

Signaturtechnisches Gutachten
zur Planung von Windenergieanlagen
im Gebiet Jühdener Feld
im Einflussbereich der militärischen
Radaranlage Wittmund

05.03.2024

Gutachten Nr.: TEYYX-310/23-2

Auftraggeber:

innoVent Planungs GmbH & Co. KG
Oldenburger Str. 49
26316 Varel

Auftragnehmer:

Airbus Defence and Space GmbH
Airbus-Allee 1
28199 Bremen

Durchgeführt von:

Dipl.-Ing. (FH) Michael Gottschalk

von der Handelskammer Bremen öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Hochfrequenz- und Signaturtechnik, insbesondere Störeinflussanalysen für Windenergieanlagen

unter Beteiligung von:

Dipl.-Ing. (FH) T. Bischoff

Tel.: +49.421.539-3020

Mobil: +49.170.269-9608

E-Mail: michael.gottschalk@airbus.com

Ausfertigung Nr.: - pdf -

Das Gutachten besteht aus den Seiten 1 bis 68.

Inhaltsverzeichnis:

1	Vorbemerkung zum Gutachten	4
2	Zielsetzung	6
3	Vorbemerkung zur Wechselwirkung zwischen WEA und Radaranlagen der militärischen Flugsicherung	9
4	Aufgabenbeschreibung	14
5	Untersuchungsverfahren.....	17
5.1	Bewertungsmethodik:	17
5.2	Bewertungsprozedur:.....	19
6	Bestimmung der für den Windpark relevanten Windrichtungen	21
7	Radarquerschnittanalyse	23
7.1	Ermittlung des RQS einer WEA	25
8	Bewertung des Gesamteinflusses der WEA-Gruppe bzgl. „Störzellen“	28
9	DCM-Störzellenbewertung.....	32
9.1	Betrachtung der Windrichtung I (Bereich um 288°).....	33
9.1.1	Situation „Planung“	33
9.1.2	Zusammenfassende Beurteilung der verschiedenen Überflugs-Szenarien:	36
9.2	Betrachtung der Windrichtung II (Bereich um 148°).....	42
9.2.1	Situation „Planung“.....	42
9.2.2	Situation „Planung opt“	45
9.2.3	Zusammenfassende Beurteilung der verschiedenen Überflugs-Szenarien:	48
10	CFAR-Algorithmus / „Schwellwert-Anhebung“	54

11	Gesamtbeurteilung/Zusammenfassung der Ergebnisse	57
	Anhang A: Abkürzungen und Begriffe	65
	Anhang B: Informative Darstellung der Planung bei Bewertung mit der Software, die von der Bundeswehr verwendet wird	66

1 Vorbemerkung zum Gutachten

Das vorliegende Gutachten fasst die Erkenntnisse und den technischen Stand der fachlichen Abstimmung mit den Entscheidungsträgern des Luftfahrtamtes der Bundeswehr (insbesondere die militärische Flugsicherung bzw. des Radar-Einsatzführungsdienstes der Luftwaffe) zum Zeitpunkt der Erstellung des Berichtes zusammen.

Das Gutachten dient zur Vorlage und als Entscheidungsgrundlage im Rahmen des Genehmigungsverfahrens bei dem zuständigen BAIUDBw (Bundesamt für Infrastruktur, Umweltschutz und Dienstleistungen der Bundeswehr) sowie dem Luftfahrtamt der Bundeswehr als „Betreiber“ der FS-Radaranlage auf der Liegenschaft in Wittmund.

Als Bezugsradarsystem für Wittmund wird das vorhandene ASR-S herangezogen. Eine Bewertung der Radaranlage erfolgt nicht. Die angewandten Kriterien setzen voraus, dass eine transpondergestützte Filterung von Windenergieanlagen zur Unterscheidung von Flugzielen durch den Radarsensor (wie es bei digitalen Radarsystemen zur Flugsicherung möglich ist) nicht erfolgt und sind damit auf alle Radarsysteme dieses Typs oder vergleichbarer Systeme anwendbar.

Eine betriebliche Bewertung, die eine nichttechnische Folgenabschätzung für die Nutzer der Radarsysteme bedeutet, bzw. ob mögliche Einflüsse zu betrieblich relevanten Störungen der Radarortungsanlage führen, erfolgt im Rahmen dieser Untersuchung nicht, da hierzu u. a. eine sehr konkrete operationelle Bewertung der Aufgaben der Radarortungssysteme erforderlich ist.

Eine Überprüfung der Anforderungen der Hindernisfreiheit gemäß der ICAO - Convention Annex 14, die die grundsätzlich zulässige Bauhöhe von Objekten beliebiger Art festlegt, erfolgt im Rahmen des Gutachtens nicht. Diese ist für jeden Umgebungsort

eines Flugplatzes festgelegt und unveränderlich. Sie dient dem Schutz von Luftfahrzeugen im Flug und steht nicht im Zusammenhang mit der radartechnischen Problematik, die Gegenstand des Gutachtens ist.

Nachstehend erfolgt zunächst die technische Bewertung für das Flugsicherungsradar (FS-Radar) Wittmund gemäß Kapitel 2 bis 10.

Die Gesamtbeurteilung der einzelnen Ergebnisse zum FS-Radar Wittmund ist im Kapitel 11 dargestellt.

2 Zielsetzung

Das vorliegende Gutachten bewertet bzgl. der Radaranlage am Flugplatz Wittmund für den Radargerätetyp ASR-S die radartechnischen Störwirkungen des Windparks Jühdener Feld für sechs neue Windenergieanlagen vom Typ Nordex N 133 unter Berücksichtigung von 30 Bestandsanlagen im Hinblick auf die Möglichkeit von Flugzielverlusten im Falle eines Überfluges über die untersuchte Windenergieanlagenanordnung, vgl. Tabelle 1. Die geplanten Windenergieanlagen im WP Jühdener Feld befinden sich südöstlich des Radarstandortes Wittmund in einer Entfernung von ca. 31,5 km, vgl. Abbildung 26 und Abbildung 27.

Der Schwerpunkt der Untersuchung besteht bei einer Beeinträchtigung des Radarsystems durch die WEA-Anordnung in der Analyse der verschiedenen technischen Möglichkeiten im Zusammenhang mit der bedarfsorientierten Fremdsteuerung. Es werden dabei zusätzlich verschiedene Rotororientierungen und die damit verbundenen unterschiedlichen Reflexionscharakteristika bewertet.

Die Untersuchung führt einen relativen Vergleich zwischen einem angenommenen WEA-Trudelbetrieb bis WEA-Stillstand im Rahmen der bedarfsorientierten Fremdsteuerung der WEAs durch. Einbezogen wird dabei die Richtungscharakteristik des konkreten WEA-Fabrikats bzw. Typs auf der Grundlage von Konstruktionsdaten der Hersteller.

Das Ergebnis in der vorliegenden gutachterlichen Untersuchung ist eine Aussage zum Lfz-Trackverlust für ein überquerendes Lfz, im Bereich der WEA-Anordnung. Die Bewertung der Zellenbelastung (DCM-Zellen) erfolgt dabei unter Beachtung des bei der Bundeswehr vorhandenen Tools. Im Rahmen des Gutachtens wurden hingegen Berechnungen mit messtechnisch verifizierten individuellen WEA-RQS-Daten durchgeführt, die in einzelnen Fällen durch Datenaufzeichnungen am neuen Radar ASR-S verifiziert worden sind.

Die DCM-Zellenbewertung (inkl. des Tools bei der Bundeswehr) ermöglicht nur eine Aussage über die Intensität und die räumliche Ausdehnung der zu erwartenden Einflüsse durch WEAs auf die „Cluttermap“. Sie gibt keine unmittelbare Aussage über die Wahrscheinlichkeit und zeitliche Dauer eines Lfz-Trackverlustes für einen ausgewählten Flugweg.

Das im Gutachten dargestellte Ergebnis zum Lfz-Trackverlust ist dagegen die entscheidende Aussage. Diese erfolgt im Rahmen der gutachterlichen Untersuchung durch weiterführende Berechnungen zu einem überfliegenden Lfz im Bereich der WEA-Anordnung.

Weiter erfolgt bei den im Gutachten ausgewiesenen Ergebnissen im Zusammenhang mit der Lfz-Überquerung ein Vergleich zwischen dem

- a. Lfz-Trackverlust für einen WEA-Trudelbetrieb durch eine bedarfsorientierte Fremdsteuerung und dem
- b. Lfz-Trackverlust für eine mit ausreichend reduzierter Rotordrehzahl betriebene WEA im Rahmen der bedarfsorientierten Fremdsteuerung.

Die Fremdsteuerung wird dabei nicht in Frage gestellt, sofern nicht ausdrücklich abweichend erwähnt.

Auf der Grundlage eines Feldversuchs zur Ermittlung absoluter Werte zum Lfz-Trackverlust unabhängig von der bedarfsorientierten Fremdsteuerung können sich geringfügig abweichende Ergebnisse zeigen, da das Gutachten als „Worst-Case“-Analyse auf einer vollständigen metallischen Reflexionsintensität der Rotorblätter basiert. In der Realität ist von einer geringeren Reflexionsintensität der Rotorblätter auszugehen, die günstigere Ergebnisse zur Reflexionsintensität bedeutet.

Die Untersuchung beurteilt für die geplanten WEAs die Auswirkungen auf mögliche Lfz-Trackverluste in Abhängigkeit von der räumlichen Anordnung der WEAs sowie die Störwirkungen, die durch die WEA-Anlagentypen zu erwarten sind. Das Ziel der Untersuchung ist die Identifizierung eines Restrisikos im Hinblick auf Lfz-Trackverluste gegenüber der heutigen Situation.

Bezüglich der Begrifflichkeiten und Definitionen sei auf die Festlegungen gemäß Anhang A verwiesen.

3 Vorbemerkung zur Wechselwirkung zwischen WEA und Radaranlagen der militärischen Flugsicherung

Die Analyse eines möglichen Störpotentials durch die geplanten Windenergieanlagen im Gebiet Jühdener Feld, südöstlich der Liegenschaft Wittmund im Nahbereich der militärischen Flugsicherungsanlagen, wurde erforderlich aufgrund von Bedenken der zuständigen Genehmigungsbehörden, insbesondere der militärischen Flugsicherung.

Bedenken wurden im Zusammenhang mit Windenergieanlagen seit ca. 1998 im Umfeld von Luftverteidigungsradaranlagen stets geäußert und im Rahmen einer umfangreichen, durch Flugvermessungen gestützten Untersuchung unter Leitung des Luftwaffenführungskommandos bestätigt, vgl. Abschlussbericht: "Einfluss von Hindernissen..." vom 15.02.2004. Dabei wurden gezielt für in Betrieb befindliche 3D-Radaranlagen Kriterien und Lösungen für WEAs bzgl. der radartechnisch zulässigen Dimensionen und räumlicher Anordnungen ausgearbeitet und nachgewiesen.

Vergleichbare durch systematische Flugvermessungen messtechnisch bestätigte und verifizierte Kriterien liegen für 2D-Radaranlagen im Rahmen der Förderstudie des BMU seit September 2011 vor:

- Dabei erfolgten an verschiedenen militärischen Flugplätzen die Aufzeichnung von Störeinflüssen von Windenergieanlagen auf das Radarsystem ASR 910 über einen langen Zeitraum unter sehr unterschiedlichen Wetter- bzw. Windbedingungen. Durch diese Ergebnisse konnten verschiedenen Windenergieanlagentypen unterschiedliche Störpotentiale bzw. Störhäufigkeiten zugeordnet werden.
- Auf der Grundlage von Auswertungen zu WEA-Darstellungs- bzw. Störhäufigkeiten sowie auf der Grundlage der Auswertung von Lfz-Überquerungen über

WEA-Anordnungen konnten Kriterien für radartechnisch zulässige Anordnungen am Beispiel vorhandener Windenergieanlagenanordnungen und WEA-Typen festgelegt werden.

Durch die Bewegung der Rotoren einer WEA wird für den Radarsensor ein Reflexionsobjekt mit einem starken dynamischen Radarquerschnitt bzw. Radarreflexionsintensität generiert. Die Charakteristik eines dynamischen Radarquerschnittes ist einem bewegten Luftfahrzeug sehr ähnlich, so dass für den Radarsensor eines ASR-S oder vergleichbarer moderner Flugsicherungsradaranlagen eine Unterscheidung gegenüber einem Luftfahrzeug (L fz) erschwert wird.

Die Störeinflüsse von Windenergieanlagen bei 2D-Radaranlagen zur Flugsicherung sind im Schwerpunkt durch zwei unterschiedliche Erscheinungen beschreibbar:

- a. Jede Windenergieanlage, unabhängig von ihrer Dimension und Rotorblattform, erzeugt mit einer individuellen Häufigkeit auf dem Radarschirm eine ortsfeste Zieldarstellung. In der Umgebung eines Radaranlagenstandortes sind über diese Erscheinung prinzipiell alle vorhandenen Windenergieanlagen sichtbar. Beim ASR-S ist die Darstellung dieser Plots üblicherweise nicht eingeschaltet. Die Darstellungshäufigkeit von WEAs ist somit kein direktes Maß für deren Störwirkung. In der Umgebung des Flugplatzes bzw. im Überwachungsbereich des Radars ist bereits eine größere Anzahl von Windenergieanlagen vorhanden. Zusätzliche Windenergieanlagen können beim ASR-S zu L fz-Plotausfällen sowie hierdurch bedingte Trackabbrüche generieren. In seltenen Fällen können WEA-Plots zu einer Trackablenkung bzw. Falschtracks führen.

WEA-Plots verursachen in der Radardarstellung bei Windstille – wenn der Windenergieanlagenrotor nicht dreht – keine L fz-Plotausfälle. Sie sind durch technische Maßnahmen bei Windenergieanlagen nicht lösbar, da hierzu eine Minderung der Reflexionsintensität von Windenergieanlagen über mehrere Dekaden,

d. h. mehr als 30 dB (Faktor 1000), notwendig wäre, die technisch nicht möglich ist.

- b. Beim Überflug über Windparks oder über mehrere räumlich eng angeordnete Windenergieanlagen zeigen sich Schwächungen der Primärziendarstellung bei der Überwachung von Lfz-Bewegungen im direkten Umgebungsgebiet um und über WEAs für alle Flughöhen. Eine falsche Trackgenerierung ist ebenfalls möglich.

Dieser Sachverhalt kann für die Flugsicherung eine schwerwiegende Problematik eines nicht akzeptablen Lfz-Zielverlustes bewirken und ist der Schwerpunkt der technischen Beurteilung des vorliegenden Gutachtens. Diese Problematik wird sehr stark bestimmt durch die räumliche Anordnung der geplanten Windenergieanlagen sowie die technischen Parameter der Windenergieanlagen, die die Störwirkung bestimmen. Durch technische Maßnahmen bei den Windenergieanlagen sowie durch deren räumliche Anordnungen im Hinblick auf mögliche Überflugsszenarien von Lfz sind hier Maßnahmen zur Problemlösung oder Problemminde- rung möglich. Diese Maßnahmen sind im Hinblick auf künftige digital arbeitende Radarsysteme zur Flugsicherung besonders vorteilhaft, weil eine Unterscheidung zwischen einer WEA und einem Lfz unterstützt wird.

In diesem Zusammenhang kann festgestellt werden, dass abhängig von der Verweildauer eines Lfz im Fall des Überfluges im entsprechend betroffenen Luft- raumgebiet oberhalb einzelner WEAs oder kleiner isoliert stehender Windparks diese nicht zwangsläufig als Ursache entsprechender Störungen wirksam wer- den, wenn die Verweildauer eines Lfz oberhalb dieses Gebietes geringer ist als drei Antennenumdrehungszeiten.

Zusätzlich wurden im vorliegenden Gutachten technische Erkenntnisse aus nachste- henden Dokumentationen und Besprechungen berücksichtigt:

- Abschlussbericht: Einfluss von Hindernissen auf HF-gestützte Führungsmittel vom 15.02.2004
- Feldstudie RAF AWC „The Effects of Wind turbine Farms on ATC Radar“ vom 10.05.2005
- Messtechnische Untersuchung an Windenergie rotorblättern zur Ermittlung von reflexionsdämpfenden Möglichkeiten vom 04.06.2003 und 15.01.2004.
- Report DoD USA „ THE EFFECES OF WIND TURBINE FARMS ON MILITARY READINESS 2006“
- aktuelle Empfehlungen von EUROCONTROL gemäß Doc ID 0.3 vom 18.05.2008
- BMVg IT 4 – Schutzbereich von Funkstellen (allgemeiner Umdruck Nr. 51)
- Besprechung und Vortrag bei „EUROCONTROL / Wind energy task group“ vom 01.03.2006 „Potential effects of wind turbines and justiciable solutions“.
- Technische Dokumentation zum 2D-Radar „ASR-S“ des Herstellers
- Technische Dokumentation des AFSBw zum ASR 910
- Ergebnisse einer BMU-Studie zum Störeinfluss von WEAs auf Radarsysteme zur Flugsicherung – Ergebnispräsentation von 09.12.2008.
- ICAO EUR Doc. 15 2nd Edition, September 2009
- ICAO – Doc 8071 – Manual on Testing of Radio Navigation Aids; Vol. III
- EUROCONTROL-Doc. “Assessment Methodology to Determine the Impact of Wind Turbines on ATC Surveillance Systems, Edition Number 0.4 (3.2.3 ff)”
- EUROCONTROL-Doc. "Wind farm impact assessment technique and mitigation measures, Edition 0.5”
- Besprechung mit AFSBw im Rahmen des BMU – Fördervorhabens „Fortführung WEA – Radarverträglichkeit“ vom 11.+12.05.2010
- Eurocontrol “Guidelines from Wind turbine task force” Version 1.0 from May 2010
- Abschlussbericht des BMU-Fördervorhaben „Fortführung WEA – Radarverträglichkeit“ von September 2011

- Datenaufzeichnung und Auswertung am Radar in Wittmund vom Typ ASR-S am Beispiel eines vorhandenen Windparks im Dezember 2015
- Besprechung beim Luftfahrtamt der Bundeswehr Referat 3 II e bzgl. der Bewertung für das ASR-S vom 19.01.2016
- Datenaufzeichnung und Auswertung am Radar in Schleswig vom Typ ASR-S am Beispiel zweier vorhandener Windparks im Juli 2016
- Mitteilung des BMVg vom Februar 2018: „Im Rahmen der bedarfsgerechten Schaltung fordert die Bundeswehr, dass Windenergieanlagen, welche eine Auflage zur Einrüstung einer bedarfsgerechten Schaltung erhalten, innerhalb von 1 Minute in einen für das Radargerät störungsfreien Zustand übergehen müssen. Ob die Windenergieanlagen dabei im Pendelbetrieb langsam weiterrotieren oder gänzlich angehalten werden, entscheidet nicht die Bundeswehr, sondern der jeweilige Anbieter der bedarfsgerechten Schaltung. Wichtig ist, dass die Drehzahl soweit reduziert bleibt, dass sich die drehenden Rotorblätter nicht störend auf das Radargerät auswirken.“

Neuere messtechnische Untersuchungen konzentrieren sich auf vergleichende Detailuntersuchungen zu konkreten Bestandparks, werden daher nicht explizit aufgeführt und dienen der Verifikation der Ergebnisse der genannten Grundlagenuntersuchungen.

4 Aufgabenbeschreibung

Beschreibung der grundsätzlichen Problematik:

Beim Überflug über Windparks oder über mehrere Windenergieanlagen zeigen sich selbst bei modernen 2D-Radaranlagen, wie dem ASR-S Schwächungen der Primärzielarstellung bei der Überwachung von Lfz-Bewegungen oder Lfz-Zielverluste für alle Flughöhen im direkten Umgebungsgebiet um WEAs. Es muss jedoch auch festgestellt werden, dass abhängig von der Verweildauer eines Lfz im entsprechend belasteten Luftraumgebiet oberhalb einzelner WEAs oder kleinerer isoliert stehender Windparks, diese nicht zwangsläufig als Ursache entsprechender Störungen wirksam werden. Abhängig von der zeitlichen Charakteristik der radarwirksamen Reflexionen, der Form und Materialität der Rotorblätter, kann eine deutlich geringere Störwirkung vorliegen.

Dagegen kann durch eine geringe Anzahl zusätzlicher WEAs eine räumliche Verknüpfung bisher „isolierter“ WEA-Gruppierungen geschaffen werden. In diesem Fall wird ein durch Störungen belastetes ausgedehntes Gebiet geschaffen, das vorher nicht wirksam war.

Ursache für mögliche Flugzielverluste ist die intensive Oberflächenreflexion sowie der dynamische RQS-Anteil von sehr großen Bauwerken mit bewegten Komponenten wie z. B. den Rotorblättern von Windenergieanlagen. Die bewegten Komponenten können aufgrund des dynamischen RQS und dessen Dopplercharakters nicht durch Verfahren wie Festzielunterdrückung in einem fest definierten Umgebungsbereich herausgefiltert werden. Dadurch wird eine Flugzielverfolgung / „Trackbildung“ in einem Umgebungsbereich oberhalb des Hindernisses stark eingeschränkt oder sogar fehlerhaft, da der RQS einer WEA den RQS eines Lfz deutlich übertrifft.

Bei Lfz wird daher die Trackbildung bzw. die Primärzieldarstellung deutlich beeinträchtigt, wenn die „Verweildauer“ dieses Lfz im durch die o. g. Reflexionsstörungen betroffenen Gebiet einen ausreichenden Zeitraum, z. B. zwei Antennenumdrehungszeiten, überschreitet. Die Bewertung von WEAs erfolgt unter der Maßgabe, dass die zu betrachtenden Störzellen in einem definierten Polar Flächenraster (DCM-Zellen) vorliegen, welcher auf den Radarstandort ausgerichtet ist.

Die Wirkungsintensität dieser DCM-Zelle wird bestimmt durch die Reflexionsintensität und die bzgl. des Radarstandorts radialen Geschwindigkeitskomponenten des Rotorblattes. Da kleinere WEAs größere Rotorgeschwindigkeiten zeigen, stellt sich die Problematik für unterschiedlich große WEAs sehr ähnlich dar. Zudem sind die Anzahl und die Anordnung der WEAs innerhalb sowie außerhalb der betrachteten DCM-Zellen maßgeblich.

Eine herabgesetzte Reflektivität oder eine herabgesetzte radiale Geschwindigkeitskomponente der Rotoren der zu berücksichtigenden WEAs mindert zwangsläufig die Wirkungsintensität bzw. Relevanz einer Störzelle.

In diesem Zusammenhang ist die RQS-Bewertung eines WEA-Typs von besonderer Bedeutung, da bei einer WEA bauartbedingt nicht zwangsläufig eine 100%-ige Störwirkung angenommen werden kann.

Die DCM-Zelle mit 1,8° Breite und einer ca. 300 m großen radialen Ausdehnung (bei Entfernungen von weniger als 10,5 km beträgt die Dimension der DCM-Zellen ca. 300 m x 3,6°) im Bereich des Windparks beim ASR-S, ist in allen Flughöhen wirksam. Eine Filterung auf der Grundlage der charakteristischen Störeinflüsse der Windenergieanlagen unter Berücksichtigung des dynamischen Radarquerschnittes ist bisher mit 2D-Radaranlagen nicht möglich.

Im Hinblick auf moderne künftige Flugsicherungsradaranlagen kann eine Verbesserung der Primärzieldarstellung durch Verfahren wie

- verbesserte Tracker-Routinen,
- verbesserte räumliche Auflösung, sowie
- „adaptives Beamforming“

erwartet werden.

Aufgrund fehlender messtechnischer Nachweise unter betrieblichen Bedingungen wird bei der vorliegenden Windparkbewertung auf diese künftigen Möglichkeiten nicht zurückgegriffen.

Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass im Falle radarreflexionsarmer Rotorblätter bei WEAs die Voraussetzungen für eine gute Wirksamkeit WEA-optimierter „Tracker- Routinen“ gegeben wird, da die Intensitätsunterschiede zwischen dem dynamischen RQS eines WEA-Rotors und einem Lfz in gleicher Distanz und Richtung ausreichend herabgesetzt sind.

5 Untersuchungsverfahren

Für die vorliegende Untersuchung der WEA-Anordnung im Gebiet Jühdener Feld wird ein Bewertungsverfahren zugrunde gelegt, das sich auf die Auswertung von Beobachtungen des ASR-S auf der Grundlage heute bekannter Parameter stützt.

Die berücksichtigte Betriebsrotordrehzahl für den neuen Anlagentyp Nordex N 133 beträgt 6,9 U/min bis 13,9 U/min.

5.1 Bewertungsmethodik:

Die technischen Erfordernisse für die Windenergieanlagen im Gebiet Jühdener Feld erfolgen unter den Randbedingungen des Radarsystems ASR-S oder funktionsgleicher anderer Radarsysteme. Grundlage sind die WEA-Standorte gemäß den Koordinaten aus Tabelle 1.

1. Die Bewertung der WEAs erfolgt unter der Maßgabe, dass die zu betrachtenden durch WEAs beeinflussten Zellen in einem definierten Polar Flächenraster (DCM- Zellen) vorliegen, welcher auf den Radarstandort ausgerichtet ist. Beim ASR-S weist jede dieser DCM-Zellen in einer Entfernung zwischen 10,5 km und 70 km zum Radargerät $299,7 \text{ m} \times 1,8^\circ$ auf. Bei Entfernungen von weniger als 10,5 km beträgt die Dimension der DCM-Zellen $299,7 \text{ m} \times 3,6^\circ$.
2. Die für die Bewertung angenommene Lfz-Überfluggeschwindigkeit wird mit 180 km/h (50 m/s) angegeben, dabei wird ein störrelevanter Trackverlust bei weniger als drei Antennenumdrehungen ausgeschlossen.

Die Beurteilung der Lfz-Verweildauer im Falle eines Überflugs über die Gesamtanordnung der WEA-Standorte gemäß Tabelle 1 führt auf eine Zunahme der Flugzielverluste infolge der durch WEAs beeinflussten DCM-Zellen (im Folgen-

den als Störzellen bezeichnet). Nach der Errichtung der WEAs sind bei Überflügen Flugzielverluste mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit der Überflugrichtung zu erwarten. Bei diesem Bewertungsverfahren wurden der Geländeeinfluss sowie die reale Erfassbarkeit von Windenergieanlagen entsprechend der Ergebnisse der BMU-Studie aus 2011 berücksichtigt.

3. Die tatsächliche Störrelevanz innerhalb einer Störzelle wird durch die Position bzw. die Anordnung der WEAs innerhalb und außerhalb der betrachteten Störzelle bestimmt. Zudem sind die Intensität und die zeitliche Änderung der Radarreflektivität bzw. des RQS (Radarrückstreuquerschnitt) einer WEA maßgeblich.

Von Bedeutung ist jedoch, dass der RQS der WEA eine Größenordnung zeigt, die deutlich über der Detektionsschwelle des ASR-S sowie anderer moderner 2D-Radarsysteme liegt, so dass eine Bewertung der WEA-Erfassung durchgeführt werden muss.

Ein Lfz-Trackverlust ist gemäß den Forderungen und Festlegungen der Flugsicherung ab der dritten durch eine WEA gestörten Detektion mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit gegeben.

Bei Radaranlagen der Flugsicherung wird für eine sichere Flugzielerfassung eine Wahrscheinlichkeit ($P_{D \text{ Lfz}}$) von mindestens 90 % gefordert, die realiter diffizil zu erreichen ist.

Der oben gewählte Ansatz stellt im Hinblick auf die Bewertung von Überflügen über WEA einen Worst-case Ansatz dar.

So wäre eine Lfz-Zielverlustwahrscheinlichkeit von unter 10 % für die o. g. Forderung von mindestens 90 % für die $P_{D \text{ Lfz}}$ rechnerisch ohne nachteilige Auswirkung. Dieser Ansatz wird jedoch im vorliegenden Fall nicht verfolgt, weil eine Anhebung der Falschalarmrate (FAR) in diesem Zusammenhang ebenfalls zu berücksichtigen ist.

5.2 Bewertungsprozedur:

1. Um jede WEA wird als ein möglicher Ort für Reflexionen ein Ortskreis mit der Größe des Rotordurchmessers angelegt.
2. Das Umgebungsgebiet um einen Radarstandort wird ab einer Entfernung zwischen 10,5 km und 70 km zum Radargerät in einem polaren Koordinatensystem durch DCM-Zellen mit jeweils 299,7 m radialer Ausdehnung, sowie mit einer Azimutausdehnung von $1,8^\circ$ – bezogen auf den Radarstandort – gegliedert. Bei Entfernungen von weniger als 10,5 km beträgt die Dimension der DCM-Zellen $299,7 \text{ m} \times 3,6^\circ$.
3. Jede DCM-Zelle in dem sich der Ortskreis einer Windenergieanlage befindet, sowie die angrenzenden Zellen werden markiert. Die Festlegung, ob eine derart markierte DCM-Zelle als Störzelle interpretiert wird, setzt eine ausreichende Reflexionsintensität, d. h. „Radarquerschnitt“ der WEAs voraus, vgl. hierzu Kapitel 7.
4. Für jede markierte DCM-Zelle wird die Wahrscheinlichkeit der Darstellung eines Lfz mit einem Radarrückstreuquerschnitt von 3 m^2 ermittelt und anschließend in einer Grafik farbig kodiert.
5. Es werden vier verschiedene Überflugpfade über das Gebiet mit farbig kodierten DCM-Zellen gelegt. Dabei werden bezogen auf das Radargerät ein Überflug Radial, einer Tangential und zwei unterschiedliche Diagonalüberflüge betrachtet. Die einzelnen Überflugpfade werden derart gewählt, dass jeweils die größte Lateraldimension der Störzellen der geplanten WEA abgedeckt wird. Diese Überflugpfade stellen damit ein sogenanntes „Worst-Case“-Szenario dar. Als Referenzgeschwindigkeit eines Lfz wird 180 km/h gewählt. Damit sind die typischen Reisefluggeschwindigkeiten auch kleiner Lfz berücksichtigt.

6. Für jeden Überflugpfad wird die Zielverlustwahrscheinlichkeit an diskreten Punkten berechnet. Die für die Bewertung angenommene Lfz-Überfluggeschwindigkeit beträgt hierbei 180 km/h (50 m/s).
7. Zulässig sind Erfassungsverluste bei maximal zwei direkt aufeinander folgenden Antennenorientierungen in Richtung WEA oder Windpark.
8. Ab dem dritten direkt aufeinander folgenden Erfassungsverlust besteht die Möglichkeit eines Trackverlustes.
9. Trackverlustwahrscheinlichkeiten für ein Lfz mit einem RQS von 3 m² bei einem Überflug von über 50 % sind gemäß den Forderungen und Festlegungen der Flugsicherung radartechnisch nicht zulässig. Ein RQS von 3 m² entspricht z. B. einem einmotorigen Sportflugzeug.
10. Die räumliche Separation zu einer benachbarten WEA-Gruppierung muss einen Abstand zeigen, der über mindestens drei Antennenumdrehungen eine störfreie neue Detektion des Lfz gewährleistet.

Bei Windenergieanlagen mit sehr großen Rotordurchmessern von über 100 m und geringerer Rotordrehzahl wurde festgestellt, dass eine durchgehende Störung trotz eines sehr großen Radarquerschnittwertes infolge langsamer Drehgeschwindigkeiten des Rotors bei bestimmten Windrichtungen nicht gegeben ist. Die Störwirkung ist in dem Fall herabgesetzt.

Liegt keine vertikale Orientierung eines Rotorblattes vor, zeigt sich ein offenbar ausreichend reduzierter dynamischer Radarquerschnitt bzw. Radarreflexionsintensität. Dadurch ist der zulässige Grenzwert für die Reflexionsintensität festgelegt. Eine WEA, deren dynamischer Radarquerschnitt diesen Grenzwert nicht überschreitet, generiert keinen zusätzlichen Störeinfluss.

6 Bestimmung der für den Windpark relevanten Windrichtungen

Es gilt zu beachten, dass bei einem größeren RQS einer WEA, die Lfz-Darstellungswahrscheinlichkeit (PD) sinkt. Daher werden zwei Windrichtungen untersucht, die bzgl. der Darstellungswahrscheinlichkeit für ein Lfz mit einem Radarrückstreuquerschnitt von 3 m^2 , den Mittelwert sowie den Worst-Case abdecken.

Die Untersuchung für den Mittelwert wird bei einer Rotorausrichtungen zum Radar von 330° , sowie für den Worst-Case bei einer Rotorausrichtungen zum Radar von 190° , durchgeführt.

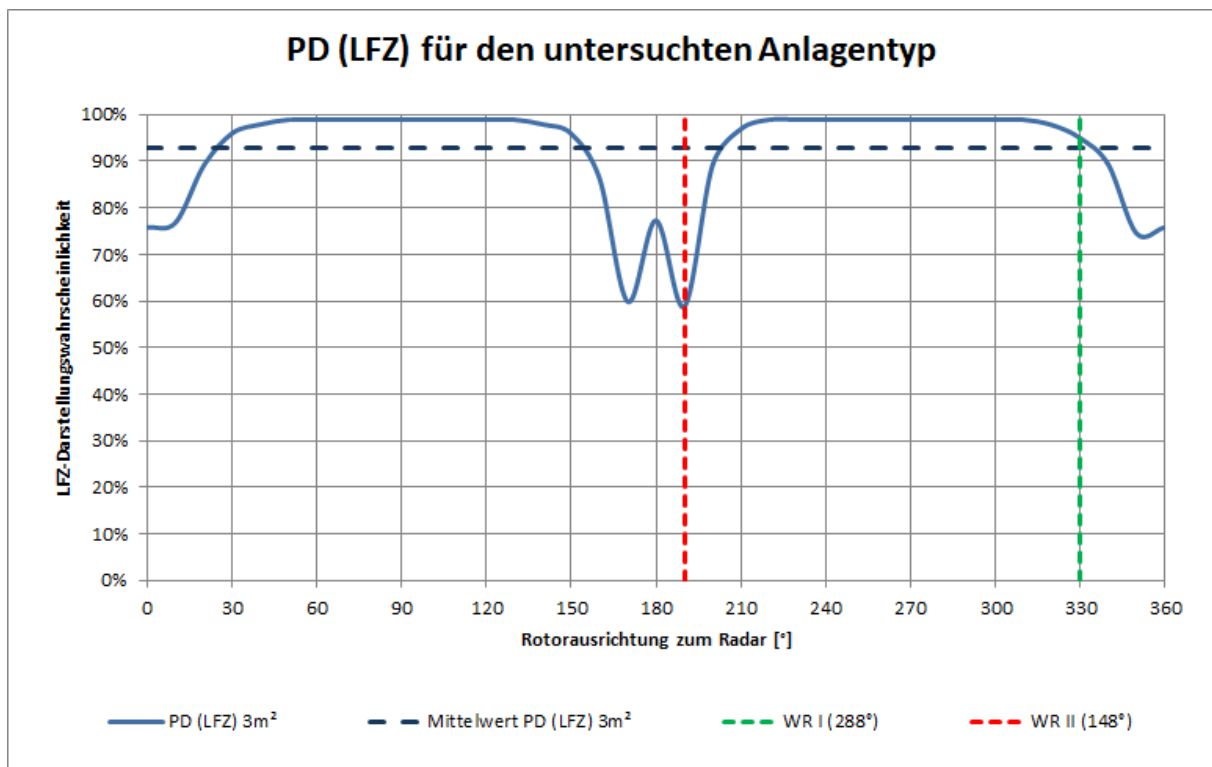


Abbildung 1: Darstellungswahrscheinlichkeit (PD) für ein Lfz bei dem untersuchten Anlagentyp

Eine Rotorausrichtung zum Radar von 330° entspricht hierbei einer Windrichtung von 288° und eine Rotorausrichtung zum Radar von 190° entspricht hierbei einer Windrichtung von 148° .

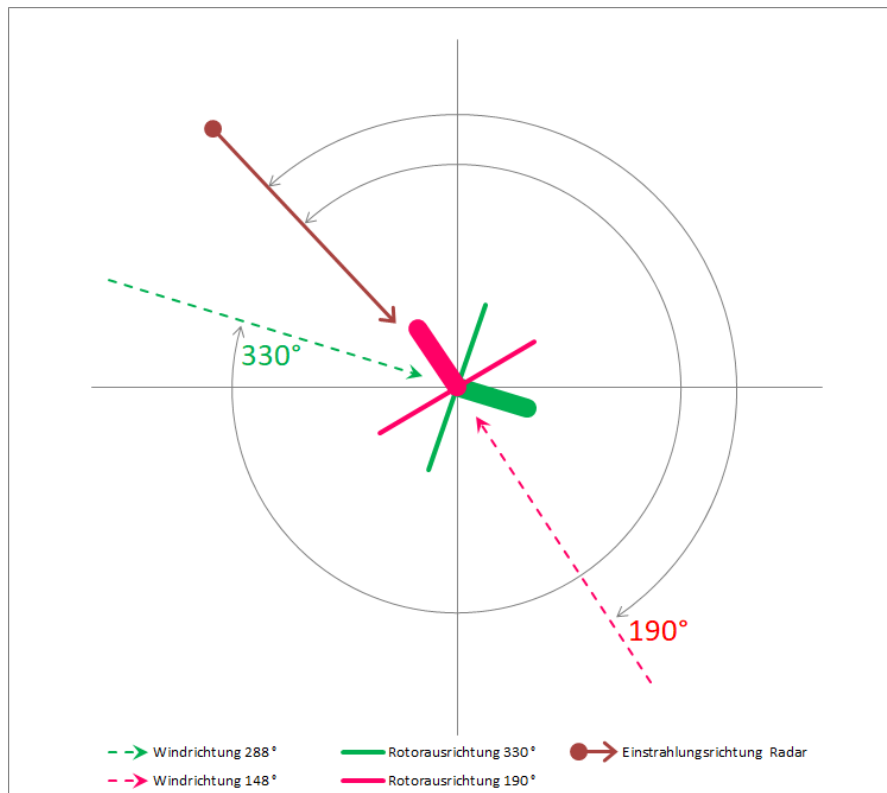


Abbildung 2: Untersuchte Windrichtungen und entsprechende Ausrichtung der Windenergieanlagen zum Radar

7 Radarquerschnittanalyse

Der dynamische Radarquerschnitt zeigt abhängig von der Orientierung der Rotorblätter während der Umdrehung sehr unterschiedliche Werte, die bei vertikaler Orientierung eines Rotorblattes oder einer Rotorblattkante stets einen maximalen Reflexionswert für die z. B. bei vertikaler Polarisierung arbeitende Radarantenne zeigen.

Der RQS bzw. Rückstrahlfläche eines Objektes ist eine objektspezifische Größe, die für die Entdeckungswahrscheinlichkeit eines Objektes durch ein Radargerät ein wesentlicher Parameter ist. Sie ist abhängig von der Kubatur und der Wellenlänge bzw. vom Verhältnis der Strukturabmessungen des Körpers zur Wellenlänge. Quantitativ gibt der Radarquerschnitt eine effektive Fläche an, die die einlaufende Welle einfängt und isotrop in den Raum abstrahlt.

Der Radarquerschnitt σ ist definiert als

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{P_s}{P_i}$$

Dabei ist P_i die Leistungsdichte auf dem Radarziel und P_s die gestreute Leistungsdichte in einem Abstand R vom Radarziel.

Für eine WEA erfolgt die Berechnung des RQS auf der Grundlage einer computer-gestützten 3D-CAD Nachbildung gemäß beigestellter Konstruktionsunterlagen des Herstellers. Der RQS ist nur gültig für die Untersuchungsfrequenz sowie die angegebene nachgebildete Objektkubatur bzw. Oberflächenformgebung und Dimension unter Berücksichtigung der Materialien und Bauweisen sowie ggf. Mehrfachreflexionen zwischen Oberflächensegmenten.

Zur Gegenüberstellung mit einer WEA sind zur Orientierung typische RQS-Werte von Objekten nachstehend angegeben:

Vogel $\approx 0,01 \text{ m}^2$

Mensch $\approx 1 \text{ m}^2$

Einmotoriges Sportflugzeug ... leichtes Jagdflugzeug $< 3 \text{ m}^2$

schweres Kampfflugzeug $< 5 \text{ m}^2$

Verkehrsflugzeug $\approx 40 \text{ m}^2$

Jumbojet / A 380 $\approx 100 \text{ m}^2$

Für ein großes Kampfflugzeug kann in dem Zusammenhang ein RQS von 5 bis 6 m^2 angegeben werden. Ein Transportflugzeug zeigt einen RQS in der Größenordnung von ca. 100 m^2 , ein kleines Passagierflugzeug zeigt einen RQS von ca. 10 m^2 , ein Mensch/Ultraleichtfluggerät zeigt einen RQS in der Größenordnung von ca. 1 m^2 .

7.1 Ermittlung des RQS einer WEA

Der RQS einer Windenergieanlage hängt prinzipiell von drei unterschiedlichen Parametern ab. Dem Typ der Anlage, der Windrichtung und damit dem Winkel zwischen Rotorachse und dem Richtungsvektor zur Radaranlage, und der Rotorblattstellung zum Zeitpunkt der Erfassung durch das Radar. Unter Berücksichtigung der Antennenumdrehungszeit des Radarsystems ASR-S ist die Möglichkeit einer Detektion einer WEA mit einer zeitlichen Rate von ca. 5 Sekunden gegeben.

Die Ermittlung des RQS berücksichtigt die nachstehenden technischen Aspekte:

1. Die Objektstruktur einer WEA wird von der elektromagnetischen Welle nicht kohärent (phasengleich) erreicht. Grundsätzlich liegen gekrümmte Wellenfronten vor. Eine phasengleiche Erfassung eines Abschnittes eines Rotorblattes zum Beispiel liegt vor, wenn die Distanzunterschiede kleiner sind als $1/8$ der Wellenlänge.

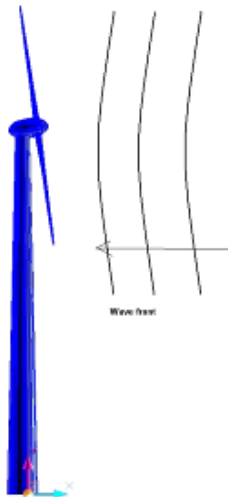


Abbildung 3: Schemabild zur Wellenfront.

2. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass die Radareinstrahlung auf die Windenergieanlage durch die Hauptkeule / Hauptrichtung innerhalb der Hauptkeule nicht mit gleicher Intensität erfolgt. Die Breite der Hauptkeule (Half power beam) wird

für ca. 2,7 GHz–Systeme mit ca. 3° Breite angenommen. So liegt bei ca. 13 km Distanz eine Fläche von ca. 680 m Durchmesser im Raum vor.

Die Ermittlung des RQS_{dyn} der Rotoren für die geplanten Windenergieanlagen wurde nachstehend für eine Frequenz von ca. 2,7 GHz ermittelt. Der RQS über ϕ/deg wird für eine vollständige Rotordrehung stets zwischen 0° und 360° bei einem Elevationswinkel von 0° bzgl. der Radarantenne und Rotornabe dargestellt.

Dabei wird die Oberfläche der Objektstruktur durch eine ausreichend große Anzahl ebener Dreieckflächenelemente nachgebildet – „trianguliert“. Zur Vermeidung unphysikalischer singulärer Einzelwerte, die bei jeweils rot angegebenen RQS-Rohdaten vorliegen, wird zur Bewertung ein Winkelintervall über 2° festgelegt. Die Medianwerte aus diesem Bereich sind, wie in Abbildung 4 und Abbildung 5 ersichtlich, durch blaue Linie gekennzeichnet und werden nachfolgend zur Beurteilung herangezogen.

Abbildung 4 gibt am Beispiel einer Nordex N 117 den RQS_{dyn} für die Rotorausrichtungen zum Radar von 330° an. Diese Rotorausrichtung stellt bzgl. der Lfz-Darstellungswahrscheinlichkeiten den Mittelwert dar.

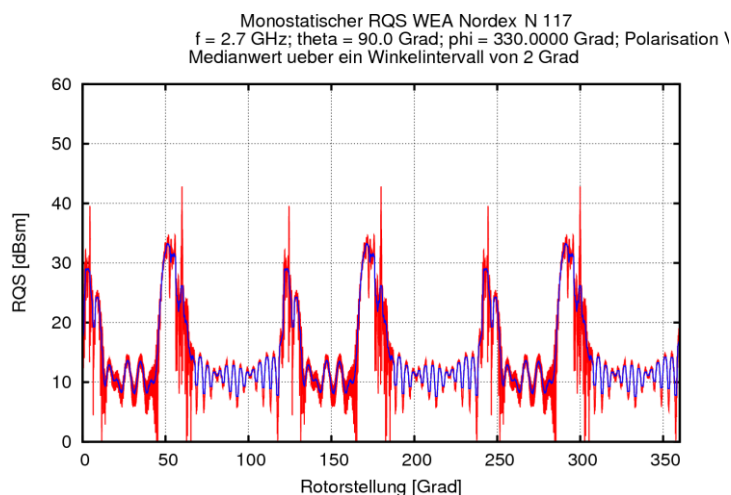


Abbildung 4: RQS_{dyn} über eine Rotordrehung am Beispiel einer Nordex N 117 bei einer Rotorausrichtung zum Radar von 330°

Abbildung 5 gibt am Beispiel einer Nordex N 117 den RQS_{dyn} für die Rotorausrichtungen zum Radar von 190° an. Diese Rotorausrichtung stellt bzgl. der Lfz-Darstellungswahrscheinlichkeiten als Worst-Case dar.

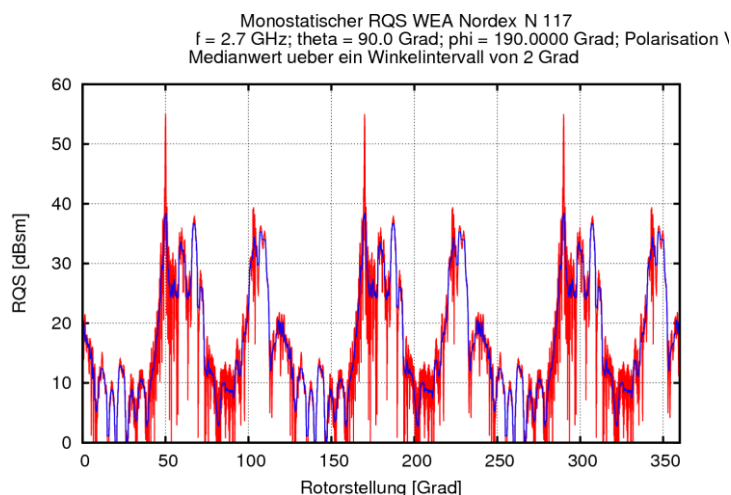


Abbildung 5: RQS_{dyn} über eine Rotordrehung am Beispiel einer Nordex N 117 bei einer Rotorausrichtung zum Radar von 190°

8 Bewertung des Gesamteinflusses der WEA-Gruppe bzgl. „Störzellen“

Ein Radargerät vom Typ ASR-S besitzt zur Unterdrückung von stationären Zielen „mit Dopplerverschiebung“ eine sogenannte Doppler-Clutter-Map (DCM-Map). Zur Ermittlung der Luftraumgebiete (DCM-Zellen), in denen ein möglicher Zielverlust nicht ausgeschlossen werden kann, wird nicht nur der Standort der WEA-Säule selbst betrachtet, sondern es wird zusätzlich um jeden WEA-Standort ein „Ortskreis“ mit der Größe des Rotordurchmessers eingetragen. Hierdurch werden alle potentiellen Reflexionsorte vom Rotor berücksichtigt.

Nachfolgend wird für jede betroffene DCM-Zelle, sowie die angrenzenden Zellen, die Darstellungswahrscheinlichkeit für bestimmte Radarrückstreuquerschnitte des Ziels berechnet. Die Darstellungswahrscheinlichkeit eines Lfz mit einem RQS von 3 m^2 für jede betroffene DCM-Zelle ist im Kapitel 9.1 und 9.2 dargestellt.

Ein RQS von 3 m^2 entspricht z. B. einem einmotorigen Sportflugzeug oder einem leichten Jagdflugzeug. Bei größeren RQS-Werten eines Lfz würden sich die nachfolgenden Ergebnisse günstiger darstellen. Ein kleinerer RQS-Wert von ca. 1 m^2 wie z. B. von einem Ultraleichtfluggerät oder einer größeren Drohne würde zu ungünstigeren Ergebnissen führen. Der Fall, dass sich ein Ultraleichtfluggerät/Drohne unmittelbar über oder in einem Windpark aufhält, ist jedoch aufgrund der Turbulenzen durch die Windenergieanlagen sehr unwahrscheinlich.

Über diese betroffenen DCM-Zellen werden verschiedene Flugpfade gelegt. Die gewählten Flugpfade stellen jeweils die ungünstigsten Überflugpfade für die jeweilige Überflugrichtung dar, die bezogen auf die Störzellenanordnung möglich ist. Es sei darauf hingewiesen, dass abhängig vom Flugpfad im Detail deutlich unkritischere Überflugszenarien vorliegen. In der Regel hat eine Abweichung vom hier angenommenen Worst-Case-Überflugpfad eine oft sogar deutlich günstigere Situation zur Folge, bezogen auf die resultierende Störwahrscheinlichkeit. Oft sind Abweichungen von nur 50 m

bis 100 m ausreichend, um die Problematik entscheidend zu entschärfen. Dies gilt in umso höherem Maße bei separiert gelegenen Störzellen und umso weniger, je verdichteter das Störzelligebiet beschaffen ist.

Die Überflugpfade kennzeichnen infolge der festgelegten Überfluggeschwindigkeit von 50 m/s durch blaue Punkte die Detektionsereignisse, die infolge der zeitlichen Abtastung durch die drehende Radarantenne möglich sind. Der Abstand der Detektionspunkte kann beim ASR-S mit 250 m angegeben werden.

Eine vergleichbare Überflugbetrachtung für eine deutlich höhere Überfluggeschwindigkeit von z. B. 100 m/s \approx 360 km/h kann bei ausschließlicher Betrachtung des jeweils zweiten blauen Punktes erfolgen.

Für die vorliegende WEA-Anordnung werden vier verschiedene Überflugpfade jeweils in unterschiedlichen Richtungen analysiert. Die einzelnen durch WEAs belasteten Störzellen bilden eine gemeinsame Störzone. Einschwenkvorgänge wurden ebenfalls untersucht, führen im vorliegenden Fall jedoch nicht zu abweichenden Ergebnissen, da die gewählten Überflugpfade die ungünstigsten Situationen wiedergeben.

Die Bewertung der einzelnen Überflugsszenarien entlang der gekennzeichneten Flugpfade orientiert sich an den blau gekennzeichneten Detektionsorten. An diesen Orten wird für die Überflugbewertung die Lfz-Position angenommen, an der ein Lfz durch die Radarortungsanlage erfasst und ggf. zeit- und ortsgleich mit der nächstgelegenen Windenergieanlage detektiert wird. Diese zeit- und ortsgleiche Detektion kann zu einem Lfz-Zielverlust mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit führen, die sehr stark durch die Störintensität der Windenergieanlagen bestimmt wird.

Der Flugpfad eines Lfz unterliegt beim Überflug in das Luftraumgebiet oberhalb der Windenergieanlagen gemäß den Forderungen und Festlegungen der Flugsicherung ab der dritten durch eine WEA gestörten Detektion einer bestimmten Verlustwahrscheinlichkeit bzgl. der Lfz-Zielerkennung.

Weiter kann auf dieser Grundlage eine Aussage getroffen werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit grundsätzlich von einem Zielverlust sowie einem Trackverlust während eines Überfluges ausgegangen werden kann. Nach einem Trackverlust sind in direkter Folge drei ungestörte Detektionsereignisse notwendig, um eine neue Lfz-Trackgenerierung zu ermöglichen.

Abhängig von der Störintensität und der Länge des Flugpfades oberhalb eines Windenergieanlagegebietes ist weiter eine Aussage möglich, mit welcher Wahrscheinlichkeit Zielverluste unterschiedlicher Länge – zeitlich und räumlich – zu erwarten sind. Insbesondere bei der Planung von zusätzlichen Windenergieanlagen im räumlichen Zusammenhang mit bestehenden Anlagen oder bei Repowering-Vorhaben kommt diesem Aspekt eine besondere Bedeutung zu, um die Änderung und die Auswirkung für die Flugsicherung zu beurteilen:

- Der Zeitabschnitt eines Lfz-Trackverlustes ist somit nicht zwangsläufig identisch mit dem Zeitraum, den ein Lfz für den Überflug über ein Störzelligebiet benötigt.
- Auch sind die notwendigen Separationsabstände zwischen benachbarten WEA-Gebieten ebenfalls nicht identisch mit drei Detektionsabständen.

Beide Sachverhalte werden durch die Störintensität der einzelnen WEA und deren räumlicher Anordnung bestimmt, die räumliche Lücken bei den Störzellen bewirken können.

Diese Ergebnisse sind nachstehend für jedes Überflugszenario angegeben.

In den nachfolgenden Kapiteln erfolgt eine farbige Kodierung der Darstellungswahrscheinlichkeit eines Lfz mit einem Radarrückstreuquerschnitt von 3 m^2 , auf Grundlage der vom Radarhersteller überlassenen Beschreibung der Signalverarbeitung.

Am Radarschirm der ASR-S lässt sich eine Darstellung der DCM-Zellen einstellen. Diese Darstellung ist üblicherweise nicht eingeschaltet. Die Visualisierung der DCM-Zellen wurde hierbei seitens des Herstellers empirisch zur Darstellung für einen Lotsen eingestellt. Die Farben entstehen aus einer „Übersetzungstabelle“ in der ASR-S Auswerteeinheit, die die typisch am BW-Standort auftretenden Amplituden der vom SIP gelieferten DCM in Farben übersetzt. Hierbei ist zu beachten, dass das ASR-S sechs parallele DCM-Maps für die sechs Bewegtzieldopplerfilter besitzt. Farblich dargestellt wird je DCM-Zellenposition jedoch nur ein Element, welches aus den Pegeln in diesen sechs Dopplerfiltern gebildet wurde. Daraus eine direkte Aussage bzgl. der Verlustrate abzuleiten ist somit nicht möglich, da u.a. die Abhängigkeit von dem jeweils stimulierten Dopplerfilter unterschlagen wird.

Zudem ist der RQS eines zu betrachtenden Lfz bei der farblichen Darstellung der DCM-Zellen am Radarschirm nicht berücksichtigt. Für eine Aussage zur Darstellungswahrscheinlichkeit eines Lfz ist dieser aber notwendig.

9 DCM-Störzellenbewertung

Untersucht wurde die Situation „Planung“ bei beiden betrachteten Windrichtungen, sowie zusätzlich „Planung opt“ bei der Windrichtung II. Die hierbei berücksichtigten Betriebszustände der Windenergieanlagen sind nachfolgend angegeben.

Situation „Planung“:

Die in Tabelle 1 mit Planung benannten Anlagen wurden als aktiv berücksichtigt

Situation „Planung opt“:

Die in Tabelle 1 mit Planung benannten Anlagen WEA 01, WEA 04 und WEA 05 wurden als aktiv, die WEA 02 und WEA 03 als abgeschaltet berücksichtigt. Die WEA 05 ist mit der angegebenen Rotordrehzahlbegrenzung auf 8 rpm berücksichtigt.

9.1 Betrachtung der Windrichtung I (Bereich um 288°)

9.1.1 Situation „Planung“

Die in Tabelle 1 mit Planung benannten Anlagen wurden als aktiv berücksichtigt

Die Abbildung 6 zeigt die farbige Kodierung der Darstellungswahrscheinlichkeit eines Lfz mit einem Radarrückstreuquerschnitt von 3 m² für die Situation „Planung“.

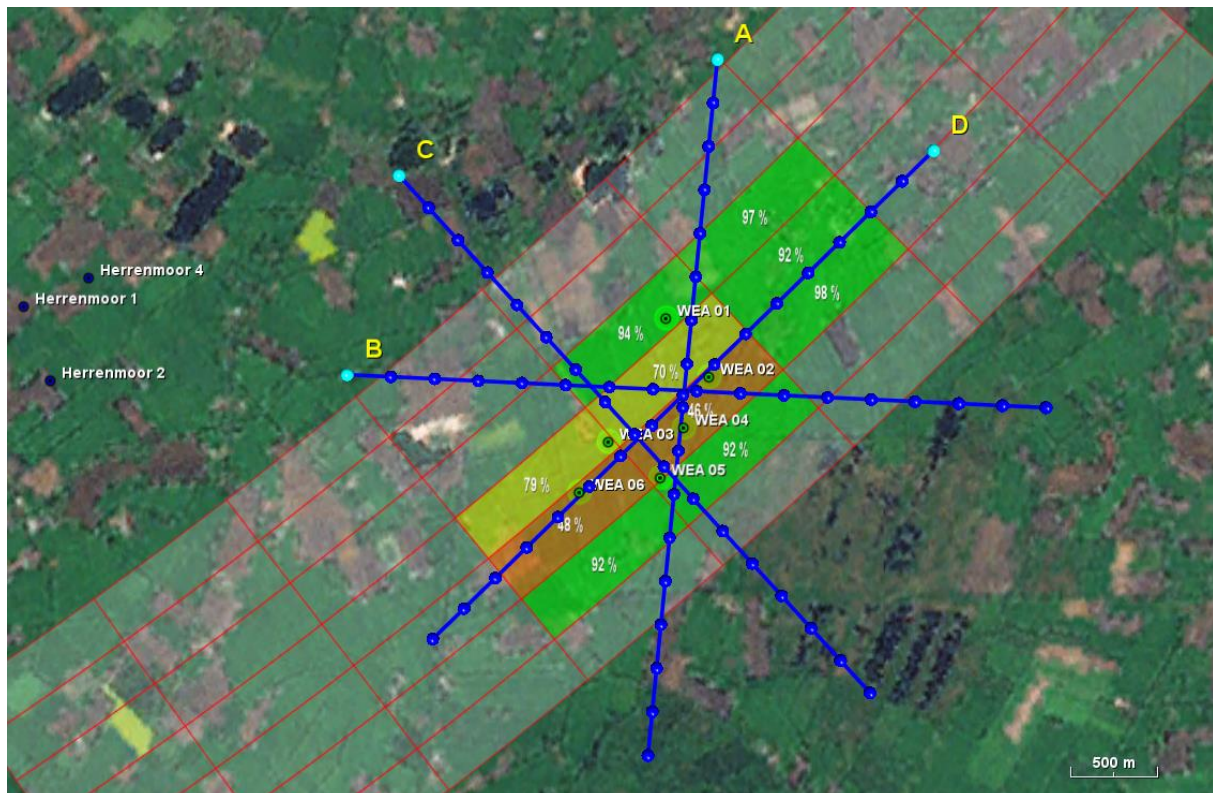


Abbildung 6: Übersicht über die Situation „Planung“. Farblich kodiert sind die DCM-Zellen nach der Wahrscheinlichkeit der Darstellung eines Lfz mit einem RQS von 3 m². Zusätzlich sind die „Worst-Case“-Überflugpfade durch blaue Linien dargestellt. Die Ermittlung der Ziel- bzw. Trackverlustwahrscheinlichkeit erfolgt an den blauen Punkten. Copernicus Sentinel data [2024]

Die Farbkodierung der Darstellungswahrscheinlichkeit eines Lfz geschieht nach der folgenden Systematik:

- 0 % - 19 % = rot
- 20 % - 49 % = orange
- 50 % - 89 % = gelb
- 90 % - 100 % = grün

Die gewählten Überflugpfade (blaue Linien) über den geplanten Windpark stellen ein sogenanntes „Worst-Case“-Szenario dar. Dabei wird die Trackverlustwahrscheinlichkeit eines Lfz an den mit blauen Punkten gekennzeichneten Orten ermittelt.

Die Pfade sind hierbei:

- A = Diagonal A
- B = Diagonal B
- C = Radial
- D = Tangential

Die Überfluggeschwindigkeit des Lfz wird mit 50 m/s angenommen.

Flugpfad A: Von N nach S und in umgekehrter Richtung

Beim Flugpfad A kann die Länge des Pfades mit 8 Detektionen, entsprechend 1750 m, angegeben werden. Die Trackverlustwahrscheinlichkeit liegt bei 0 Detektionen über 50 % und steigt auf maximal 16 % an. In Gegenrichtung liegt die Trackverlustwahrscheinlichkeit bei 0 Detektionen über 50 %.

Flugpfad B: Von W nach O und in umgekehrter Richtung

Beim Flugpfad B kann die Länge des Pfades mit 6 Detektionen, entsprechend 1250 m, angegeben werden. Die Trackverlustwahrscheinlichkeit liegt bei 0 Detektionen über 50 % und steigt auf maximal 16 % an. In Gegenrichtung liegt die Trackverlustwahrscheinlichkeit bei 0 Detektionen über 50 %.

Flugpfad C: Von NW nach SO und in umgekehrter Richtung

Beim Flugpfad C kann die Länge des Pfades mit 5 Detektionen, entsprechend 1000 m, angegeben werden. Die Trackverlustwahrscheinlichkeit liegt bei 0 Detektionen über 50 % und steigt auf maximal 12 % an. In Gegenrichtung liegt die Trackverlustwahrscheinlichkeit bei 0 Detektionen über 50 %.

Flugpfad D: Von NO nach SW und in umgekehrter Richtung

Beim Flugpfad D kann die Länge des Pfades mit 12 Detektionen, entsprechend 2750 m, angegeben werden. Die Trackverlustwahrscheinlichkeit liegt bei 4 Detektionen über 50 % und steigt auf maximal 63 % an. In Gegenrichtung liegt die Trackverlustwahrscheinlichkeit bei 8 Detektionen über 50 %.

9.1.2 Zusammenfassende Beurteilung der verschiedenen Überflugs-Szenarien:

Bei allen hier durchgeführten Untersuchungen ist zu beachten, dass es sich um sogenannte „Worst-Case“-Szenarien handelt. Das bedeutet, dass ein etwaiger realer Überflug genau diese hier dargestellten Richtungen aufweisen müsste. Dabei ist bei einer auch nur geringfügigen Abweichung von wenigen Metern von diesem Worst-Case-Szenario von einer zum Teil sehr viel geringeren Zielverlustwahrscheinlichkeit auszugehen.

Grundlage sind die technischen Erfordernisse des Radarsystems ASR-S oder funktionsgleicher anderer Radarsysteme, sowie die WEA-Standorte gemäß Tabelle 1.

Untersucht wurde die Situation „Planung“. Die hierbei berücksichtigten Betriebszustände der Windenergieanlagen sind nachfolgend angegeben.

Situation „Planung“:

Die in Tabelle 1 mit Planung benannten Anlagen wurden als aktiv berücksichtigt

Auf der Grundlage der durchgeführten Überflugbewertungen bzgl. zu erwartender Trackverlustwahrscheinlichkeiten von Lfz kann festgestellt werden, dass bei der untersuchten Situation und allen Überflügen ein Störzelligebiet vorliegt, bei dem bzgl. der Radaranlage Wittmund Trackverlustwahrscheinlichkeiten für ein Lfz mit einem RQS von 3 m² von unter 50 % vorliegen.

Trackverlustwahrscheinlichkeiten von über 50 % sind für ein Lfz mit einem RQS von 3 m² bei einem Überflug gemäß den Forderungen und Festlegungen der Flugsicherung radartechnisch nicht zulässig. Ein RQS von 3 m² entspricht z. B. einem einmotorigen Sportflugzeug.

Nachfolgend sind die Trackverlustwahrscheinlichkeiten für ein Lfz mit einem RQS von 3 m² für die Situation „Planung“ dargestellt.

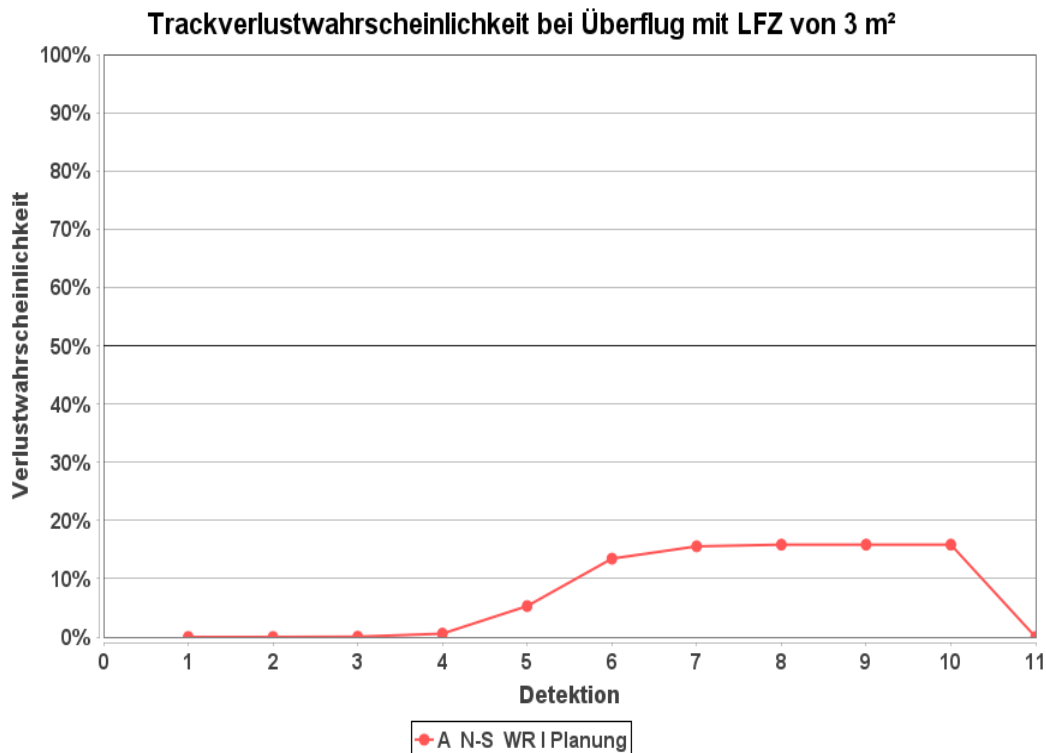


Abbildung 7: Trackverlustwahrscheinlichkeit bei einem Überflug (Pfad A)

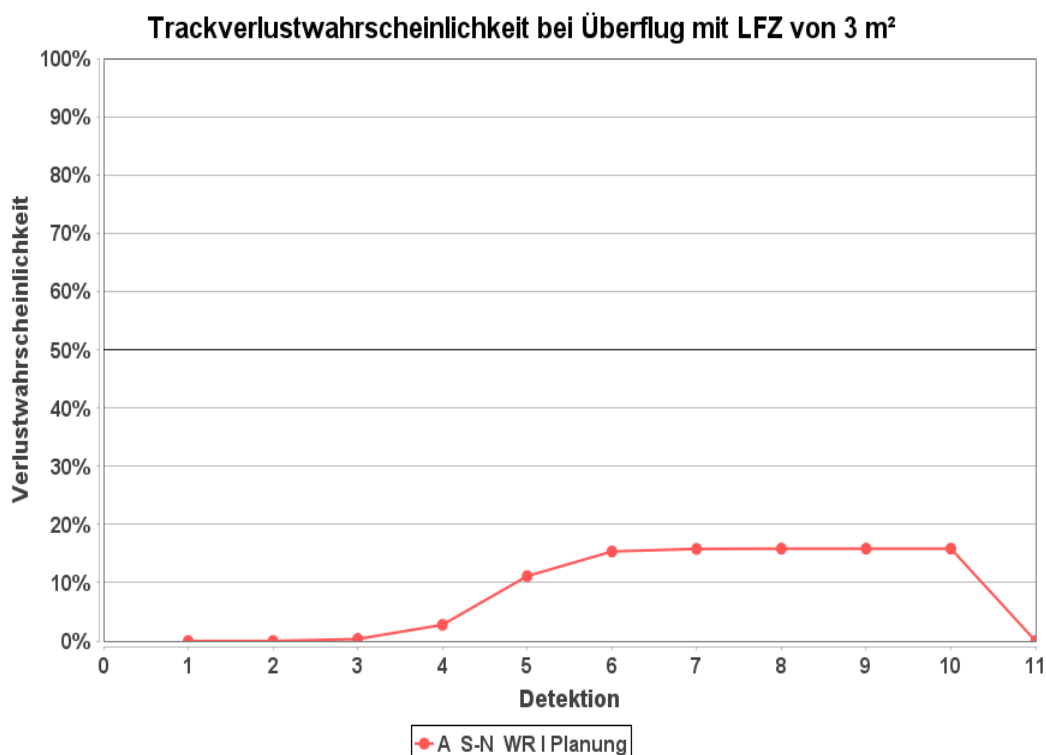


Abbildung 8: Trackverlustwahrscheinlichkeit bei einem Überflug (Pfad A) Gegenrichtung

Die Weitergabe sowie Vervielfältigung dieser Unterlage ist nicht gestattet, soweit nicht ausdrücklich zugestanden. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadensersatz. Insbesondere die Veröffentlichung in öffentlich zugänglichen Medien setzt eine explizite schriftliche Zustimmung durch Airbus Defence and Space voraus. Alle Rechte für den Fall der Patenterteilung oder Gebrauchsmuster – Eintragung vorbehalten. Quellenangabe: Alle genutzten Darstellungen sind durch Airbus Defence and Space, bzw. den Bearbeiter erzeugt worden.

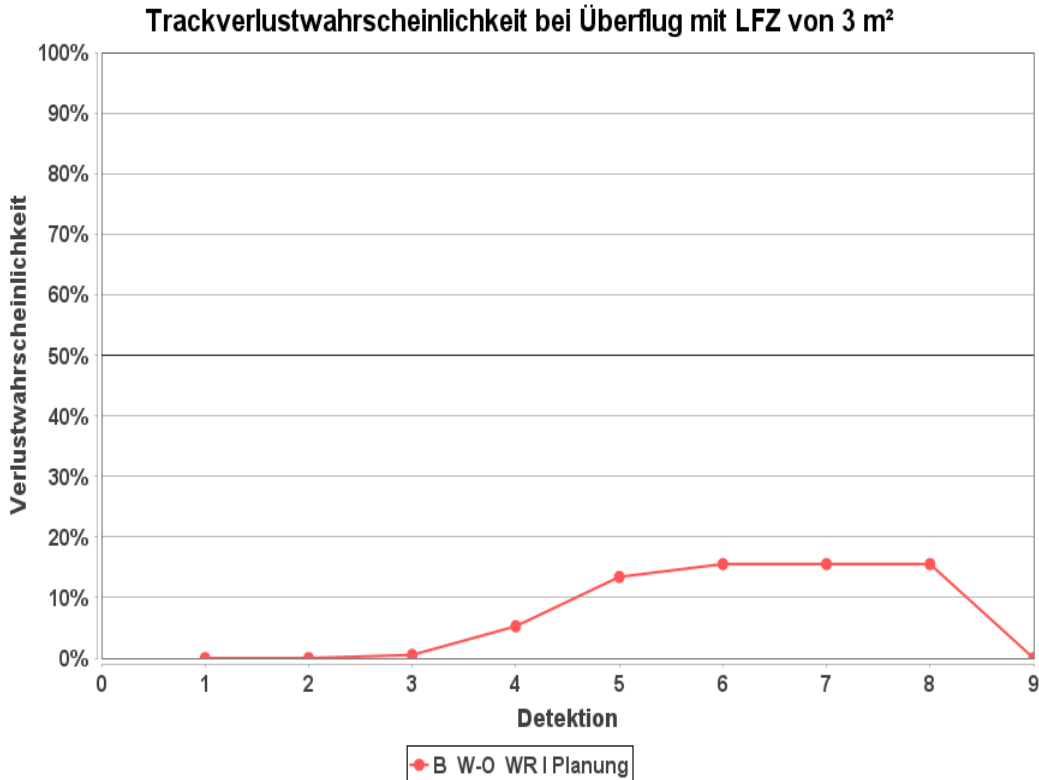


Abbildung 9: Trackverlustwahrscheinlichkeit bei einem Überflug (Pfad B)

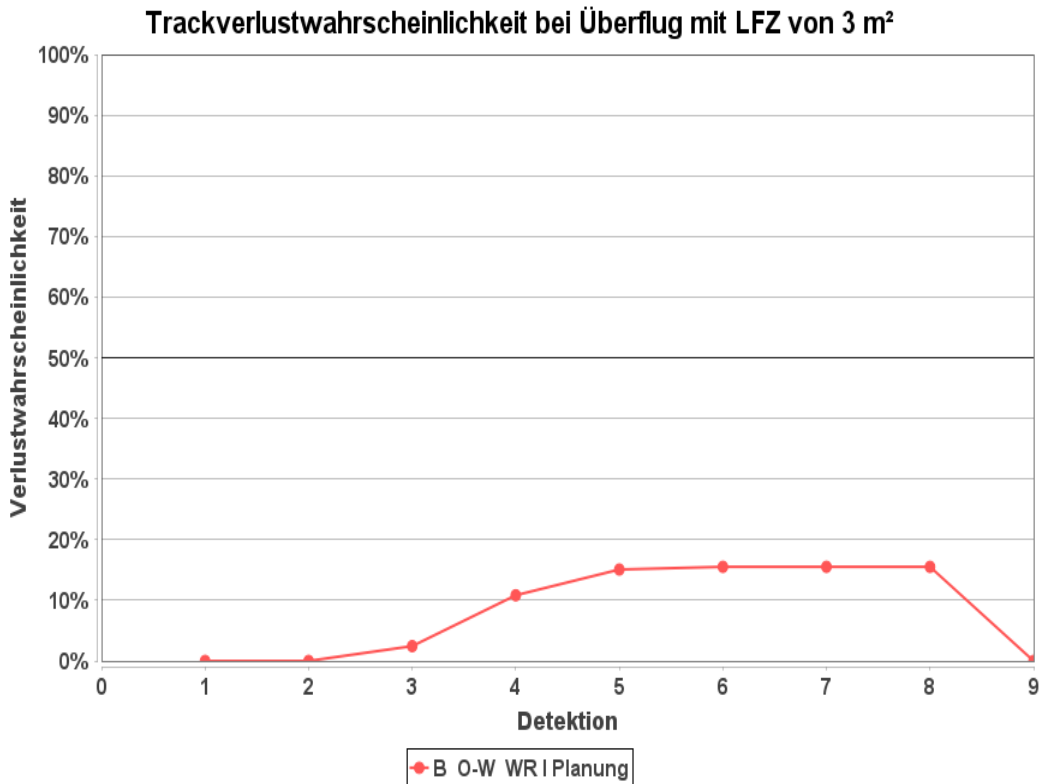


Abbildung 10: Trackverlustwahrscheinlichkeit bei einem Überflug (Pfad B) Gegenrichtung

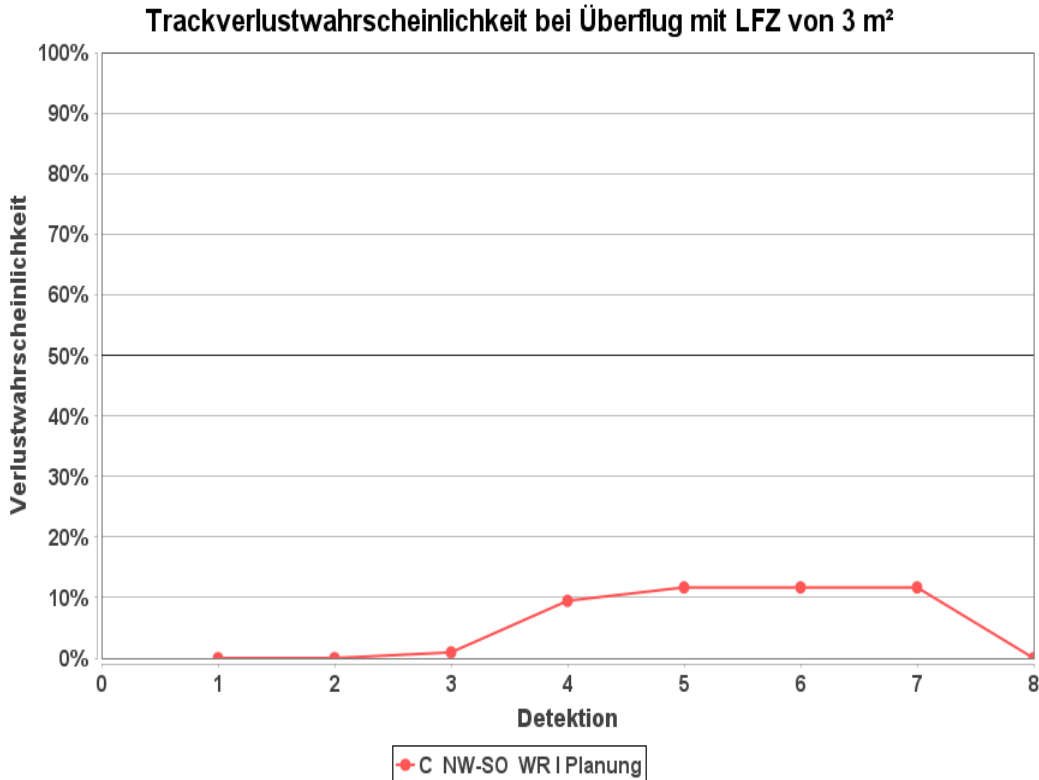


Abbildung 11: Trackverlustwahrscheinlichkeit bei einem Überflug (Pfad C)

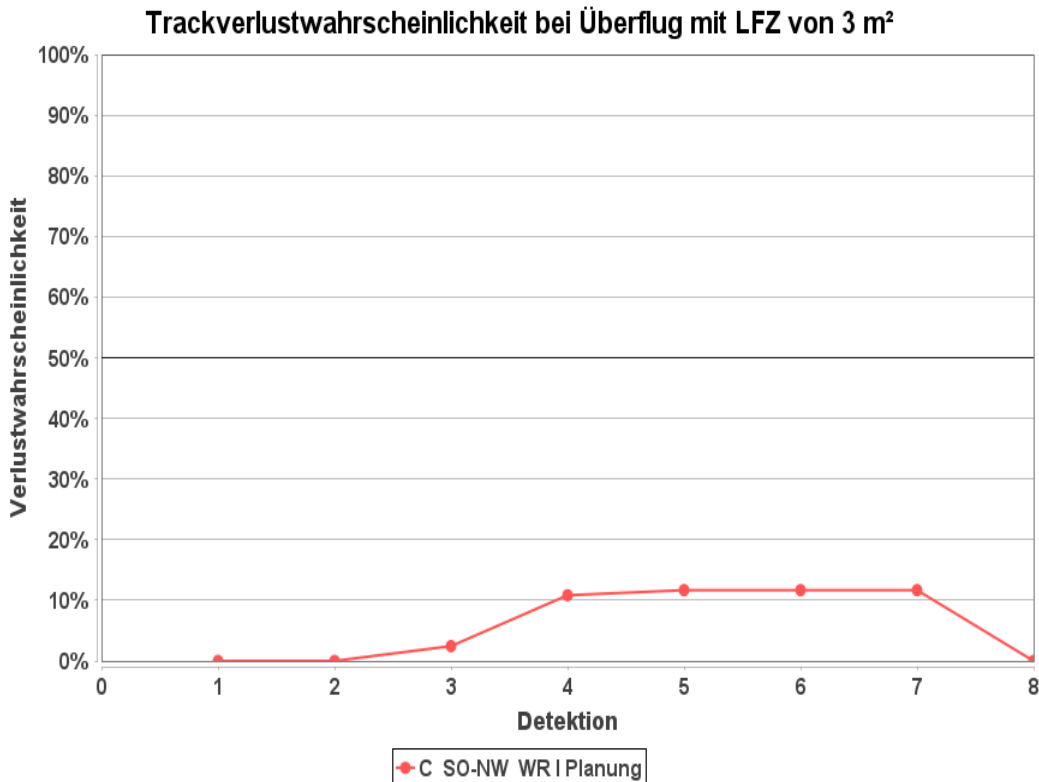


Abbildung 12: Trackverlustwahrscheinlichkeit bei einem Überflug (Pfad C) Gegenrichtung

Die Weitergabe sowie Vervielfältigung dieser Unterlage ist nicht gestattet, soweit nicht ausdrücklich zugestanden. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadensersatz. Insbesondere die Veröffentlichung in öffentlich zugänglichen Medien setzt eine explizite schriftliche Zustimmung durch Airbus Defence and Space voraus. Alle Rechte für den Fall der Patenterteilung oder Gebrauchsmuster – Eintragung vorbehalten. Quellenangabe: Alle genutzten Darstellungen sind durch Airbus Defence and Space, bzw. den Bearbeiter erzeugt worden.

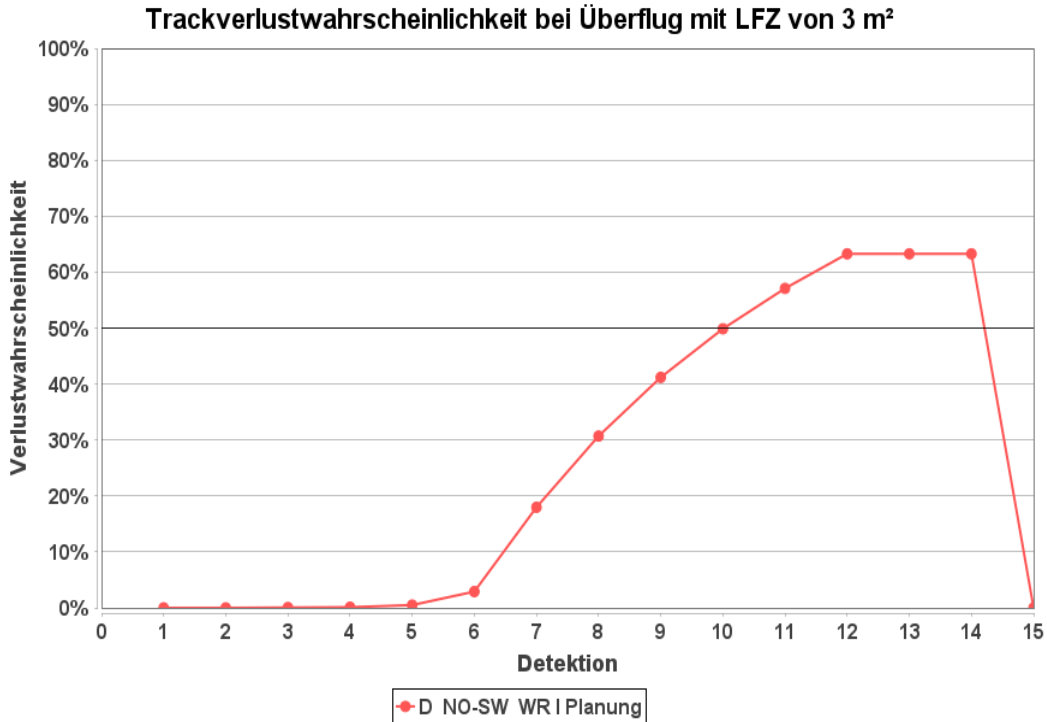


Abbildung 13: Trackverlustwahrscheinlichkeit bei einem Überflug (Pfad D)

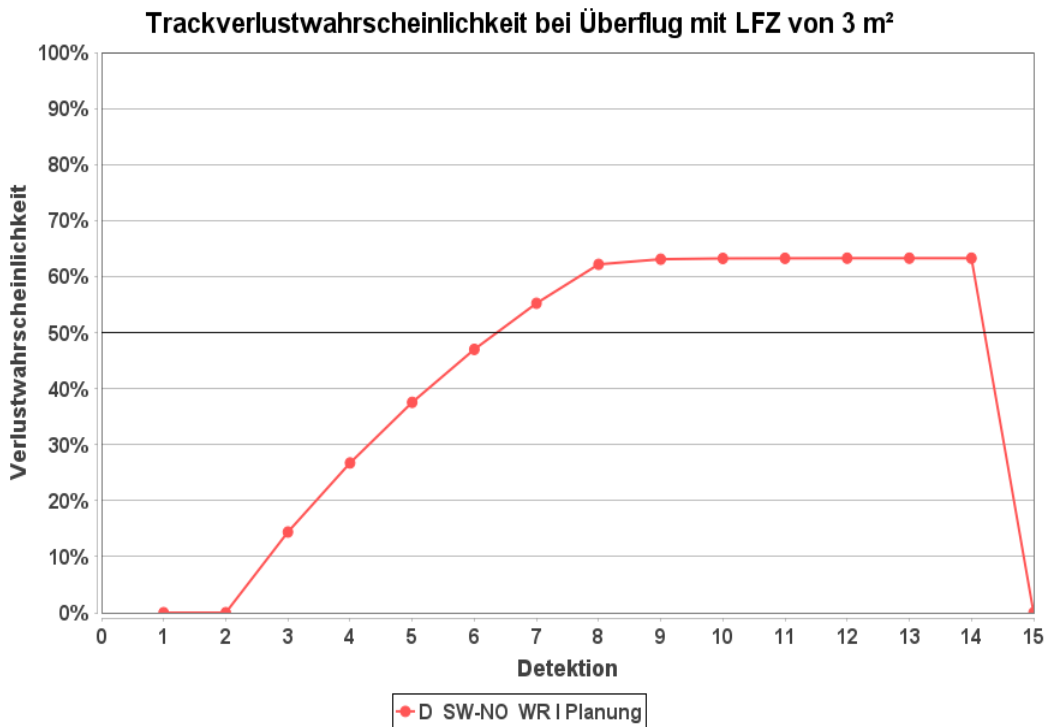


Abbildung 14: Trackverlustwahrscheinlichkeit bei einem Überflug (Pfad D) Gegenrichtung

9.2 Betrachtung der Windrichtung II (Bereich um 148°)

9.2.1 Situation „Planung“

Die in Tabelle 1 mit Planung benannten Anlagen wurden als aktiv berücksichtigt

Die Abbildung 15 zeigt die farbige Kodierung der Darstellungswahrscheinlichkeit eines Lfz mit einem Radarrückstreuquerschnitt von 3 m² für die Situation „Planung“.

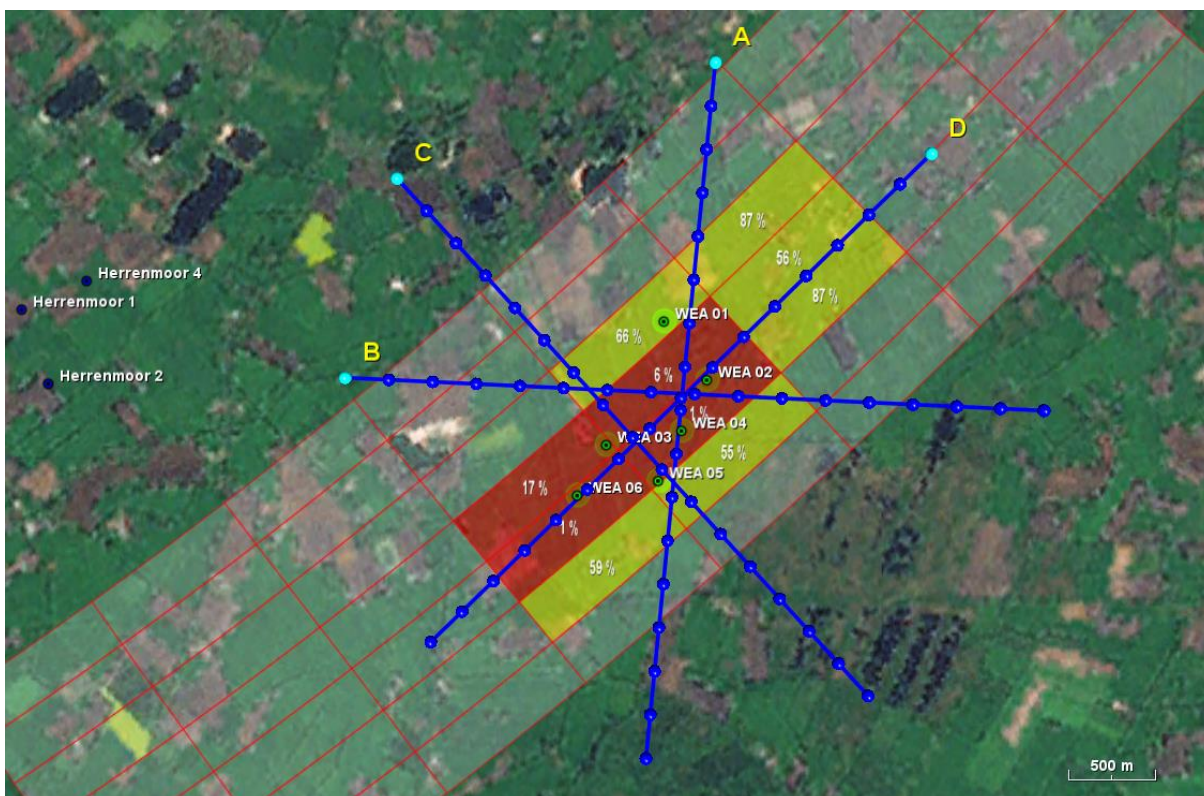


Abbildung 15: Übersicht über die Situation „Planung“. Farblich kodiert sind die DCM-Zellen nach der Wahrscheinlichkeit der Darstellung eines Lfz mit einem RQS von 3 m². Zusätzlich sind die „Worst-Case“-Überflugpfade durch blaue Linien dargestellt. Die Ermittlung der Ziel- bzw. Trackverlustwahrscheinlichkeit erfolgt an den blauen Punkten. Copernicus Sentinel data [2024]

Die Farbkodierung der Darstellungswahrscheinlichkeit eines Lfz geschieht nach der folgenden Systematik:

- 0 % - 19 % = rot
- 20 % - 49 % = orange
- 50 % - 89 % = gelb
- 90 % - 100 % = grün

Die gewählten Überflugpfade (blaue Linien) über den geplanten Windpark stellen ein sogenanntes „Worst-Case“-Szenario dar. Dabei wird die Trackverlustwahrscheinlichkeit eines Lfz an den mit blauen Punkten gekennzeichneten Orten ermittelt.

Die Pfade sind hierbei:

- A = Diagonal A
- B = Diagonal B
- C = Radial
- D = Tangential

Die Überfluggeschwindigkeit des Lfz wird mit 50 m/s angenommen.

Flugpfad A: Von N nach S und in umgekehrter Richtung

Beim Flugpfad A kann die Länge des Pfades mit 8 Detektionen, entsprechend 1750 m, angegeben werden. Die Trackverlustwahrscheinlichkeit liegt bei 6 Detektionen über 50 % und steigt auf maximal 100 % an. In Gegenrichtung liegt die Trackverlustwahrscheinlichkeit bei 7 Detektionen über 50 %.

Flugpfad B: Von W nach O und in umgekehrter Richtung

Beim Flugpfad B kann die Länge des Pfades mit 6 Detektionen, entsprechend 1250 m, angegeben werden. Die Trackverlustwahrscheinlichkeit liegt bei 5 Detektionen über 50 % und steigt auf maximal 100 % an. In Gegenrichtung liegt die Trackverlustwahrscheinlichkeit bei 5 Detektionen über 50 %.

Flugpfad C: Von NW nach SO und in umgekehrter Richtung

Beim Flugpfad C kann die Länge des Pfades mit 5 Detektionen, entsprechend 1000 m, angegeben werden. Die Trackverlustwahrscheinlichkeit liegt bei 4 Detektionen über 50 % und steigt auf maximal 97 % an. In Gegenrichtung liegt die Trackverlustwahrscheinlichkeit bei 4 Detektionen über 50 %.

Flugpfad D: Von NO nach SW und in umgekehrter Richtung

Beim Flugpfad D kann die Länge des Pfades mit 12 Detektionen, entsprechend 2750 m, angegeben werden. Die Trackverlustwahrscheinlichkeit liegt bei 9 Detektionen über 50 % und steigt auf maximal 100 % an. In Gegenrichtung liegt die Trackverlustwahrscheinlichkeit bei 12 Detektionen über 50 %.

9.2.2 Situation „Planung opt“

Die in Tabelle 1 mit Planung benannten Anlagen WEA 01, WEA 04 und WEA 05 wurden als aktiv, die WEA 02 und WEA 03 als abgeschaltet berücksichtigt. Die WEA 05 ist mit der angegebenen Rotordrehzahlbegrenzung auf 8 rpm berücksichtigt.

Die Abbildung 15 zeigt die farbige Kodierung der Darstellungswahrscheinlichkeit eines Lfz mit einem Radarrückstreuquerschnitt von 3 m² für die Situation „Planung opt“.

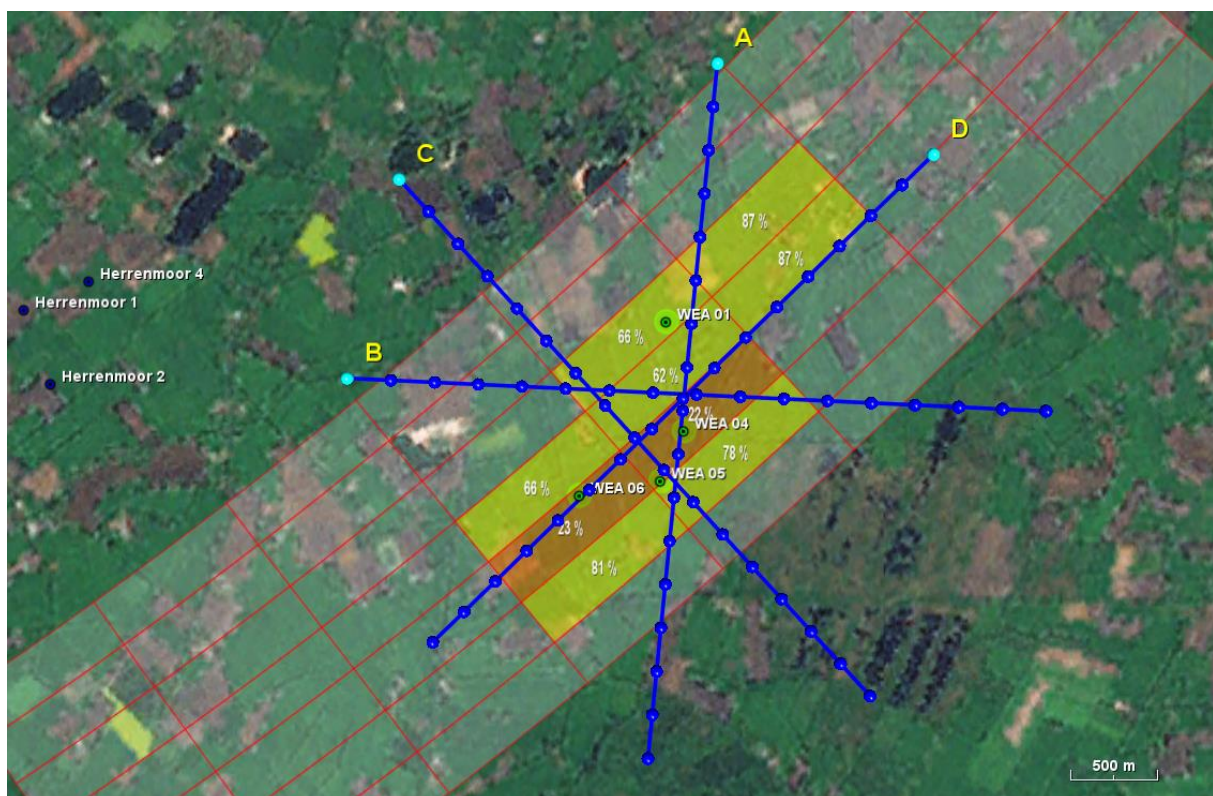


Abbildung 16: Übersicht über die Situation „Planung opt“. Farblich kodiert sind die DCM-Zellen nach der Wahrscheinlichkeit der Darstellung eines Lfz mit einem RQS von 3 m². Zusätzlich sind die „Worst-Case“-Überflugpfade durch blaue Linien dargestellt. Die Ermittlung der Ziel- bzw. Trackverlustwahrscheinlichkeit erfolgt an den blauen Punkten. Copernicus Sentinel data [2024]

Die Farbkodierung der Darstellungswahrscheinlichkeit eines Lfz geschieht nach der folgenden Systematik:

- 0 % - 19 % = rot
- 20 % - 49 % = orange
- 50 % - 89 % = gelb
- 90 % - 100 % = grün

Die gewählten Überflugpfade (blaue Linien) über den geplanten Windpark stellen ein sogenanntes „Worst-Case“-Szenario dar. Dabei wird die Trackverlustwahrscheinlichkeit eines Lfz an den mit blauen Punkten gekennzeichneten Orten ermittelt.

Die Pfade sind hierbei:

- A = Diagonal A
- B = Diagonal B
- C = Radial
- D = Tangential

Die Überfluggeschwindigkeit des Lfz wird mit 50 m/s angenommen.

Flugpfad A: Von N nach S und in umgekehrter Richtung

Beim Flugpfad A kann die Länge des Pfades mit 8 Detektionen, entsprechend 1750 m, angegeben werden. Die Trackverlustwahrscheinlichkeit liegt bei 0 Detektionen über 50 % und steigt auf maximal 46 % an. In Gegenrichtung liegt die Trackverlustwahrscheinlichkeit bei 0 Detektionen über 50 %.

Flugpfad B: Von W nach O und in umgekehrter Richtung

Beim Flugpfad B kann die Länge des Pfades mit 6 Detektionen, entsprechend 1250 m, angegeben werden. Die Trackverlustwahrscheinlichkeit liegt bei 0 Detektionen über 50 % und steigt auf maximal 43 % an. In Gegenrichtung liegt die Trackverlustwahrscheinlichkeit bei 0 Detektionen über 50 %.

Flugpfad C: Von NW nach SO und in umgekehrter Richtung

Beim Flugpfad C kann die Länge des Pfades mit 5 Detektionen, entsprechend 1000 m, angegeben werden. Die Trackverlustwahrscheinlichkeit liegt bei 0 Detektionen über 50 % und steigt auf maximal 39 % an. In Gegenrichtung liegt die Trackverlustwahrscheinlichkeit bei 0 Detektionen über 50 %.

Flugpfad D: Von NO nach SW und in umgekehrter Richtung

Beim Flugpfad D kann die Länge des Pfades mit 12 Detektionen, entsprechend 2750 m, angegeben werden. Die Trackverlustwahrscheinlichkeit liegt bei 8 Detektionen über 50 % und steigt auf maximal 98 % an. In Gegenrichtung liegt die Trackverlustwahrscheinlichkeit bei 11 Detektionen über 50 %.

9.2.3 Zusammenfassende Beurteilung der verschiedenen Überflugs-Szenarien:

Bei allen hier durchgeführten Untersuchungen ist zu beachten, dass es sich um sogenannte „Worst-Case“-Szenarien handelt. Das bedeutet, dass ein etwaiger realer Überflug genau diese hier dargestellten Richtungen aufweisen müsste. Dabei ist bei einer auch nur geringfügigen Abweichung von wenigen Metern von diesem Worst-Case-Szenario von einer zum Teil sehr viel geringeren Zielverlustwahrscheinlichkeit auszugehen.

Grundlage sind die technischen Erfordernisse des Radarsystems ASR-S oder funktionsgleicher anderer Radarsysteme, sowie die WEA-Standorte gemäß Tabelle 1.

Untersucht wurden die Situationen „Planung“ und „Planung opt“. Die hierbei berücksichtigten Betriebszustände der Windenergieanlagen sind nachfolgend angegeben.

Situation „Planung“:

Die in Tabelle 1 mit Planung benannten Anlagen wurden als aktiv berücksichtigt

Situation „Planung opt“:

Die in Tabelle 1 mit Planung benannten Anlagen WEA 01, WEA 04 und WEA 05 wurden als aktiv, die WEA 02 und WEA 03 als abgeschaltet berücksichtigt. Die WEA 05 ist mit der angegebenen Rotordrehzahlbegrenzung auf 8 rpm berücksichtigt.

Auf der Grundlage der durchgeführten Überflugbewertungen bzgl. zu erwartender Trackverlustwahrscheinlichkeiten von Lfz kann festgestellt werden, dass bei der untersuchten Situation „Planung“ bei allen Überflügen ein Störzelligebiet vorliegt, bei dem bzgl. der Radaranlage Wittmund Trackverlustwahrscheinlichkeiten für ein Lfz mit einem RQS von 3 m² von über 50 % vorliegen. Bei der Situation „Planung opt“ liegen die Trackverlustwahrscheinlichkeiten für die Überflüge „A“ bis „C“ bei unter 50 %, bei dem Überflug „D“ über 50 %.

Trackverlustwahrscheinlichkeiten von über 50 % sind für ein Lfz mit einem RQS von 3 m² bei einem Überflug gemäß den Forderungen und Festlegungen der Flugsicherung radartechnisch nicht zulässig. Ein RQS von 3 m² entspricht z. B. einem einmotorigen Sportflugzeug.

Im Zusammenhang mit dem Flugpfad D sei darauf hingewiesen, dass bei tangential orientierten Flugpfaden relativ zum Standort des Radarsystems generell Einschränkungen bei der Darstellung von Lfz-Bewegungen aufgrund fehlender radialer Dopplerinformationen vorliegen.

Nachfolgend sind die Trackverlustwahrscheinlichkeiten für ein Lfz mit einem RQS von 3 m² für die Situationen „Planung“ und „Planung opt“ gegenübergestellt. Die Kurven der verschiedenen Situationen sind teilweise deckungsgleich, sodass nicht immer alle Kurven durchgängig zu erkennen sind.

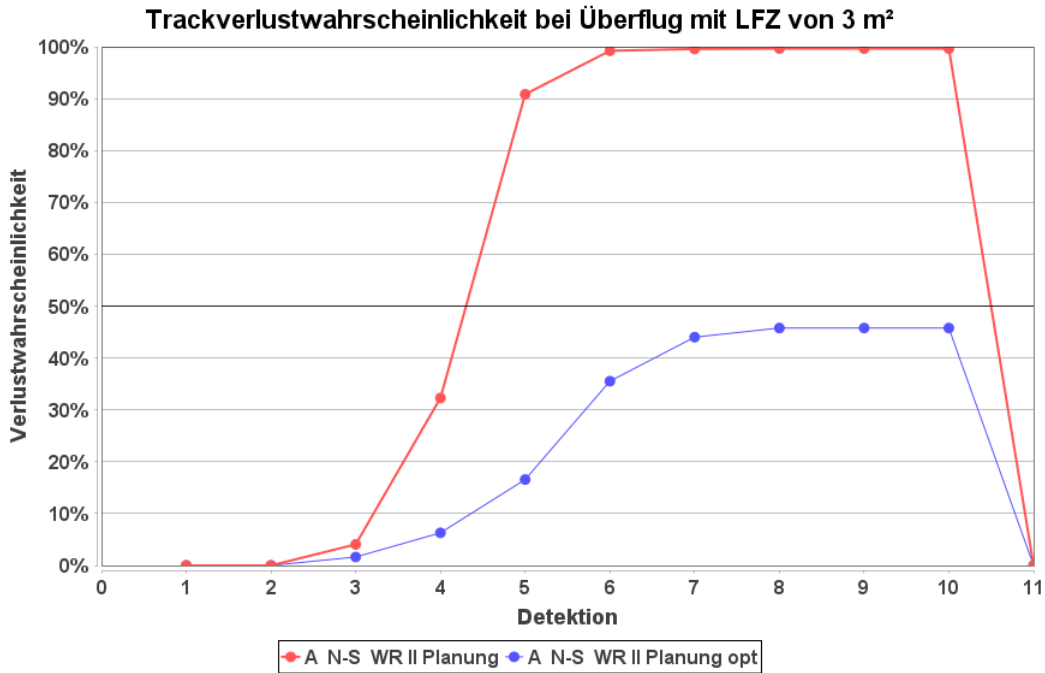


Abbildung 17: Trackverlustwahrscheinlichkeit bei einem Überflug (Pfad A)

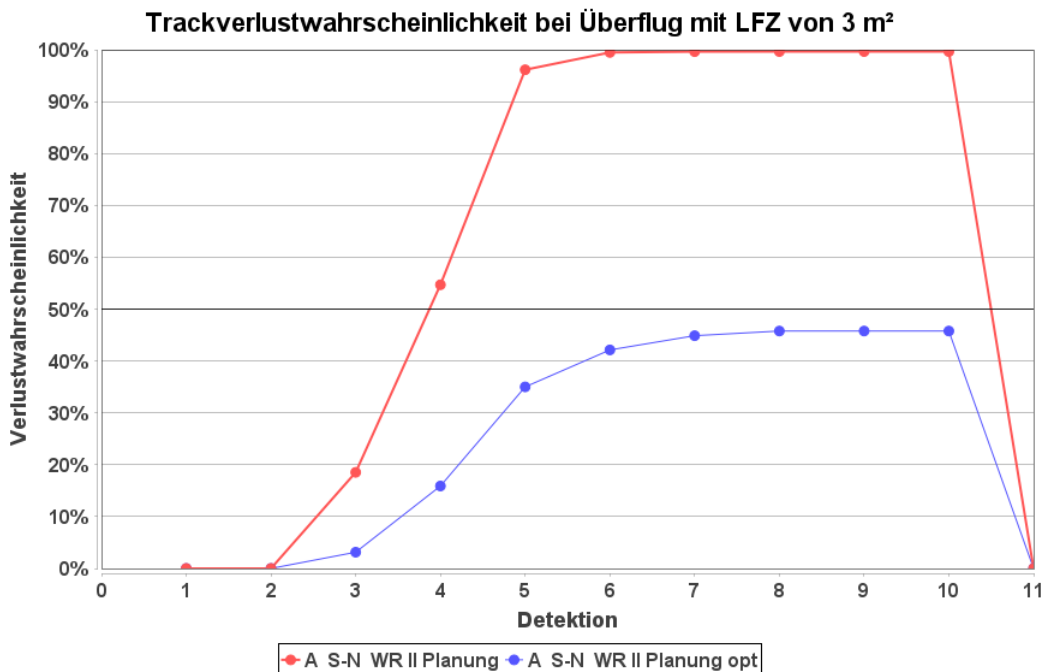


Abbildung 18: Trackverlustwahrscheinlichkeit bei einem Überflug (Pfad A) Gegenrichtung

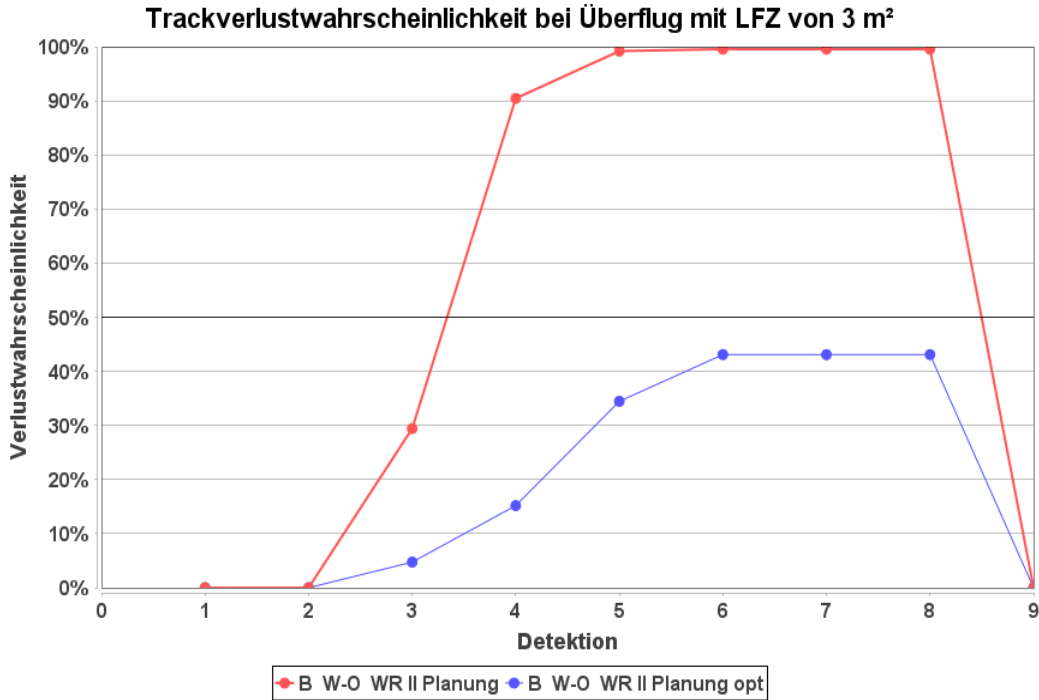


Abbildung 19: Trackverlustwahrscheinlichkeit bei einem Überflug (Pfad B)

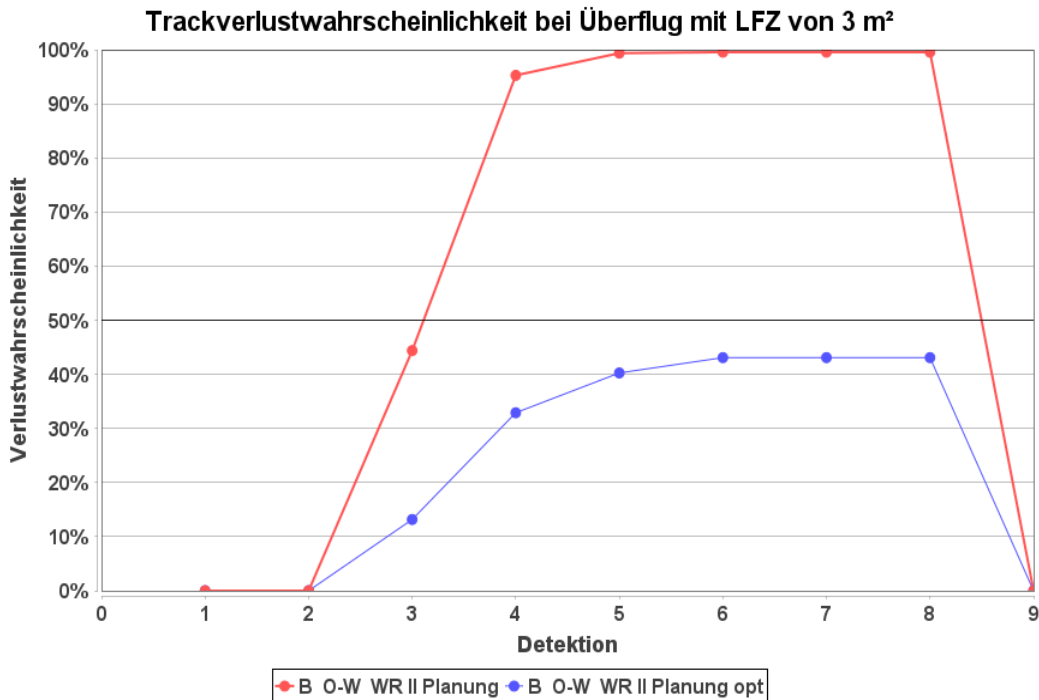


Abbildung 20: Trackverlustwahrscheinlichkeit bei einem Überflug (Pfad B) Gegenrichtung

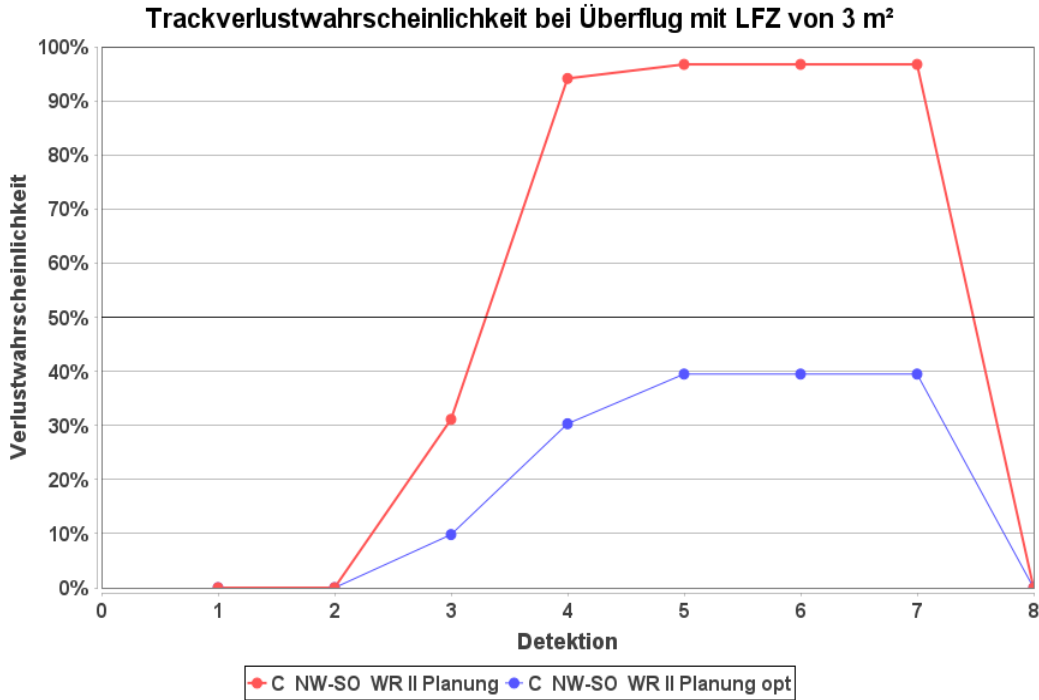


Abbildung 21: Trackverlustwahrscheinlichkeit bei einem Überflug (Pfad C)

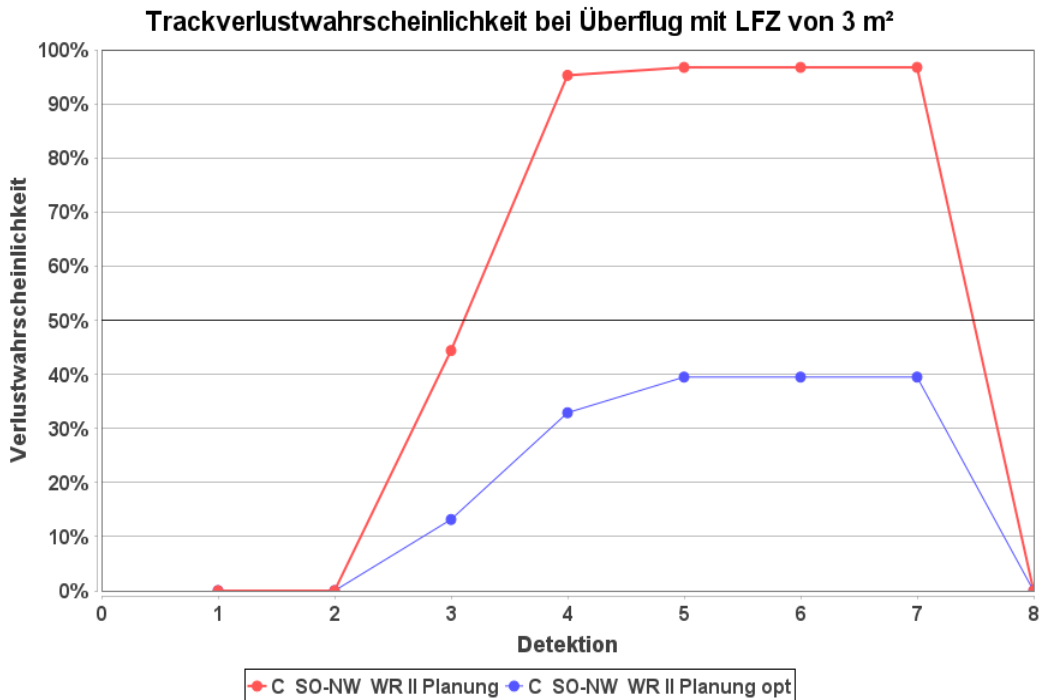


Abbildung 22: Trackverlustwahrscheinlichkeit bei einem Überflug (Pfad C) Gegenrichtung

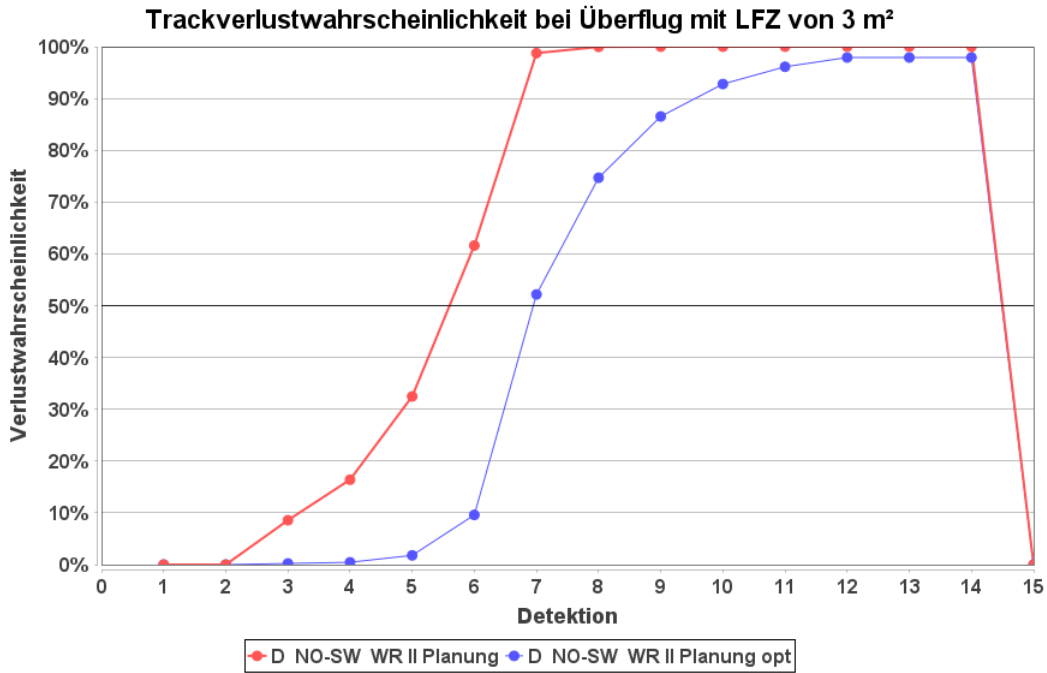


Abbildung 23: Trackverlustwahrscheinlichkeit bei einem Überflug (Pfad D)

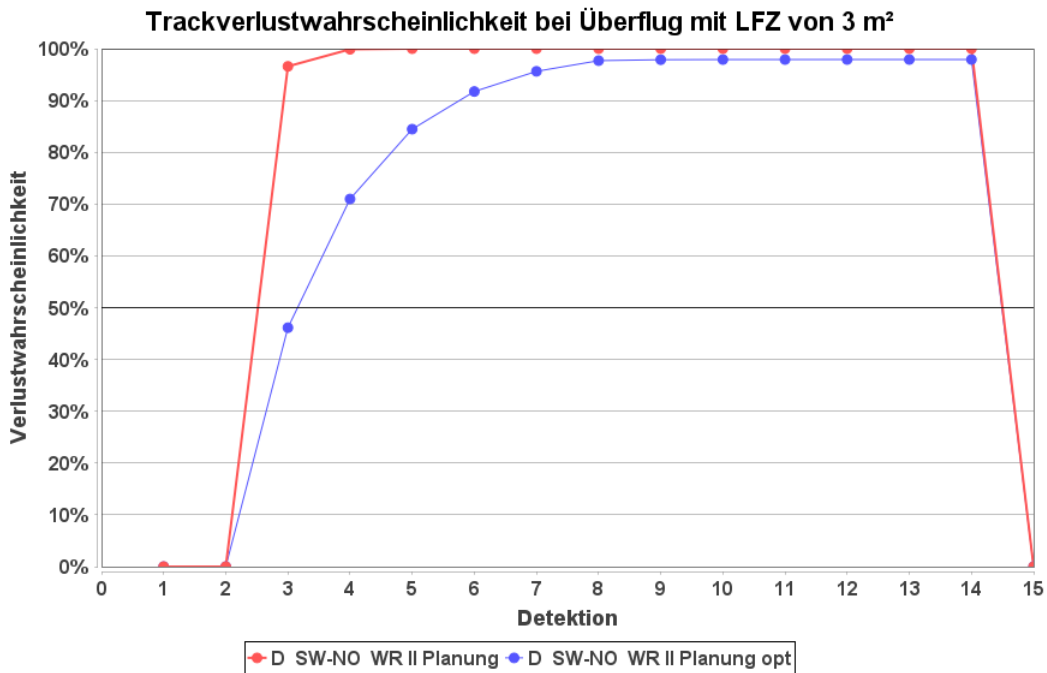


Abbildung 24: Trackverlustwahrscheinlichkeit bei einem Überflug (Pfad D) Gegenrichtung

10 CFAR-Algorithmus / „Schwellwert-Anhebung“

Die Beeinträchtigung der Lfz-Darstellung wird durch verschiedene reflektierende Objekte beeinflusst, die von der CFAR-Cluttermap und der DCM (Dopplercluttermap) unterschiedlich berücksichtigt werden.

Cluttermap bei statischen Bauwerken:

Statische Bauwerke (die keinen Doppleranteil haben und deren RQS nicht zeitvariant sind wie beispielsweise bei großen Gebäuden) werden als Festziele berücksichtigt und innerhalb einer Abtastzelle unterdrückt. Abhängig von der tatsächlichen Position können bis zu vier derartige Zellen betroffen sein. Unter der Annahme einer Abtastzelle der Cluttermap der Dimension

Range: 60 m und

Azimut ca. $0,7^\circ$

wird dieses ortsfeste Ziel innerhalb einer Zelle von ca. 120 m und ca. $1,45^\circ$ unterdrückt.

Cluttermap bei WEA:

Im Zusammenhang mit WEA, deren Reflexionssignal durch Dopplerinformationen gekennzeichnet ist, ist die nachstehende Bewertung erforderlich. Bei mehrstufigen Dopplerfiltern moderner digitaler Radarsysteme ergeben sich abhängig von der Dopplerfrequenz Einflüsse auf die Cluttermap und auf die DCM.

Ausgehend von der Lfz-Position wird über Range ein Nachbarschaftsbereich von 24 Zellen (1440 m) sowie über Azimut ein Bereich von $1,45^\circ$ zur Bewertung herangezogen. Wenn ein weiteres Ziel, zusätzlich zum Lfz, jetzt erfasst wird z.B. eine WEA, wird diese dargestellt. Wenn nun diese WEA oder mehrere WEA als Gruppe mehr als 7 Zellen a 60 m Range von 24 Zellen belasten (also innerhalb von 1440 m), dann ist

als Ergebnis eine Zone von allen 24 Zellen (1440 m) betroffen. Diese CFAR-Zone berechnet sich von der am weitesten entfernten WEA zurück zum Radar.

Es wird innerhalb dieses Gebietes, das sich auf die Lfz-Position bezieht, der Einfluss aller Objekte integriert. Innerhalb dieses Gebietes beeinflussen eine oder mehrere WEA das Clutterniveau bzw. die CFAR-Schwelle. Neben dem dynamischen RQS der WEA sind die Position und die räumliche Anordnung mehrere WEAs innerhalb dieses Nachbarschaftsgebietes von besonderer Bedeutung.

Die Abbildung 25 zeigt für die untersuchten Situationen die Gebiete in denen eine CFAR-Schwellwertanhebung stattfindet.

Durch die vorhandenen und neuen Windenergieanlagen im Windpark Jühdener Feld wird eine zusammenhängende CFAR-Zone geschaffen, in der eine CFAR-Schwellwertanhebung erfolgt. Unter Berücksichtigung der Planung der neuen WEAs (grün) ergibt sich eine Erweiterung der CFAR-Zone gegenüber der heutigen Situation „“.

In diesem Gebiet sind zusätzliche Beeinflussungen durch die Windenergieanlagen auf die Darstellungswahrscheinlichkeit von Lfz möglich.

Die farblichen Umrandungen der CFAR-Zonen sind nachfolgend angegeben:

Bei der untersuchten Situation „Planung opt“ ergibt sich keine CFAR-Zone

- Situation „Planung“: Gelbe Umrandung

Die farblich gekennzeichneten Gebiete bedeuten, dass innerhalb dieser Grenzen eine Anhebung der CFAR-Schwelle durch die WEAs gegeben ist. Durch die Anhebung der Schwelle kann es, in Abhängigkeit vom RQS des zu detektierenden Lfz, zu einer Beeinträchtigung bei der Darstellung kommen. Zurzeit kann mangels messtechnischer Referenzierung noch keine Aussage zur Intensität der CFAR-Beeinflussung durch WEA erfolgen.

In der Praxis von Windparks machen aufgrund der mangelnden Range-Ausdehnung einzelnen WEA oder 2 WEAs kein Problem, d.h. keine CFAR Anhebung.



Abbildung 25: Gebiete der CFAR-Schwellwertanhebung. Situation „Planung“: Gelbe Umrandung; Copernicus Sentinel data [2024]

11 Gesamtbeurteilung/Zusammenfassung der Ergebnisse

Um eine Situation sicherzustellen, bei der Trackverlustwahrscheinlichkeiten von unter 50 % für ein Lfz mit einem RQS von 3 m² bei einem Überflug vorliegen und hierdurch für die Radaranlage in Wittmund eine sichere, radarbasierte Flugführung möglich ist, ist die nachstehende Anordnung nach Abbildung 26, bzw. nach Abbildung 27 (Detailansicht) sowie Tabelle 1 unter Berücksichtigung der genannten Maßnahmen zulässig.



Abbildung 26: Gesamtübersicht der geplanten Windenergieanlagen (grün) sowie der Vorbelastung (blau). Copernicus Sentinel data [2024].

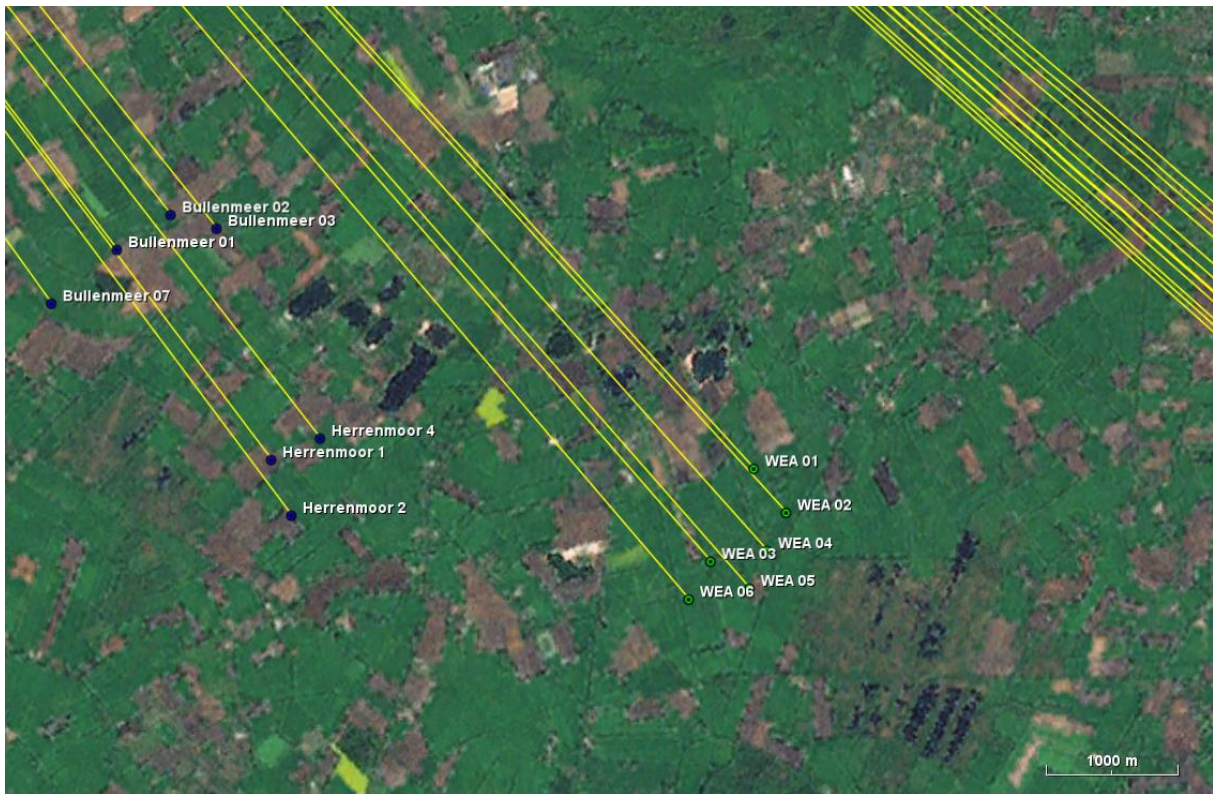


Abbildung 27: Detailübersicht der geplanten Windenergieanlagen (grün) sowie der Vorbelastung (blau). Copernicus Sentinel data [2024].

Standort	Anlage	WGS 84 Nord	WGS 84 Ost	Nabenhöhe [m]	Geländehöhe [m]	Distanz [m]	Winkel [°]	Rotordrehzahlbegrenzung WR II [rpm]
Planung								
WEA 01	Nordex N 133	53° 20' 44,23"	7° 58' 55,44"	125	6	31094,99	137,329	
WEA 02	Nordex N 133	53° 20' 33,38"	7° 59' 8,79"	125	6	31509,34	137,409	0
WEA 03	Nordex N 133	53° 20' 21,33"	7° 58' 37,55"	125	6	31402,69	138,647	0
WEA 04	Nordex N 133	53° 20' 23,96"	7° 59' 0,90"	125	6	31627,79	137,960	
WEA 05	Nordex N 133	53° 20' 14,67"	7° 58' 53,66"	125	7	31753,88	138,485	8
WEA 06	Nordex N 133	53° 20' 11,96"	7° 58' 28,53"	125	7	31512,70	139,221	
Vorbelastung								
Bullenmeer 01	GE 5.5-158	53° 21' 38,31"	7° 54' 32,11"	102	9,7	26688,22	142,631	
Bullenmeer 02	GE 5.5-158	53° 21' 46,96"	7° 54' 54,34"	102	10	26728,00	141,582	
Bullenmeer 03	GE 3.8-130	53° 21' 43,61"	7° 55' 13,30"	86,5	10	27027,10	141,134	
Bullenmeer 07	Siemens SWT-2.3-93	53° 21' 25,00"	7° 54' 5,00"	80	13,15	26720,96	144,021	
Herrenmoor 1	E-126	53° 20' 46,42"	7° 55' 35,98"	135	11	28680,28	142,686	
Herrenmoor 2	E-101	53° 20' 32,67"	7° 55' 44,28"	99	11	29112,24	142,950	
Herrenmoor 4	E-101	53° 20' 51,73"	7° 55' 56,16"	99	11	28777,28	141,896	
Bentstreek 01	E-66	53° 23' 28,21"	7° 51' 6,20"	98	9	21702,61	145,214	
Bentstreek 02	E-66	53° 23' 27,79"	7° 51' 37,33"	98	8,45	22045,17	144,003	
Bentstreek 03	E-66	53° 23' 27,45"	7° 51' 55,07"	98	11,83	22247,15	143,334	
Bentstreek 04	E-66	53° 23' 24,15"	7° 50' 46,06"	98	10	21597,62	146,216	
Bentstreek 05	E-66	53° 23' 23,98"	7° 51' 20,67"	98	10	21962,67	144,834	
Bentstreek 06	E-66	53° 23' 13,94"	7° 50' 36,50"	98	10	21764,91	147,063	
Bentstreek 07	E-66	53° 23' 17,86"	7° 51' 4,83"	98	10	21952,42	145,743	
Bentstreek 08	E-66	53° 23' 17,85"	7° 51' 48,53"	98	10	22415,47	144,034	
Bentstreek 09	E-66	53° 23' 13,58"	7° 51' 27,19"	98	9	22295,30	145,055	
Bentstreek 10	E-66	53° 23' 6,94"	7° 50' 54,35"	98	10,93	22126,08	146,649	
Bentstreek 11	E-66	53° 23' 3,00"	7° 50' 34,60"	98	10,92	22031,22	147,617	
Lehmnden 01	Enercon E-82 E2	53° 16' 58,08"	8° 11' 25,57"	108,38	9,59	45953,05	130,382	
Lehmnden 02	Enercon E-82 E2	53° 16' 49,22"	8° 11' 26,92"	108,38	9,32	46151,36	130,619	
Lehmnden 03	Enercon E-82 E2	53° 16' 53,60"	8° 11' 42,66"	108,38	8,55	46283,34	130,256	
Liethe 01	NEG Micon NM54	53° 16' 43,08"	8° 11' 11,34"	70	8,81	46059,45	131,033	
Liethe 02	NEG Micon NM54	53° 16' 41,32"	8° 11' 24,13"	70	8	46273,24	130,890	
Liethe 03	NEG Micon NM54	53° 16' 34,98"	8° 11' 18,14"	70	8,5	46319,78	131,162	
Liethe 04	NEG Micon NM54	53° 16' 31,20"	8° 11' 7,11"	70	8,1	46244,98	131,439	
Liethe 05	NEG Micon NM54	53° 16' 29,83"	8° 11' 26,81"	70	8,46	46545,62	131,178	
Liethe 06	NEG Micon NM54	53° 16' 24,06"	8° 11' 11,50"	70	10,43	46452,99	131,574	
Liethe 07	NEG Micon NM54	53° 16' 22,74"	8° 11' 33,94"	70	7,53	46790,00	131,271	
Liethe 08	NEG Micon NM54	53° 16' 20,90"	8° 11' 22,04"	70	9,55	46663,55	131,503	
Lehmnden B01	Enercon E-58	53° 17' 2,11"	8° 11' 11,67"	59	12,65	45676,76	130,475	

Tabelle 1: Koordinatenübersicht mit Angabe der Rotordrehzahlbegrenzung über die geplanten Windenergieanlagen (grün), sowie der berücksichtigten Vorbelastung (blau).

Bei einigen der geplanten Standorte ist eine bedarfsgerechte Steuerung erforderlich.

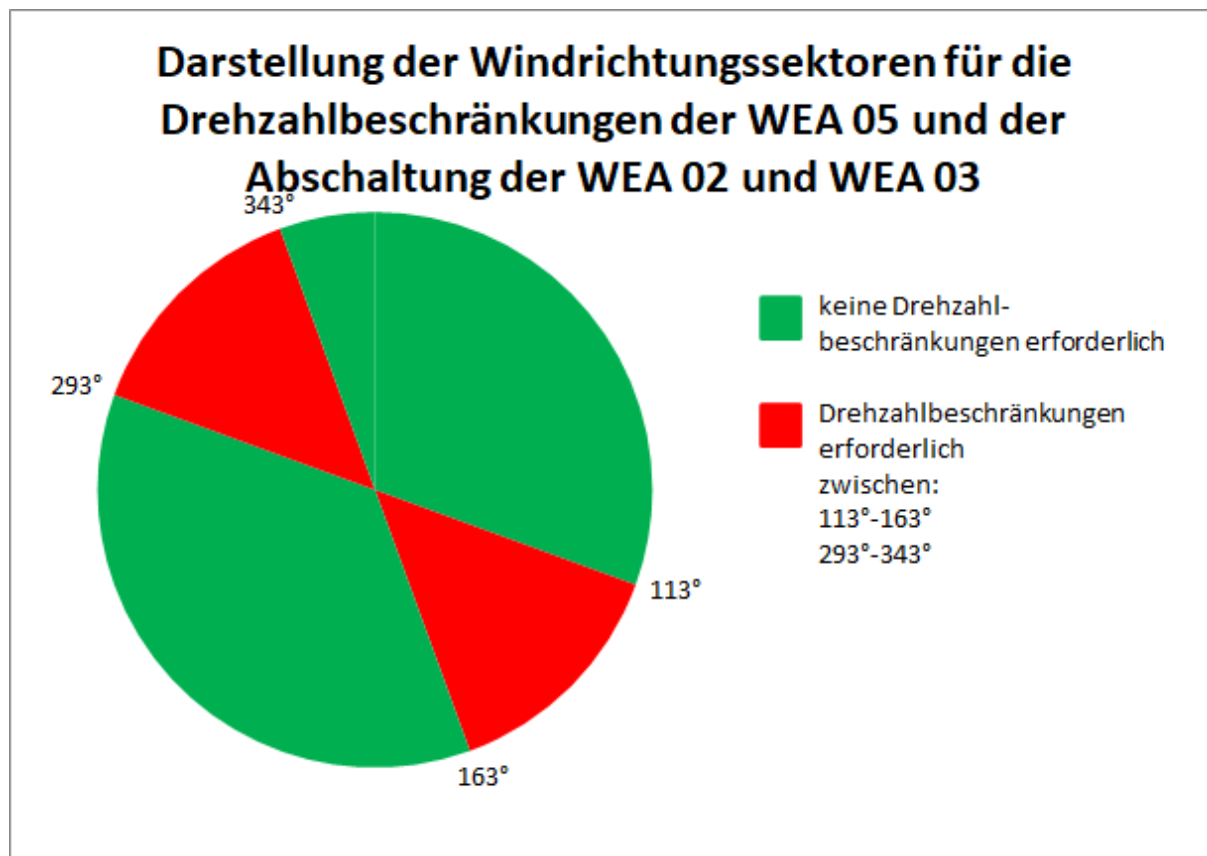


Abbildung 28: Darstellung der Windrichtungssektoren für die Drehzahlbeschränkungen

Die gemäß Tabelle 1 angegebenen Drehzahlbegrenzungen sind nur bei den Windrichtungen erforderlich, die zu einer geringen LFZ-Darstellungswahrscheinlichkeit führen. Diese Windrichtungssektoren sind in der Abbildung 28 rot dargestellt.

Bei den Windrichtungen die eine günstige Situation bzgl. der LFZ-Darstellungswahrscheinlichkeit darstellen, wie es bei der Windrichtung 288° der Fall ist, ist durch die Planung eine ausreichend geringe DCM-Zellenbelastung gegeben.

Bewertung:

Grundlage sind die technischen Erfordernisse des Radarsystems ASR-S oder funktionsgleicher anderer Radarsysteme, sowie die WEA-Standorte gemäß Tabelle 1.

Untersucht wurde die Situation „Planung“ bei beiden betrachteten Windrichtungen, sowie zusätzlich „Planung opt“ bei der Windrichtung II. Die hierbei berücksichtigten Betriebszustände der Windenergieanlagen sind nachfolgend angegeben.

Situation „Planung“:

Die in Tabelle 1 mit Planung benannten Anlagen wurden als aktiv berücksichtigt

Situation „Planung opt“:

Die in Tabelle 1 mit Planung benannten Anlagen WEA 01, WEA 04 und WEA 05 wurden als aktiv, die WEA 02 und WEA 03 als abgeschaltet berücksichtigt. Die WEA 05 ist mit der angegebenen Rotordrehzahlbegrenzung auf 8 rpm berücksichtigt.

Bewertung für die Windrichtung I bei 288°:

Auf der Grundlage der durchgeführten Überflugbewertungen bzgl. zu erwartender Trackverlustwahrscheinlichkeiten von Lfz kann festgestellt werden, dass bei der untersuchten Situation und allen Überflügen ein Störzelligebiet vorliegt, bei dem bzgl. der Radaranlage Wittmund Trackverlustwahrscheinlichkeiten für ein Lfz mit einem RQS von 3 m² von unter 50 % vorliegen.

Bewertung für die Windrichtung II bei 148°:

Auf der Grundlage der durchgeführten Überflugbewertungen bzgl. zu erwartender Trackverlustwahrscheinlichkeiten von Lfz kann festgestellt werden, dass bei der untersuchten Situation „Planung“ bei allen Überflügen ein Störzelligebiet vorliegt, bei dem bzgl. der Radaranlage Wittmund Trackverlustwahrscheinlichkeiten für ein Lfz mit einem RQS von 3 m² von über 50 % vorliegen. Bei der Situation „Planung opt“ liegen die Trackverlustwahrscheinlichkeiten für die Überflüge „A“ bis „C“ bei unter 50 %, bei dem Überflug „D“ über 50 %.

Trackverlustwahrscheinlichkeiten von über 50 % sind für ein Lfz mit einem RQS von 3 m² bei einem Überflug gemäß den Forderungen und Festlegungen der Flugsicherung radartechnisch nicht zulässig. Ein RQS von 3 m² entspricht z. B. einem einmotorigen Sportflugzeug.

Im Zusammenhang mit dem Flugpfad D sei darauf hingewiesen, dass bei tangential orientierten Flugpfaden relativ zum Standort des Radarsystems generell Einschränkungen bei der Darstellung von Lfz-Bewegungen aufgrund fehlender radialer Dopplerinformationen vorliegen.

Die Untersuchung wurde für die Windrichtungen 288° und 148° durchgeführt, um bzgl. der Lfz-Darstellungswahrscheinlichkeit den Mittelwert sowie den Worst-Case abzudecken.

Es muss stets dabei deutlich unterschieden werden zwischen der grundsätzlich angegebenen Möglichkeit für einen Lfz-Trackverlust, der als Kumulation verschiedener Ergebnisse angegeben wird, und der Wahrscheinlichkeit, dass ein Lfz-Zielverlust bei einer bestimmten Detektion eintritt. In dem Zusammenhang ist zu beachten, wie lange ein derartiger Verlust gegeben ist.

Bei der vorliegenden detaillierten Bewertung wurden die jeweiligen anlagenspezifischen RQS-Daten sowie die individuellen Rotordrehzahlen der untersuchten WEA-Typen berücksichtigt. Gegenüber einer vereinfachten pauschalen Abschätzung mit der den militärischen Behörden vorliegenden Software, können sich teilweise erhebliche Unterschiede ergeben, da diese Software als Datenbasis für die RQS-Werte von WEA nur auf eine sehr geringe und abstrahierte Mixtur von WEA-Typen zurückgreift, bei derer eine Berücksichtigung der Rotordrehzahlen, sowie der weiteren WEA-gerätetypischen Eigenschaften nicht erfolgt.

Eine ausführliche technische Bewertung der Überflugproblematik, der Radardarstellung sowie unterstützender bzw. kompensierender Maßnahmen erfolgt in Kapitel 9.

Empfehlung:

Unter Abwägung der verschiedenen untersuchten Situationen und Überflugpfade ist die Rotordrehzahl für die geplanten Windenergieanlagen WEA 02, WEA 03 und WEA 05 bei Überflügen auf die gemäß Tabelle 1 angegebenen Werte zu begrenzen. Die Rotordrehzahlbeschränkung ist nur bei den auf Seite 8 angegebenen Windrichtungen erforderlich. Bei Windrichtungen die eine zur Windrichtung 288° vergleichbare günstige Situation bzgl. der Lfz-Darstellungswahrscheinlichkeit darstellen, ist keine Drehzahlbeschränkung erforderlich.

Durch diese Bedingungen ist inhaltlich die Forderung der Bundeswehr, durch eine bedarfsgerechte Steuerung von WEA eine Situation sicher zu stellen, die eine sichere, radarbasierte Flugführung zulässt, erfüllt.

Hinweis:

Sämtliche Ergebnisse sind unter den für die untersuchten WEA-Standorte angegebenen Randbedingungen gültig. Ein Übertrag der Ergebnisse auf andere Windenergieanlagen oder auf andere Standorte ist nur mit Einschränkungen möglich. Bei Änderungen der WEA-Konstruktionen, der Standorte oder bei abweichenden Geländeprofilen verlieren die ermittelten Ergebnisse ihre Gültigkeit.

Alle Untersuchungsobjekte sind hinsichtlich Konstruktion und Material vom Auftraggeber vorgegeben worden. Alle Untersuchungen und theoretischen Analysen sind vom Sachverständigen persönlich durchgeführt worden. Der Schwerpunkt der Unterstützung durch Dipl.-Ing. (FH) T. Bischoff liegt in der Durchführung der Simulationsverfahren nach festgelegten Prozessen.

Alle genutzten Hilfsmittel sind Eigentum der Airbus Defence and Space GmbH, Betrieb Bremen. Sie entsprechen dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Lehre und der Erfahrung aus der Praxis.

Dipl.-Ing. (FH) Michael Gottschalk

Anhang A: Abkürzungen und Begriffe

ASR	=	Airport Surveillance Radar (Primärradar)	2-D-Radar
CFAR	=	Constant False Alarm Rate; Algorithmische Methode zur Detektion von Zielsignalen, welche vom Störsignal überlagert sind	
DCM	=	Doppler Clutter Map	
Detektion	=	Schwellwertüberschreitung des Pegels des Radar-Echosignals	
ICAO	=	Internationale Zivilluftfahrtorganisation	
Lfz	=	Luftfahrzeug	
Lfz-Zielverlust	=	Bei ausschließlicher Bewertung der Primärradarerfassung liegt ein Lfz-Zielverlust vor, wenn in unmittelbarer Folge die Darstellung einer Lfz-Position durch WEA beeinträchtigt wird, und in dem Zusammenhang keine eindeutige Zuordnung/Identifikation zwischen dargestelltem Ziel und einem Lfz herstellbar ist.	
NH	=	Nabenhöhe	
PD	=	Detektionswahrscheinlichkeit	
Plot	=	Punkt- bzw. Positionsdarstellung auf dem Radarsichtschirm	
Radial	=	Betrachtung der Linie Radar-Zielobjekt	
RQS/RCS	=	Radar-Cross-Section (Radarquerschnitt/Radarreflexionsintensität)	
SSR/IFF	=	Secondary Surveillance Radar	(Sekundärradar)
Störhäufigkeit	=	Häufigkeit der Detektion und Lfz – ähnlichen Darstellung einer WEA auf dem Radarschirm der ASR 910.	
Tangential	=	Betrachtung einer orthogonalen Linie zur Linie Radar-Zielobjekt	
Track	=	Spur	
WEA	=	Windenergieanlage	

Anhang B: Informative Darstellung der Planung bei Bewertung mit der Software, die von der Bundeswehr verwendet wird

Als ergänzende Information der Windparkbewertung werden die Ergebnisse dargestellt, die ermittelt werden, wenn das der Bundeswehr zur Verfügung gestellte WEA-Störzellen-Tool in der Version 1.5.4 vom 20.04.2018 genutzt wird.

Die nachstehenden Abbildungen geben einen informativen Überblick über die zu erwartenden Bewertungsergebnisse bei Anwendung des dem LuFaBw zurzeit zur Verfügung stehende Bewertungstools, dass eine informative Aussage zur möglichen Änderung der Einflüsse auf die DCM-Zellen des Radarortungssystems erlaubt.

Dabei werden die Charakteristika der WEA sowie die Einflüsse unterschiedlicher Windrichtungen sowie Rotordrehzahlen nicht beachtet. Ersatzweise erfolgt die Wahl eines Störtyps, der sehr grob zwischen kleinen, mittleren und großen WEAs unterscheidet.

Diese Bewertung mit dem Tool der Bundeswehr erlaubt keine Aussage zur Sicherheit oder zur Verlustwahrscheinlichkeit eines Lfz-Tracks, sondern gibt Auskunft zur Belastung einzelner DCM-Zellen. Naturgemäß ergeben sich dadurch Unterschiede gegenüber einer Detailbewertung, die eine Überflugbewertung einschließt.

Bei Anwendung der stark vereinfachten Methodologie der Bundeswehr, die von alten stark vereinfachten WEA-Daten ausgeht und nur eine Orientierung zur DCM-Zellenbelastung ermöglicht, ergeben sich nachfolgende Belastungen der DCM-Zellen (inkl. CFAR).



Abbildung 29: Ergebnis für die Situation „Planung“ gemäß dem WEA-Störzellen-Tool der Bundeswehr. Copernicus Sentinel data [2024].



Abbildung 30: Ergebnis für die Situation „Planung opt“ gemäß dem WEA-Störzellen-Tool der Bundeswehr. Copernicus Sentinel data [2024].