellt und beziehen sich auf die primäre Y-Achse, die MTR-Werte des Radars Holzacker-Knorburg sind orange dargestellt und beziehen sich auf die sekundäre Y-Achse.

6.8.3.4 Diskussion

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen, dass mit den untersuchten BNK-Radargeräten Vögel auch über große Entfernungen aufgezeichnet werden können. So wurden mit dem auf Rügen getestete offshore BNK-Radar Vögel im gesamten Erfassungsbereich bis über 60 km Entfernung und damit bis in Bereich in Nähe der südschwedischen Küste detektiert. Auch das für den Onshore-Bereich konzipierte BNK-Radar am Standort Klintum erfasst Vögel bis in über 25 km Entfernung.

Zur Klassifizierung von Radarsignalen als Vögel wurde im ersten Schritt der interne Algorithmus des Herstellers verwendet, wie dies auch bei spezialisierten Vogelerfassungsradaren anderer Hersteller (beispielsweise Swiss Birdradar oder Robin Radar, vgl. Kap. 6.8.2.1) der Fall ist. Der auf „machine learning“ basierende Klassifikator des Herstellers der BNK-Radare ist dabei unabhängig von Radarquerschnitt und der Entfernung zum Radar, sondern fußt primär auf der Kinematik der Tracks, insbesondere der Bewegungsmuster. Wie die nachträgliche Filterung anhand der zu erwartenden Vogelgröße (Radarquerschnitt) sowie der Fluggeschwindigkeit zeigte, wies nur ein sehr geringer Anteil der auf Basis des Algorithmus klassifizierten Vogeltracks als unwahrscheinlich eingestufte Werte auf.

Die für die nachträgliche Filterung der als Vögel eingestuften Tracks anhand der Fluggeschwindigkeit wurden Werte angenommen, die als unteres Limit (5 m/s) bzw. oberes Limit (30 m/s) in früheren Messungen festgestellt wurden (BRUDERER & BOLDT 2001). Dieser Filterschritt betraf 2,8 % (ca. 4.500 Tracks) der klassifizierten Vogeltracks. Eine weitere Filterung wurde auf Basis des Radarquerschnitts durchgeführt. Hier wurde 5 cm^2 RCS als unterer Grenzwert für kleine Singvögel angenommen. Mit 5 m^2 wurde ein wesentlich höheres oberes Limit angenommen, als einem einzelnen großen Vogel entspricht (vgl. EASTWOOD 1967). Grund hierfür war, dass die räumliche Auflösung des Radars - in Abhängigkeit der Entfernung zum Radarstandort und der Entfernung zwischen einzelnen Vögeln - es nicht immer erlaubt, Einzelindividuen von Vogeltrupps zu unterscheiden. Die Reichweiten-Auflösung des Radars Rügen liegt zwar im gesamten Erfassungsbereich bei etwa 36 m, die Azimut-Auflösung nimmt jedoch mit zunehmender Entfernung ab und beträgt in Entfernungen $>30 \text{ km}$ schon $>500 \text{ m}$. Durch die Wahl eines hohen oberen RCS-Grenzwerts wurde daher verhindert, Vogeltrupps fälschlicherweise aus dem Datensatz auszuschließen. Insgesamt wurden anhand des Radarquerschnitts 2,0 % (etwa 3.100 Tracks) der als Vögel klassifizierten Tracks ausgefiltert.

Durch den geringen Anteil, der auf diese Weise zusätzlich ausgeschlossenen Tracks, kann davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse davon weitgehend unbeeinflusst blieben und der firmeninterne Algorithmus des Radarherstellers bereits eine genaue Klassifizierung von Vögeln ermöglicht.

Die von den BNK-Radargeräten detektierten Vogeltracks wurden in der Regel über mehrere 100 m oder Kilometer aufgezeichnet. Dies ermöglicht das Erfassen detaillierter Informationen zur Flugrichtung der Vögel (siehe Kap.6.8.3.3.4). Darüber hinaus ist es denkbar, dass mit den Radargeräten Daten zum Verhalten der Vögel, beispielsweise hinsichtlich der Reaktion auf Windparks, auch in großer Entfernung gesammelt werden können. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass die Geräte keine Informationen zur Flughöhe der Vögel liefern können (siehe unten), was eine Interpretation der Daten erschwert.

Weiterhin kann mit den Daten die Häufigkeit der Vögel ermittelt werden. Im Rahmen dieser Studie wurde sie als „Vogeltrackdichte“ (Anzahl der Vogeltracks pro km^2 und Stunde) berechnet. Diese „Dichte“-Werte beziehen sich jedoch auf eine Fläche und nicht auf ein konkretes Volumen. Dies liegt darin begründet, dass das vom Radar erfasste Raumvolumen in Abhängigkeit des Öffnungswinkels des Radarstrahls mit zunehmender Entfernung zum Radarstandort zunimmt. So hat das auf Rügen verwendete Radargerät einen vertikalen Öffnungswinkel von ca. 11° bzw. einen Öffnungswinkel oberhalb der Erd-/Wasseroberfläche von $5,5^\circ$. Das heißt, dass sich der Erfassungsraum des Radars in 10 km Entfernung bis in eine

Höhe von ca. 1.000 m, in einer Entfernung von 35 km bis in >3 km Höhe erstreckt. Dementsprechend werden auch Vögel entfernungsabhängig bis in unterschiedliche Höhenbereiche erfasst. Da das Radar jedoch keine Höhenverteilung der Vogeltracks erfassen kann, beziehen „Dichte“-Berechnungen unterschiedliche Höhenbereiche ein. Die auf diese Weise berechneten Vogeltrackdichten stellen somit ein relatives Maß der Vogelhäufigkeit dar. Standardmäßig werden Vogelzugintensitäten als MTR-Werte angegeben („migration traffic rate“). Diese geben die Anzahl Vögel wieder, die in einem definierten Höhenbereich (oftmals bis 1.000 m Höhe) innerhalb einer Stunde eine Strecke von einem Kilometer überfliegen.

Ein weiterer wichtiger, bei der Interpretation der Daten zu berücksichtigender Aspekt ist die Abhängigkeit der Detektionswahrscheinlichkeit der Vögel von deren Größe sowie der Entfernung zum Radargerät. Dies liegt darin begründet, dass die von Vögeln reflektierte Energie zum einem proportional mit der Größe des Vogels bzw. dessen Radarquerschnitts zunimmt und zum anderen mit zunehmender Entfernung sehr stark abnimmt (im Verhältnis $1/r^4$; r = Entfernung Radar zum Objekt).

Die festgestellte Abnahme der Vogeltrackdichte in Abhängigkeit der Entfernung zum Radar (siehe Abbildung 52) spiegelt diese Zusammenhänge wider. Die Vogeldichte nimmt hier mit der Entfernung stark ab, obwohl das vom Radar erfasste Raumvolumen und somit die Anzahl der sich im Erfassungsraum aufhaltenden Vögel zunimmt.

Die Abnahme der Rückstrahlenergie mit abnehmendem Radarquerschnitt der Vögel hat darüber hinaus zur Folge, dass Vögel einer bestimmten Größe, ab einer bestimmten Entfernung nicht mehr vom Radar detektiert werden können. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 53 verdeutlicht. Die Ergebnisse zeigen, dass beispielsweise Singvögel mit einem Radarquerschnitt von ca. 10 cm^2 vom Radar Rügen bis maximal etwa 8 km Entfernung erfasst werden konnten; beim Radar Klintum lag die Erfassungsgrenze dieser Vogelgruppe bei maximal etwa 3 km. Einzelne Großvögel konnten demnach mit den BNK-Radaren bis in ca. 40 km (Rügen) bzw. 13 km (Klintum) erfasst werden. Diese Schätzwerte sind als Maximalwerte anzusehen, da der Radarquerschnitt neben der Körpergröße der Vögel von weiteren Faktoren abhängig ist, so auch von der Flugrichtung des Vogels in Relation zum Radarstrahl. So hat ein Vogel, der auf das Radargerät zufliegt in der Regel einen geringeren effektiven Radarquerschnitt als ein seitlich vom Radarstrahl getroffenes Individuum.

Für das Radar Klintum lagen zeitgleich erhobene Vergleichsdaten von marinen Navigationsradaren vor, die für die systematische, quantitative Erfassung von Vögeln eingesetzt werden können (siehe Kap. 6.8.4). Sowohl der graphische Vergleich als auch die Korrelationsanalyse zeigen eine hohe qualitative Übereinstimmung zwischen den Radarsystemen. Der zeitliche Verlauf der mit den Vogelradargeräten ermittelten MTR-Werte

entsprach weitgehend den mit dem BNK-Radar erfassten Vogeltrackdichten. Auch wenn sich aufgrund des oben beschriebenen Sachverhalts mit den BNK-Radaren nicht ohne Weiteres MTR-Werte berechnen lassen, so ergibt sich aus der hohen relativen Übereinstimmung die Möglichkeit eines systematischen Abgleichs der Radarsysteme und somit einer indirekten Berechnung von Durchflugraten bzw. Zugintensitäten auf Basis der BNK-Radare. Eine solche „Kalibrierung“ von BNK-Radaren wäre aufgrund der fehlenden Höhenbestimmung jedoch nur für das gesamte erfasste Radarvolumen möglich. Ein Bezug auf einen bestimmten Höhenbereich, beispielsweise auf den Höhenbereich der Rotoren von Windenergieanlagen, kann hier nicht hergestellt werden.

Auch der tageszeitliche Verlauf des mit den BNK-Radaren festgestellten Vogelaufkommens stimmte weitgehend mit Ergebnissen vorhergehender Studien überein. So nimmt nachts in der Regel die Zugaktivität nach Sonnenuntergang stark zu, erreicht in der ersten Nachthälfte ein Maximum, um im weiteren Verlauf der Nacht wieder abzunehmen (siehe Abbildung 55 oben, (KRIJGSVELD et al. 2011; BIOCONSULT SH et al. 2020; WELCKER & VILELA 2020). Ein entsprechendes Muster zeigten sowohl die Ergebnisse des Radars Rügen (Abbildung 47, Abbildung 48 und Abbildung 55) als auch des Radars Klintum (Abbildung 47, Abbildung 48). Der zeitliche Verlauf während der Hellphase wies beim Radar Rügen im Vergleich zu früheren Untersuchungen einen wesentlichen Unterschied auf (Abbildung 55). Zwar zeigte sich ein übereinstimmendes Muster mit hohem Zugaufkommen zu Beginn der Hellphase, stark abnehmender Werte bis zur Mitte des Tages und gleichbleibend geringe Aktivität in der 2. Tageshälfte. Die Flugaktivität zu Beginn der Hellphase lagen beim Radar Rügen jedoch im Vergleich wesentlich höher als in vorherigen Studien (BIOCONSULT SH et al. 2020; WELCKER & VILELA 2020), siehe auch Abbildung 55).

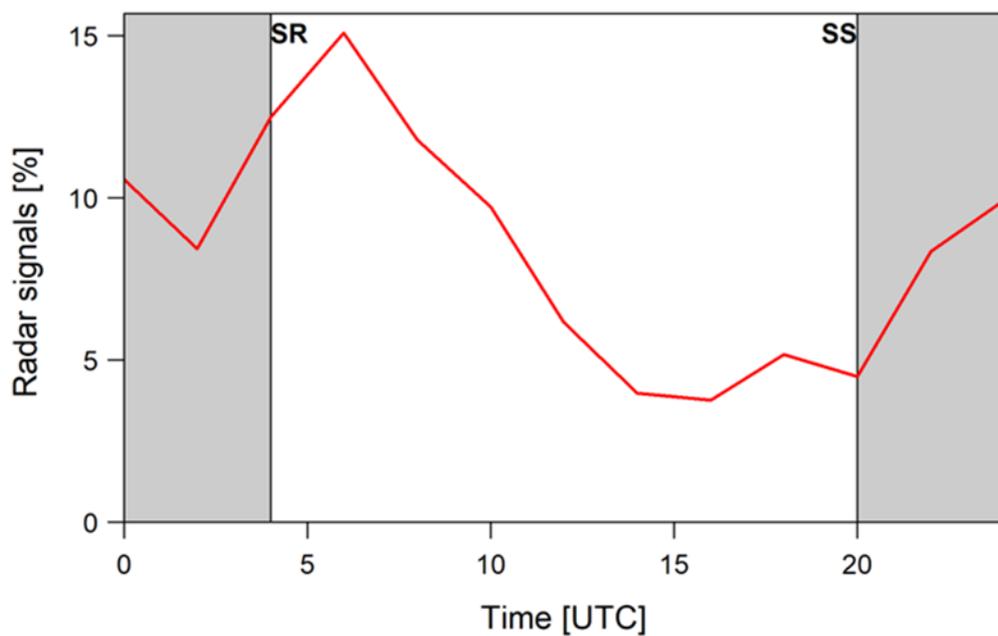
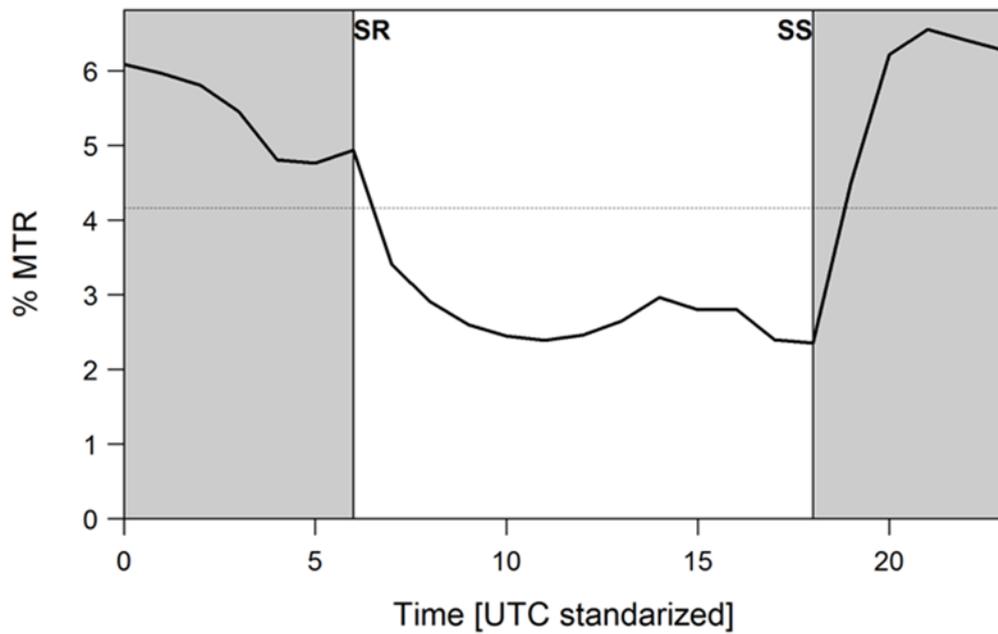


Abbildung 55: Vergleich des tageszeitlichen Verlaufs des Vogelzugaufkommens zwischen der vorliegenden Studie (Radar Rügen, unten) und Ergebnissen der Studie ProBIRD basierend auf Radardaten von 12 verschiedenen Standorten in der deutschen AWZ (oben, entnommen aus WELCKER & VILELA (2020)).

Da der Vogelzug hohe zeitliche Variabilität aufweist, ist hier einerseits ein Zufallseffekt nicht auszuschließen, d.h. tatsächlich höhere allgemeine Zugaktivität in den Stunden nach Sonnenaufgang im Untersuchungszeitraum. Andererseits könnte die unterschiedliche Detektionswahrscheinlichkeit von Singvögeln und größeren Vogelarten für das abweichende

Muster ursächlich sein. Der Nachtzug wird stark von Singvögeln und damit Vögeln geringer Körpergröße dominiert (ca. 90 % Anteil, siehe z. B. SCHULZ et al. 2013, 2014), während tagsüber mit See- und Wasservögeln Artengruppen überwiegen, die eine größere Körpergröße aufweisen. Da die Erfassungswahrscheinlichkeit von Singvögeln (bezogen auf den gesamten Erfassungsbereich des Radars) geringer ist als von größeren Vögeln, könnte dies den im Vergleich geringeren Anteil der vom Radar Rügen aufgezeichneten nächtlichen Flugbewegungen erklären.

Die mit dem Radar Rügen festgestellte Flugrichtungsverteilung wies ebenfalls eine hohe Übereinstimmung mit den auf Basis vorheriger Untersuchungen zu erwartenden Zugrichtungen auf (Abbildung 56). Für den nächtlichen Vogelzug, der zum Großteil aus dem von Singvögeln dominierten Breitfrontenzug besteht, ist im Herbst mit einem Vorherrschen südwestlicher Flugrichtungen zu rechnen (BERTHOLD 2000; OREJAS et al. 2005; HÜPPPOP et al. 2009). Der größere Anteil westlicher Zugrichtungen, der in der vorliegenden Untersuchung während des Tagzugs festgestellt wurde, ist vermutlich auch auf einen höheren Anteil von Wasservögeln zurückzuführen, die im Bereich der westlichen Ostsee häufig in ost-west-Richtung verlaufende Zugrouten zeigen (z. B. BELLEBAUM et al. 2010; BSH 2014). Auch die Dominanz westlicher Flugrichtungen beim Radar Klintum könnte darauf zurückzuführen sein. Bei diesem Radargerät wurde aufgrund der stattgefundenen Vorfilterung nur ein geringer Anteil von Vögeln mit geringem Radarquerschnitt aufgezeichnet.

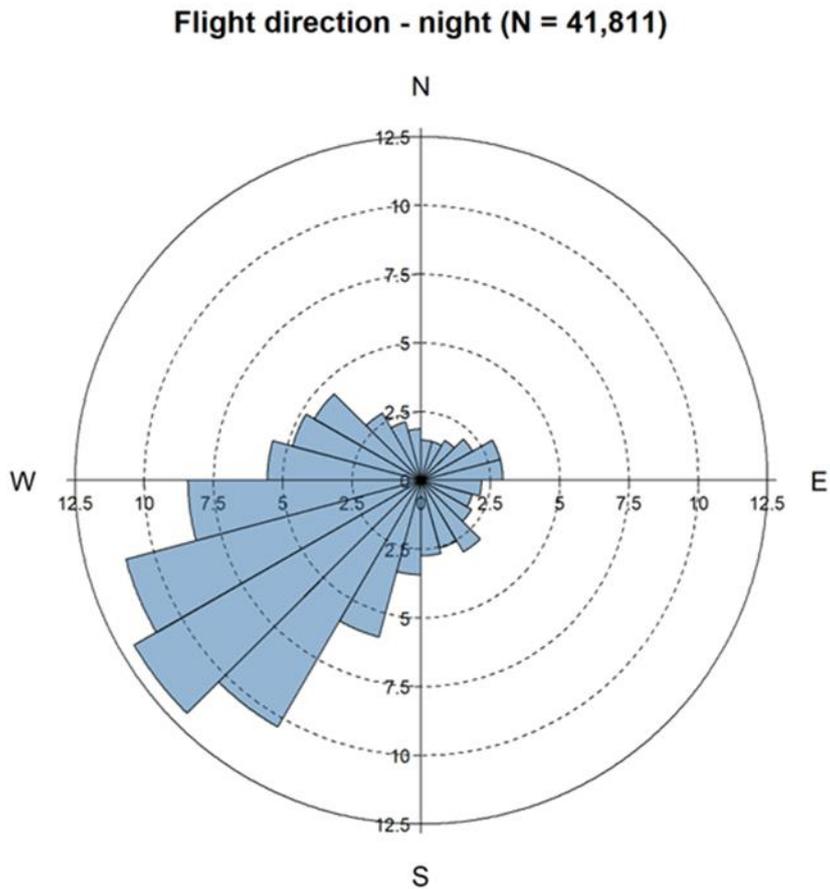
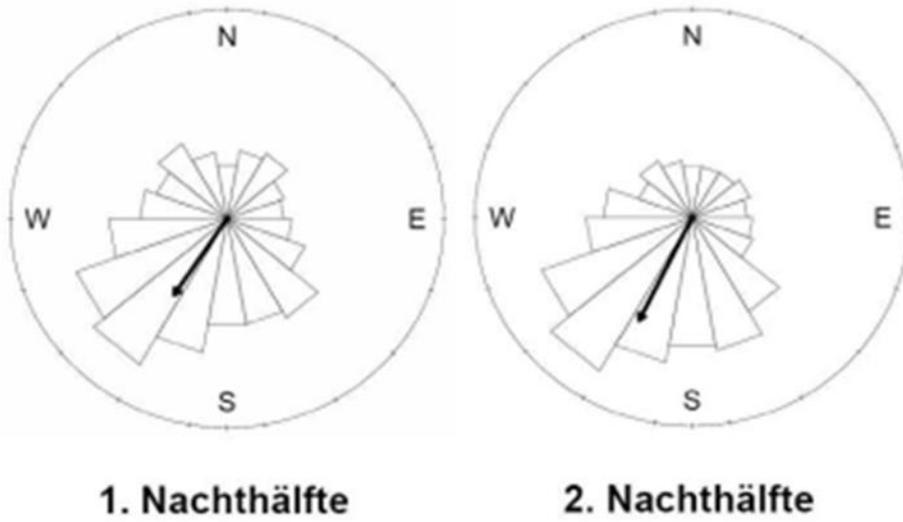


Abbildung 56: Vergleich der nächtlichen Flugrichtungsverteilung zwischen der vorliegenden Studie (Radar Rügen, unten) und Ergebnissen der FINOBIRD-Studie in der AWZ der Deutschen Bucht (oben entnommen aus HÜPPOP et al. (2009).

6.8.3.4.1 Fazit

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Ergebnisse der vorliegenden Studie die grundsätzliche Eignung der untersuchten BNK-Radargeräte zur Erfassung des Vogelzugs bzw. von Vogelflugbewegungen belegen. Der auf „machine learning“ beruhende Algorithmus des Herstellers zur Klassifizierung von Vögeln scheint dabei bereits eine hohe Genauigkeit aufzuweisen, auch wenn im Rahmen dieser Studie keine dezidierte Validierung vorgenommen werden konnte. Diese Einschätzung beruht auf der hohen Übereinstimmung mit zu erwartenden räumlichen und zeitlichen Mustern des Vogelzugs, der hoch signifikanten Korrelation mit Vergleichsdaten eines weiteren Radarsystems sowie der geringen Anzahl von klassifizierten Vogelsignalen mit zu geringen oder zu hohen Fluggeschwindigkeiten bzw. Radarquerschnitten. Es ist zu erwarten, dass durch eine zielgerichtete Fortentwicklung des systeminternen Algorithmus zur Vogelerkennung eine weitere Optimierung möglich wäre.

Da mit den untersuchten BNK-Radaren eine Messung der Flughöhe nicht möglich ist, ergeben sich Einschränkungen bei der Quantifizierung des Vogelzugs. Ebenso kann kein Bezug auf einen ausgewählten Höhenbereich, z.B. hinsichtlich des Rotorbereichs von Windenergieanlagen, vorgenommen werden. Die mit diesen Radargeräten berechneten Vogeldichten beziehen sich zwangsläufig auf mit der Entfernung zum Radarstandort variierende Höhenbereiche, so dass eine Umrechnung in die standardisierte Einheit MTR nicht ohne weiteres möglich ist. Eine „Kalibrierung“ der mit den BNK-Radaren ermittelten Werte mit Hilfe eines Abgleichs mit spezialisierten Vogelerfassungsradargeräten erscheint jedoch denkbar.

Die große Erfassungsreichweite insbesondere des BNK-Radars Rügen und die damit einhergehende großräumige Abdeckung ergibt vielfältige Möglichkeiten zur Untersuchung räumlicher und zeitlicher Muster des Vogelzugs. Dies betrifft in erster Linie Artengruppen mit größerer Körpergröße, die gerade im Offshore-Bereich eine wichtige Rolle spielen.

6.8.4 Feldstudie zur Anlockwirkung (AP 8.4)

6.8.4.1 Einleitung

Das übergeordnete Ziel der im Rahmen des AP 8.4 durchgeführten Feldstudie war es zu überprüfen, ob von der erforderlichen Nachtkennzeichnung von Windenergieanlagen im Onshore-Bereich eine anziehende Wirkung auf nachts ziehende Vögel ausgeht. Die Studie soll dabei auch als eine erste Grundlage dafür dienen, Auswirkungen der Nachtkennzeichnung auf das Kollisionsrisiko der Nachtzieher sowie eine mögliche Minderung des Kollisionsrisikos durch die Einführung der Bedarfsgerechten Nachtkennzeichnung an Land abzuschätzen. Eine

zusätzliche Zielsetzung war die Erhebung eines Datensatzes, der zu Vergleichszwecken mit einer entsprechenden Untersuchung im Offshore-bereich herangezogen werden kann.

Die in Deutschland die Hinderniskennzeichnung regulierende Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Kennzeichnung von Luftfahrthindernissen (AVV) erfordert eine Nachtkennzeichnung von Windenergieanlagen ab einer Gesamthöhe von 100 m. Diese wird in der Regel durch das sogenannte Feuer W rot umgesetzt, welches in einer Taktung von „1 s an – 0,5 s aus – 1 s an – 1,5 s aus“ geschaltet werden muss und im zentralen Bereich des Abstrahlwinkels eine Lichtstärke von 100 cd erreicht. Ab einer Gesamthöhe von 150 m sind zusätzlich Hindernisbefeuerungen am Turm erforderlich. Sofern keine BNK verwendet wird, ist die Nachtkennzeichnung ab einer Umgebungslicht-stärke von <150 Lux dauerhaft anzuschalten.

Die anziehende Wirkung von künstlichen Lichtquellen auf nachts ziehende Vögel wurde hinlänglich beschrieben und ist seit langem bekannt (GAUTHREAU JR & BELSER 2006; LONGCORE et al. 2008; BALLASUS et al. 2009; LOSS et al. 2015). Unsicherheit besteht jedoch hinsichtlich der spezifischen Wirkung von Licht unterschiedlicher Wellenlänge (Lichtfarbe) und der Beleuchtungsdauer (Dauerlicht, Blinklicht, stroboskopisches Licht). Insbesondere bezüglich der Auswirkungen roten Lichts liegen unterschiedliche Studienergebnisse vor (AVERY et al. 1976; EVANS et al. 2007; LONGCORE et al. 2008; REBKE et al. 2019).

Inwiefern die rot blinkende Nachtkennzeichnung von Windenergieanlagen im Onshore-Bereich eine anziehende Wirkung auf Nachtzieher ausübt, kann daher nicht aus vorherigen Studien abgeleitet werden, konkrete Daten liegen dazu bislang ebenfalls nicht vor. Des Weiteren ist bislang ungeklärt, inwieweit eine potenzielle Anlockwirkung an Onshore-Windenergieanlagen Auswirkungen auf das Kollisionsrisiko der Vögel hat. Dabei ist zu beachten, dass eine direkte Abhängigkeit zwischen Lichtanziehung und Kollisionsrisiko nicht zwingend gegeben ist. Dies liegt hauptsächlich darin begründet, dass vermutlich sowohl die Anlockwirkung als auch das Kollisionsrisiko und die Zugaktivität der Vögel eine Wetterabhängigkeit aufweisen.

Zum einen ist häufig beschrieben worden, dass die Anlockwirkung künstlicher Lichtquellen bei schlechtem Wetter, insbesondere eingeschränkter Sicht, verstärkt wird (BALLASUS et al. 2009). Ebenso wird vermutet, dass das Kollisionsrisiko von Vögeln bei unsichtigem Wetter erhöht ist (AVERY et al. 1977; AUMÜLLER et al. 2011). Andererseits ist jedoch – gerade an Land – bei widrigen Wetterbedingungen nur mit geringer Zugaktivität zu rechnen, da die Vögel günstige Verhältnisse für ihren Zug präferieren (ERNI et al. 2002; VAN BELLE et al. 2007). Bei Aufkommen von schlechtem Wetter können die Vögel ihren Zug jederzeit unterbrechen, auch wenn nicht immer geeignete Rasthabitate vorhanden sind. Dies würde jedoch bedeuten, dass

in Onshore-Windparks in Situationen mit potenziell erhöhter Lichtanziehung und erhöhtem Kollisionsrisiko nur mit einer geringen Anzahl an Vogelbewegungen zu rechnen ist. Ein weiteres Ziel der vorliegenden Studie war es daher, die Abhängigkeit der Lichtanziehung von den Wetterbedingungen zu überprüfen.

Die Situation im Offshore-Bereich kann sich deutlich von den Verhältnissen an Land unterscheiden. So könnten Vögel auf künstliches Licht unterschiedlich reagieren, da auf See generell weniger Lichtquellen vorhanden sind und einzelne Lichtquellen daher größere Anziehungswirkung ausüben könnten. Andererseits können ziehende Landvögel bei Aufkommen schlechter Wetterverhältnisse ihren Zug auf See nicht unterbrechen und sind dadurch ggf. einer verstärkten Anlockwirkung bei schlechtem Wetter eher ausgesetzt als an Land. Eine Übertragbarkeit von onshore auf offshore ist daher nicht ohne Weiteres gegeben. Die vorliegende Studie sollte daher eine Datengrundlage schaffen, um spätere Vergleiche mit dem Offshore-Bereich zu ermöglichen.

6.8.4.2 Material und Methoden

6.8.4.2.1 Datenaufnahme

Die Datenaufnahme fand vom 31.03. bis 01.11.2021 in der nordfriesischen Gemeinde Engesande statt. In dem knapp 20 km südlich der dänischen Grenze gelegenen, überwiegend landwirtschaftlich geprägten Gebiet war die Nachtkennzeichnung zur Sicherheit des Flugverkehrs im sieben Windenergieanlagen umfassenden Bürgerwindpark Holzacker-Knorborg dank BNK-Schaltung weitgehend deaktiviert, während im unmittelbar südöstlich angrenzenden, vier WEA zählenden Windpark Hollmark die nachts vorgeschriebene rot blinkende Befeuerung auf den Gondeln der Anlagen in ca. 95 m Höhe noch durchgehend aktiv war (Abbildung 57). Da die Gesamthöhe der Anlagen 150 m nicht überschritt, umfasste die Nachtkennzeichnung keine zusätzliche Beleuchtung der Anlagentürme.

Für die Erfassungen des Vogelzugs wurden zwei Radargeräte an einem Standort im Westen der beiden Windparks verwendet (Abbildung 57). Die Antennen der Geräte wurden auf dem Flachdach der zu den Windparks gehörigen Servergarage in etwa 3,5 m Höhe installiert und so ausgerichtet, dass ein Gerät den Bereich der nachts dauerbeleuchteten WEA erfasste und das zweite auf die mit einer BNK ausgestatteten Anlagen gerichtet war (Abbildung 57).

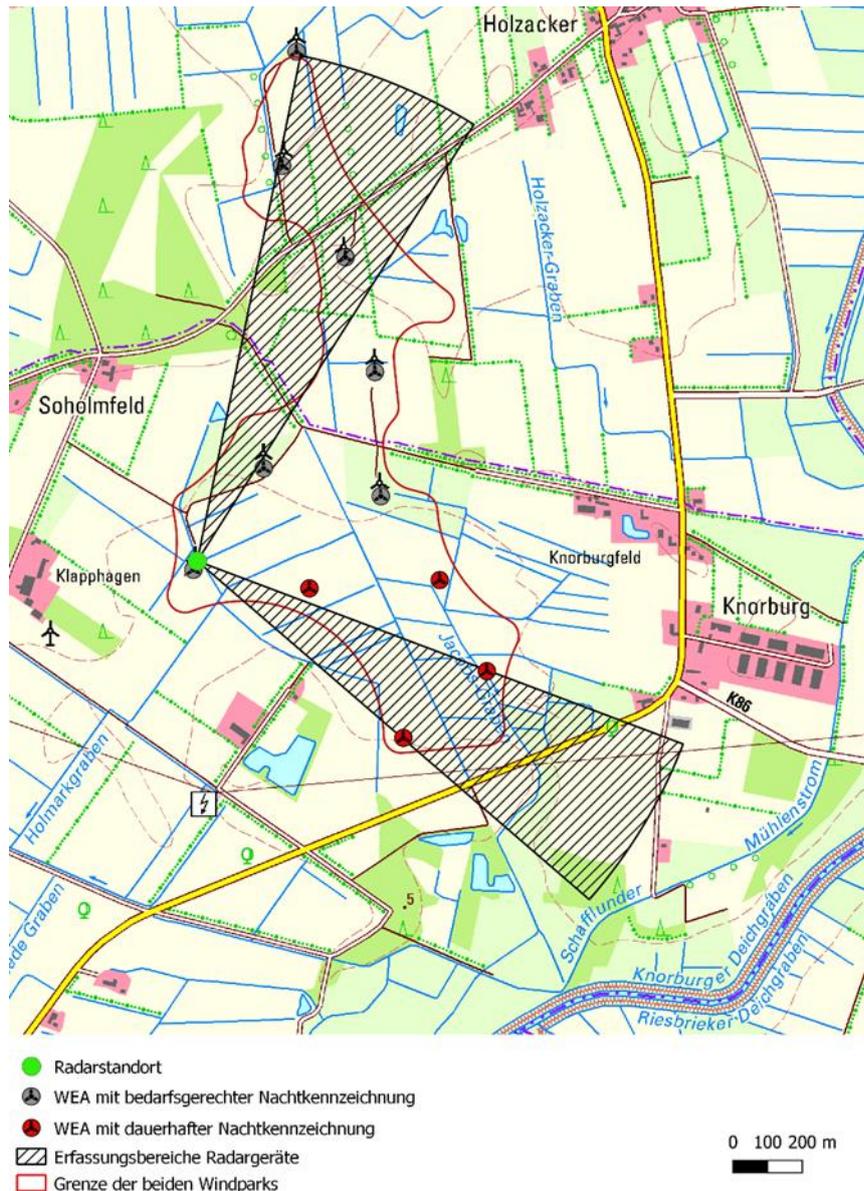


Abbildung 57: Standort der Radarerfassung: Schwarz schraffierte Bereiche kennzeichnen den ungefähren Erfassungsbereich der Radargeräte im nördlichen (aktive BNK, daher nächtlich weitgehend unbeleuchtet) und südlichen (durchgehend aktive Nachtkennzeichnung) Windparkgebiet.

Bei den verwendeten Radargeräten handelte es sich um marine Navigationsradare des Typs JRC NKE-2254-7, die mit einer Leistung von 25 KW bei 9410 MHz senden und damit gut geeignet sind, auch sehr kleine Objekte wie Singvögel zu detektieren (BRUDERER 1997). Die Antennen wurden vertikal drehend installiert (Abbildung 58) und ihre Erfassungsradien (Range) auf 1.600 m bzw. 0,75 Seemeilen (entspricht ca. 1.400 m) begrenzt. Auf diese Weise war es möglich, den Luftraum bis in diese Höhen zu abbilden. Filter für Störsignale durch z.B. Regen wurden deaktiviert, da diese auch eine unbekannte Anzahl von Vogelsignalen unterdrücken würden. Die Empfindlichkeit der Antennen (Gain) wurde auf 70 % gestellt.



Abbildung 58: Versuchsaufbau Enge-Sande: Die Antennen der beiden Radargeräte wurden vertikal drehend auf dem Dach der Servergarage der Windparks installiert. Die Antenne links im Bild ist auf die bedarfsgerecht nachtbefeuerten Anlagen des Windparks Holzacker-Knorborg (einige WEA sind im Hintergrund erkennbar) gerichtet, die Antenne rechts überwacht den Bereich des nachts durchgehend befeuerten Windparks Hollmark (WEA nicht abgebildet).

Da trotz identischen Gerätetyps und -einstellungen nicht zu gewährleisten war, dass beide Radargeräte exakt gleich empfindlich erfassen, wurden die Geräte alle drei Wochen zwischen den beiden Erfassungsräumen (beleuchteter und unbeleuchteter Bereich) gewechselt. Die Datenaufzeichnung erfolgte über die Speicherung von Screenshots der Radar-Bildschirme alle vier Minuten. Diese bildeten über die Monitor-Einstellung der Nachleuchtdauer (Trail) jeweils die Signale der letzten 30 Sekunden ab (Abbildung 59).

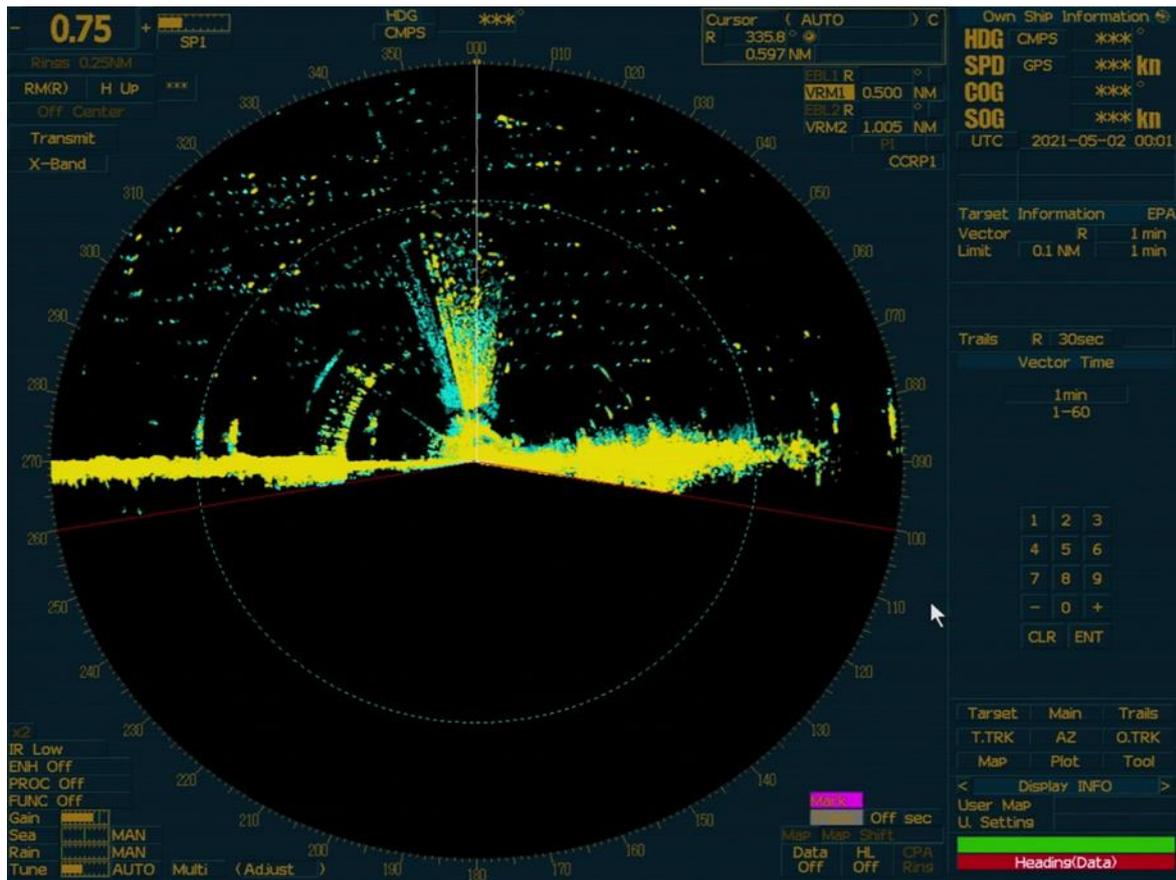


Abbildung 59: Beispiel eines Radar-Screenshots: Aufzeichnung vom 02.05.2021 um 00:01 Uhr im Bereich der dauerhaft nachtbefeuerten WEA. Der Radarstandort befindet sich in der Bildschirmmitte, die Erdoberfläche mit Strukturen (WEA, Vegetation wie Bäume etc.) ist als flächiges horizontales Radarecho zu erkennen. In der Bildmitte oberhalb des Radarstandorts sind Störsignale erkennbar, die von einer nahegelegenen WEA stammten und bei der Auswertung berücksichtigt wurden. Vogelsignale sind im Luftraum als gepunktete Linien zu erkennen: gelbe Punkte markieren dabei die aktuelle Position eines Vogels, die in regelmäßigen Abständen dahinter liegenden blauen Punkte die Positionen während vorheriger Umdrehungen der Radarantenne innerhalb der letzten 30 Sekunden.

6.8.4.2 Datenauswertung

Die aufgezeichneten Radarbilder wurden visuell nach Vogelsignalen abgesucht, die jeweils jüngste Position mit Hilfe des Programms „GSA Bird Counter 1.17“ (Gesellschaft für Softwareentwicklung und Analytik, Rostock) markiert und, in Bezug zum Positionspunkt und zum Erfassungsbereich des Radargerätes, in Flughöhen umgerechnet. Wie viele Vogelindividuen einem Vogelecho entsprechen, kann nicht festgestellt werden. Ein Vogelecho repräsentiert demnach mindestens einen Vogel. Bilder die zu mehr als 25 % von Regenstörechos überdeckt waren, wurden von der Auswertung ausgeschlossen.

Für die weitere Analyse wurden lediglich die Daten aus den Nachtzeiträumen (gerechnet vom täglichen Zeitpunkt der bürgerlichen Abend- bis zur bürgerlichen Morgendämmerung am Radarstandort) des Untersuchungszeitraums verwendet. Auf Basis der digitalisierten

Rohsignale der Vögel wurde eine sogenannte Distanzkorrektur (nach HÜPPOP et al. 2002; BSH 2013) vorgenommen. Dies ist notwendig, da die Erfassbarkeit von Vögeln mit zunehmender Entfernung zum Radargerät deutlich abnimmt. Die entfernungsabhängige Erfassungswahrscheinlichkeit von Vögeln wurde mit Hilfe der empirisch gewonnenen Daten modelliert. Dies geschah separat für die beiden verwendeten Radargeräte anhand der Vogelsignale, die nachts in einem störungsfreien Bildschirmausschnitt in 150-250 m Höhe aufgezeichnet wurden. In diesem beschränkten und vergleichsweise niedrigen Höhenband war gewährleistet, dass die Abnahme der Vogelsignale zum Rand des Erfassungsbereichs in erster Linie durch die nachlassende Detektionsfähigkeit des Radars und nicht durch andere Faktoren der nächtlich ziehenden Vögel zustande kam.

Für alle Vogelsignale in diesem Höhenband wurde die Entfernung zum Radargerät bestimmt und nach BUCKLAND et al. (2001) mit dem Programm R 3.6.3 (R CORE TEAM 2020), Paket „Distance“ (MILLER 2015) verschiedene Modelle zur entfernungsabhängigen Detektionswahrscheinlichkeit angepasst. Dabei wurden sowohl Modelle mit „Half Normal“ als auch „Hazard Rate“ Hauptfunktion (key function) mit „Cosine Expansion“ 2. bis 5. Ordnung berücksichtigt (BUCKLAND et al. 2001). Die Auswahl des besten Modells pro Radargerät wurde mit Hilfe des „Akaike Information Criterion“ vorgenommen. Da der unmittelbare Nahbereich der Radare stark gestört war und somit keine Signale aufgezeichnet wurden, wurde ein Radius von 200 m um das Radargerät herum für die Ermittlung der Korrekturfunktionen von vornherein ausgeschlossen.

Für das Radargerät mit dem Erfassungsradius von 1.600 m wurde ein Hazard-Rate-Modell 3. Ordnung gewählt, die Daten des Radars mit Erfassungsradius 0,75 nm wurden mit einem Hazard-Rate-Modell 2. Ordnung korrigiert (Abbildung 60). Um eine mögliche Überkorrektur zu begrenzen, wurde der berechnete Korrekturfaktor pro Signal nachträglich auf einen Wert von maximal 100 beschränkt.

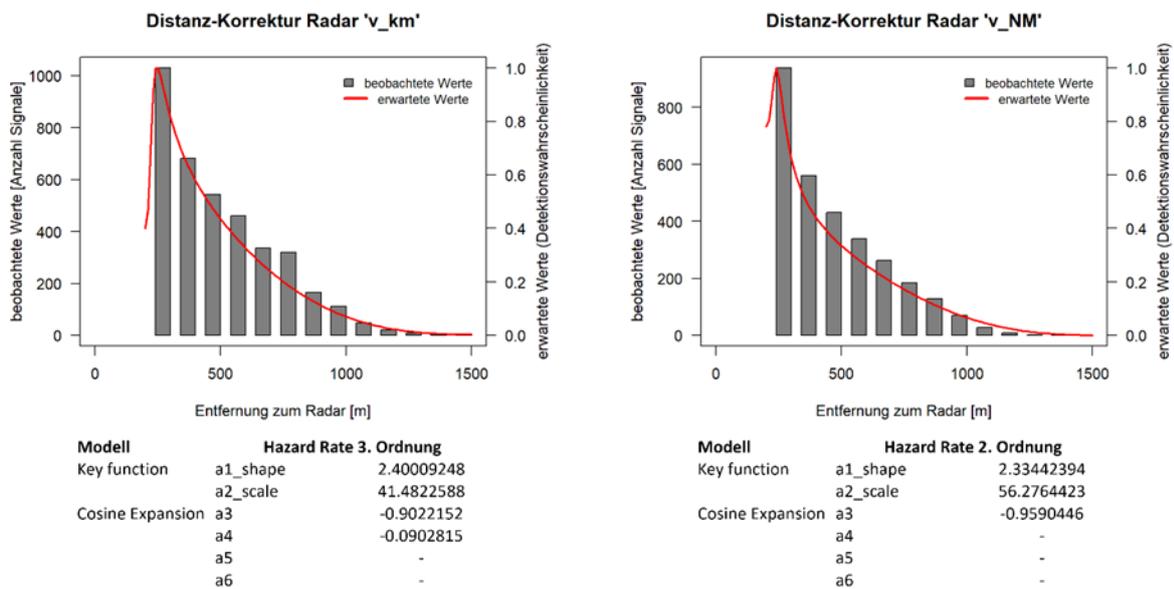


Abbildung 60: Distanzkorrektur Radar: per AIC ausgewählte Korrekturfunktionen und Modellparameter. Links: Korrekturfunktion für die Daten, die mit dem Radargerät mit Range 1,6 km erhoben wurden, rechts: Korrekturfunktion für die Daten des Radars mit Range 0,75 nm.

Mit den entsprechend korrigierten Daten wurde die stündliche Zugintensität getrennt sowohl für den unbeleuchteten als auch den beleuchteten Bereich als Migration Traffic Rate (MTR) berechnet. Dies ist die Anzahl der Signale, welche je Stunde eine virtuelle Strecke von 1.000 m überfliegen (SCHMALJOHANN et al. 2008), der Höhenbereich wurde auf 1.000 m bzw. auf 200 m begrenzt. Da im Gelände vorhandene Strukturen teils Störsignale hervorriefen, welche die Erkennung von Vogelsignalen lokal begrenzt verhinderten (Abbildung 61), wurden entsprechende Teilbereiche von der MTR-Berechnung ausgeschlossen und die Werte um die verminderte Fläche hochgerechnet.

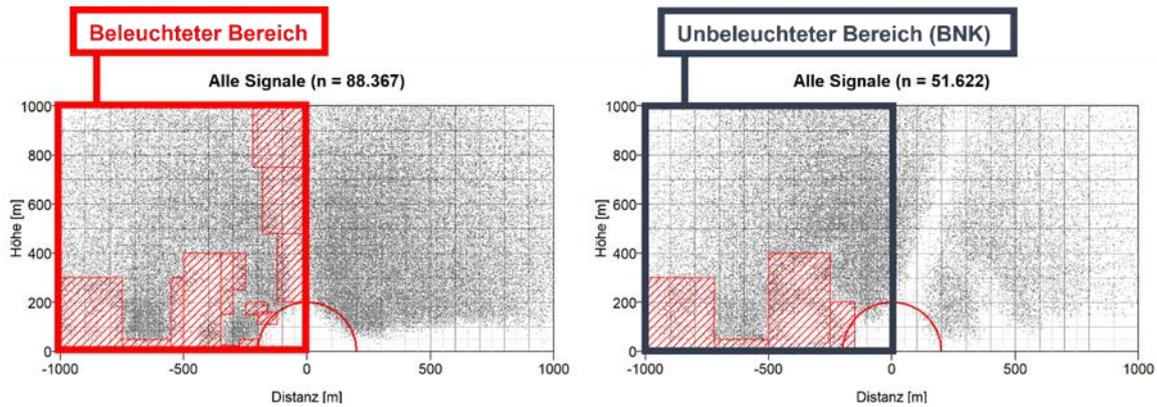


Abbildung 61: Kumulative Darstellung der nächtlich erfassten Vogelsignale (graue Punkte) im beleuchteten und unbeleuchteten Bereich. Rot schraffiert: Bereiche, in denen die Erfassung von Vögeln aufgrund von Störsignalen nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich war und die deshalb von der Berechnung der Zugraten (MTR) ausgeschlossen wurden.

Um einen möglichen kleinräumigen Einfluss der Nachtkennzeichnung auf den Vogelzug zu untersuchen, wurden außerdem die Summen korrigierter Signale in unmittelbarer Umgebung zweier WEA verglichen, von denen eine nachts dauerhaft befeuert war und die andere, dank BNK-Steuerung, nicht. Die beiden WEA befanden sich, in verschiedenen Richtungen, mit 787 m bzw. 752 m ähnlich weit vom Radarstandort entfernt; betrachtet wurde je ein Ausschnitt von 220 m Breite und 250 m Höhe um die WEA herum (Abbildung 62).

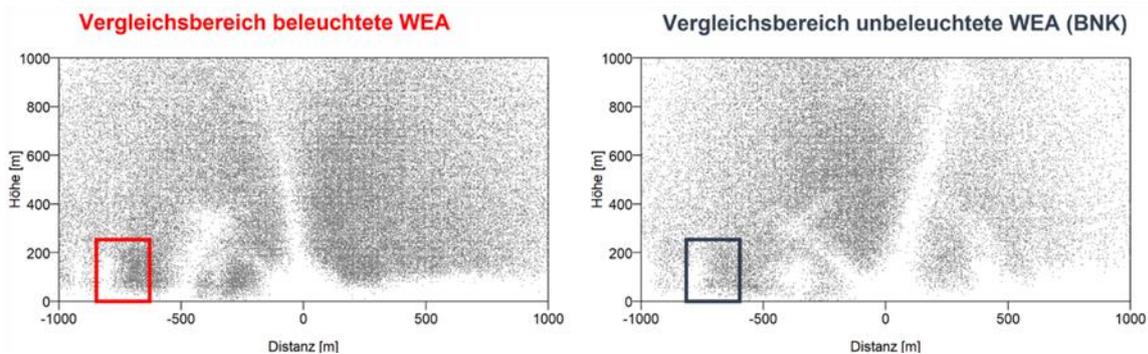


Abbildung 62: Kumulative Darstellung der nächtlich erfassten Vogelsignale und des verwendeten Nahbereichs einer dauerbeleuchteten und mit BNK ausgestatteten Windenergieanlage.

Die mit den beiden Radargeräten ermittelten Zugintensitäten waren nicht normalverteilt, sondern wiesen eine rechtschiefe Verteilung auf (Abbildung 63). Aufgrund einer relativ hohen Anzahl von Erfassungstunden mit einer MTR von 0 konnte auch durch eine log-Transformation keine Normalverteilung erzielt werden. Vergleiche der Zugintensität zwischen den Radargeräten bzw. den beleuchteten bzw. BNK-gesteuerten Anlagen wurden daher auf

Basis von Medianen durchgeführt. Zudem wurden nicht-parametrische Tests zur statistischen Prüfung der Unterschiede herangezogen.

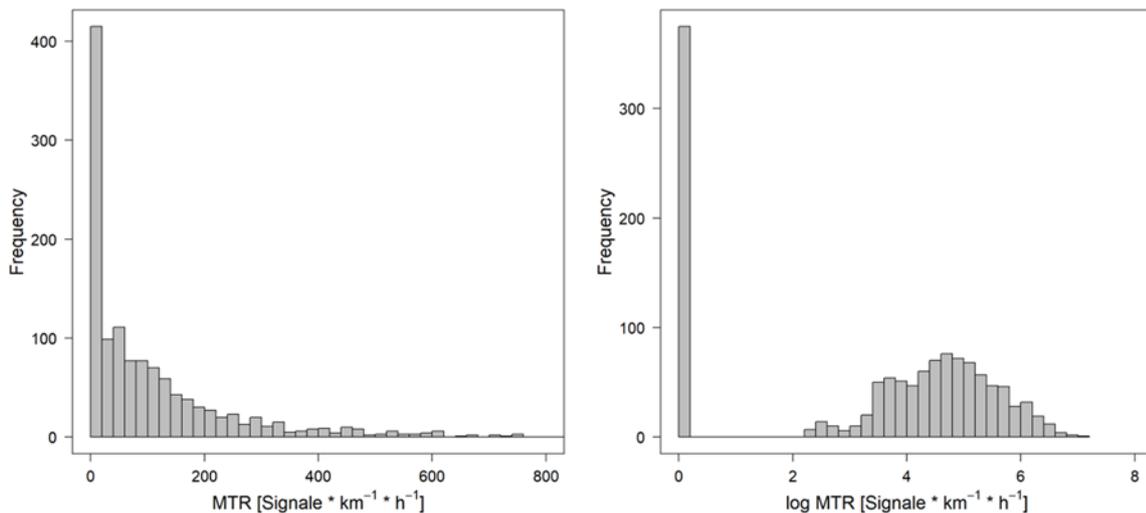


Abbildung 63: Histogramm der Zugintensität (MTR) bis in Höhe von 200 m (links) und der Logarithmus-transformierten Zugintensität ($\log+1$) bis 200 m Höhe (rechts). Es sind nur die Werte des Radars „v_NM“ dargestellt.

Für einen weiteren Analyseschritt wurden für den Vergleich zwischen beleuchteten und BNK-ausgestattetem Windpark die Differenz zwischen den stündlichen MTR-Werten der beiden Radargeräte berechnet. Hierbei wurde der MTR-Wert des Radars „v_km“ (nachfolgend vereinfacht „Radar 2“ genannt) vom MTR-Wert des Radars „v_NM“ (nachfolgend „Radar 1“) subtrahiert. Auch die statistische Prüfung der Differenzen erfolgte mit nicht-parametrischen Testverfahren.

Zur Visualisierung der hohen Streuung der Zugintensitäten und Differenzen wurde das 95 %-Konfidenzintervall gewählt. Diese wurden mit Hilfe des „bootstrap resampling“ Verfahren ermittelt. Hierzu wurden aus der jeweiligen Stichprobe 10.000 bootstrap Proben gezogen, für jede bootstrap Probe der Median berechnet, und das empirische 2,5 %-Quantil (unterer Konfidenzintervall) bzw. 97,5 %-Quantil (oberer Konfidenzintervall) zur Ermittlung des 95 %-Konfidenzintervalls herangezogen.

Zur Ermittlung potenzieller Effekte des Wetters auf die Anlockwirkung der Nachtkennzeichnung wurden Daten der Wetterstation Leck des Deutschen Wetterdienstes verwendet, die sich ca. 10 km nordwestlich des Erfassungsstandorts befindet. Windparkintern erhobene Wetterdaten konnten nicht genutzt werden, da hier nicht alle relevanten Wetterparameter erfasst wurden. Herangezogen wurden stündliche Daten des Bedeckungsgrades in Achteln, der Sichtweite [m], der relativen Luftfeuchtigkeit [%] sowie ein

Niederschlagsindikator (1; 0). Für die betrachteten Wetterparameter wurden jeweils für den Vogelzug günstige und ungünstige Verhältnisse definiert. Dabei musste berücksichtigt werden, dass die vorgenommene Kategorisierung zu einer ausreichend großen Stichprobe pro Wetterkategorie führte. Dementsprechend wurden gute vs. schlechte Sichtverhältnisse als Sichtweite >35 km bzw. <10 km, vollständige Bedeckung vs. „klarer“ Himmel als Bedeckungsgrad 8 bzw. ≤5, und geringe vs. hohe Luftfeuchtigkeit als ≥80 % bzw. ≤90 % definiert. Zur Definition von Niederschlag pro Stunde wurde die vom Deutschen Wetterdienst bereitgestellte binäre Variable Niederschlag ja/nein unabhängig von der Niederschlagsmenge verwendet.

Für alle Vergleiche zwischen dauerbeleuchtetem Windpark und BNK-gesteuertem Bereich wurden ausschließlich Zeiträume verwendet, in welchen die Nachtkennzeichnung im BNK-ausgestatteten Teil deaktiviert war. War die Nachtkennzeichnung für mehr als 5 min in einer Zeitstunde aktiviert, wurde diese von der Analyse ausgeschlossen. Die Zeiträume mit aktivierter Nachtkennzeichnung wurden jedoch in einem zusätzlichen Auswertungsschritt für einen Vorher-Nachher-Vergleich herangezogen. Hierfür wurden alle Perioden mit aktivierter Beleuchtung ausgewählt, die länger als 10 min und maximal 2 h andauerten. Für diese Zeitabschnitte sowie die jeweils 30-minütigen Zeiträume davor und danach wurde die mittlere Anzahl der korrigierten Signale als Maß für die Zugaktivität berechnet. Der statistische Vergleich der mittleren Anzahl Signale zwischen den Zeiträumen mit aktivierter Beleuchtung und den Zeitabschnitten vorher bzw. danach (mit jeweils deaktivierter Beleuchtung) wurde erneut mittels nicht-parametrischer Tests durchgeführt. Für alle Auswertungsschritte wurde die Statistiksoftware R 3.6.3 (R CORE TEAM 2020) verwendet.

6.8.4.3 Ergebnisse

6.8.4.3.1 Vergleich dauerbeleuchteter vs. BNK-gesteuerter Windpark

Zugintensitäten:

Die beiden zur Vogelerfassung eingesetzten Radargeräte unterschieden sich auch nach erfolgter Distanzkorrektur deutlich in der Anzahl der erfassten Vögel. Die zeitgleich mit den Radargeräten ermittelten Zugintensitäten divergierten sowohl im Mittel als auch im Median und für beide betrachteten Höhenbereiche (bis 1.000 m und bis 200 m Höhe) zwischen etwa 20 % und 120 % (Tabelle 5). Diese Unterschiede waren statistisch hochsignifikant (Tabelle 5). Für die weitere Betrachtung der Unterschiede zwischen dem dauerbeleuchteten und dem BNK-gesteuerten Windpark wurde daher das jeweils verwendete Radargerät berücksichtigt. Als

„Radar 1“ wird im Weiteren das Radargerät bezeichnet, das die im Vergleich höheren, als „Radar 2“ das die niedrigeren Zugintensitäten ergab.

Tabelle 5: Kennzahlen der mit den Radargeräten ermittelten Zugintensitäten (MTR) bis 1.000 m und bis 200 m Höhe. Zusätzlich ist das Ergebnis des statistischen Vergleichs zwischen den Radargeräten angegeben (Wilcoxon-Test).

Kennwert MTR (Signale*km ⁻¹ *h ⁻¹)	Höhenbereich	Radar 1	Radar 2	Wilcoxon Rangsummen-Test
Mittelwert	1000	1.612,9	1.093,9	
	200	109,0	62,4	
SD	1000	3.568,0	2.049,8	
	200	145,5	100,8	
Median	1000	427,0	357,9	p = 0,005
	200	58,6	27,2	p < 0,0001
Maximalwert	1000	47.415,1	16.862,2	
	200	1.175,0	1.236,3	

Die zu erwartende Datenverteilung bei einer angenommenen Anlockwirkung der WEA-Beleuchtung sowie eines Unterschieds zwischen den Radargeräten ist in Abbildung 64 (unten rechts) dargestellt. Der im gesamten Datensatz festgestellte Unterschied der Zugintensität zwischen den Radargeräten ($R1 > R2$) würde bei einer Anlockwirkung in jenen Zeiträumen zunehmen, in welchen das Radar 1 im dauerbeleuchteten Windpark installiert war ($R1 \gg R2$). In Zeiträumen, in welchen Radar 1 den BNK-gesteuerten Windpark erfasste, wäre hingegen kein oder nur ein geringer Unterschied zwischen den Radargeräten festzustellen ($R1 \geq R2$).

Für die Zugintensitäten im Höhenbereich bis 1.000 m und bis 200 m wurde jedoch ein von dieser Hypothese abweichendes Muster festgestellt. Hier konnte kein Unterschied zwischen der Situation insgesamt ($R1 > R2$) und den Zeiträumen gefunden werden, in denen R1 im dauerbeleuchteten bzw. BNK-gesteuerten Bereich erfasste (Abbildung 64, oben). Bei der Betrachtung der Anzahl Vogelsignale im Nahbereich einer beleuchteten vs. BNK-gesteuerten Turbine entsprach die festgestellte Verteilung der Daten hingegen der erwarteten Verteilung (Abbildung 64 unten links). Hier war der Unterschied zwischen Radar 1 und Radar 2 wesentlich größer, wenn Radar 1 im dauerbeleuchteten Windpark erfasste. In den Zeiträumen, in denen Radar 1 im BNK-gesteuerten Windpark installiert war, fiel der Unterschied wesentlich geringer aus.

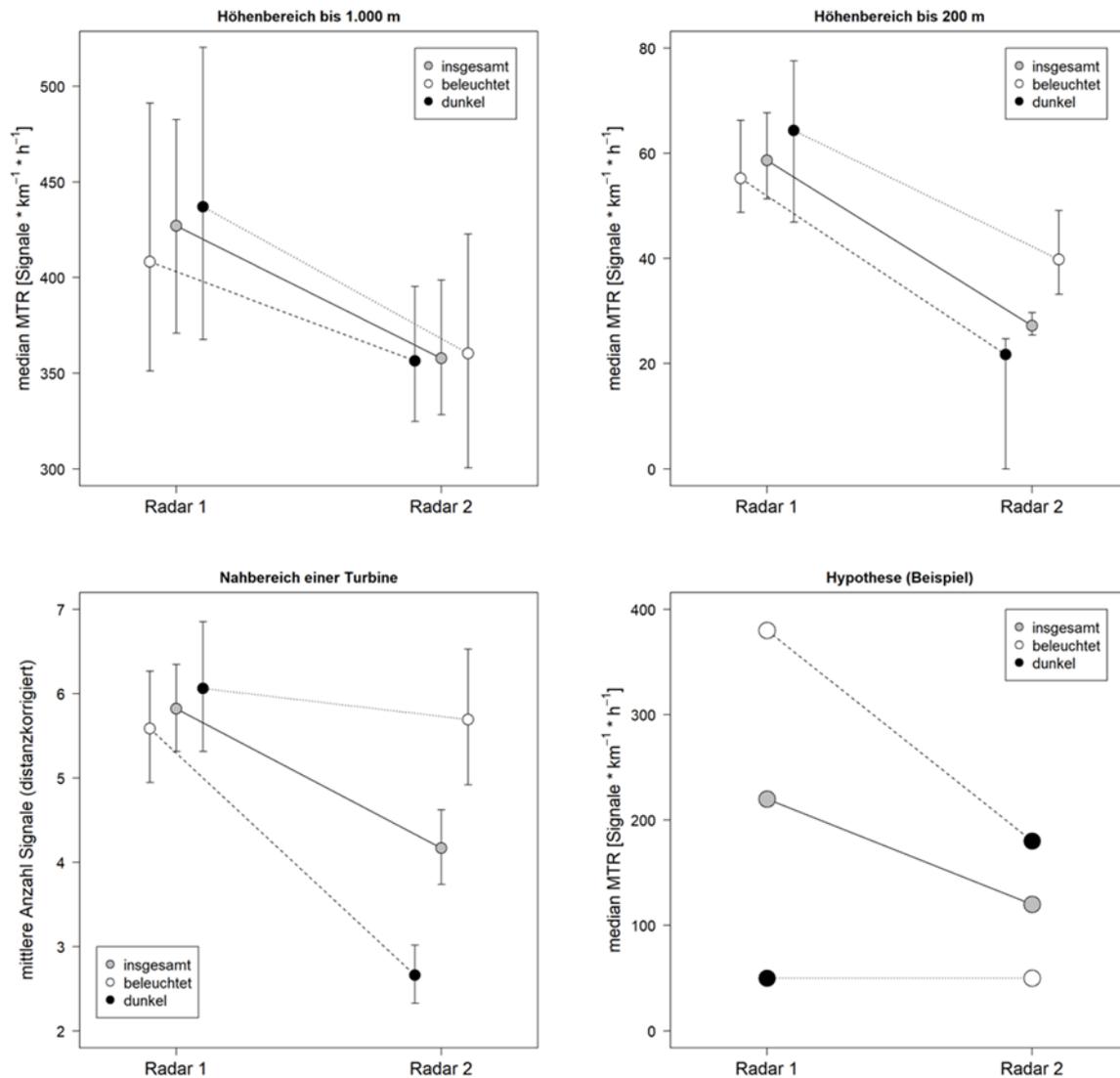


Abbildung 64: Vergleich der Zugintensitäten/Anzahl Vogelsignale zwischen den Radargeräten und dem dauerbeleuchteten („beleuchtet“) bzw. BNK-gesteuerten Windpark („dunkel“). Dargestellt sind die medianen Zugintensitäten im Höhenbereich bis 1.000 m (oben links) sowie im Höhenbereich bis 200 m (oben rechts); zudem die mittlere Anzahl Vogelsignale im Nahbereich einer Turbine (unten links) sowie eine Illustration einer erwarteten Datenverteilung bei einer bestehenden Anlockwirkung (unten rechts). Fehlerbalken geben den 95%-Konfidenzintervall an. Für weitere Details siehe Material & Methoden.

Differenz zwischen Radargeräten:

Ein ähnliches Bild ergab auch die direkte Analyse der Differenz der Zugintensität bzw. der Anzahl der Vogelsignale zwischen den Radargeräten (Abbildung 65). Beim betrachteten Höhenbereich bis 1.000 m war die Differenz auch hier unabhängig vom Beleuchtungsregime (dauerbeleuchtet vs. BNK-gesteuert). Sowohl ein Kruskal-Wallis-Test der Datenverteilung insgesamt als auch eine Überprüfung der Zeiträume, in denen Radar 1 den dauerbeleuchteten Windpark erfasste (nachfolgend „Radar 1 beleuchtet“ genannt) und den Perioden, in denen

Radar 1 im BNK-gesteuerten Windpark installiert war (nachfolgend „Radar 1 dunkel“ genannt), ergab keine statistisch signifikanten Unterschiede (Tabelle 6).

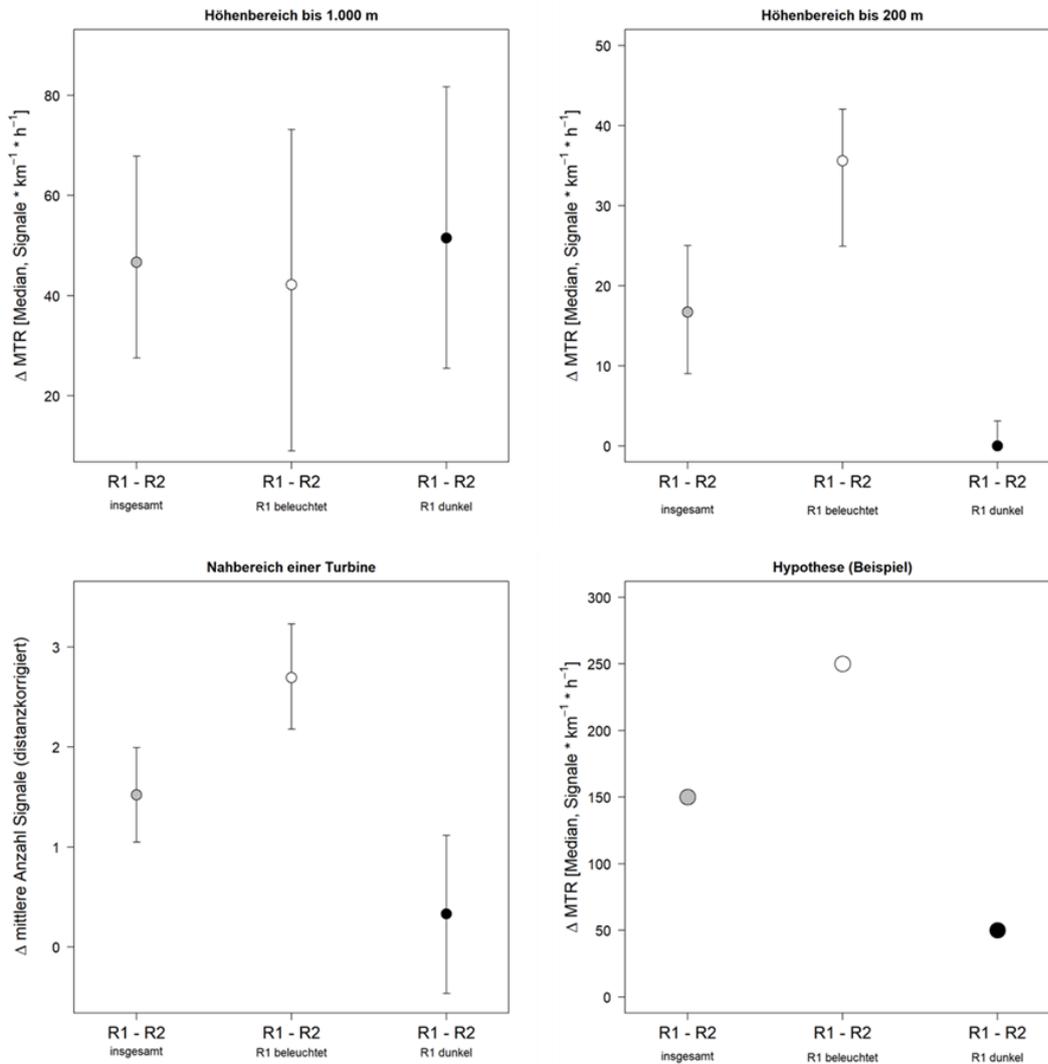


Abbildung 65: Vergleich der Differenz der Zugintensitäten/Anzahl Vogelsignale zwischen den Radargeräten im gesamten Untersuchungszeitraum („insgesamt“) sowie in den Zeiträumen, in welchen das Radar 1 im dauerbeleuchteten und Radar 2 im BNK-gesteuerten Windpark installiert waren („R1 beleuchtet“) und dem umgekehrten Fall („R1 dunkel“). Dargestellt sind die Differenzen der medianen Zugintensitäten im Höhenbereich bis 1.000 m (oben links) sowie im Höhenbereich bis 200 m (oben rechts); zudem die Differenz der mittleren Anzahl Vogelsignale im Nahbereich einer Turbine (unten links) sowie eine Illustration einer erwarteten Datenverteilung bei einer bestehenden Anlockwirkung (unten rechts). Fehlerbalken geben den 95%-Konfidenzintervall an. Für weitere Details siehe Material & Methoden.

Die Differenz der Zugintensitäten im Höhenbereich bis 200 m sowie die Betrachtung des Nahbereichs einer Turbine entsprach hingegen dem bei einer Anlockwirkung zu erwartenden Muster. Befand sich Radar 1 im dauerbeleuchteten Windpark, war die Differenz zwischen den

Radargeräten signifikant höher als bei „Radar 1 dunkel“ (Tabelle 6 sowie Abbildung 65 oben rechts und unten links).

Tabelle 6: Ergebnisse des statistischen Vergleichs der Differenzen der Zugintensitäten (MTR) zwischen den Radargeräten und Beleuchtungsregimes.

Variable	Vergleich	Test	Teststatistik	p-Wert
Δ Zugintensität bis 1.000 m Höhe	insgesamt	Kruskal-Wallis (χ^2)	0,02	p = 0,99
	R1 beleuchtet vs. R1 dunkel	Wilcoxon (W)	188528	p = 0,87
Δ Zugintensität bis 200 m Höhe	insgesamt	Kruskal-Wallis (χ^2)	34,6	p < 0,0001
	R1 beleuchtet vs. R1 dunkel	Wilcoxon (W)	223872	p < 0,0001
Δ Anzahl Signale Nahbereich	insgesamt	Kruskal-Wallis (χ^2)	25,5	p < 0,0001
	R1 beleuchtet vs. R1 dunkel	Wilcoxon (W)	218349	p < 0,0001

Auch bei einer Betrachtung verschiedener Wetterbedingungen konnte bezüglich der MTR-Differenz im Höhenbereich bis 1.000 m kein Unterschied zwischen „Radar 1 beleuchtet“ und „Radar 1 dunkel“ (Abbildung 66) festgestellt werden. Weder bei schlechter Sicht noch bei hoher relativer Luftfeuchtigkeit, bedecktem Himmel oder bei Niederschlag war die Differenz zwischen den Radargeräten bei „Radar 1 beleuchtet“ höher als bei „Radar 1 dunkel“. Ebenso war kein systematischer Unterschied zwischen guten und schlechten Wetterbedingungen im Verteilungsmuster zu erkennen (Abbildung 66).

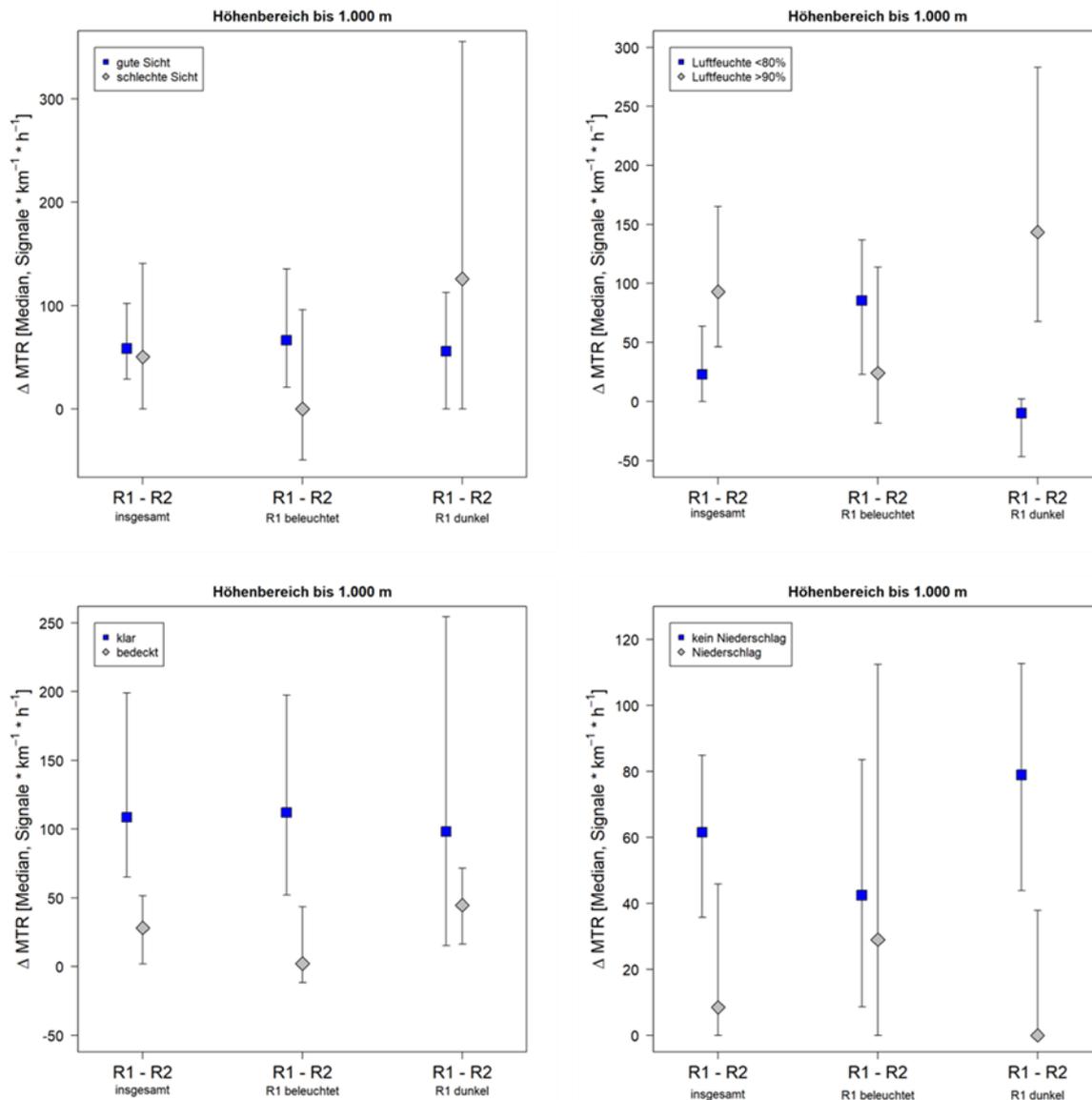


Abbildung 66: Vergleich der Differenz der medianen Zugintensitäten bis 1.000 m Höhe zwischen den Radargeräten und verschiedenen Beleuchtungsregimes für verschiedene Wetterbedingungen. Dargestellt sind die Differenzen bei guter vs. schlechter Sicht (oben links), hoher (>90%) vs. niedriger (<80%) Luftfeuchtigkeit (oben rechts), klarem vs. bedecktem Himmel (unten links) sowie Zeiträumen mit vs. ohne Niederschlag (unten rechts). Fehlerbalken geben den 95%-Konfidenzintervall an. Für weitere Details siehe Abbildung 65 und Material & Methoden.

Im Höhenbereich bis 200 m wurde insbesondere bei guten Wetterbedingungen (gute Sicht, geringe Luftfeuchtigkeit, geringe Bedeckung, kein Niederschlag) das insgesamt festgestellte Muster von größeren MTR-Differenzen bei „Radar 1 beleuchtet“ bestätigt. Auch bei ungünstigen Wetterbedingungen war die gleiche Tendenz zu erkennen, jedoch bei sehr hoher Variabilität (95% Konfidenzintervalle) der Daten. Ein Unterschied in Abhängigkeit der Wetterbedingungen war nicht zu verzeichnen (Abbildung 67).

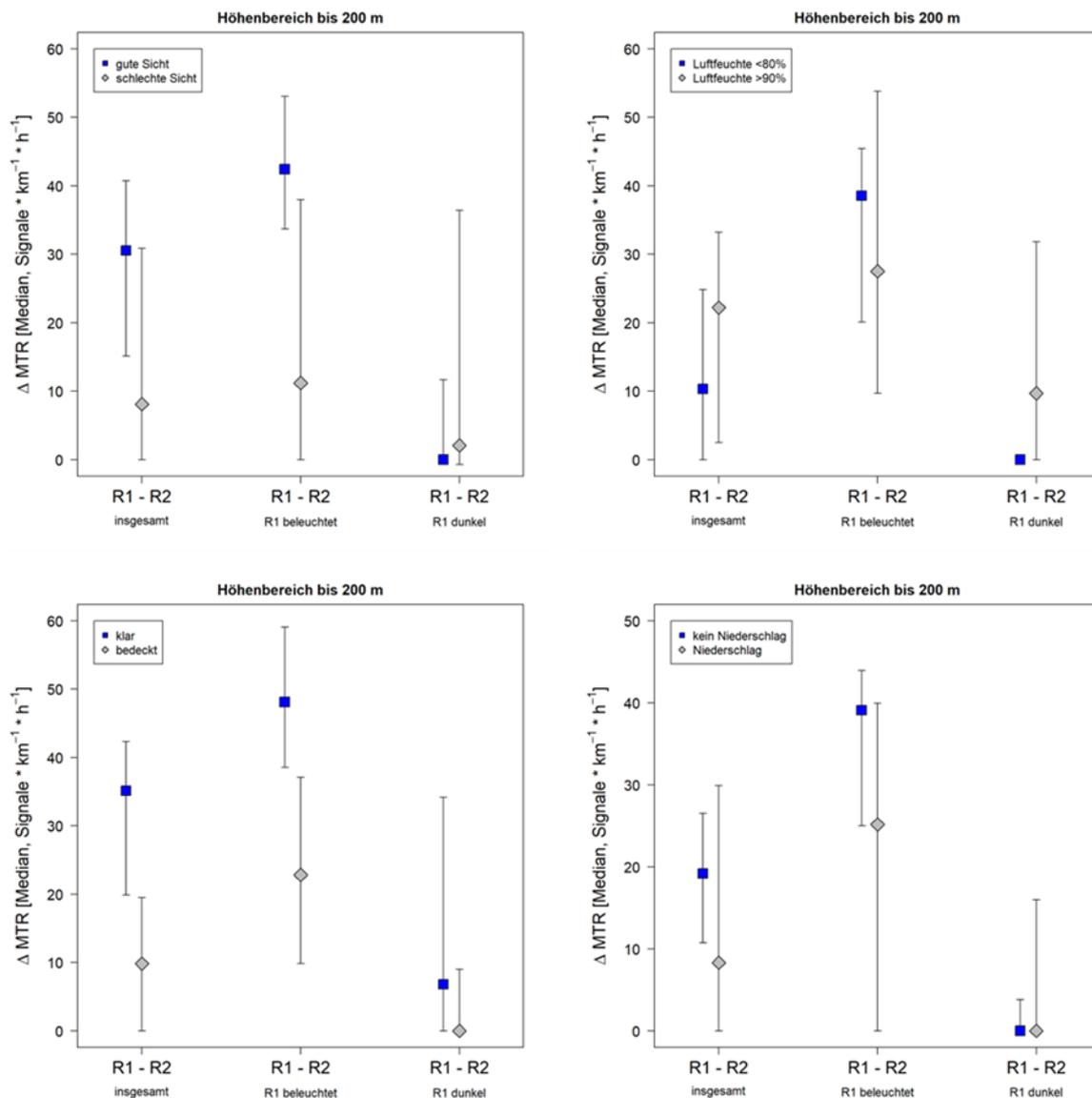


Abbildung 67: Vergleich der Differenz der medianen Zugintensitäten bis 200 m Höhe zwischen den Radargeräten und verschiedenen Beleuchtungsregimes für verschiedene Wetterbedingungen. Dargestellt sind die Differenzen bei guter vs. schlechter Sicht (oben links), hoher (>90%) vs. niedriger (<80%) Luftfeuchtigkeit (oben rechts), klarem vs. bedecktem Himmel (unten links) sowie Zeiträumen mit vs. ohne Niederschlag (unten rechts). Fehlerbalken geben den 95%-Konfidenzintervall an. Für weitere Details siehe Abbildung 65 und Material & Methoden.

Auch die Analyse der Vogelsignale im Nahbereich einer Turbine bestätigte eine höhere Differenz bei „Radar 1 beleuchtet“ im Vergleich zu „Radar 1 dunkel“, ein Unterschied zwischen ungünstigen und guten Wetterbedingungen bestand aber bei keinem der betrachteten Wetterparameter (Abbildung 68).

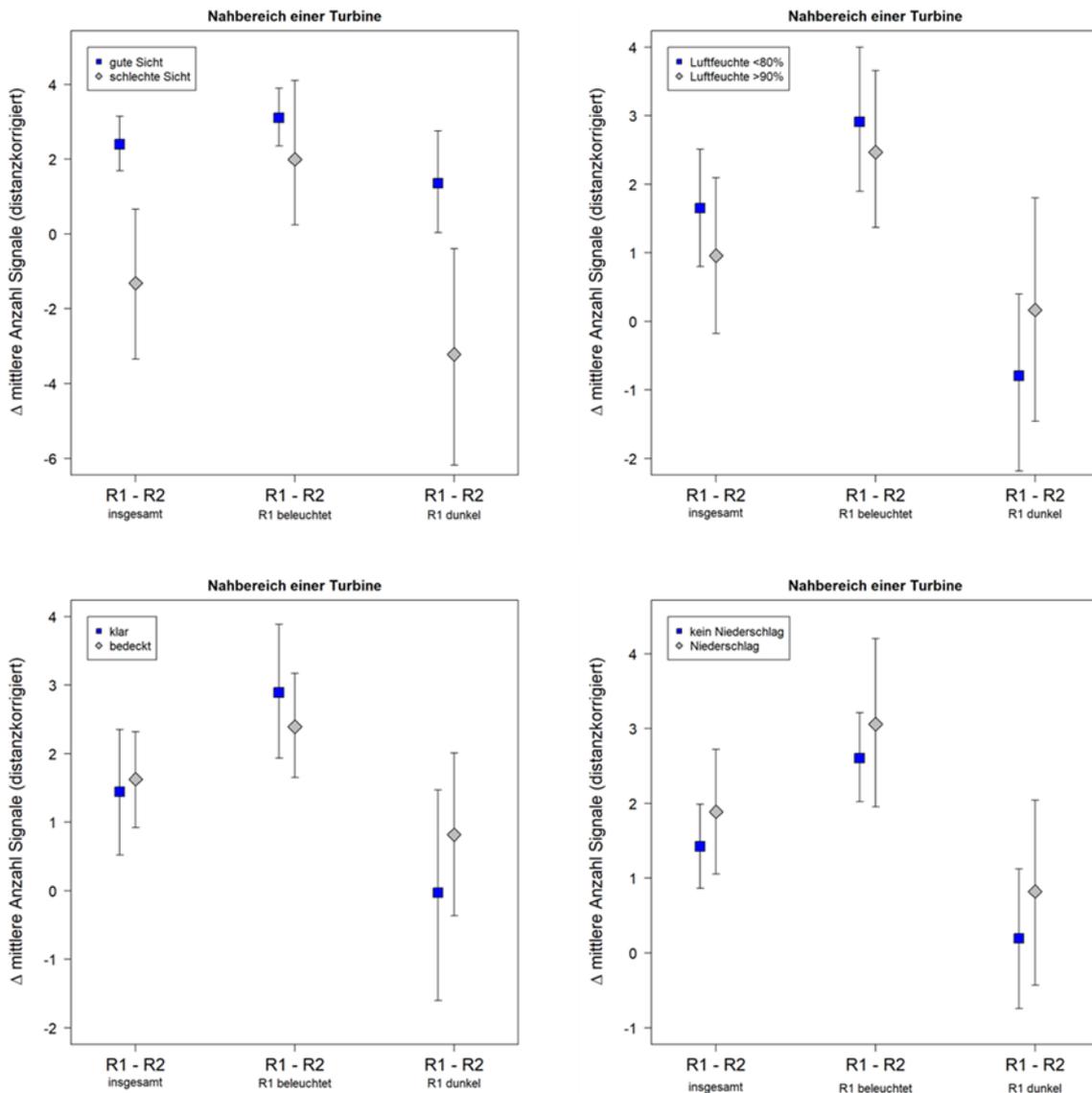


Abbildung 68: Vergleich der Differenz der mittlere Anzahl Vogelsignale im Nahbereich einer Turbine zwischen den Radargeräten und verschiedenen Beleuchtungsregimes für verschiedene Wetterbedingungen. Dargestellt sind die Differenzen bei guter vs. schlechter Sicht (oben links), hoher (>90%) vs. niedriger (<80%) Luftfeuchtigkeit (oben rechts), klarem vs. bedecktem Himmel (unten links) sowie Zeiträumen mit vs. ohne Niederschlag (unten rechts). Fehlerbalken geben den 95%-Konfidenzintervall an. Für weitere Details siehe Abbildung 65 und Material & Methoden.

6.8.4.3.2 Vergleich von Zeiträumen aktivierter vs. deaktivierter Beleuchtung in BNK-gesteuertem Windpark

Der Vergleich der Zugintensitäten während Zeiträumen, in denen die BNK-gesteuerten Anlagen beleuchtet waren mit unbeleuchteten Zeitperioden unmittelbar vorher und nachher, ergab keine eindeutigen Ergebnisse. Sowohl bei Betrachtung der Anzahl Signale bis 1.000 m Höhe als auch bis 200 m war eine sehr hohe Variabilität zu verzeichnen (Abbildung 69, große 95%-Konfidenzintervalle). Zwar lag im Höhenbereich bis 200 m die mittlere Anzahl

Vogelsignale während der beleuchteten Phasen im Mittel höher als in den Zeitperioden davor und danach, aufgrund der hohen Varianz waren diese Unterschiede jedoch statistisch nicht signifikant (Tabelle 7).

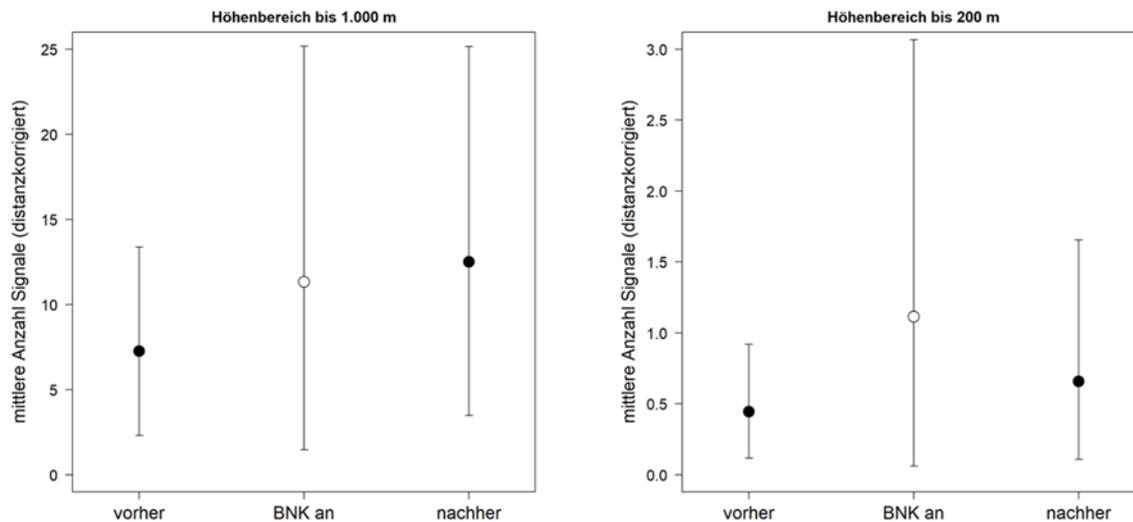


Abbildung 69: Vergleich der mittleren Anzahl Vogelsignale in Zeiträumen, in welchen die BNK-Anlagen beleuchtet wurden sowie jeweils eine halbe Stunde vorher und nachher. Dargestellt ist der Höhenbereich bis 1.000 m (links) und bis 200 m (rechts). Fehlerbalken geben den 95%-Konfidenzintervall an.

Tabelle 7: Ergebnisse des statistischen Vergleichs der Differenzen der mittleren Anzahl Signale, in welchen die BNK-Anlagen beleuchtet wurden sowie jeweils eine halbe Stunde vorher und nachher. Angegeben sind die Ergebnisse für den Höhenbereich bis 1.000 m und 200 m.

Variable	Vergleich	Test	Teststatistik	p-Wert
Mittlere Anzahl Signale bis 1.000 m Höhe	BNK vs. vorher	Wilcoxon (W)	81	p = 0,38
	BNK vs. nachher	Wilcoxon (W)	96	p = 0,51
Mittlere Anzahl Signale bis 200 m Höhe	BNK vs. vorher	Wilcoxon (W)	34	p = 0,96
	BNK vs. nachher	Wilcoxon (W)	223872	p = 0,62

6.8.4.4 Diskussion

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie weisen darauf hin, dass die dauerhafte Nachtkennzeichnung von Windenergieanlagen im Onshore-Bereich eine Anlockwirkung auf nachts ziehende Vögel ausübt. Ein solcher Effekt scheint dabei auf den unteren Höhenbereich bzw. auf die nähere Umgebung der Anlagen begrenzt zu sein. Eine Abhängigkeit der Anziehungswirkung von den Wetterbedingungen konnte nicht festgestellt werden.

Mit insgesamt 1.307 parallel im dauerbeleuchteten bzw. BNK-gesteuerten Teil des Windparks aufgenommenen Nachtstunden umfasste der für die Analysen zur Verfügung stehende Datensatz eine ausreichende Stichprobengröße. Aufgetretene Ausfallzeiten der einzelnen Radargeräte aufgrund von technischen Betriebsstörungen sowie von Stromausfall konnten somit durch die lange Gesamtlaufzeit der Erfassungen weitgehend ausgeglichen werden. Des Weiteren wurde im Untersuchungszeitraum die Nachtkennzeichnung durch die BNK-Steuerung nur in kurzen Zeiträumen angeschaltet. Insgesamt belief sich der Gesamtzeitraum mit angeschalteter Nachtkennzeichnung im mit BNK ausgestatteten Windpark auf 6,4 %. Diese Perioden wurden von der Analyse ausgeschlossen, reduzierten den Datensatz aber nicht wesentlich.

Die Erfassung des Vogelzugs in zwei separaten Windparks machte den Einsatz zweier Radargeräte erforderlich. Die verwendeten Radargeräte des Typs JRC JMA-5322 werden üblicherweise für die marine Navigation eingesetzt. Mit einer Ausgangsleistung von 25 kW und einer Sendefrequenz von 9,4 GHz sind sie, wie marine Navigationsgeräte anderer Hersteller, für die Erfassung von Vögeln geeignet (HÜPPOP et al. 2006; WELCKER et al. 2017; WELCKER 2021) und werden standardmäßig zum Zugvogelmonitoring im Rahmen von Genehmigungsverfahren von Offshore-Windparks eingesetzt (BSH 2013). Ein Nachteil dieser Geräte ist jedoch, dass sie trotz standardisierter Einstellungen nicht notwendigerweise die gleiche Detektionswahrscheinlichkeit von Vögeln aufweisen. Da dies bereits im Vorfeld bekannt war, wurde ein Versuchsaufbau mit alternierendem Einsatz der verschiedenen Radare im beleuchteten bzw. BNK-gesteuerten Windpark gewählt. Ein solches Studiendesign erlaubt eine Trennung der radarspezifischen Effekte von Auswirkungen der Beleuchtung auf Vögel.

Die Ergebnisse zeigten einen ausgeprägten Unterschied zwischen den mit den beiden Radargeräten ermittelten Zugintensitäten. Die Deutlichkeit dieses Unterschieds weicht von Ergebnissen vorheriger Studien ab, die generell eine relativ hohe Übereinstimmung von marinen Navigationsradaren unterschiedlicher Hersteller untereinander und mit spezialisierten Vogelerfassungsradaren festgestellt haben (WENDELN et al. 2007; BELLEBAUM et al. 2010; WELCKER 2021). Die Ursache für die abweichenden Ergebnisse dieser Studie ist nicht

bekannt. Sie liegt vermutlich in der internen Datenprozessierung der Radargeräte begründet, da die Aufzeichnung und Auswertung der Screenshots beider Radargeräte identisch behandelt wurden. Die Höhe des festgestellten Unterschieds (je nach betrachtetem Parameter zwischen 20 % und 120 %) machte es notwendig, das erfassende Radargerät bei der Analyse vollumfänglich zu berücksichtigen.

Eine solche, für die Datenauswertung ungünstige Situation kann in zukünftigen Studien vermieden werden, indem für die Vogelerfassung spezialisierte Radargeräte zum Einsatz kommen. Dies betrifft insbesondere auch die angestrebte Untersuchung zum Effekt der BNK in Offshore-Windparks (vgl. Kap 6.8.1 und Kap. 6.8.2). Aufgrund der in diesen Geräten speziell auf die Vogelerkennung ausgerichtete Datenverarbeitung ist hier nicht mit gerätespezifischen Unterschieden zu rechnen. Zudem besteht bei der Wahl bestimmter Gerätetypen die Möglichkeit, zwischen verschiedenen Artgruppen zu unterscheiden. Dies ist mit den in der vorliegenden Studie verwendeten Radargeräten nicht möglich. Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich daher auf den Nachtzug insgesamt. Inwiefern verschiedene am Nachtzug beteiligte Artgruppen unterschiedlich auf die Nachtkennzeichnung von Windenergieanlagen reagieren, kann somit nicht beurteilt werden. Da der Nachtzug jedoch von der Gruppe der Singvögel anzahlmäßig stark dominiert wird – Anteile von etwa 90 % sind wahrscheinlich (SCHULZ et al. 2013, 2014) – spiegeln die Ergebnisse der vorliegenden Studie vermutlich primär das Verhalten dieser Artgruppe wider.

Die Ergebnisse lieferten keine Hinweise auf eine großräumige Anlockwirkung durch die Nachtkennzeichnung. Bei einer Betrachtung der MTR-Werte bzw. der Differenz zwischen den Radargeräten bis in die Höhe von 1.000 m waren bei einer hohen Variation keine Unterschiede zwischen den Zeiträumen zu erkennen, in welchen das Radar 1 im dauerbeleuchteten bzw. im BNK-gesteuerten Teilbereich erfasste. Generell wäre beim angewendeten Versuchsaufbau bei einer bestehenden Anlockwirkung zu erwarten gewesen, dass der festgestellte Unterschied zwischen den Radargeräten zunimmt, wenn Radar 1 im dauerbeleuchteten Bereich erfasst und abnimmt, wenn Radar 1 im BNK-gesteuerten Teil des Windparks installiert ist. Das war bei der Zugintensität bis 1.000 m Höhe nicht der Fall. Rückschlüsse aus eventuell bestehenden Unterschieden in der Zugintensität lediglich eines Radargeräts zwischen den verschiedenen Beleuchtungsregimes können nicht gezogen werden, da der Vogelzug eine hohe zeitliche Variabilität aufweist. Solche Unterschiede könnten somit auf die Beleuchtung oder die temporäre Variabilität des Vogelzugs zurückzuführen sein.

Bei der Zugintensität bis in 200 m Höhe sowie insbesondere bei der mittleren Anzahl der Vogelsignale im Nahbereich einer Turbine entsprachen die festgestellten Verteilungsmuster bzw. Differenzen zwischen den Radargeräten hingegen den Erwartungen einer

Anlockwirkung. Hier war die Differenz in den Zeiträumen signifikant höher, in welchen Radar 1 im dauerbeleuchteten Bereich erfasste. Die medianen Zugintensitäten bis 200 m Höhe lagen im dauerbeleuchteten Teil dabei etwa 10 % höher als aufgrund des generellen Unterschieds zwischen den Radargeräten zu erwarten gewesen wäre. Die mittlere Anzahl Vogelsignale lag dementsprechend im dauerbeleuchteten Bereich etwa 25 % höher als im BNK-gesteuerten. Diese Daten deuten auf eine Zunahme der Attraktionswirkung mit Abnahme der Entfernung hin.

Dass nachts ziehende Vögel von künstlichen Lichtquellen angezogen werden können und mit beleuchteten Strukturen wie Gebäuden, Leuchttürmen oder Offshore-Plattformen kollidieren, ist seit langem bekannt (LONGCORE et al. 2008; BALLASUS et al. 2009). Dabei gehen mehrere Autoren davon aus, dass weißes Licht eine stärkere Wirkung auf Vögel aufweist als andere Lichtfarben. Ebenso wird ununterbrochener Dauerbeleuchtung ein größerer Effekt zugewiesen als unterbrochener Blink- oder stroboskopischer Beleuchtung (AVERY et al. 1976; BALLASUS et al. 2009; GEHRING et al. 2009). Insbesondere hinsichtlich der Wirkung von rotem Licht, wie sie bei der Nachtkennzeichnung im untersuchten Windpark vorlag, liegen jedoch unterschiedliche Studienergebnisse vor. So fanden beispielsweise EVANS et al. (2007) und REBKE et al. (2019) keine Hinweise auf eine anziehende Wirkung von rotem Dauer- oder Blinklicht auf Vögel. GAUTHREAUX JR & BELSER (2006) hingegen beschrieben eine Zunahme der Vogelaktivität an mit rotem Dauer- und Blinklicht beleuchteten Gebäuden, AVERY et al. (1976) und LONGCORE et al. (2008) zeigten eine Abnahme von Vogelkollisionen, nachdem an Fernsehtürmen in den USA rote Beleuchtung durch weißes stroboskopisches Licht ersetzt wurde. Zudem konnte die Mortalität an Flutlichtern durch Rotlichtfilter deutlich gesenkt werden (siehe BALLASUS et al. 2009).

Hinsichtlich der Auswirkungen der rot-blinkenden Nachtkennzeichnung von Windenergieanlagen liegt bislang lediglich eine Publikation von KERLINGER et al. (2010) vor. In dieser nordamerikanischen Studie wurde kein Unterschied in der Kollisionsrate von Vögeln an Windenergieanlagen mit roter Blink- oder Dauerbeleuchtung im Vergleich zu unbeleuchteten Anlagen gefunden. Ob eine Anlockwirkung von der Nachtkennzeichnung ausging, wurde in dieser Studie nicht untersucht. Weitere Erkenntnisse, insbesondere aus Europa, liegen bis dato nicht vor.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie weisen auf eine Anlockwirkung der rotblinkenden Nachtkennzeichnung auf Nachtzieher hin. Inwiefern diese Anlockung das Kollisionsrisiko der Vögel erhöht, kann anhand der vorliegenden Daten jedoch nicht beurteilt werden. Es wird generell davon ausgegangen, dass die Wetterbedingungen einen großen Einfluss auf die Anziehungswirkung künstlicher Lichtquellen auf Vögel haben. Insbesondere unter schlechten

Sichtbedingungen (Nebel, Niesel oder niedrige vollständige Wolkendecke), welche die Orientierungsfähigkeit der Vögel beeinträchtigen, wird eine verstärkte Anlockwirkung angenommen (LARKIN 2000; BALLASUS et al. 2009; REBKE et al. 2019; WEISSHAUPT et al. 2022). Solchen Bedingungen wird in der Folge ein entsprechend erhöhtes Kollisionsrisiko an den beleuchteten Strukturen zugewiesen.

Überraschenderweise zeigten die Daten der vorliegenden Studie keine Hinweise auf einen Einfluss der Wetterbedingungen auf die Anlockwirkung der Nachtkennzeichnung. Die Differenzen der MTR bis 200 m Höhe bzw. die Anzahl Signale im Nahbereich einer Turbine unterschieden sich nicht in Abhängigkeit der Sichtweite, des Bedeckungsgrads, der relativen Luftfeuchtigkeit oder des Auftretens von Niederschlag. Diese Ergebnisse stehen somit im Widerspruch zu der Annahme, dass Lichtanziehung vornehmlich unter ungünstigen Wetterbedingungen stattfindet. Bei der Interpretation der Daten ist allerdings zu berücksichtigen, dass der Datensatz eine relativ geringe Anzahl Stunden enthielt, in welchen sowohl Aufzeichnungen beider Radargeräte als auch schlechte Wetterbedingungen vorlagen. Erschwerend kommt hinzu, dass aufgrund der notwendigen Berücksichtigung des jeweils eingesetzten Radargeräts sowie der insgesamt hohen zeitlichen Variabilität des Vogelzugaufkommens eine große Stichprobe benötigt wurde, um potenzielle Effekte des Wetters aufzeigen zu können.

Aus diesen Gründen musste die Definition von „guten“ bzw. „schlechten“ Bedingungen hinsichtlich der Sichtverhältnisse, der Luftfeuchtigkeit oder des Bedeckungsgrads relativ weit gefasst werden. So musste beispielsweise „schlechte Sicht“ ab einer Sichtweite von <10.000 m definiert werden, um eine ausreichend große Stichprobe zu erhalten. Für eine stringente Überprüfung des Effekts der Sichtverhältnisse wäre jedoch eine Abgrenzung von schlechter Sicht bei einer Sichtweite von <500 m oder <1.000 m wünschenswert gewesen.

Während aufgrund dieser Einschränkungen eine Verstärkung der Anlockwirkung durch ungünstige Wetterbedingungen nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann, zeigen die Ergebnisse deutlich, dass eine anziehende Wirkung der Nachtkennzeichnung auf Vögel auch bei guten Wetterbedingungen besteht. Weitere Studien sind notwendig, um die Frage zu klären, ob eine solche Anlockwirkung unter guten Bedingungen Auswirkungen auf das Kollisionsrisiko der Vögel hat. Da Hinweise vorliegen, dass das Kollisionsrisiko von Nachtziehern nicht direkt von der Anzahl der Vögel bzw. der Zugintensität abhängt, sondern auch hier die Wetterbedingungen eine wesentliche Rolle spielen (AVERY et al. 1977; MÜLLER 1981; AUMÜLLER et al. 2011; HÜPPPOP et al. 2016), ist eine Erhöhung des Kollisionsrisikos durch eine Anlockwirkung bei gutem Wetter nicht zwangsläufig gegeben. So wurde wiederholt festgestellt, dass Nachtzieher, deren Zugaktivität sich stark auf Zeiträume mit günstigen

Wetterbedingungen konzentriert (ERNI et al. 2002; VAN BELLE et al. 2007; VAN DOREN & HORTON 2018; WELCKER & VILELA 2019), im Onshore-Bereich nur ein vergleichsweise geringes Kollisionsrisiko an Windenergieanlagen aufweisen (KRIJGSVELD et al. 2009; GRÜNKORN et al. 2016; WELCKER et al. 2017). Dies könnte auch erklären, warum bislang noch keine Effekte der Nachtkennzeichnung auf die Anzahl von Kollisionsopfern gefunden werden konnte (KERLINGER et al. 2010).

Inwiefern sich die Situation an Offshore-Windparks davon unterscheidet, ist weiterhin unklar. Da Nachtzieher, insbesondere Singvögel, im Offshore-Bereich ihren Zug nicht ohne Weiteres bei sich verschlechternden Wetterbedingungen unterbrechen können, können hier häufiger Situationen auftreten, in denen erhöhte Zugaktivität auch bei ungünstigem Wetter auftritt. Daher könnte einer Anlockwirkung durch die Nachtkennzeichnung bei schlechten Wetterverhältnissen im Offshore-Bereich eine größere Bedeutung hinsichtlich des Kollisionsrisikos zukommen. So liegen mehrere Studien vor, welche eine starke Anlockwirkung von Lichtquellen auf See bei schlechter Sicht oder anderer widriger Wetterbedingungen beschreiben und das damit verbundene Kollisionsrisiko an den beleuchteten Strukturen dokumentieren (MÜLLER 1981; AUMÜLLER et al. 2011; HÜPPOP et al. 2016).

6.8.4.5 Fazit

Die in dieser Studie durchgeführten, zeitgleichen Radarerfassungen des nächtlichen Vogelzugs in einem Windpark mit dauerhafter Nachtkennzeichnung und einem mit einer BNK ausgestatteten Bereich zeigten eine Anlockwirkung der Beleuchtung auf nachts ziehende Vögel. Diese wurde primär im Nahbereich der Turbinen festgestellt. Es ergaben sich keine Hinweise auf eine Wetterabhängigkeit der Anlockwirkung. Auf Basis der vorliegenden Daten können keine Rückschlüsse hinsichtlich der Auswirkungen des Anziehungseffekts auf das Kollisionsrisiko der Vögel gezogen werden. Ebenso sind weitere Studien notwendig, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den Offshore-Bereich zu prüfen.

6.9 Erstellung eines Konzepts zur flächendeckenden BNK (AP 9)

Im AP 9 sollte ein Konzept für die bedarfsgesteuerte Nachtkennzeichnung von einzelnen OWEA, von ganzen Windparks und für das gesamte Gebiet der Nord- und Ostsee mit Hilfe von Radarsystemen erstellt werden. Dabei geht es um die Erfassung von Flugobjekten im Wirkungsraum von Luftfahrthindernissen, in diesem Fall Windenergieanlagen in einem Offshore Windpark. Der Wirkungsraum der BNK wird entsprechend der SOLF, Teil 5 Anhang 6 gebildet durch den Luftraum, der sich um jedes Hindernis in einem Radius von mindestens 4000 Metern erstreckt und vom Boden bis zu einer Höhe von nicht weniger als 600 Metern (2000 ft) über dem Hindernis reicht.

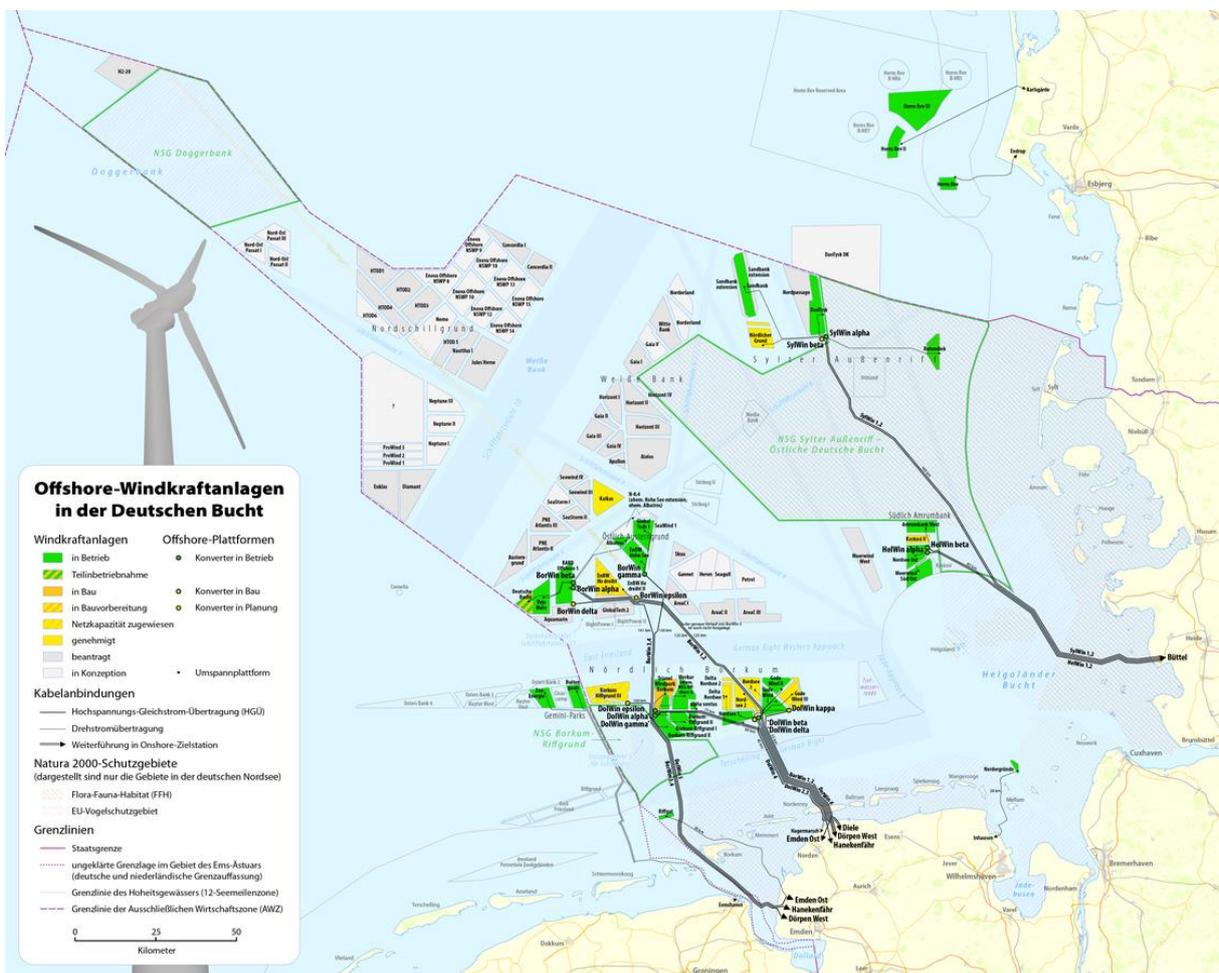


Abbildung 70: OWP in der Deutschen Bucht, Quelle: Maximilian Dörrbecker (Chumwa) - Eigenes Werk, using data and information from these web sites: Global Offshore Wind Farms Database Bundesamt für Naturschutz OpenSeaMap TenneT Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrologie

Die Untersuchungen bezogen sich größtenteils auf das Gebiet der Nordsee (siehe Abbildung 70), da die Ostsee wie im folgenden Kapitel dargestellt mit Radargeräten von Land aus erfasst werden kann.

Da es zum einen aufgrund der Corona-Pandemie fast keine Reisen gab und somit kaum Reisekosten abgerufen wurden und sich zum anderen in AP 6 der Aufwand zur erforderlichen Genehmigung zur Errichtung des Testsystems deutlich reduziert hat, kam es zu einer Mittelverschiebung zugunsten des AP 9.

Zur Entwicklung des Gesamtkonzeptes konnte daher ein Unterauftrag an die Firma PlanGis vergeben werden. Mit Unterstützung durch PlanGis wurde ein GIS-Projekt erstellt, in dem verschiedene Szenarien kartografisch dargestellt werden konnten.

6.9.1 Theoretische Abdeckung mit Hilfe eines Radarsystems

Mit Hilfe des GIS wurden zunächst hypothetische Standorte von Radarsystemen in die Karte eingetragen und mit den angenommenen Reichweiten 50 m und 75 m gebuffert. Diese Radien dienten zunächst zur Erstellung eines groben Überblicks und wurden im zweiten Schritt mit Hilfe der Berechnung zur „Line of Sight“ (LoS = Sichtlinie bzw. direkte Sichtverbindung), konkretisiert. Im ersten Schritt wurde zunächst geprüft, ob die Möglichkeit besteht, dass der Bereich von Nord- bzw. Ostsee abgedeckt werden kann, wenn die Radarsysteme mit der entsprechenden Reichweite ausschließlich an Land (Festland und Inseln) installiert werden. Dazu wurden drei Standorte konstruiert. Als nördlichster Punkt im Bereich der Nordsee wurde ein Standort auf der Insel Sylt angenommen, der östlichste lag auf der Insel Borkum. Fast mittig dazwischen wurde ein Standort auf der Insel Helgoland angenommen.

Wie Abbildung 71 zeigt, war eine komplette Abdeckung selbst bei einer Reichweite von 75 m für den Bereich der Nordsee nicht möglich. Lediglich OWPs der Zone 1 konnten erfasst werden. Für die Ostsee, in der es ausschließlich die Zone 1 gibt, ist theoretisch eine radartechnische Erfassung aller OWPs von Land aus möglich, wie die Abbildung 72 zeigt. Bei einer angenommenen Reichweite von 75 m würden zwei Radarstationen ausreichen, um sämtliche OWPs abzudecken. Für den Bereich der Nordsee wurden sukzessiv weitere Szenarien betrachtet. Mit der Ergänzung einer weiteren Radarstation auf der Konverter-Plattform Dolwin Alpha, konnten zumindest Teile der Zone 3 erreicht werden, wie in Abbildung 73 zu sehen ist. Erst bei einer simulierten Installation von 9 Radar-Systemen (Abbildung 74), wovon 6 auf verschiedenen Konverter-Plattformen und 3 an Land dargestellt werden, können alle OWPs der Zonen 1-3 erfasst werden.

Durch diese Simulationen wurde der Ansatz die Radarsysteme auf den Konverter-Plattformen zu installieren weiter vertieft und mit Hilfe der Fa. Terma konnten erste Ansätze zu möglichen Standorten entwickelt werden. Dennoch sind viele Themen noch offen und könnten ggf. in einem Folgeprojekt geklärt werden.

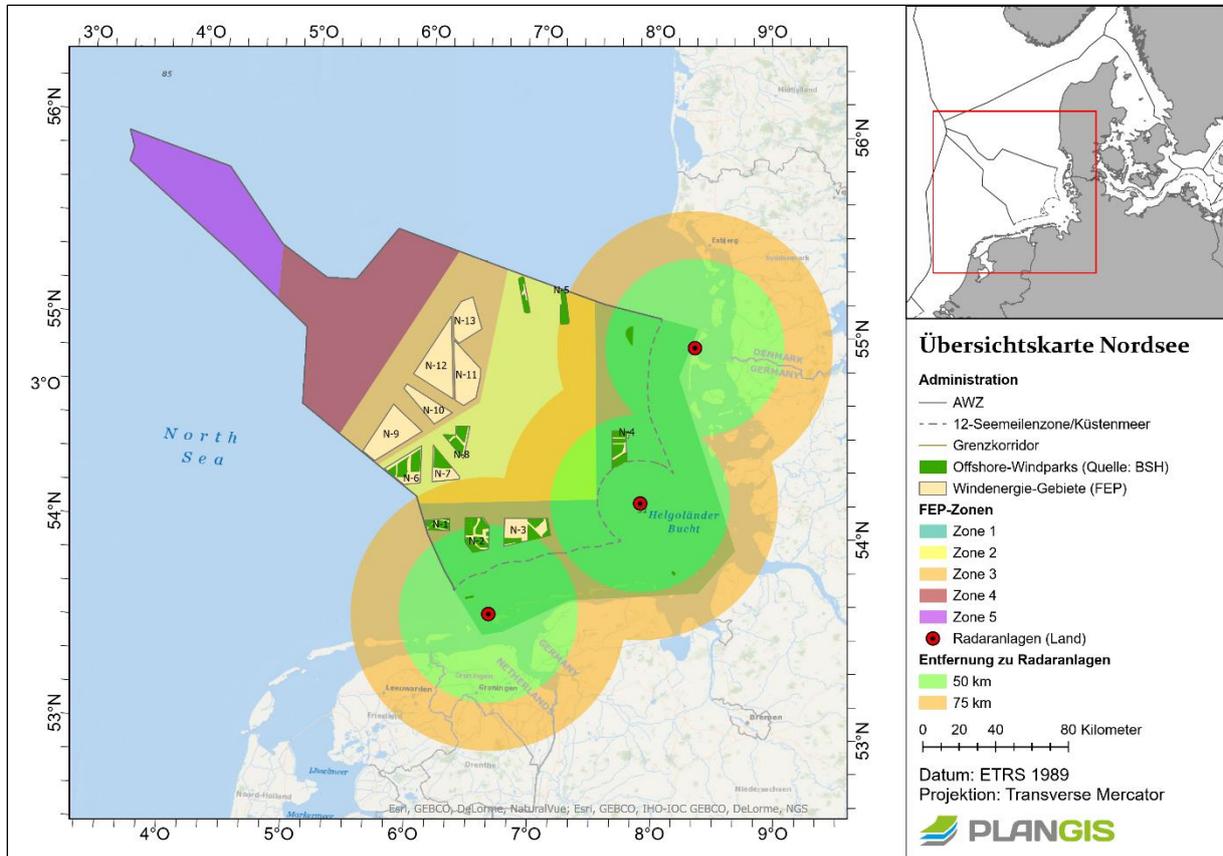


Abbildung 71: Theoretische Abdeckung OWP bei ausschließlicher Installation von Radar-Systemen an Land (Nordsee)

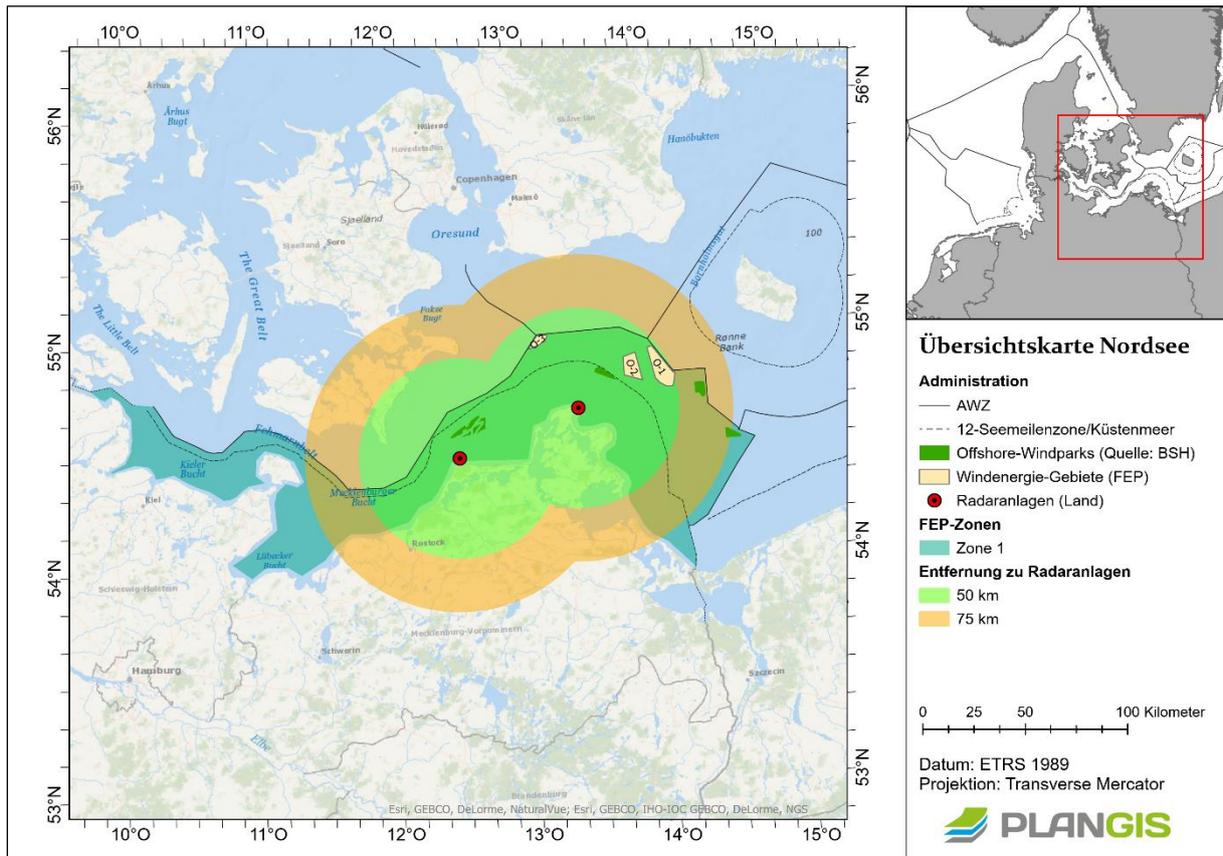


Abbildung 72: Theoretische Abdeckung OWP bei ausschließlicher Installation von Radar-Systemen an Land (Ostsee)

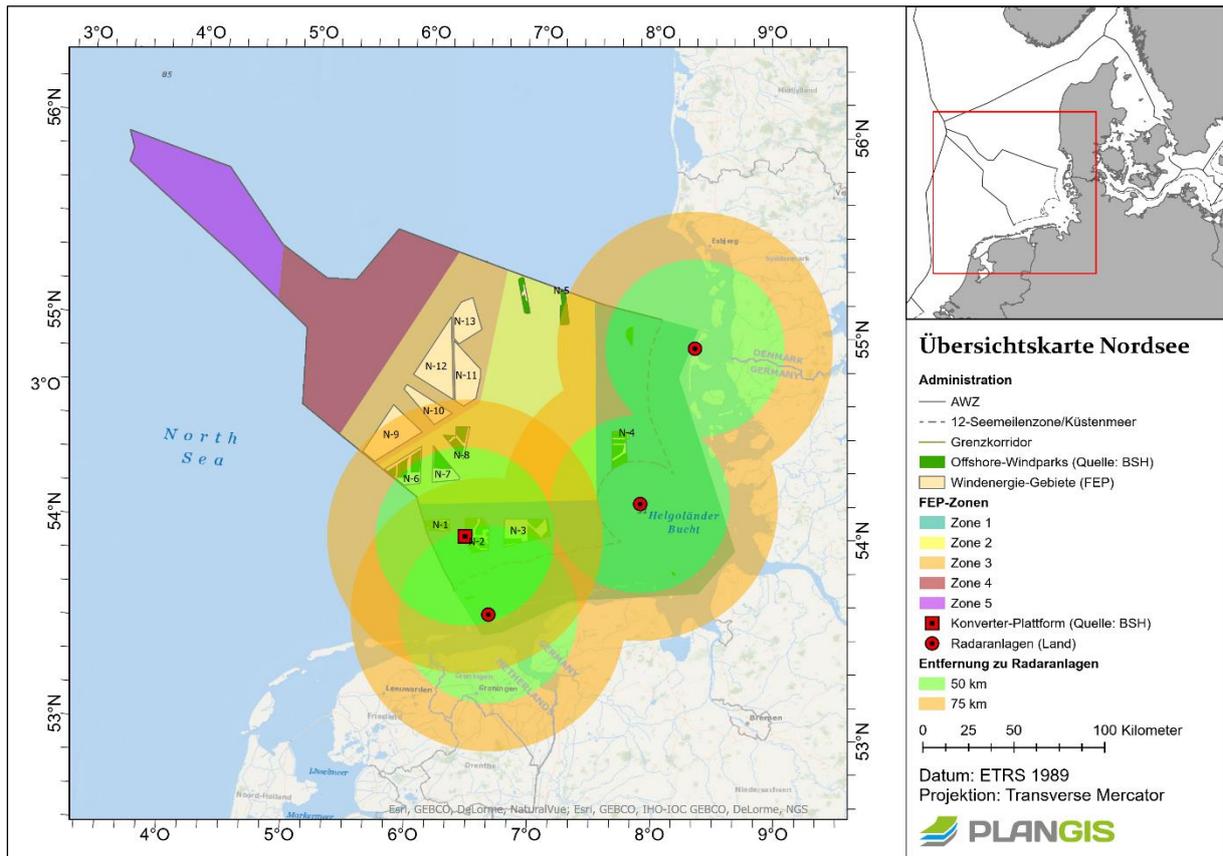


Abbildung 73: Abdeckung OWPs bei Installation von Radar-Systemen an Land plus Konverter-Plattform (Nordsee)

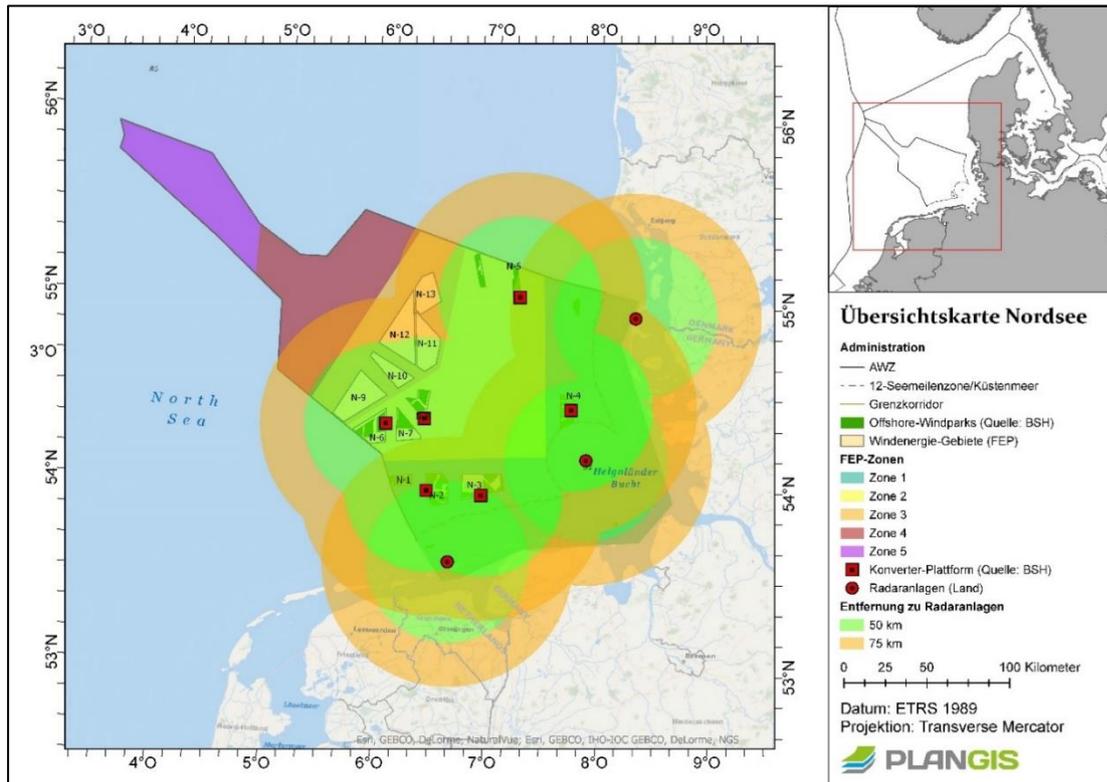


Abbildung 74: Abdeckung OWP's bei Installation von Radar-Systemen an Land plus 6 Konverter-Plattform (Nordsee)

6.9.2 Installation von Radarsystemen auf Konverter-Plattformen und Abdeckung nach Berechnung LoS

6.9.2.1 Konverter-Plattformen

Eine Konverter-Plattform, auch Umspannplattform genannt, dient in erster Linie dazu die Verluste und den Aufwand für die Übertragung der elektrischen Energie von den Offshore-Windparks zum Festland zu reduzieren. Die vier Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) 50Hertz, Amprion, TenneT und TransnetBW sind in Deutschland verantwortlich für das Übertragungsnetz zur überregionalen Versorgung und Übertragung im Höchstspannungsbereich.

Neben der elektrotechnischen Funktion dienen Umspannplattformen häufig auch als Stützpunkt für Aufbau-, Wartungs- und Revisionsarbeiten am Windpark. Sie verfügen daher häufig über Serviceräume sowie Mannschaftsquartiere für mehrere Dutzend Menschen. Für den An- und Abtransport von Material und Personal ist üblicherweise ein Helideck vorhanden, sowie die Möglichkeit, mit Versorgern oder anderen Schiffen anzulegen.

Die Konverter-Plattformen sind mit Radarsystemen zur Seeraumüberwachung ausgestattet. Eine Installation von Radarsystemen zur Erfassung von Flugobjekten und somit zur Steuerung von BNK-Systemen ist ebenfalls möglich, allerdings sind noch diverse offene Punkte zu klären.

Bei einem Gespräch mit einem Mitarbeiter der TenneT wurden u. A. folgende Punkte angesprochen:

- Beeinflussung bestehender Kommunikationssysteme oder Helikopterkorridore
- Datenübertragung und technische Ausführung
- Größe und Anbaumöglichkeiten der Geräte (ggf. Unterbaukonstruktion erforderlich)
- Stromversorgung
- Zugang/Transfer bei Durchführung von Installations- und Wartungsarbeiten

Für die weitere Erarbeitung des Gesamtkonzeptes wurden diese Punkte jedoch nicht weiter berücksichtigt, zumal die Firma Terma schon mehrere Radarsysteme des Typs Scanter 4002 auf Umspannwerken und Ölplattformen installiert hat - allerdings für andere Zwecke als für die BNK (z. B. für VTS/Küstenüberwachung).

Bzgl. der Radartechnik sind für das Gesamtkonzept vor allem die folgenden Punkte zu berücksichtigen:

6.9.2.2 Radarstörungen durch Rotorblätter

Durch die Rotorblätter der Windenergieanlagen kann es zu Radarstörungen kommen, so dass die einwandfreie dauerhafte Gewährleistung des BNK-Systemes nicht jederzeit gegeben ist. Hierzu wurde jedoch in einem Joint Venture zwischen dem Windparkentwickler Ørsted und Terma erfolgreich eine Offshore-Radarlösung getestet, die mit Hilfe eines Mitigationsradar die durch die Turbinenblätter verursachten Radarstörungen beseitigt.

Der Test wurde über einen Zeitraum von sechs Monaten in der britischen Windfarm Hornsea One - der größten Offshore-Windfarm der Welt - durchgeführt, wobei die Analysen von NATS (UK National Air Traffic Services) vorgenommen wurden. Die Tests umfassten sowohl leichte als auch größere Flugzeuge sowie Hubschrauber, die versuchten, sich hinter den Turbinen zu verstecken. Zudem wurde sogar mit Kampffjets getestet. Das Mitigationsradar war immer in der Lage ein klares ungestörtes Radarbild zu liefern und erkennt dabei ebenfalls kleine Flugzeuge erkennt, die über die Windparkstandorte hinwegfliegen.

6.9.2.3 Radarhorizont und Radarsicht

Bei einem Radarsystem ist der Radarhorizont durch die Entfernung definiert, in der der Radarstrahl die Erdoberfläche „berührt“ und die Erkennung von Zielen, die sich unterhalb des Strahls bewegen, unmöglich ist. Der Radarhorizont wird in der Seefahrt auch die geographische Kimm genannt und ist die maximale Reichweite, die durch Radarmessung erfasst werden kann, wobei davon ausgegangen wird, dass die Zielhöhe Null ist.

Die theoretische Reichweite, die durch Radarmessung erfasst werden kann und ist abhängig von Antennenhöhe und Zielhöhe und nennt sich auch Radarkimm. Sie ist immer weiter als der Radarhorizont. Die Reichweite eines Radarsystems kann unabhängig von der Leistungsfähigkeit des Systems durch die für den Aufstellungsort gegebene Radarsicht eingeschränkt werden. Die Zielhöhe spielt bei den weiteren Berechnungen eine wesentliche Rolle. Entsprechend der SOLF wäre die Zielhöhe die Wasseroberfläche. Dadurch würde die Reichweite jedoch stark eingeschränkt werden.

6.9.2.4 Berechnung des Radarhorizonts und der Zielsichtbarkeit

In der Abbildung 75 werden die Eingangsdaten zur Berechnung des Radarhorizonts und der Zielsichtbarkeit dargestellt. Der braune Kreis ist die Erdoberfläche. Für die Radarhöhenantenne wurde der auf den verschiedenen Konverter-Plattformen jeweils höchstmögliche Punkt angenommen.

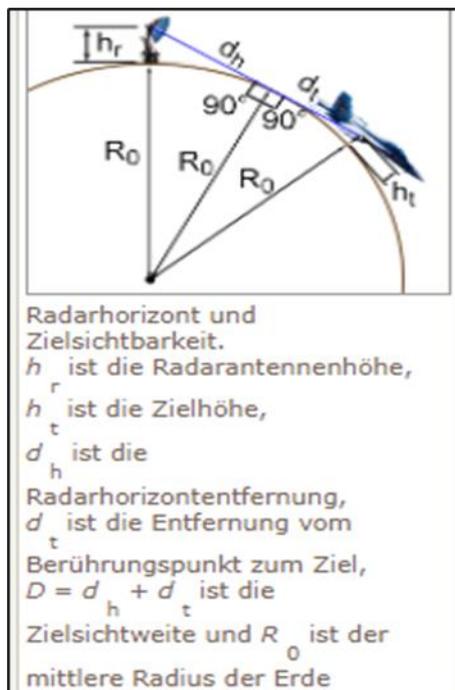


Abbildung 75: Darstellung Berechnung Radarhorizont und Zielsichtbarkeit. Quelle: <https://www.translatorscafe.com/unit-converter/en-US/calculator/radar-horizon/>

Es wurden drei Szenarien zur Gesamtabdeckung der Wirkungsräume aller bestehenden OWPs innerhalb der Deutschen Bucht berechnet. Die Zielhöhe war Wasseroberfläche, 50 m AMSL und 75 m AMSL. Mit Hilfe dieser Angaben konnte die Sichtlinie zum Horizont berechnet werden, dargestellt als blaue Linie in der Abbildung und die geometrische Zielsichtbarkeit.

6.9.3 Ergebnisse

Auf Basis der oben genannten Punkte wurde von Terma eine Berechnung der LoS durchgeführt, die unter dem Titel „Offshore Radar Coverage – Simulation of LoS Coverage“ im Anhang zu finden ist. Diese Berechnung zeigt, bis zu welcher Höhe (AMSL) es möglich ist Flugobjekte in den Zonen 1-2 zu erfassen. Diese Berechnungen wurden ins GIS übertragen.

Abbildung 76 zeigt, dass eine Abdeckung bis zur Wasseroberfläche (Zielhöhe null), so wie es im Teil 5, Anhang 6 der SOLF gefordert (siehe Kap. 6.7.4), selbst bei einer Installation auf allen 6 geeigneten Konverter-Plattformen nicht möglich ist.

Wenn der zu erfassende Wirkungsraum sich auf eine Höhe von 50 m AMSL bis zu einer Höhe von nicht weniger als 600 m über dem Hindernis begrenzen würde, wäre es möglich mit der Installation von 4 Radarsystemen auf den Konverter-Plattformen OSS SylWin Alpha, OSS BorWin Beta, OSS HelWin Alpha und OSS DolWin Gamma die bestehenden OWPs bis auf den OWP Nordergründe abdecken könnte (siehe Abbildung 77).

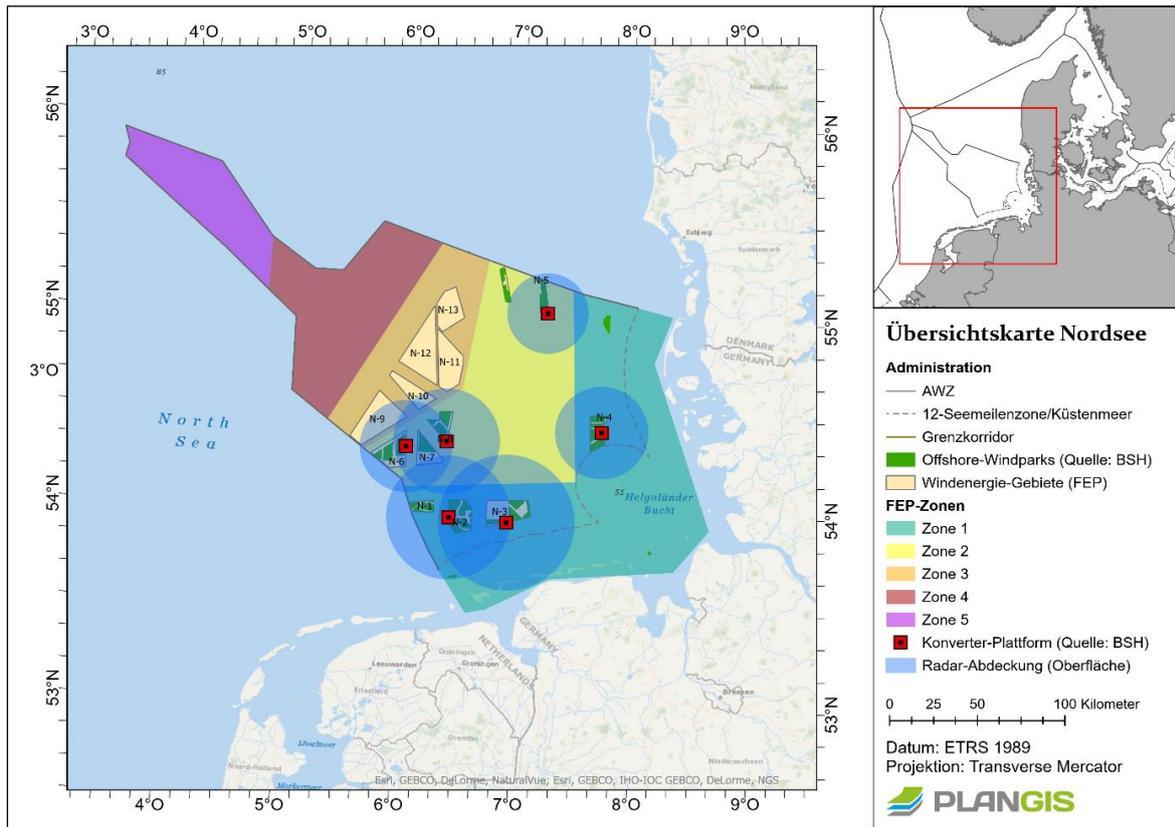


Abbildung 76: Abdeckung bis zur Wasseroberfläche

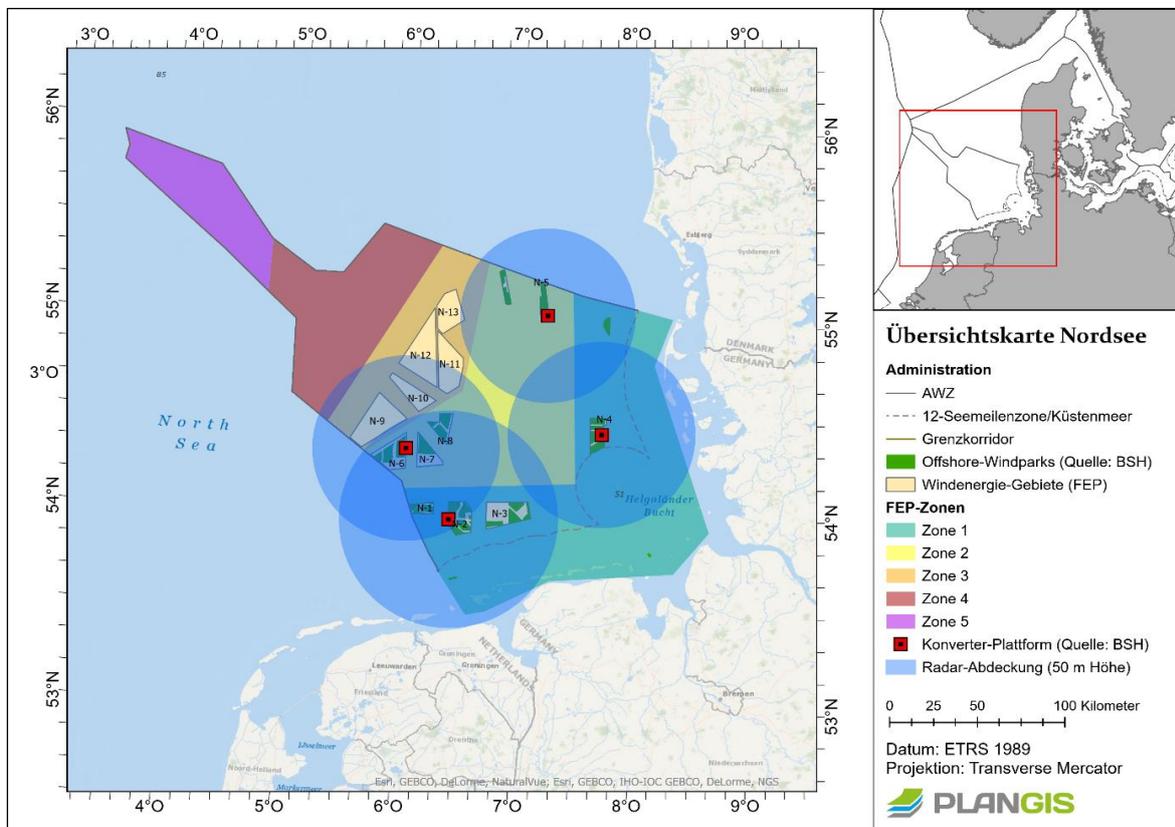


Abbildung 77: Abdeckung bis zu einer Höhe von 50 m AMSL

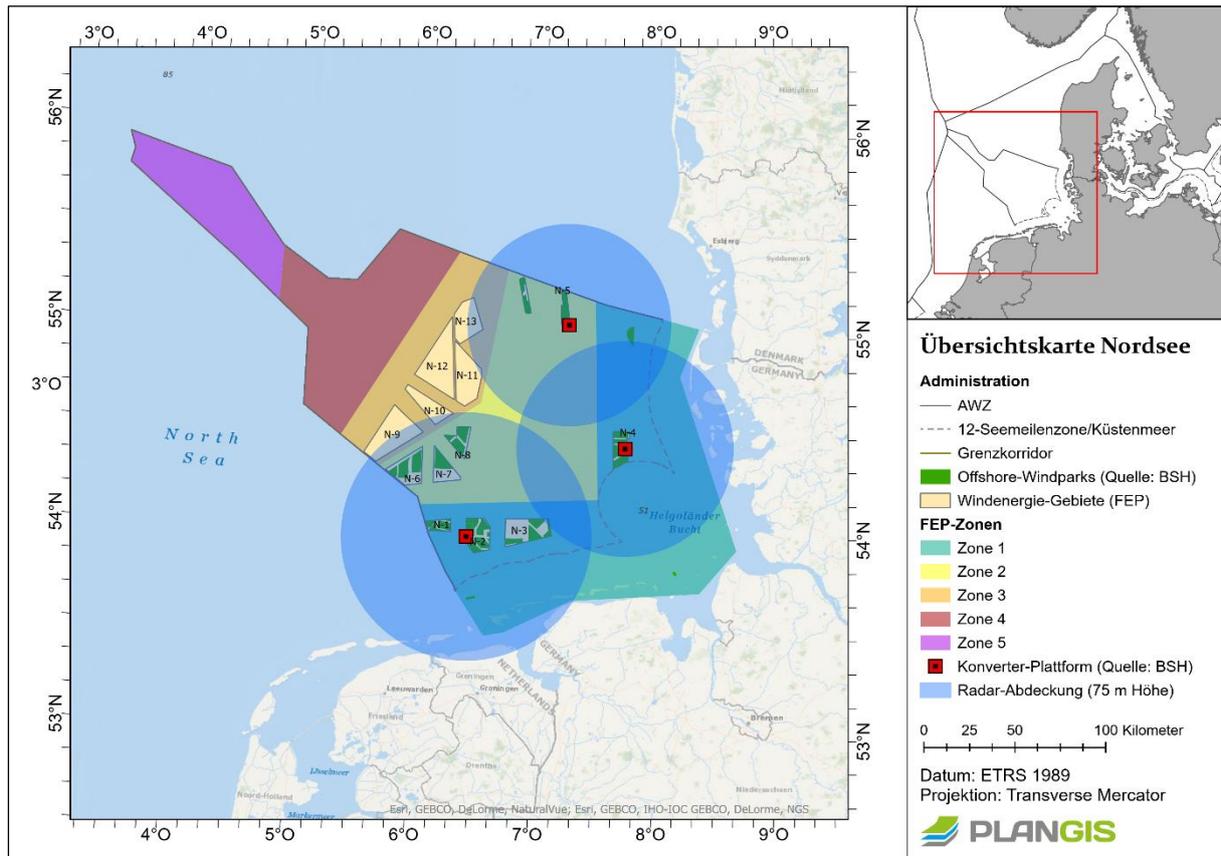


Abbildung 78: Abdeckung bis zu einer Höhe von 75 m AMSL

Bei einer Reduktion des Wirkungsraumes auf eine Höhe von 75 m AMSL (Abbildung 78) würden 3 Radarsysteme ausreichen. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass ausschließlich die LoS betrachtet wurde und keine Analyse der Radarabdeckung vorgenommen wurde, bei der auch die Größe des Ziels, der Seegang oder das Multi-Path Routing vorgenommen wurde. Dies kann die nutzbare Reichweite verringern - vor allem in niedrigeren Höhen bei großen Entfernungen aufgrund des Lobing-Phänomens.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass ein Konzept für die bedarfsgesteuerte Nachtkennzeichnung mit Hilfe des Radarsystems Scanter 4002, oder gleichwertigen, für die gesamte deutsche Bucht erstellt werden kann. Allerdings ist dafür entweder eine Änderung des SOLF hinsichtlich der Höhe des Wirkungsraumes erforderlich oder es müssten andere Standorte neben den Konverter-Plattformen gesucht werden auf denen weitere Radarstationen errichtet werden können. Hinsichtlich des SOLFs stellt sich die Frage nach dem Grund der vorgegebenen Höhe (Boden/Wasseroberfläche), da allenfalls Helikopter für einen Rettungseinsatz so tief fliegen würden, die dann allerdings schon beim Eintritt in die warning-zone die BNK aktivieren würden

Das 4-Radar Szenario scheint momentan das aussichtsreichste zu sein, da bei der Zielhöhe von 50 m davon auszugehen ist, dass die bisherigen Berechnungen bei der weiteren Analyse die wenigsten Abweichungen aufweisen. Für eine realistische Umsetzung sind weitere Untersuchungen erforderlich, zudem sollte ein Kostenvergleich gegenüber anderen Systemen (z.B. Transponderlösungen) erfolgen. Eine Absprache der Betreiber untereinander wäre sinnvoll. Für die weitere Entwicklung im Bereich der Offshore Windindustrie mit kommendem Rückbau und Repowering ist ein dauerhaftes Gesamtkonzept positiv zu bewerten!

7. Literatur

- AUMÜLLER, R., BOOS, K., FREIENSTEIN, S., HILL, K. & HILL, R. (2011): Beschreibung eines Vogelschlagereignisses und seiner Ursachen an einer Forschungsplattform in der Deutschen Bucht. *Vogelwarte* 49, S: 9–16.
- AVERY, M., SPRINGER, P. F. & CASSEL, J. F. (1976): The effects of a tall tower on nocturnal bird migration - a portable ceilometer study. *The Auk* 93, S: 281–291.
- AVERY, M., SPRINGER, P. F. & CASSEL, J. F. (1977): Weather influences on nocturnal bird mortality at a North Dakota tower. *The Wilson Bulletin* 89/2, S: 291–299.
- BALLASUS, H., HILL, K. & HÜPPOP, O. (2009): Gefahren künstlicher Beleuchtung für ziehende Vögel und Fledermäuse. *Ber. Vogelschutz* 46, S: 127–157.
- BELLEBAUM, J., GRIEGER, C., KLEIN, R., KÖPPEN, U., KUBE, J., NEUMANN, R., SCHULZ, A., SORDYL, H. & WENDELN, H. (2010): Ermittlung artbezogener Erheblichkeitsschwellen von Zugvögeln für das Seegebiet der südwestlichen Ostsee bezüglich der Gefährdung des Vogelzuges im Zusammenhang mit dem Kollisionsrisiko an Windenergieanlagen. Abschlussbericht, Forschungsvorhaben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (FKZ 0329948). IfAÖ, LUNG MV/Neu Broderstorf (DEU), S: 333.
- BERTHOLD, P. (2000): Vogelzug. Eine aktuelle Gesamtübersicht. (4., stark überarb. und erw. Aufl. Auflage). Wissenschaftliche Buchgesellschaft/Darmstadt (DEU), 280 Seiten.
- BIOCONSULT SH, IBL UMWELTPLANUNG & IFAÖ (2020): Flächenvoruntersuchung O-1.3 - Bericht 2016 - 2018. Ergebnisse der ökologischen Untersuchungen für das Schutzgut Zugvögel.
- BRUDERER, B. (1997): The study of bird migration by radar. Part 1: The technical basis. *Naturwissenschaften* 84/1, S: 1–8.
- BRUDERER, B. & BOLDT, A. (2001): Flight characteristics of birds: I. Radar measurements of speeds. *Ibis* 143, S: 178–204.
- BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE - **BSH** (2013): Standard - Untersuchung der Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt (StUK 4). Ergänzung zum Schutzgut Benthos, gemäß StUK4. Hamburg & Rostock (DEU).
- BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE (Hrsg.) - **BSH** (2014): Bundesfachplan Offshore für die deutsche ausschließliche Wirtschaftszone der Ostsee 2013 und Umweltbericht, (Hrsg. BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE). Nr. 7602, Hamburg & Rostock (DEU), S: 225.
- BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE (Hrsg.) - **BSH** (2017): Bundesfachplan Offshore für die deutsche ausschließliche Wirtschaftszone der Ostsee 2016/2017 und Umweltbericht, (Hrsg. BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE). Nr. BSH Nr. 7607, Hamburg & Rostock (DEU), S: 241.
- BUCKLAND, S. T., ANDERSON, D. R., BURNHAM, K. P., LAAKE, J. L., BORCHERS, D. L. & THOMAS, L. (2001): Introduction to distance sampling estimating abundance of biological populations. (1. Auflage). Oxford University Press/Oxford (UK), 452 Seiten.
- DOKTER, A. M., LIECHTI, F., STARK, H., DELOBBE, L., TABARY, P. & HOLLEMAN, I. (2011): Bird migration flight altitudes studied by a network of operational weather radars. *Journal of the Royal Society Interface* 8/54, S: 30–43.
- EASTWOOD, E. (1967): Radar ornithology. Methuen & Co Ltd./London (GBR), 278 Seiten.
- ERNI, B., LIECHTI, F., UNDERHILL, L. G. & BRUDERER, B. (2002): Wind and rain govern the intensity of nocturnal bird migration in central Europe - a log-linear regression analysis. *Ardea* 90/1, S: 155–166.
- EVANS, W., AKASHI, Y., ALTMAN, N. S. & MANVILLE II, A. M. (2007): Response of night-migrating songbirds in cloud to colored and flashing light. *North American Birds* 60/4, S: 476–488.
- EVANS OGDEN, L. J. (1996): Collision course: the hazards of lighted structures and windows to migrating birds. World Wildlife Fund Canada & Fatal Light Awareness Programm/Ontario (CAN).

- FA WIND (Hrsg.) (2016): Bedarfsgerechte Nachtkennzeichnung von Windenergieanlagen, (Hrsg. FA WIND). Berlin (DEU).
- FARNSWORTH, A. (2005): Flight calls and their value for future ornithological studies and conservation research. *The Auk* 122/3, S: 733–746.
- FARNSWORTH, A. (2007): Flight calls of wood-warblers are not exclusively associated with migratory behaviors. *The Wilson Journal of Ornithology* 119/3, S: 334–341.
- GAUTHREAU JR, S. A. & BELSER, C. G. (2006): Chapter 4: Effects of artificial night lighting on migrating birds. In: *Ecological Consequences of Artificial Night Lightningsland* Press/Washington D. C. (USA), S. 67–93.
- GEHRING, J., KERLINGER, P. & MANVILLE, A. M. (2009): Communication towers, lights, and birds: successful methods of reducing the frequency of avian collisions. *Ecological Applications* 19/2, S: 505–514.
- GRÜNKORN, T., BLEW, J., COPPACK, T., KRÜGER, O., NEHLS, G., POTIEK, A., REICHENBACH, M., VON RÖNN, J., TIMMERMANN, H. & WEITEKAMP, S. (2016): Ermittlung der Kollisionsraten von (Greif-)Vögeln und Schaffung planungsbezogener Grundlagen für die Prognose und Bewertung des Kollisionsrisikos durch Windenergieanlagen (PROGRESS). Schlussbericht zum durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen des 6. Energieforschungsprogrammes der Bundesregierung geförderten Verbundvorhaben PROGRESS, FKZ 0325300A-D. S: 332.
- HÜPPOP, O., DIERSCHKE, J., EXO, K. M., FREDRICH, E. & HILL, R. (2006): Bird migration studies and potential collision risk with offshore wind turbines. *Ibis* 148, S: 90–109.
- HÜPPOP, O., EXO, K. M. & GARTHE, S. (2002): Empfehlungen für projektbezogene Untersuchungen möglicher bau- und betriebsbedingter Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf Vögel. *Berichte zum Vogelschutz* 39, S: 77–94.
- HÜPPOP, O., HILL, R., HÜPPOP, K. & JACHMANN, F. (2009): Auswirkungen auf den Vogelzug - Begleitforschung im Offshore-Bereich auf Forschungsplattformen in der Nordsee (FINOBIRD), Abschlussbericht. Institut für Vogelforschung „Vogelwarte Helgoland“/Helgoland (DEU), S: 278.
- HÜPPOP, O., HÜPPOP, K., DIERSCHKE, J. & HILL, R. (2016): Bird collisions at an offshore platform in the North Sea. *Bird Study* 63, S: 73–82.
- KERLINGER, P., GEHRING, J. L., ERICKSON, W. P., CURRY, R., JAIN, A. & GUARNACCIA, J. (2010): Night migrant fatalities and obstruction lighting at wind turbines in North America. *The Wilson Journal of Ornithology* 122/4, S: 744–754.
- KNORR, K., HORST, D., BOFINGER, S. & HOCHLOFF, P. (2017): Energiewirtschaftliche Bedeutung der Offshore-Windenergie für die Energiewende, (Hrsg. FRAUNHOFER INSTITUT FÜR ENERGIEWIRTSCHAFT UND ENERGIESYSTEMTECHNIK IWES). Im Auftrag der Stiftung Offshore-Windenergie, S: 43.
- KRIJGSVELD, K. L., AKERSHOEK, K., SCHENK, F., DIJK, F. & DIRKSEN, S. (2009): Collision risk of birds with modern large wind turbines. *Ardea* 97/3, S: 357–366.
- KRIJGSVELD, K. L., FIJN, R. C., JAPINK, M., VAN HORSSSEN, P. W., HEUNKS, C., COLLIER, M. P., POOT, M. J. M., BEUKER, D. & DIRKSEN, S. (2011): Effect studies Offshore Wind Farm Egmond aan Zee - Final report on fluxes, flight altitudes and behaviour of flying birds, Final Report. Bureau Waardenburg bv/Culemborg (NDL), S: 328.
- KULIK, G., SKOV, H., HILL, R. & PIPER, W. (2020): Vogelzug über der deutschen AWZ der Ostsee – Methodenkombination zur Einschätzung des Meideverhaltens und Kollisionsrisikos windkraftsensibler Arten mit Offshore-Windenergieanlagen, (Hrsg. IFAÖ INSTITUT FÜR ANGEWANDTE ÖKOSYSTEMFORSCHUNG, DHI A/S, & AVITEC RESEARCH GBR), Abschlussbericht. Neu Brodersdorf (DEU), Auftraggeber: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH). Aktenzeichen: 0800Z12-1114/002/690, S: 299.
- LARKIN, R. (2000): Investigating the behavioral mechanisms of tower kills: Transcripts of Proceedings of the Workshop on Avian Mortality at Communications Towers, August 11, 1999. *Cornell University, Ithaca, New York*.
- LIECHTI, F., ASCHWANDEN, J., BLEW, J., BOOS, M., BRABANT, R., DOKTER, A. M., KOSAREV, V., LUKACH, M., MARURI, M., REYNIERS, M., & OTHERS (2018): Cross-calibration of different

- radar systems for monitoring nocturnal bird migration across Europe and the Near East. *Ecography* 42, S: 1–12.
- LONGCORE, T., RICH, C. & GAUTHREAU JR, S. A. (2008): Height, guy wires, and steady-burning lights increase hazard of communication towers to nocturnal migrants: A review and meta-analysis. *The Auk* 125/2, S: 485–492.
- LOSS, S. R., MARRA, P. P. & WILL, T. (2015): Direct Mortality of Birds from Anthropogenic Causes. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 46/1, S: 99–117.
- MILLER, D. L. (2015): Package „Distance“.
- MÜLLER, H. (1981): Vogelschlag in einer starken Zugnacht auf der Offshore-Forschungsplattform „Nordsee“ im Oktober 1979. *Seevögel* 2, S: 33–37.
- NILSSON, C., DOKTER, A. M., SCHMID, B., SCACCO, M., VERLINDEN, L., BÄCKMAN, J., HAASE, G., DELL'OMO, G., CHAPMAN, J. W., LEIJNSE, H. & LIECHTI, F. (2018): Field validation of radar systems for monitoring bird migration. *Journal of Applied Ecology*.
- OREJAS, C., SCHROEDER, A., JOSCHKO, T., DIERSCHKE, J., EXO, K. M., FRIEDRICH, E., HILL, R., HÜPPOP, O., POLLEHNE, F., ZETTLER, M. L. & BOCHERT, R. (2005): Ökologische Begleitforschung zur Windenergienutzung im Offshore-Bereich auf Forschungsplattformen in der Nord- und Ostsee (BeoFINO), BMU 0327526-Abschlußbericht. Alfred-Wegener-Institut für Polar und Meeresforschung/Bremerhaven (DEU), S: 354.
- R CORE TEAM (2019): R: A Language and Environment for Statistical Computing, R version 3.6.1. R Foundation for Statistical Computing/Vienna (AUT).
- R CORE TEAM (2020): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing/Vienna, Austria.
- REBKE, M., DIERSCHKE, V., WEINER, C. N., AUMÜLLER, R., HILL, K. & HILL, R. (2019): Attraction of nocturnally migrating birds to artificial light: The influence of colour, intensity and blinking mode under different cloud cover conditions. *Biological Conservation* 233, S: 220–227.
- SCHMALJOHANN, H., LIECHTI, F., BÄCHLER, E., STEURI, T. & BRUDERER, B. (2008): Quantification of bird migration by radar – a detection probability problem. *Ibis* 150/2, S: 342–355.
- SCHULZ, A., DITTMAN, T. & COPPACK, T. (2014): Erfassung von Ausweichbewegungen von Zugvögeln mittels Pencil Beam Radar und Erfassung von Vogelkollisionen mit Hilfe des Systems VARS. StUKplus Schlussbericht. Rostock, Im Auftrag des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), S: 89.
- SCHULZ, A., DITTMANN, T., WEIDAUER, A., KILIAN, M., LÖFFLER, T., RÖHRBEIN, V. & SCHLEICHER, K. (2013): Weiterentwicklung der Technik für Langzeituntersuchungen der Vögel mittels Radar und automatischer Kamerabeobachtung am Standort FINO 2 und Durchführung von Langzeitmessungen am Standort für den Zeitraum 2010 bis 2012, Abschlussbericht. Institut für Angewandte Ökosystemforschung/Neu Brodersdorf (DEU), Teilprojekt Vogelzug. Bestandteil des Forschungsvorhabens „Betrieb für Forschungsplattform FINO 2“ (BMU; FKZ 0329905D), S: 103.
- SCHULZ, A., KUBE, J., KELLNER, T., SCHLEICHER, K. & SORDYL, H. (2009): Entwicklung und Einführung eines automatischen Erfassungssystems für die Ermittlung des Vogelschlages unter Praxisbedingungen auf FINO 2., Abschlussbericht. Institut für Angewandte Ökologie/Neu Brodersdorf (DEU), Forschungsvorhaben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (FKZ 0327560), S: 59.
- SKOV, H., HEINÄNEN, S., NORMAN, T., WARD, R., MÉNDEZ-ROLDÁN, S. & ELLIS, I. (2018): ORJIP Bird Collision and Avoidance Study, Final Report. The Carbon Trust/London (GBR), S: 247.
- VAN BELLE, J., SHAMOUN-BARANES, J., VAN LOON, E. & BOUTEN, W. (2007): An operational model predicting autumn bird migration intensities for flight safety. *Journal of Applied Ecology* 44/4, S: 864–874.
- VAN DOREN, B. M. & HORTON, K. G. (2018): A continental system for forecasting bird migration. *Science* 361/6407, S: 1115–1118.

- VAN DOREN, B. M., HORTON, K. G., DOKTER, A. M., KLINCK, H., ELBIN, S. B. & FARNSWORTH, A. (2017): High-intensity urban light installation dramatically alters nocturnal bird migration. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114/42, S: 11175–11180.
- WEISSHAUPT, N., LESKINEN, M., MOISSEEV, D. N. & KOISTINEN, J. (2022): Anthropogenic Illumination as Guiding Light for Nocturnal Bird Migrants Identified by Remote Sensing. *Remote Sensing* 14/7, S: 1616.
- WELCKER, J. (2019): Patterns of nocturnal bird migration in the German North and Baltic Seas. ProBIRD report 2. BioConsult SH/Husum (DEU), S: 70.
- WELCKER, J. (2021): Vergleichbarkeit verschiedener Radarsysteme zur Erfassung des Vogelzugs. Husum, Im Auftrag des Bundesamts für Naturschutz, S: 42.
- WELCKER, J., LIESENJOHANN, M., BLEW, J., NEHLS, G. & GRÜNKORN, T. (2017): Nocturnal migrants do not incur higher collision risk at wind turbines than diurnally active species. *Ibis* 159/2, S: 366–373.
- WELCKER, J. & VILELA, R. (2018): Analysis of bird flight calls from the German North and Baltic Seas. Final Report. BioConsult SH/Husum, S: 128.
- WELCKER, J. & VILELA, R. (2019): Weather-dependence of nocturnal bird migration and cumulative collision risk at offshore wind farms in the German North and Baltic Seas., Technical report. BioConsult SH/Husum (DEU), S: 70.
- WELCKER, J. & VILELA, R. (2020): ProBIRD - Prognose des regionalen und lokalen Vogelzugs und des kumulativen Vogelschlagrisikos an Offshore-Windenergieanlagen, Endbericht. Husum (DEU), S: 70.
- WENDELN, H., LIECHTI, F., HILL, R., HÜPPOP, O. & KUBE, J. (2007): Sind Schiffsradargeräte für quantitative Vogelzugmessungen geeignet? - Ein Vergleich mit dem Zielfolgeradar „Superfledermaus“. *Vogelwarte* 45, S: 336–337.
- ZAUGG, S., SAPORTA, G., VAN LOON, E., SCHMALJOHANN, H. & LIECHTI, F. (2008): Automatic identification of bird targets with radar via patterns produced by wing flapping. *Journal of The Royal Society Interface* 5/26, S: 1041–1053.
- ZEHNDER, S., ÅKESSON, S., LIECHTI, F. & BRUDERER, B. (2001): Nocturnal autumn bird migration at Falsterbo, South Sweden. *Journal of Avian Biology* 32/3, S: 239–248.

8. Anlagen

Anhang 1: „LoS Coverage Modelling“ Berechnung durch Terma

Anhang 2: Bewertungsmatrix

Anhang 3: Scanter 4002 ADLS test, Rügen, Germany; TERMA S/A

Anhang 4: Projektbericht BeBeO; Quantec Sensors GmbH