



**PARASOL GmbH & Co. KG**

**Titel:**

**Weiterentwicklung des Passiv-Radarsystems**

**„PARASOL“**

**Projekt: PARAPOFA**

**Untertitel:**

*Untersuchung falsch-positiver Detektionsanhäufungen im Nahbereich des passiven Radarsystems zur Verbesserung der bedarfsgerechten Nachtkennzeichnung von Windenergieanlagen*

**Abschlussbericht**

Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt  
mit Aktenzeichen  
37768/01-24/0

von  
Marvin Friedrichsen  
Jan Boysen  
Jörg Heckenbach

Reußenköge, den 02.06.2025



## Inhaltsverzeichnis

1. Verzeichnis von Abbildungen und Tabellen .....	4
2. Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen .....	5
3. Zusammenfassung .....	7
4. Einleitung .....	8
5. Darstellung der erzielten Ergebnisse und Ergebnisdiskussion .....	11
5.1. Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte und Diskussion .....	11
5.1.1. Anforderungsprofil .....	11
5.1.2. Durchführung einer Ursachenanalyse zu auffallenden Detektionsanhäufungen im Nahbereich des Systems (Parasol/FHR) .....	14
5.1.3. Entwicklung/ Untersuchung von Algorithmen zur Klassifizierung und Behandlung der Radarsignale (FHR/Parasol) .....	17
5.1.4. Untersuchung von begrenzenden Effekten in der Detektionsreichweite des Systems .....	23
5.1.5. Entwicklung und Untersuchung von Algorithmen zur Erhöhung der Detektionsreichweite) .....	29
5.1.6. Vorabanalyse von Konzepten zur optimierten Betriebsregulierung von Windparks .....	33
5.2. Maßnahmen zur Verbreiterung der Vorhabensergebnisse .....	41
6. Fazit .....	42
7. Literaturverzeichnis .....	44

# 1. Verzeichnis von Abbildungen und Tabellen

## Abbildungsverzeichnis

<i>Abb. 1: Schematische Darstellung der Infrastruktur für das PARASOL-BNK System.</i>	11
<i>Abb. 2: Beispiel einer Dislozierung eines PARASOL-Sensors am Turm einer Windenergieanlage (links) und der Anbringung von höhenversetzbaren Antennen auf einem Antennenmast (rechts). (Quelle PARASOL GmbH &amp; Co. KG)</i>	12
<i>Abb. 3: Aufbau einer Antennenvermessung.</i>	14
<i>Abb. 4: Zwei- und Dreidimensionale Darstellung der vermessenen Richtcharakteristik.</i>	15
<i>Abb. 5: Schematische Darstellung der vierdimensionalen Matrix als Datenwürfel.</i>	16
<i>Abb. 6: Range-Doppler-Darstellung eines Referenzziels, welches zur Merkmalextraktion herangezogen wurde.</i>	18
<i>Abb. 7: Darstellung des Verlaufs der Detour-Rate über die Zeit.</i>	19
<i>Abb. 8: Darstellung des Verlaufs der bistatischen Entfernung über die Zeit. Die x-Achse wird mithilfe der Laufvariable Doppler-Shift über die Zeit beschrieben.</i>	19
<i>Abb. 9: Dopplerverschiebung aufgetragen über die Zeit.</i>	20
<i>Abb. 10: Detour-Acceleration als normalisierte Zustandsgröße mit N=93 (links) und nicht normalisiert über alle 2200 Messungen (rechts).</i>	21
<i>Abb. 11: Darstellung einer Fast-Furrier-Transformation der Detour-Acceleration über Samplerate 5 (links) und Samplerate 93 (rechts).</i>	21
<i>Abb. 12: Darstellung der berechneten Kreuzkorrelation der Detour-Acceleration für eine Samplerate von 93.</i>	22
<i>Abb. 13: Zusammenhang zur Berechnung der Range-Walk-Compensation der kohärenten Kurzzeitintegration.</i>	30
<i>Abb. 14: Typisches Verschiebemuster für die Range-Walk-Compensation.</i>	31
<i>Abb. 15: Formel zur Berechnung der Gesamtenergie für die nicht-kohärente Integration.</i>	31
<i>Abb. 16: Darstellung einer Testmessung ohne Langzeitintegration mit klar erkennbaren Track-Bruchstücken (orange).</i>	32
<i>Abb. 17: Darstellung einer Testmessung mit Range-Walk kompensierter Implementierung der nicht -kohärenten Langzeitintegration zur Erhöhung der Detektionsreichweite mit nahezu geschlossener Tracking-Spur (orange).</i>	32
<i>Abb. 18: Histogramm des Rauschens mit (blau) und ohne (grün) RWC mit Nicht-kohärenter Integration.</i>	33
<i>Abb. 19: Google Maps Darstellung der Messumgebung. Oben ist der Messplatz am Moselufer dargestellt. Unten ist der Beleuchter Kühkopf in etwa 7 km Entfernung markiert.</i>	37
<i>Abb. 20: Messplatz am südlichen Ufer des Moselstausees bei Koblenz.</i>	37
<i>Abb. 21: Detektion von zwei Enten im Flug über der Mosel.</i>	38
<i>Abb. 22: Deutliche Detektion von Kanadagänsen bei 120 m und -60 Hz.</i>	38
<i>Abb. 23: Detektion eines einzelnen Kormorans bei 420 m und -30 Hz.</i>	39
<i>Abb. 24: SNR eines einzelnen Kormorans über die bistatische Entfernung.</i>	39
<i>Abb. 25: Formel zur Abschätzung der Detektionsreichweite.</i>	40

## Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Übersicht Anforderungen des Projektes PARAPOFA.</i>	12
<i>Tabelle 2: Übersicht Maßnahmen zur Ertüchtigung von WEA mit einem System von PARASOL.</i>	34

## 2. Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

Begriff, Abkürzung	Erklärung
A/D-Wandler	Analog-Digital-Wandler – Ein elektronisches Bauteil, das analoge Signale in digitale umwandelt.
Aspektwinkel	Der Winkel zwischen der Richtung, in der ein Radar auf ein Ziel gerichtet ist, und der Längsachse des Ziels.
Azimutwinkel	Der horizontale Winkel zwischen einer Referenzrichtung und der Richtung zu einem Ziel.
bistatische Entfernung (Detour)	Der Weg, den ein Radarsignal zurücklegt, wenn es von einem Ziel reflektiert wird.
BNK	Bedarfsgerechte Nachtkennzeichnung
CFAR-Prozessierung	Constant False Alarm Rate – Ein Verfahren zur automatischen Anpassung der Detektionsschwelle an das Hintergrundrauschen.
Datenfusion	
Detektionsgüte	Ein Maß zur Qualität der Erkennung eines Ziels durch ein Radar.
Doppler Shift	Die Änderung der Frequenz einer Welle aufgrund der relativen Bewegung zwischen Sender und Empfänger.
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
Elevationswinkel	Der vertikale Winkel zwischen der Horizontalen und der Richtung zu einem Ziel.
FFT	Fast Fourier Transformation - Ein effizienter Algorithmus zur Zerlegung eines Signals in seine einzelnen Frequenzkomponenten.
FHR	Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik
Großsignalfestigkeit	Fähigkeit eines Empfängers schwache Nutzsignale, trotz starker einfallender Sendesignale herauszufiltern.
Hochfrequenzphysik	Der Zweig der Physik, der sich mit elektromagnetischen Wellen im Hochfrequenzbereich beschäftigt.
isotropischer Strahler	Ein theoretisches Antennenmodell, das gleichmäßig in alle Richtungen strahlt.
KI	Künstliche Intelligenz
Kohärente Integration	Die Addition von mehreren aufeinanderfolgenden Radarimpulsen, um das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern.
Kreuzkorrelation	Ein Maß für die Ähnlichkeit zweier Signale in Abhängigkeit von einem zeitlichen Versatz.
Nicht-kohärente Integration	Die Addition der Amplitudenquadrate mehrerer aufeinanderfolgender Radarimpulse.
Omnidirektionale Antennen	Antennen, die Signale in alle Richtungen gleichmäßig abstrahlen oder empfangen.
Passivradar	Ein Radar, das keine eigenen Signale aussendet, sondern die von externen Sendern (z.B. Funkmasten, TV-Sender) reflektierten Signale empfängt.
Phased-Array-Technologien	Antennenarrays, bei denen die Phasen der einzelnen Antennenelemente gesteuert

Planpositionsanzeigen-Detektionen (PPI)	werden, um die Strahlrichtung elektronisch zu verändern. Eine Art von Radaranzeige, die die Position von Zielen in polarer Darstellung zeigt.
Polardiagramm	Eine grafische Darstellung der Richtcharakteristik einer Antenne.
Polarisation	Die Ausrichtung des elektrischen Feldes einer elektromagnetischen Welle.
Primärradar	Ein aktives Radar, das eigene Signale aussendet und die von Zielen reflektierten Signale empfängt.
Radar-Rückstreuquerschnitt (RCS)	Ein Maß für die Fähigkeit eines Objekts, Radarwellen zurückzustrahlen.
Range Migration Compensation (RMC)	Methode zur Korrektur der Reichweitenmigration
Range-Doppler-Map	Eine Darstellung von Radar-Echosignalen in Abhängigkeit von Entfernung und Dopplerfrequenz.
Reichweitenmigration (Range Migration)	Eine Verzerrung der Darstellung von Zielen in einem Radarbild aufgrund ihrer Bewegung während der Sende- und Empfangsphase.
Rtr	Entfernung zwischen Vogel und Empfänger
Rtt	Entfernung zwischen Sender und Vogel
Sekundärradar	Ein Radar, das auf die Antwort von Transpondern an Bord von Flugzeugen oder Schiffen angewiesen ist.
Signal-Rausch-Verhältnis (SNR)	Das Verhältnis der Stärke eines Nutzsignals zur Stärke des Störsignals.
Transponder	Ein Gerät, das ein empfangenes Signal verstärkt und in einer anderen Frequenz oder mit einem anderen Code zurücksendet.
UHF	Ultra High Frequency – Ein Frequenzbereich im Hochfrequenzspektrum, der höhere Frequenzen als VHF umfasst
VHF	Very High Frequency – Ein Frequenzbereich im Hochfrequenzspektrum
WEA	Windenergieanlage – Eine Anlage zur Umwandlung von Windenergie in elektrische Energie.
Wirkungsräume	Der Bereich, in dem ein Radar seine Ziele erfassen kann.

### 3. Zusammenfassung

Im Rahmen der Untersuchung falsch-positiver Detektionsanhäufungen im Nahbereich des passiven Radarsystems zur Verbesserung der bedarfsgerechten Nachtkennzeichnung von Windenergieanlagen fand die Weiterentwicklung des Passiven Radarsystems „PARASOL“ statt. Das Projekt wurde im Rahmen einer Zusammenarbeit durch die PARASOL GmbH & Co. KG (Bewilligungsempfänger) und das Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik (Forschungspartner) durchgeführt. Das Vorhaben mit dem DBU-AZ: 37768/01-24/0 beschäftigte sich mit der Ursachenanalyse auffälliger Detektionsanhäufungen im Nahbereich und begrenzenden Effekten in der Detektionsreichweite des PARASOL- Systems, einer Untersuchung von Algorithmen zur Klassifizierung/ Behandlung/ Unterdrückung der im Radarbild auftretenden Detektionsanhäufungen und einer Entwicklung von prototypischen Lösungsansätzen.

Es fand die Vermessung der aktuell eingesetzten Empfängerantenne statt, um das Leistungsaufnahmeverhalten detailliert zu studieren und daraus Berechnungsparameter für die Datenverarbeitung zu optimieren. Zur Behandlung von Falschsignalen wurden anspruchsvolle Funktionen wie Ortung, Objektverfolgung, Mustererkennung oder Klassifizierung zusammen mit dem Forschungspartner weiterentwickelt und wirtschaftlich sinnvoll gelöst. Zur Ursache der auffälligen Detektionsanhäufungen wurde festgestellt, dass der Algorithmus zur Schätzung der Position eines Flugobjektes bei nicht exaktem Ellipsoiden-Schnitt einen Fehler aufweist. Zur Unterdrückung dieser Signalanhäufungen wurden mehrere Kriterien (normierte Beschleunigung, Vorzeichenklassifizierung und Änderungsrate der Zustandsgrößen, Transformation der Zustandsgrößen in den Frequenzbereich mittels FFT, Kreuzkorrelation im Zeitbereich) herangezogen, was zu einer wesentlichen Veränderung der Softwarebestandteile und des Auswertalgorithmus führte. Zur Verbesserung der Detektionsreichweite wurden Möglichkeiten zur Erhöhung der Empfangsempfindlichkeit, Verbesserung der Antennentechnik und einer Optimierung der Signalverarbeitung untersucht. Durch den Einsatz von Signalverarbeitungstechniken der nicht-kohärenten/kohärenten Integration konnte eine Verbesserung erreicht werden. Diese Vorarbeiten wurden in ihrer Gesamtheit als Basis zur Detektion und Klassifizierung von kleinen Flugobjekten (Vögeln) erfolgreich erprobt. Es konnten in ersten Messungen mittels passiv Radar von PARASOL an der Mosel bei Koblenz Formationen von z.B. zwei Enten, vier Kanadagänsen, zwei Schwänen und eines einzelnen Kormorans detektiert werden. Somit konnte die Erfassung der ortsspezifischen Flugaktivitäten in der Nähe von WEA auf Fragen des Naturschutzes ausgedehnt werden. Allerdings wurde festgestellt, dass für die Merkmalextraktion von kleinen Flugobjekten immer eine gewisse Lernzeit (Latenz) von Nöten ist, um die erforderlichen Informationen zu gewinnen und die Entscheidungen treffen zu können. Für die Auswahl eines gut anwendbaren und ökonomischen KI-Ansatzes zur Signalverarbeitung sowie der weiteren Entwicklung des PARASOL-Systems ist daher eine Validierung der notwendigen Randbedingungen durch experimentelle Erprobung entscheidend.

Eine nachgelagerte Überführung der Projektergebnisse in einen Praxistest in einem Windpark wird daher im Anschluss an dieses Vorhaben von PARASOL GmbH & Co. KG angestrebt. Projektziel eines Nachfolgevorhabens wäre es bereits realisierte Funktionsmuster und Prototypen zu einem funktionierenden und robusten Demonstrator weiterzuentwickeln, um Fragestellungen der BNK und des Naturschutzes zusammenzubringen.

## 4. Einleitung

Die **Ausgangssituation** für die Aufstellung von neuen Windenergieanlagen (WEA) in Vorranggebieten kann folgendermaßen beschrieben werden. Es gibt immer weniger Standorte, in denen es zu keinen Konflikten mit den Anwohnern oder dem Natur- und Artenschutz kommt. Für den Ausbau und Betrieb haben sich deswegen die Auflagen der Genehmigungsbehörden in den vergangenen Jahren enorm erhöht. Windenergieanlagen werden regulatorisch, wie Hindernisse für den Luftverkehr behandelt. Das führt entsprechend der geltenden Rechtslage zu einer Kennzeichnungspflicht gemäß der „Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Kennzeichnung von Lufthindernissen“. Das blinkende Licht der Nachtkennzeichnung wird dabei durch die Anwohner als besonders störend empfunden und lockt Säugetiere und Insekten in den Gefahrenbereich der WEA an. Um Lichtverschmutzung entgegenzuwirken, ist für kennzeichnungspflichtige Windenergieanlagen in Deutschland die Ausrüstung mit Systemen zur bedarfsgerechten Nachtkennzeichnung (BNK) vorgeschrieben. Dies ist auf die Einführung des § 9 Abs. 8 Erneuerbaren-Energie-Gesetz (EEG 2017) zurückzuführen. Ab Mitte 2020 besteht eine Ausstattungspflicht für Windenergieanlagen ab einer Gesamthöhe von 100 Metern, welche zwischenzeitlich durch die Bundesnetzagentur auf Ende 2022 verlängert wurde, um den Marktakteuren mehr Zeit für die Umstellung zu gewähren. Aus den Anforderungen an die BNK geht hervor, dass der Wirkungsraum der Systeme durch den Luftraum gebildet wird, der sich um jedes Hindernis in einem Radius von mindestens 4.000 Metern erstreckt und vom Boden bis zu einer Höhe von nicht weniger als 600 Metern (2 000 Fuß) über dem Hindernis reicht.<sup>1</sup> Die Fachagentur Windenergie geht davon aus, dass somit 16.000 bis 19.000 bestehende WEA nachgerüstet werden müssen. Hinzu kommen auch noch die Neuanlagen.

Erste BNK-Systeme wurden bereits seit 2015 zugelassen und betrieben. Bislang handelte es sich jedoch um eine optionale Möglichkeit. Durch die Einführung einer Ausstattungspflicht mit einem BNK-System wurde der Anbietermarkt belebt. Erhältlich und von der Deutschen Flugsicherung zugelassen sind bisher drei Technologieoptionen 1) das Primärradar oder aktives Radar, 2) das Sekundärradar (über Transponder in Luftfahrzeugen) oder 3) das Passivradar, welches dem von der Firma PARASOL eingesetzten System entspricht.

Im Rahmen der Systemnutzung des PARASOL Systems konnte weiterer Entwicklungsbedarf identifiziert werden, da aufgrund der hohen Auflösung und Detektionsgüte des Verfahrens insbesondere im Nahbereich eine Detektionsanhäufung von Falschziel-Signalen auftritt. Während Nutzsignale zur Erkennung von Flugobjekten beitragen, führen Störechos zu Mehrfach- oder Falschdetektionen. Die Ursachenanalyse für diese falsch-positive Signalanhäufung stellt eine Herausforderung dar, um eine Systemverbesserung zu ermöglichen. Mögliche Auslöser können Reflektionen und zahlreiche Überlagerungen durch die Vegetation, andere WEA, den Straßenverkehr, Umwelteinflüsse wie Wind, Regen, das Flugverhalten von Vögeln, von Fledermäusen oder von Flugdrohnen sein, die zu korrelierenden Falschziel-Signalen führen. Die

---

<sup>1</sup> <http://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/BMVI-LF15-20200424-SF-A006.htm>

Falschziel-Signale sind für den Betrieb der Nachtkennzeichnung von Windparks nicht erwünscht, denn diese aktivieren eine Befeuerung und stellen somit eine Lichtverschmutzung dar, obwohl keine Notwendigkeit im Wirkungsraum vorliegt.

Da die moderne Signalverarbeitung in den letzten Jahren deutliche Fortschritte erfahren hat, war die **Zielsetzung** für dieses Vorhaben die Weiterentwicklung des passiven Radarsystems „PARASOL“ anzustoßen. Es können mittlerweile zunehmend komplexere Aufgaben und anspruchsvollere Funktionen wie Objektverfolgung, Mustererkennung oder Klassifizierung mit passivem Radar wirtschaftlich gelöst werden. Daher war es sinnvoll und notwendig eine Ursachenanalyse zu auffallenden Detektionsanhäufungen im Nahbereich des PARASOL- Systems durchzuführen und Abhilfe bzw. Lösungsstrategien zu schaffen. Weiterhin bestand der Bedarf einer Untersuchung von Algorithmen zur Klassifizierung/ Behandlung/ Unterdrückung der im Radarbild auftretenden Detektionsanhäufungen, um die Robustheit des Gesamtsystems zu verbessern und neue Funktionen zu erschließen. Ebenfalls mussten begrenzende Effekte in der Detektionsreichweite des Systems, das Hardwaresetup und Softwarealgorithmen analysiert werden und mögliche Maßnahmen zur allgemeinen Weiterentwicklung des PARASOL-Systems zu ergreifen.

Auf Basis dieser Untersuchungen und der notwendigen Erfassung der ortsspezifischen Flugaktivitäten zur Behandlung von Signalursachen sollte eine allgemeine Erstklassifizierung von Flugobjekten durch Radarsysteme vorgenommen und auf Fragen des Naturschutzes ausgedehnt werden. So sollten im Rahmen der Signalauswertung Möglichkeiten eines Vogel-Trackings betrachtet werden.

Aus dieser Motivation ergab sich daher die folgende **Aufgabenstellung**. Im angedachten Lösungsweg sollten systemdienliche technologische Verbesserungen und Beiträge zur Umweltrelevanz der passiven Radartechnologie gemeinsam betrachtet werden. Insbesondere bei der Nutzung der Rohdaten im Nahbereich bestanden technische Herausforderungen, die einerseits zu falsch-positiv/ falsch-negativen Detektionsanhäufungen führten, andererseits für neue Anwendungsfelder des passiven Radarsystems „PARASOL“ genutzt werden könnten. Zusammen mit dem Forschungspartner Fraunhofer Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik konnte dabei auf einen langjährigen und starken Projektpartner zurückgegriffen werden.

Konkrete Aufgaben bestanden insbesondere im Bereich Fragestellungen, welche Anforderungen an die technische Ausstattung des passiven Radarsystems im Bereich der Wirkungsräume, der Detektionsgüte und der Antennenkonfiguration erfüllt werden könnten und müssten, um weitere Anwendungsmöglichkeiten (z.B. Vogel-Tracking) zu erschließen.

Entsprechende Lösungen wurden für aktive Radarsysteme entwickelt, aber noch nicht auf Anwendungen mit passivem Radar übertragen. Daher entstand Forschungsbedarf zur mathematischen Modellierung, Analyse der erstellten Algorithmen bezüglich Stabilität und Detektionswahrscheinlichkeit, Filterung und Datenverarbeitung von Detektionsereignissen.

Im Bereich der Detektionsreichweite des Systems sollten Möglichkeiten untersucht werden, die zu einer Verbesserung des Signal-Rauschverhältnisses beitragen können. Hierzu sollten vielfältige Lösungsansätze zur Verbesserung der Antennentechnik, zur Datenfusion, zum Einsatz von verbesserter Hardware mit akzeptablem Preis-Leistungsverhältnis (Hochleistungsverstärker, Verwendung von hochwertigen Filtern) oder zur Nutzung von Antennenarrays mit adaptiven Algorithmen zur Kalibrierung betrachtet und bewertet werden.

Bei der Vorabanalyse von Konzepten zur optimierten Betriebsregulierung von Windparks sollten zuletzt Betrachtungen erfolgen, um die Übertragbarkeit der gefundenen Lösungsansätze sowie der erzielten Ergebnisse und der dafür notwendigen Rahmenbedingungen in einen nachgelagerten Praxistest zu identifizieren.

Die Untersuchung dieser Ansätze im Rahmen des Forschungsvorhabens stellte daher eine anspruchsvolle und innovative Aufgabe im Bereich der Windenergie und des Naturschutzes für die Projektpartner dar.

## 5. Darstellung der erzielten Ergebnisse und Ergebnisdiskussion

### 5.1. Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte und Diskussion

#### 5.1.1. Anforderungsprofil

Bisherige Vorarbeiten zum PARASOL-System basierten auf den langjährigen Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des Meterwellenradars im Frequenzbereich VHF-UHF des Fraunhofer Instituts für Hochfrequenzphysik und Radartechnik. Ende der 1990er Jahre führten Überlegungen im militärischen Bereich dazu existierende Beleuchter (z.B. Rundfunksender) im niederfrequenten Bereich für die Radarzieldarstellung zu nutzen. Dies war auf die Erkenntnis zurückzuführen, dass niederfrequente Radarverfahren aufgrund der Frequenzteilungsproblematik kaum nutzbar waren. Andererseits wiesen diese Frequenzbereiche positive Eigenschaften, wie die Beobachtung abgeschatteter Bereiche (Beugungsausbreitung von Radarwellen an Kanten) oder Unempfindlichkeit gegenüber Verfahren zur Reduzierung des Rückstreuquerschnitts von Zielen, auf. Dadurch wurde am FHR zunächst theoretisch und später experimentell die Eignung von analogen Rundfunk- und Fernsehsignalen für die passive Radarzielbeobachtung untersucht. Im Jahr 2012 startete das Vorhaben „Passiv Radar basierte Schaltung der Objektkennzeichnung für die Luftfahrt - PARASOL“ (FKZ 0325445). Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde gemeinsam durch FHR und Dirkshof bis 2014 das Sensor-Konzept PARASOL unter Verwendung von passiven

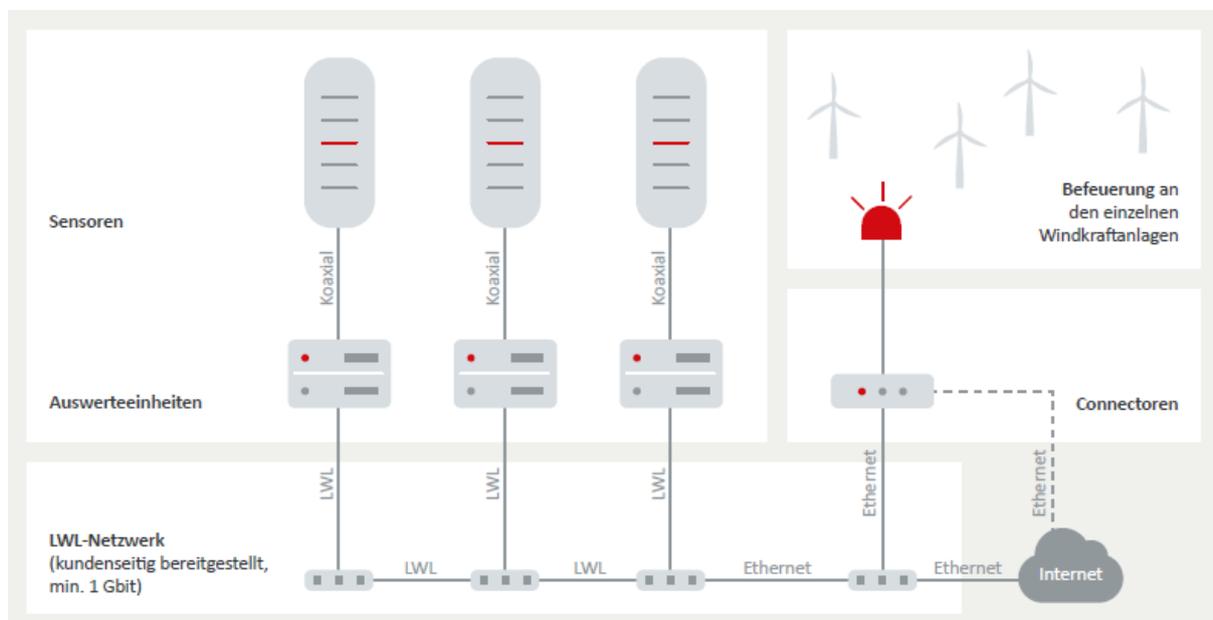


Abb. 1: Schematische Darstellung der Infrastruktur für das PARASOL-BNK System.

Radar-Sensoren entwickelt. Eine schematische Darstellung der realisierten Infrastrukturlösung an einer Windenergieanlage ist in der Abbildung 1 dargestellt.



Abb. 2: Beispiel einer Dislozierung eines PARASOL-Sensors am Turm einer Windenergieanlage (links) und der Anbringung von höhenversetzbaren Antennen auf einem Antennenmast (rechts). (Quelle PARASOL GmbH & Co. KG)

Diese besteht aus drei Empfängermodulen (Sensoren) mit jeweils einer Auswerteeinheit (einem A/D-Wandler, Rechner und Datenspeicher), die jeweils an einem WEA-Standort disloziert werden. Über ein Lichtwellenleiter- (LWL) oder Ethernet-Netzwerk erfolgt die Verbindung zur Steuerung der Befuerung der einzelnen WEA im Wirkungsbereich. Abbildung 2 stellt beispielhaft die Anbringung von PARASOL-Sensoren an einer WEA oder einem Antennenmast dar.

Im Rahmen der industriellen Systemnutzung konnte allerdings weiterer Entwicklungsbedarf identifiziert werden, der im Rahmen dieses Vorhabens adressiert werden sollte. Im ersten Schritt am Anfang des Vorhabens wurde das Anforderungsprofil zwischen den Projektpartnern definiert. Dies sollte dazu dienen den Entwicklungsfortschritt und die Zielerreichung nachzuverfolgen.

Die herausgearbeiteten Anforderungen sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 1: Übersicht Anforderungen des Projektes PARAPOFA.

Kategorie	Anforderung
Vermessung der aktuell eingesetzten Empfängerantenne	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hardwarevermessung unter möglichst realen Bedingungen</li> <li>• Ableitung der Berechnungsparameter für die Datenverarbeitung</li> <li>• Detaillierte Bestimmung der Richtcharakteristik und des Leistungsaufnahmeverhaltens</li> </ul>
Ursache der auffallenden Detektionsanhäufungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Datenaufbereitung aufgenommener Radar-Tracks</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Untersuchung der Algorithmen zur Ziellokalisierung und der Sensorkonfiguration</li> <li>• Bestimmung der Kovarianzen aus den Radar-Messwerten</li> <li>• Bestimmung der Güte der Daten und möglicher Flexibilitäten zur Bestimmung der Rechenparameter</li> </ul>
Algorithmen zur Klassifizierung und Behandlung der Radarsignale	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entwicklung der Lösungsmethodik neuer Algorithmen, Methoden zur Parameterberechnung und -schätzung</li> <li>• Bestimmung des Rechenaufwands neuer Methoden und deren Übertragbarkeit auf das System PARASOL</li> <li>• Untersuchung der Kombinatorik gemessener Radar-Rohdaten zur Erfüllung der Kriterien eines Lösungsraums des PARASOL-Systems</li> <li>• Visualisierung der Entwicklungsergebnisse</li> <li>• Optimierung der Softwarebestandteile des Auswertalgorithmus</li> </ul>
Untersuchung der Detektionsreichweite des Systems	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Literaturrecherche zum Stand der Technik</li> <li>• Untersuchung der Empfindlichkeit des Systems</li> <li>• Untersuchung der Antennentechnik</li> <li>• Untersuchung der Signalverarbeitung</li> <li>• Unterbreitung von Lösungsansätzen für die Verbesserung der Detektionsempfindlichkeit des PARASOL Systems</li> </ul>
Erhöhung der Detektionsreichweite des Systems	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluation der Flexibilität und des Bedarfs an Rechenleistung für mögliche Lösungsansätze</li> <li>• Generierung von Messdaten zur Untersuchung der entwickelten Lösungsansätze</li> <li>• Implementierung von Prozessschritten zur Verbesserung der Detektionsreichweite</li> <li>• Entwicklung von mathematischen Modellen zur Behandlung der Messdaten und deren Integration in Berechnungsalgorithmen und Prozessierungsschritte</li> <li>• Visualisierung der Ergebnisse</li> </ul>
Konzepten zur optimierten Betriebsregulierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Möglichkeit zur Ertüchtigung von WEA-Bestandsanlagen von Dirkshof</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Übertragbarkeit der Ergebnisse in Windparks mit WEA der wesentlichen Anlagenhersteller</li> <li>• Ableiten von Rahmenbedingungen zur Durchführung eines nachgelagerten Praxistests</li> </ul>
Detektion Vogel-Tracking	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durchführung von Messkampagnen zur Detektion von Individuen, Detektion von Vogelgruppen</li> <li>• Ableiten von Ergebnissen dieser Untersuchungen und Visualisierung der Ergebnisse</li> </ul>

### 5.1.2. Durchführung einer Ursachenanalyse zu auffallenden Detektionsanhäufungen im Nahbereich des Systems (Parasol/FHR)

Der Falschanteil zwischen Falsch-Positiv-Signalen liegt derzeit bei etwa 10%, bestimmt durch die Wetterlage, Verkehrsdichte und Jahreszeit. Dies bezieht sich auf mechanische Flugobjekte größer 1m<sup>2</sup> Rückstrahlfläche. Bei Flugobjekten kleiner 1m<sup>2</sup> Rückstrahlfläche sind diese Falsch-Positiv-Signale derzeit bei gleicher Konstellation bei etwa 60% Falschanteil, was zu einer nicht Abschaltung der WEA führen würde.

Im Arbeitspaket 2 wurde eine Ursachenanalyse zu Detektionsanhäufungen im Nahbereich des passiven Radarsystems durchgeführt. Das beinhaltete die Gewinnung von Mess-, bzw. Testdaten durch die Fa. PARASOL zur Analyse der auffallenden Effekte und die gemeinsame Analyse mit dem Forschungspartner Fraunhofer FHR.

So fand die detaillierte Vermessung der aktuell eingesetzten Empfängerantenne unter möglichst realen Bedingungen statt, um daraus Berechnungsparameter für die Datenverarbeitung zu optimieren. Im Zuge einer Antennenvermessung kann die Richtcharakteristik und das Leistungsaufnahmeverhalten einer Antenne detailliert bestimmt werden. Die Richtcharakteristik gibt an, wie sich die Leistungsdichte in Abhängigkeit des Azimut- und Elevationswinkel verhält. Vereinfacht gesagt gibt sie an, aus welcher Richtung die Antenne gut empfängt/sendet. Dies ist insofern von Bedeutung, wenn,

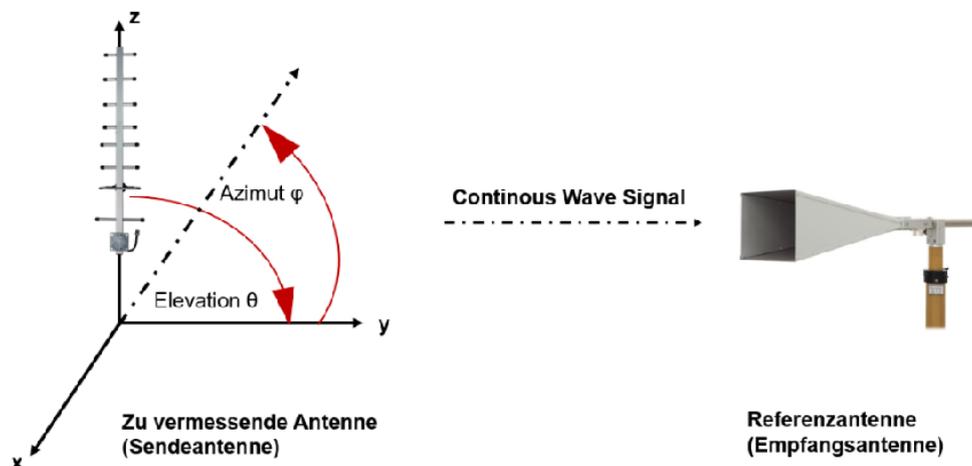


Abb. 3: Aufbau einer Antennenvermessung.

wie im Fall des PARASOL-Systems keine omnidirektionale Antenne verwendet werden. Der Gewinn einer Antenne wird üblicherweise in dBi (Dezibel Isotrop) angegeben. Dieser Wert bezieht sich auf einen (theoretischen) isotropischen Strahler und kann je nach Antennenart positiv oder negativ sein. Wichtig hierbei ist zu verstehen, dass dieser winkelabhängig ist und in der Regel mithilfe von Polarkoordinaten angegeben wird. Kenntnisse über die Richtcharakteristik verbessern zusätzlich die passive Radarsimulation, da die verwendete Antenne realistisch modelliert wird. Um die Richtcharakteristik zu erhalten, betreibt man die zu vermessende Antenne als Sendeantenne. Diese strahlt ein CW-Signal mit einer bestimmten Sendeleistung  $P_{TX}$  aus. Pro Elevationswinkel  $\theta$  werden alle Azimutwinkel  $\varphi$  durchlaufen, sodass sich die Antenne einmal um ihre Achse dreht. Die Referenzantenne, die stets zur zu vermessenden Antenne gerichtet ist und ihre Position nicht verändert, misst empfängt hierbei die Ausstrahlung. Dadurch erhält man eine dreidimensionale Richtcharakteristik. Abbildung 3 zeigt den Aufbau inklusive des dazugehörigen Koordinatensystems.

Mithilfe der Berechnung des Antennengewinns aus der erhaltenen Messung wird für jeden Azimutwinkel und einem dazugehörigen Elevationswinkel die Richtcharakteristik

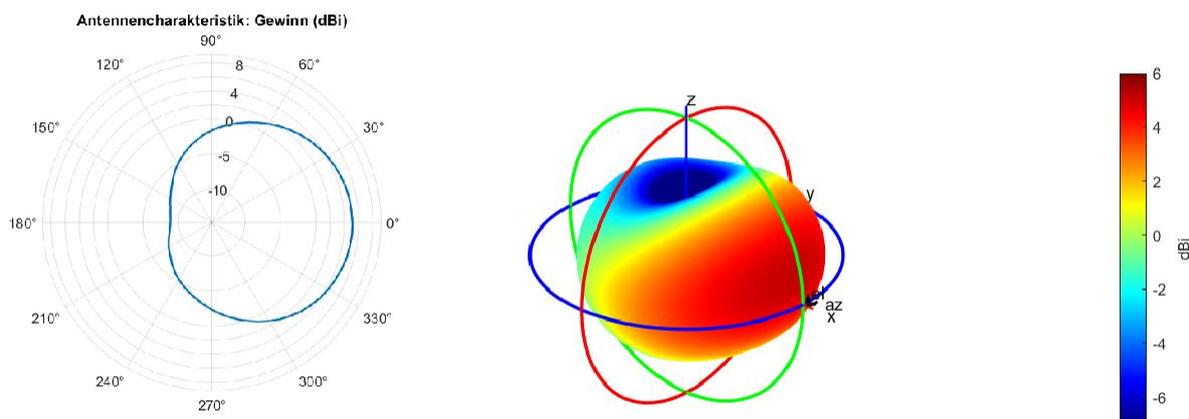


Abb. 4: Zwei- und Dreidimensionale Darstellung der vermessenen Richtcharakteristik.

erstellt. Visuell stellt man dies mittels Polardiagramme da, wie in der Abbildung 4 dargestellt. Hierbei wird die dreidimensionale Richtcharakteristik mittels einer Ebene geschnitten. Dreidimensionale Darstellungen sind auch möglich, dienen jedoch hauptsächlich der Visualisierung und Verständnis.

Mittels eines Skriptes wurden die Daten aufbereitet und in eine vierdimensionale Matrix übertragen, wo die Messwerte in Abhängigkeit der Frequenz, Azimut- und Elevationswinkel und Polarisation geordnet werden. Zur Veranschaulichung ist dies in der Abbildung 5 dargestellt. Diese Daten wurden dazu verwendet, um Berechnungsparameter zur Detektion von Flugobjekten anzupassen und fundierte Aussagen zur Ursachenanalyse der auffallenden Detektionsanhäufungen im Nahbereich der Parasol Sensoren machen zu können.

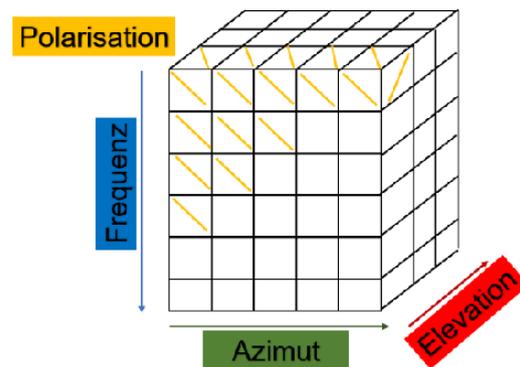


Abb. 5: Schematische Darstellung der vierdimensionalen Matrix als Datenwürfel.

Zur Ursache der auffallenden Detektionsanhäufungen wurde festgestellt, dass viele der Planpositionsanzeigen-Detektionen (PPI) mindestens zwei gleiche Radar-Targets als Basis haben, aber nur eine Kombination mit einem dritten Radar-Target einem realen Flugobjekt entsprechen. Es wurde zunächst sichergestellt, dass Bestimmung der Kovarianz aus den Radar-Messwerten oder die Parameter zur Unterdrückung der WEA optimal gesetzt sind. Anschließend wurde der Ansatz verfolgt, ob es möglich ist den Radar-Rückstreuquerschnitt (RCS) einer Planpositionsanzeigendetektion zu schätzen. Dieser Wert könnte Aufschluss darüber geben, ob eine PPI-Detektion falsch ist. Dazu musste die Differenz des empfangenen Direktsignals zu der Detektion ins Verhältnis gesetzt werden, um unter Berücksichtigung der betreffenden Richtungen des Antennendiagramms einen Wert zu ermitteln. Allerdings wurde festgestellt, dass der Rückstreuquerschnitt zu stark mit dem Winkel für die gestellte Aufgabenstellung fluktuiert. Zusätzlich wurde analysiert, ob unter Duldung einer leichten Verschlechterung der horizontalen Planpositionsbestimmung ganz auf den Parameter Höhe zum Aufgreifen und Verfolgen eines Flugziels verzichtet werden kann. Daraus ergäbe sich eventuell die Möglichkeit auf einen der drei Sensoren zur Detektion zu verzichten und diesen nur zur detaillierten Parameterschätzung eines mit zwei Sensoren detektierten und getrackten Zieles heranzuziehen. Eine kurzfristige Implementierung zeigte allerdings deutlich die Nachteile dieses Ansatzes.

Die weitere Untersuchung der aufgenommenen Radar-Tracks ließ den Schluss zu, dass der Algorithmus zur Schätzung der Position bei nicht exaktem Ellipsoiden-Schnitt einen Fehler hat, der die weitere Verarbeitung der Messwerte beeinflusst. Nach gründlicher Untersuchung des Algorithmus und Studium der Lektüre "Ziellokalisierung mittels Laufzeitmessungen" von Franz Dommermuth musste festgestellt werden, dass das Beobachtete weitestgehend dem in der Lektüre "Ziellokalisierung mittels Laufzeitmessungen" dargelegten Verhalten der Lösungsinstabilitäten entspricht. Die vertikale Verteilung von Sender, Empfängern und Ziel befinden sich im Verhältnis zur horizontalen Ausdehnung in ein einem sehr kleinen Bereich. Hochfliegende Ziele können durch eine Höhenschätzung nahezu jederzeit gut vermieden werden. Dahingegen ist die Güte der Höhenschätzung niedrig fliegender Ziele stark von deren Position im

Bezug zu Sender und Empfängern abhängig, wie Dommermuth bereits nachgewiesen hat. Das bedeutet, dass ein Wert der Range-Doppler-Maps darüber entscheidet, ob es sich um ein reales Flugobjekt handelt. Zur Lösung der Problematik wurde die Untersuchung des wesentlich rechenaufwendigeren Ansatzes mit Bayes-Schätzer bewertet. Da es sich aber bei diesem Vorhaben, um die konkrete Entwicklung von Algorithmen für die Verbesserung eines in Betrieb befindlichen Systems handelt, musste zunächst überprüft werden, wieviel Rechenzeit für den Bayes-Schätzer zur Verfügung steht.

### 5.1.3. Entwicklung/ Untersuchung von Algorithmen zur Klassifizierung und Behandlung der Radarsignale (FHR/Parasol)

In Arbeitspaket drei sind die Entwicklungsarbeiten und die Untersuchung von Algorithmen zur Unterdrückung und Behandlung der Radarsignale durchgeführt worden. Dieser Arbeitsschritt wurde überwiegend durch den Forschungspartner FHR bearbeitet, der entsprechende Entwicklungstätigkeiten zur Erstellung von Algorithmen zur räumlichen Zuordnung der Effekte aus multistatischen Sensoren und Analysen bezüglich Stabilität und Detektionswahrscheinlichkeit durchführte. Die Bereitstellung der Daten und des Vergleichssystems erfolgte durch den Parasol eigenen Teststandort im Windpark Reußenköge. Das System wurde technisch an die Forschungsanforderungen angepasst, um die Anforderungen im Projekt zu erfüllen. Somit konnten am Teststandort Daten/Werte erfasst und gleichzeitig neue Softwareanpassungen in Echtzeit getestet werden, um stets eine Vergleichbarkeit zum ursprünglichen Systemaufbau herzustellen.

Die Bewertung des Einsatzes des wesentlich rechenaufwendigeren Ansatzes mit dem Bayes-Schätzer resultierte in der Einschätzung des FHR, dass ohne eine vorherige quantitative Reduzierung der Zielanhäufungen im Radarbild, der Bayes-Schätzer zunächst nicht zielführend ist. Daher musste eine praktikable Lösung gesucht werden, die die Anzahl der Falschdetektionen deutlich reduziert. Der Fokus wurde daher auf die Untersuchung der Kombinatorik aus den gemessenen Radar-Rohdaten gelegt. Ziel war es zunächst Kriterien zu finden, die es erlauben würden einen Lösungsraum aufzuspannen. Das blinde Testen jeder möglichen Kombination führt zu einer sogenannten Kombinationsexplosion.<sup>2</sup> Daher sollte zunächst der Verlauf eines jeden Range-Doppler-Tracks betrachtet werden, um Merkmale zu finden, die diesen so gut beschreiben, dass die einzelnen Tracks mit gleichen Merkmalen kombiniert werden können und somit zu einer Reduktion der Detektionsanhäufungen geführt werden können. Dabei wurde davon ausgegangen, dass ein Flugobjekt niemals einen idealen Geradeausflug absolviert, sondern z.B. durch Umwelteinflüsse wie Wind geschaukelt und Steuerungskorrekturen ausgesetzt werden kann. Die so entstehenden Merkmale und den komplexen Sachverhalt galt es nun formal zu beschreiben. Beachtet musste ebenfalls, dass diese Merkmale bedingt durch unterschiedliche Beleuchtungsrichtung für die verschiedenen Sender im Detail unterschiedlich aussehen können.

---

<sup>2</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Combinatorial\\_explosion](https://en.wikipedia.org/wiki/Combinatorial_explosion) (abgerufen am 02.08.2024)

Zur Visualisierung und Merkmalsextraktion wurden insgesamt 2200 Aufzeichnungsdateien analysiert. Mithilfe der Range-Doppler-Darstellung kann der Flug des Referenzziels, das mittels GPS getrackt wurde, dargestellt werden. Das ist in der Abbildung 6 zu sehen.

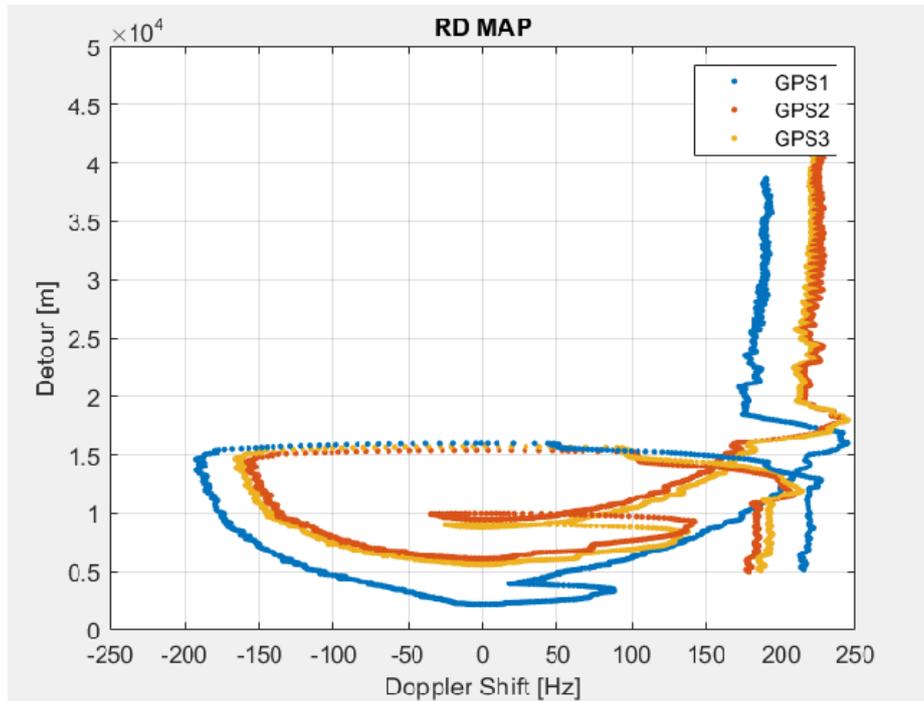


Abb. 6: Range-Doppler-Darstellung eines Referenzziels, welches zur Merkmalsextraktion herangezogen wurde.

Charakteristisch ergaben sich durch die geographische Konstellation drei verschiedene Tracks, da bei der Messung drei verschiedene Beleuchter vorhanden waren. In dieser Darstellung wird typischerweise keine Information über die Zeit gegeben. Deshalb müssen die Zustandsgrößen für die Merkmalsextraktion aus den Daten zunächst in Abhängigkeit der Zeit gestellt werden.

Die bistatische Entfernung (**Detour**) ist die erste Zustandsgröße und kann über die vergangene Zeit dargestellt werden. Das ist in der Abbildung 7 gezeigt. In dieser Darstellung wird die x-Achse mithilfe der Laufvariable  $i$  über die Zeit beschrieben. Man erkennt, dass Detour für alle Tracks mit einer vergleichbaren Änderungsrate zu- bzw. abnimmt. Die tatsächliche Detour variiert, weswegen die Änderungsrate, die der Geschwindigkeit des Flugobjekts entspricht, von Interesse ist.

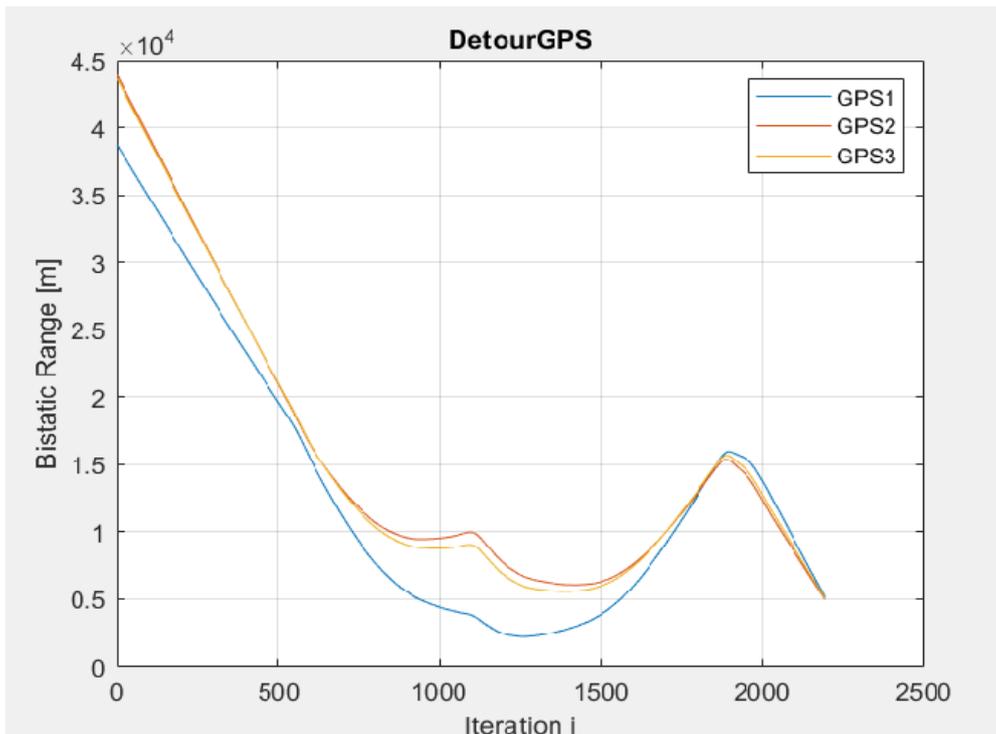


Abb. 8: Darstellung des Verlaufs der bistatischen Entfernung über die Zeit. Die x-Achse wird mithilfe der Laufvariable Doppler-Shift über die Zeit beschrieben.

Die zweite mögliche Zustandsgröße ist die **Detour-Rate**, die der Geschwindigkeit des Flugziels entspricht. Sie beschreibt, wie schnell sich die Detour zeitlich ändert. Man kann feststellen, dass sich die Signale in Phase befinden, wobei der tatsächliche Betrag sich unterscheiden kann. Jedoch ist von Interesse, ob potenzielle Kombinationen stets das identische Vorzeichen für die Zustandsgrößen besitzen. Eine Darstellung des Verlaufs der Geschwindigkeit des Referenzziels über die Zeit ist in der Abbildung 8 zu sehen.

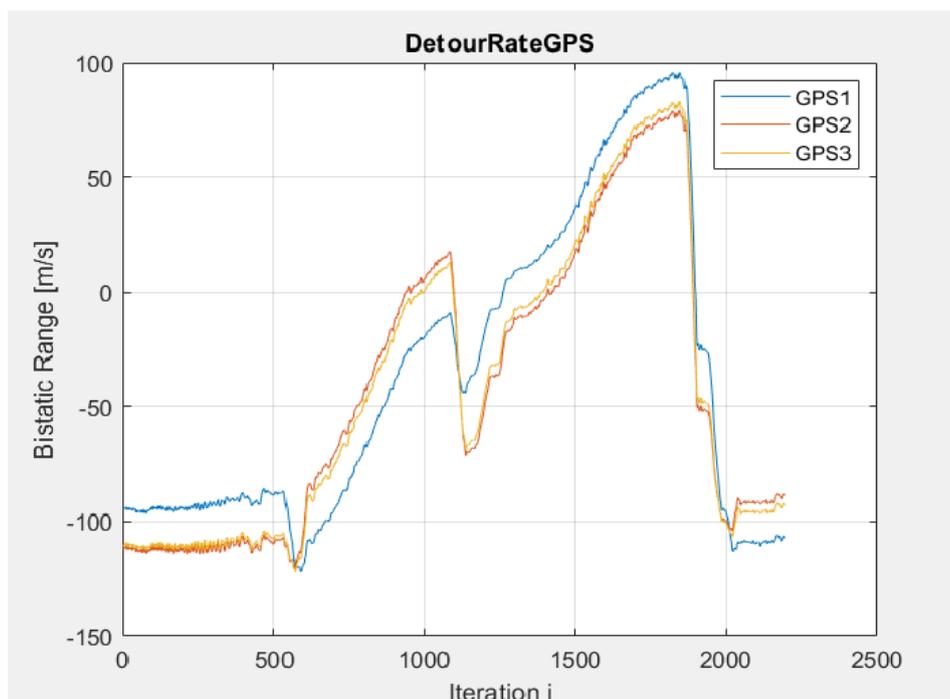


Abb. 7: Darstellung des Verlaufs der Detour-Rate über die Zeit.

Die **Dopplerverschiebung** ist keine unabhängige Zustandsgröße, da sie aus der Detour-Rate abgeleitet wird. Somit unterscheiden sich beide Größen nur durch einen negativen Faktor (rund -2 in diesem Fall). Konkret bedeutet dies, dass keine neuen Informationen gewonnen werden können. Eine Darstellung der Dopplerverschiebung über die Zeit ist in der Abbildung 9 gezeigt.

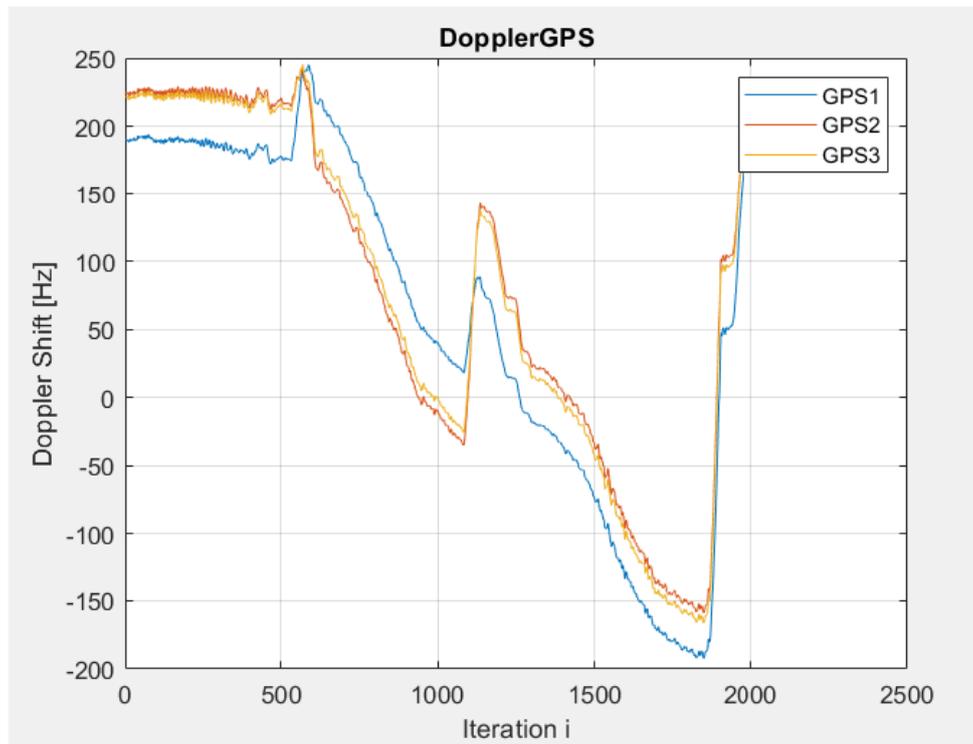


Abb. 9: Dopplerverschiebung aufgetragen über die Zeit.

Die Änderung der Geschwindigkeit (**Detour-Acceleration**) über die Zeit wird mithilfe der Beschleunigung definiert. Sie beschreibt die Dynamik des Flugobjekts, und gibt Auskunft über Kräfte, die am Flugziel wirken. Es ist naheliegend sich die Beschleunigung anzusehen, da diese für alle drei Tracks identisch sein sollte. Es handelt sich im Grunde um das gleiche Flugziel. Es wurde festgestellt, dass diese Überlegung zutrifft, da die Beschleunigungen nahezu einen identen Betrag und eine Phase besitzen. Es ist ratsam die Werte zu normalisieren, da der Betrag der Beschleunigung von der Konstellation RX/TX abhängt. Man stellt fest, dass die jeweiligen drei Beschleunigungen nach der Normalisierung beinahe identisch sind. Jedoch zeigt sich, dass die Beschleunigungen unter gewissen Voraussetzungen voneinander abweichen können. Dies geschieht, falls hohe Beschleunigungen des Flugobjektes erzielt werden, also wenn die Geschwindigkeit schlagartig zunimmt. Im Folgenden ist die Detour-Acceleration als normalisierte Zustandsgröße mit  $N=93$  und nicht normalisiert über alle 2200 Messungen in der Abbildung 10 gezeigt.

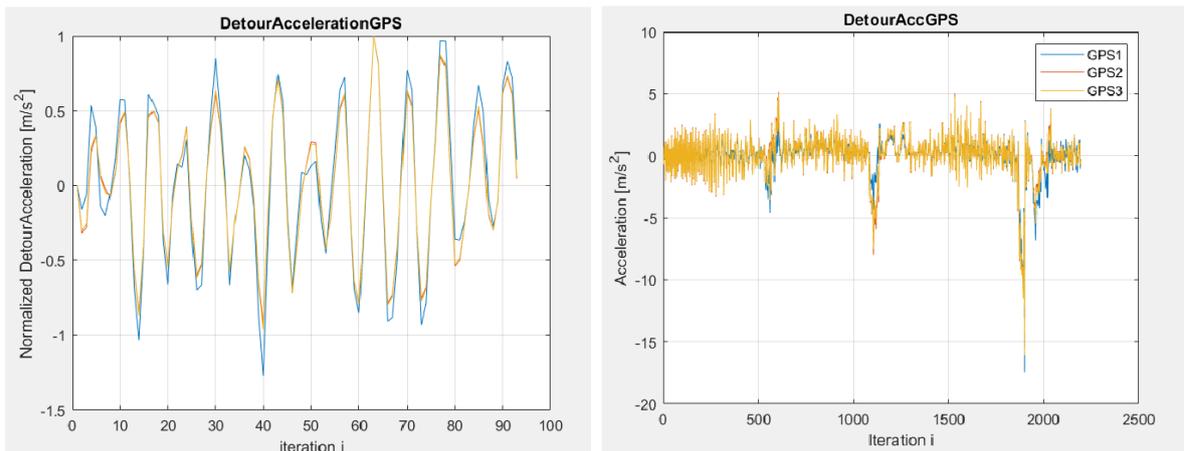


Abb. 10: Detour-Acceleration als normalisierte Zustandsgröße mit  $N=93$  (links) und nicht normalisiert über alle 2200 Messungen (rechts).

Ziel der weiteren Untersuchung war es einen Algorithmus/Lösungsansatz zur Reduzierung von mehrfachen Kombinationen mit gleichem Kombinationsschlüssel der Zustandsgrößen zu entwickeln, die durch verschiedene Beleuchter-Hypothesen entstanden sind, um das Radarbild aufräumen zu können.

Um die Anzahl der potenziellen Tracks mithilfe eines simplen Kriteriums zu filtern, wurde zunächst das Vorzeichen der Zustandsgrößen betrachtet. Dazu analysiert man die Vorzeichen der Referenzdaten, um eine Wahrscheinlichkeit zu bestimmen in wie vielen Fällen eine solche Klassifizierung zutrifft. Hierbei beschreibt  $P(\text{Bedingung})$  die Wahrscheinlichkeit, dass der Fall eintritt. In nahezu allen Fällen wird eine Wahrscheinlichkeit von beinahe oder über 90% erreicht. Das bedeutet, dass in 2200 Fällen 1980 richtig entschieden wurde.

Weiter wurde die Ähnlichkeit der Referenzdaten verglichen. Um zu überprüfen, ob die Beschleunigungen der Referenzdaten zueinander in Abhängigkeit stehen, wurden die Messdaten der Beschleunigung in den Frequenzbereich transformiert. Es war sinnvoll, die Messdaten in verschiedenen Sampleanzahlen zu untersuchen, da es sich um keine periodische Schwingung handeln musste. Es zeigte sich, dass für eine geringe Anzahl an Samples (wie zu erwarten war) sich die Frequenzanteile nicht aussagekräftig bestimmen ließen. Falls jedoch die Anzahl der Samples und somit die Anzahl der

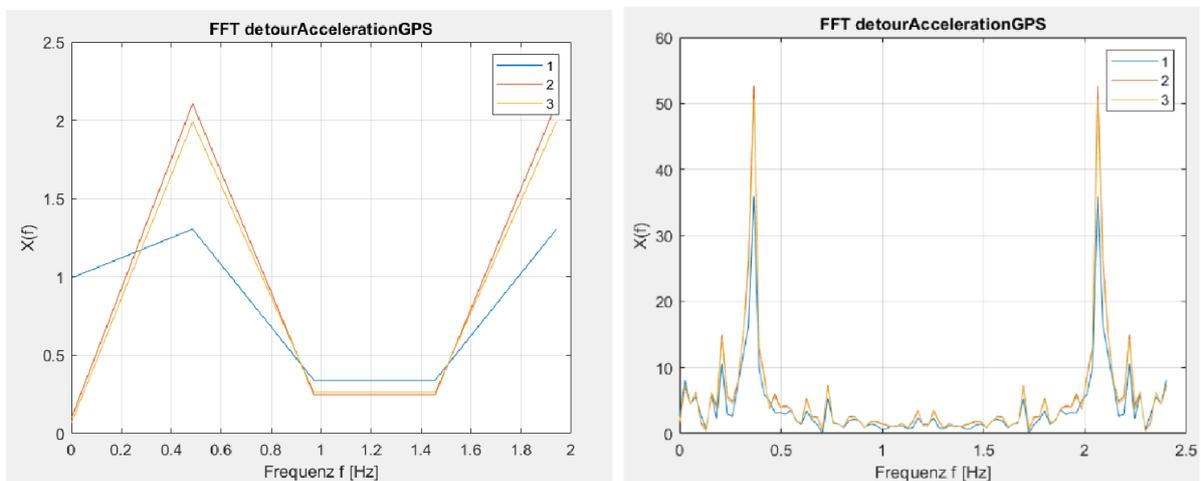


Abb. 11: Darstellung einer Fast-Furier-Transformation der Detour-Acceleration über Samplerate 5 (links) und Samplerate 93 (rechts).

Spektrallinien erhöht wurde, zeigte sich ein genaueres Bild ab. Das ist in der Abbildung 11 zu sehen. Eine dominante Frequenz war eindeutig zu bestimmen, die in diesem Fall für alle drei Tracks zutraf, womit ein weiteres Kriterium gewonnen werden konnte.

Im nächsten Schritt wurde mit Hilfe der Kreuzkorrelation untersucht, inwiefern zwei Zustandsgrößen zueinander verschoben waren. Dazu wurde der Kreuzkorrelationskoeffizient eingeführt, der über die Verschiebung der Samples aufgetragen wird. Falls dieser den höchsten (positiven) Wert im Koordinatenursprung besitzt, dann sind die Zustandsgrößensignale zueinander in Phase. Diese Kreuzkorrelation wurde für die 3 möglichen Kombinationen (1 und 2, 2 und 3, 1 und 3) der PARASOL-Sensoren durchgeführt. Es zeigte sich, dass alle Signale (siehe Abbildung 12, in diesen Fall die Beschleunigung) zueinander in Phase waren. Auch hier wurde zusätzlich über drei Sampleanzahlen ( $N = 5, 93, 2200$ ) der Messdaten untersucht, die alle in gleicher Weise interpretiert werden könnten und keine Anomalien aufwiesen. Damit konnte ein weiteres Kriterium eingeführt werden.

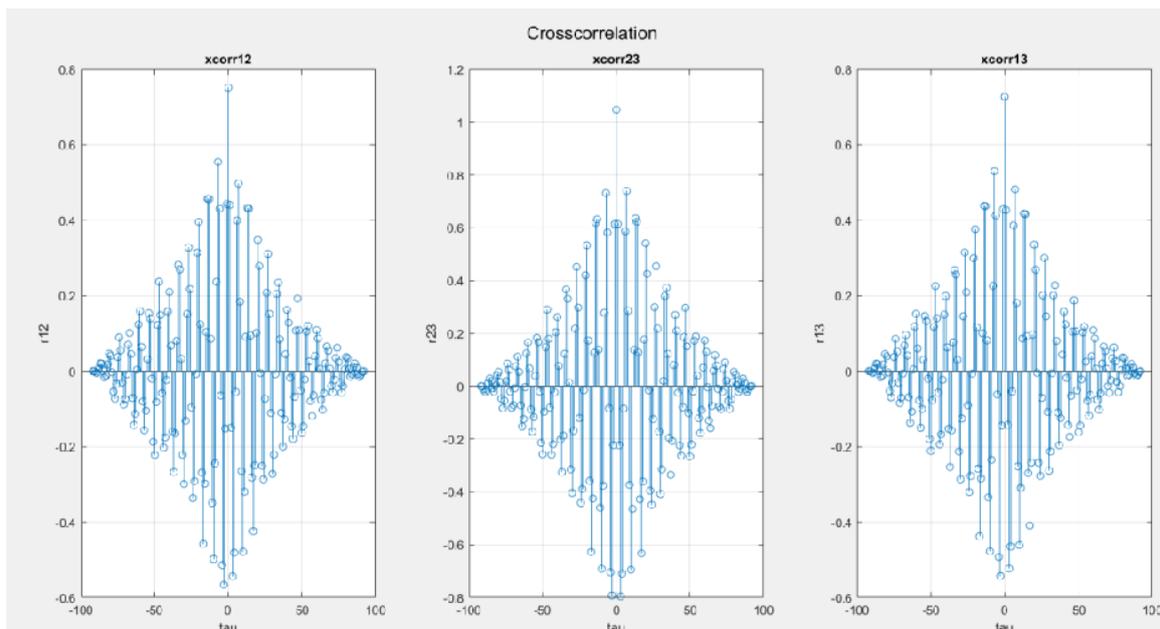


Abb. 12: Darstellung der berechneten Kreuzkorrelation der Detour-Acceleration für eine Samplerate von 93.

Für die Target-Kombinatorik wurde aufbauend auf den oben beschriebenen Ergebnissen eine Implementierung über die folgenden Lösungsmethodik umgesetzt.

1. Berechnung der normierten Änderungsrate der Zustandsgrößen (z.B. der Beschleunigung)
2. Vorzeichenklassifizierung der Zustandsgrößen
3. Transformation der Zustandsgrößen in den Frequenzbereich mittels FFT
4. Kreuzkorrelation im Zeitbereich
5. Kombination der verbleibenden Kombinationen

Das führte zu einer wesentlichen Veränderung der Softwarebestandteile und des Auswertalgorithmus. Dadurch konnte eine Reduktion der Auswertungsleistung und eine

Reduktion der Falschziele im Nahbereich erreicht werden. So konnte der Erfassungsbereich / Detektionsbereich von Flug-Bewegten-Objekten um ca. 40% gesteigert werden. Aus diesem entwickelten Konzept wurden ebenso die Konzepte zur möglichen Vogel-/Drohndetektion abgeleitet. Weiterhin wurde ein Algorithmus zur Bestimmung eines relativen RCS in der PPI-Domäne entwickelt, um potenzielle Ziele nach Ihrer relativen Größe im RCS ausblenden zu können. Grundsätzlich soll das System in die Lage versetzt werden, im Livebetrieb eine Klassifizierung der Objekte vorzunehmen und diese Visuell auf Kartenmaterial wiederzugeben.

Die vorgestellte Lösungsmethodik liefert den Ansatz, eine riesige Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit durch einen Best-Match Ansatz auf die tatsächlich vorhandene Anzahl der Ziele zu reduzieren. Allerdings bringt der Lösungsansatz auch eine technische Herausforderung mit sich. Es ist so, dass erst nach einer gewissen Lernzeit eine sichere Auswahl getroffen werden kann. Das Messsystem muss eine gewisse Anzahl an repräsentativen Datenproben sammeln. Die dafür notwendige Zeitspanne (Latenz) muss für die Anwendung und aktuelle KI-Ansätze tragbar sein und hängt stark von der Rechenintensität des gewählten Ansatzes, der Häufung der Zielobjekte und der Verweildauer der Flugobjekte in der Nähe der WEA. In unserem Anwendungsfall wurden Daten von 5 bis 2200 Stichproben untersucht. Letztlich wird die Detektionsstatistik aus einem praktischen Einsatz über einen längeren Zeitraum zeigen, ob man sich diesen pragmatischen Ansatz leisten kann oder noch weitere qualifizierte Kriterien für die Kombinationen untersucht und beibehalten werden müssen. Ein gemischtes Verfahren, in dem eindeutige Kombinationen direkt weiterverarbeitet werden und vielfältige erst nach einer näheren Untersuchung durch KI-Methoden behalten oder verworfen werden, wäre auch denkbar. Für die Auswahl des richtigen KI-Ansatzes zur Signalverarbeitung ist daher eine Validierung der praktischen Randbedingungen durch längere experimentelle Untersuchung entscheidend.

#### 5.1.4. Untersuchung von begrenzenden Effekten in der Detektionsreichweite des Systems

Größere Erfassungsräume sind von direktem Nutzen für den Einsatz im Bereich der bedarfsgerechten Nachtkennzeichnung. Durch größere Wirkräume lassen sich weitere Windparks gemeinsam mit einem BNK-System regeln. Höhere Detektionsreichweiten führen zur Kostenersparnis im Windpark durch eine geringere Anzahl von notwendigen Detektions-Systemen zur Überwachung eines oder mehrerer Windparks. Durch die geringe Radarrückstrahlfläche von Vögeln ist eine möglichst hohe Detektionsreichweite des Wirkraumes notwendig, um die Flugbewegungen von kleineren Objekten rechtzeitig detektieren zu können und einen kontrollierten Stopp der WEA einzuleiten. Gerade in Bezug auf Vogelbewegungen ist eine frühzeitige Erkennung wichtig, da Windkraftanlagen durchschnittlich mindestens 60 Sekunden für einen kontrollierten Stopp benötigen.

Ziel der Untersuchungen in Arbeitspaket vier war es Möglichkeiten aufzuzeigen, die eine Vergrößerung der Detektionsreichweite der Parasol-Sensoren erlauben würden. Zunächst wurde dazu eine Literaturrecherche zum Stand der Technik durchgeführt. In

der Literatur wurden dazu einige Ansätze zur Erhöhung der Empfangsempfindlichkeit (1), Verbesserung der Antennentechnik (2), Optimierung der Signalverarbeitung (3), (4), (5), (6), (7), (8), (9), (10), (11), (12), (13), (14), Erhöhung der Sendersignalleistung (15), (16), (17), (18) gefunden. Im Folgenden werden einige wichtige Strategien diskutiert.

1. Die Erhöhung der Empfangsempfindlichkeit eines Radarsystems kann über die Verwendung von Empfängern mit geringem Rauschen und hochwertiger Verstärkertechnik erfolgen. Dadurch können schwache Signale bei gleichzeitiger Präsenz starker Signale besser erfasst werden. Hochleistungsverstärker mit geringem Rauschfaktor sind essenziell, um die Empfangsempfindlichkeit zu erhöhen. Durch das verbesserte Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) kann eine bessere Detektion schwacher Signale erfolgen. Rauscharme Verstärker (Low-Noise Amplifiers, LNA) werden oft in den ersten Stufen des Empfängers eingesetzt, um das Signal zu verstärken, bevor es durch weitere Verarbeitungsstufen geht. Besonders bei passivem Radar sieht sich dieser Verstärker neben dem schwachen Ziel Echo mit dem deutlich stärkeren Direktsignal konfrontiert. Daher sind neben dem geringen Rauschen eine große Linearität und Großsignalfestigkeit gefordert.

Durch die Verwendung von hochwertigen Filtern und fortschrittliche Filtertechniken kann das Signal-Rausch-Verhältnis weiter verbessert werden. Bandpassfilter, die nur bestimmte Frequenzbereiche durchlassen, sowie adaptive Filter, die sich dynamisch an die Umgebung anpassen, können die Empfindlichkeit erheblich erhöhen. Adaptive Rauschunterdrückungstechniken passen sich dabei in Echtzeit an die Umgebungsbedingungen an und filtern Rauschkomponenten aus dem empfangenen Signal heraus. Diese Techniken nutzen Algorithmen, die kontinuierlich die Signalcharakteristika analysieren und die Filterparameter entsprechend anpassen.

Fazit zur Empfangsempfindlichkeit:

In Punkt der Empfangsempfindlichkeit wurde festgestellt, dass der Parasol-Sensor bereits weit fortgeschritten ist. Im Bereich der Hardware kamen der Forschungspartner FHR und Fa. PARASOL gemeinsam zu dem Schluss, dass alles technologisch Mögliche und in einem vernünftigen Preis-/Leistungsverhältnis vertretbare bereits in die Hardware integriert ist. Eine leichte Verbesserung wurde durch die ausgewogene Justage der Einstellglieder für die Empfangsempfindlichkeit erreicht. Im Detail waren es das Eingangs- und Ausgangsdämpfungsglied des Empfängers und die Eingangsstufe des AD-Wandlers. Dabei musste berücksichtigt werden, dass das schwache reflektierte Signal des Radar-Echos mit dem Rauschen und dem deutlich stärkeren Direktsignal der Sender konkurrierte.

2. Die Verbesserung der Antennentechnik spielt eine entscheidende Rolle bei der Erweiterung der Detektionsreichweite und der Genauigkeit passiver Radarsysteme. Ein vielversprechender Ansatz ist die Verwendung mehrerer Antennen,

die in einem Antennenarray unter Nutzung von Phased-Array-Technologien zusammengeschaltet sind.

Durch die Nutzung mehrerer Antennen wird der Antennengewinn erhöht, was zu einer besseren Empfangsempfindlichkeit führt. Ein Antennenarray kann auch Strahlformung betrieben werden, um die Empfangsrichtung gezielt zu steuern und unerwünschte Signale zu unterdrücken. Weiter kann durch die Kombination der Signale mehrerer Antennen die Detektionsreichweite erhöht und die Positionsbestimmung präzisiert werden.

Die Zusammenschaltung mehrerer Antennen erfordert allerdings eine präzise Kalibration, um die Phasendifferenzen und Amplitudenunterschiede zwischen den Antennen zu kompensieren. Ohne ordnungsgemäße Kalibration können Probleme auftreten.

Phaseninkonsistenzen durch unterschiedliche Phasenlagen der Signale können zu destruktiver Interferenz führen, was die Gesamtleistung des Systems beeinträchtigt. Algorithmen zur Phasenkorrektur können implementiert werden, die kontinuierlich die empfangenen Signale analysieren und Phasendifferenzen kompensieren. Ein Beispiel ist die Nutzung von Phasenschiebern in den digitalen Signalverarbeitungseinheiten, die dynamisch angepasst werden können, um Phasenkohärenz zu gewährleisten. Andererseits kann die Kombination mehrerer bekannter Phasenreferenzen im Signalpfad verwendet werden, um eine genauere Phasenkalibration zu ermöglichen. Dies kann durch Einbeziehung von Signalen aus unterschiedlichen Richtungen oder durch Nutzung von Signalen bekannter starker Quellen erfolgen.

Amplitudenabweichungen durch unterschiedliche Signalstärken der Antennen können zu Verzerrungen in der Strahlformung und somit zu ungenauen Richtungen führen. Eine Implementierung von adaptiven Verstärkungsalgorithmen, die die Signalstärke jeder Antenne individuell anpassen, kann durchgeführt werden, um eine gleichmäßige Signalverteilung zu gewährleisten. Diese Algorithmen können dann die Verstärkungsfaktoren basierend auf den empfangenen Signalpegeln dynamisch einstellen. Weiterhin kann eine regelmäßige Durchführung von Kalibrationsmessungen (Nutzung bekannter Signale zur Bestimmung und Anpassung der Amplitudeneinstellungen) eingeführt werden. Diese Messungen können automatisiert und in regelmäßigen Intervallen durchgeführt werden, um die Kalibration aufrechtzuerhalten und den Aufwand zu minimieren.

Ungenauigkeiten in der zeitlichen Abstimmung der Empfangssignale (Synchronisation) können die Fähigkeit des Systems beeinträchtigen, genaue Positions- und Geschwindigkeitsinformationen der Ziele zu liefern. Die Verwendung hochpräziser Zeitstempelungstechniken, um die zeitliche Abstimmung der empfangenen Signale sicherzustellen, kann Abhilfe schaffen. Dies kann durch Einsatz von GPS-Synchronisation oder anderen hochgenauen Zeitsynchronisationssystemen erreicht werden. Auch die Anwendung von Korrelationstechniken, um die Synchronisation der Signale aus verschiedenen Antennen zu überprüfen und anzupassen, kann helfen, zeitliche Diskrepanzen zu erkennen und zu korrigieren.

Wenn wie im betrachteten PARASOL-System keine spezialisierte Hardware für die Kalibration vorhanden ist, können die Herausforderungen bei der Kalibration durch den Einsatz fortschrittlicher digitaler Signalverarbeitungstechniken, Methoden zur Selbstkalibration, kohärenter Integration und der Nutzung von Umgebungsreflexionen bewältigt werden. Im Folgenden werden Lösungsansätze zur Kalibration ohne spezialisierte Hardware erörtert:

- a) Fortschrittliche Algorithmen zur digitalen Signalverarbeitung können verwendet werden, um Kalibrationsfehler softwareseitig zu kompensieren. Techniken wie die Verwendung von Kalibrationssignalen, die regelmäßig ausgesendet und empfangen werden, können helfen, Phasen- und Amplitudenabweichungen zu erkennen und zu korrigieren. Diese Methode erfordert keine zusätzlichen Hardwarekomponenten und kann die Kalibration durch kontinuierliche Anpassung der Algorithmen während des Betriebs verbessern. Allerdings bedarf es mindestens einer Sendeanlage für die Kalibrationssignale mit entsprechender Sendegenehmigung.
- b) Methoden der Selbstkalibration nutzen die von den Antennen empfangenen Signale, um relative Unterschiede zu messen und anzupassen. Dies kann durch Analyse der empfangenen Signale von bekannten Quellen oder durch Nutzung von Methoden der adaptiven Signalverarbeitung erreicht werden. Die Selbstkalibration basiert auf der Annahme, dass sich die Eigenschaften der Umgebung nicht abrupt ändern und dass die empfangenen Signale stabile Referenzpunkte bieten.
- c) Durch die kohärente Integration von Signalen über längere Zeiträume können Phasenabweichungen gemittelt und deren Auswirkungen reduziert werden (Radmard et al., 2009). Dies ermöglicht eine Verbesserung der Signalqualität und der Detektionsleistung, da die Integration über die Zeit dazu beiträgt, zufällige Störungen zu minimieren und die Signalstärke zu erhöhen.
- d) Durch Analyse der Reflexionen von Umgebungsobjekten kann eine relative Kalibration durchgeführt werden. Dies setzt voraus, dass die Reflexionseigenschaften der Umgebung gut bekannt sind oder durch Messungen ermittelt werden können. Diese Methode kann besonders nützlich sein in Szenarien, in denen die direkte Kalibration durch kooperative Signale schwierig ist. Die Reflexionen bieten natürliche Referenzpunkte, die zur Anpassung der Phasen- und Amplitudenabweichungen genutzt werden können.

Fazit zur Verbesserung der Antennentechnik:

Die Verbesserung der Antennentechnik durch die Verwendung von Antennenarrays bietet bedeutende Vorteile für passive Radarsysteme, insbesondere hinsichtlich der Detektionsreichweite und der Positionsgenauigkeit. Die Herausforderungen bei der Kalibration, insbesondere in Abwesenheit spezialisierter Hardware, können durch den Einsatz fortschrittlicher digitaler Signalverarbeitungstechniken, Selbstkalibrationsmethoden, kohärenter Integration und der Nutzung

von Umgebungsreflexionen erfolgreich bewältigt werden. Diese Lösungsansätze ermöglichen es, die Vorteile von Antennenarrays zu maximieren und gleichzeitig die Kalibrationsprobleme zu minimieren, was letztlich zu einer verbesserten Systemleistung führt. Speziell bei Parasol-Sensoren werden bereits mehrere Antennen benutzt, um eine Diversität in den Empfangssignalen zu erreichen. Diese Diversitäten werden bei den Referenzantennen genutzt, um ein möglichst ideales Referenzsignal zu bilden. Bei den Überwachungsantennen werden die Diversitäten genutzt, um Unterschiede zu schaffen zwischen stationären Doppler behafteten Echos von Windenergieanlagen und denen von bewegten Zielen. Ein Algorithmus im Bereich der Zusammenführung der Signale der verschiedenen Antennen ist dann in der Lage diese Unterschiede zu erkennen und Windenergieanlagen von Flugzielen zu unterscheiden. Mit einer präzisen Kalibration wäre an dieser Stelle auch eine Unterstützung der Höhenschätzung möglich, da die Antennen übereinander angeordnet sind.

3. Eine Optimierung der Signalverarbeitung für passive Radarsysteme umfasst zahlreiche Aspekte mit dem Ziel sehr schwache Signale, die von starkem Rauschen überlagert sind, herauszufiltern. Die kohärente Integration ist eine zentrale Technik zur Erhöhung der Detektionsreichweite in passiven Radarsystemen. Sie ermöglicht es, Signale über längere Zeiträume zu summieren, wodurch das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) verbessert wird. Durch diese Summierung werden die gewünschten Signale verstärkt, während das Rauschen, das als zufällige Komponente betrachtet wird, reduziert wird. Diese Methode kann jedoch bei der Detektion beweglicher Ziele zu spezifischen Herausforderungen führen. Während der Integration über längere Zeiträume können sich die Positionen der Ziele aufgrund ihrer Bewegungen ändern. Dies führt zu mehreren Effekten:
  - a) Range Migration (Reichweitenmigration): Wenn sich das Ziel während der Integrationszeit bewegt, kann es seine Position in den Reichweiten-gitterzellen ändern. Dies bedeutet, dass das Signal des Ziels nicht in einer festen Reichweitzelle bleibt, sondern von einer Zelle zur nächsten wandert. Die Folge ist eine Verminderung des Integrationsgewinns, da das Zielsignal nicht kohärent addiert wird.
  - b) Doppler-Verschiebung: Die Bewegung des Ziels führt zu einer Doppler-Verschiebung des Empfangssignals, was bedeutet, dass die Frequenz des Signals sich im Laufe der Zeit verändert. Bei der kohärenten Integration kann diese Frequenzänderung dazu führen, dass sich das Signal und Rauschen teilweise gegenseitig aufheben, was ebenfalls zu einem Verlust des Integrationsgewinns führt. Selbst bei einem geradlinigen Flug beschreibt der Dopplerverlauf bei der bistatischen Anordnung eines passiven Radars einen parabelförmigen Verlauf.
  - c) Phasendrift: Aufgrund der Bewegung des Ziels kann es zu einer Phasendrift kommen, d.h. die Phase des empfangenen Signals ändert sich kontinuierlich. Wenn die Phasendrift nicht kompensiert wird, führt dies zu

einer Verringerung der kohärenten Summierung und somit zu einer Reduktion des SNR.

Mögliche Lösungsansätze zur Kompensation der Bewegungen lassen sich folgendermaßen behandeln:

- a) Range Migration Compensation (RMC): Eine Methode zur Kompensation der Reichweitenmigration besteht darin, adaptive Algorithmen zu verwenden, die die Bewegung des Ziels während der Integrationszeit verfolgen und die Signale entsprechend umordnen. Dies ermöglicht eine korrekte Kohärenz der Integration, indem die Zielbewegung berücksichtigt wird. Zum Beispiel wird die keystone-Transformation häufig eingesetzt, um die Auswirkungen der Reichweitenmigration zu kompensieren.
- b) Doppler-Korrektur: Um die Auswirkungen der Doppler-Verschiebung zu minimieren, können spezielle Filtertechniken oder Doppler-Kompensationsalgorithmen eingesetzt werden. Diese Algorithmen passen die Integrationsstrategie dynamisch an die geschätzte Doppler-Verschiebung des Ziels an und stellen sicher, dass die Integration auf der korrekten Frequenz erfolgt.
- c) Adaptive Signalverarbeitung: Die Anwendung adaptiver Signalverarbeitungsmethoden ermöglicht es, die Phasenabweichungen aufgrund von Bewegungen zu korrigieren. Techniken wie die Least-Squares-Anpassung und die Phasenkorrektur können verwendet werden, um die Phasendrift auszugleichen und eine effektive kohärente Integration zu gewährleisten.
- d) Track-Before-Detect (TBD) Methoden: Track-Before-Detect-Ansätze integrieren die Signalinformation, während sie gleichzeitig versuchen, die Bewegung des Ziels über mehrere Zeiträume hinweg zu verfolgen. Diese Methode ist besonders nützlich bei der Detektion von Zielen mit geringer SNR, da sie die Trajektorie des Ziels vor der eigentlichen Detektion schätzen und verfolgen kann.
- e) Kohärente und nicht-kohärente Integration: Eine Kombination aus kohärenter und nicht-kohärenter Integration kann verwendet werden, um die Vorteile beider Methoden zu nutzen. Während die kohärente Integration für kurze Zeiträume verwendet wird, um die Phaseninformationen zu bewahren, wird die nicht-kohärente Integration für längere Zeiträume eingesetzt, um die Gesamtenergie des Signals zu maximieren, ohne dass Phaseninkonsistenzen eine Rolle spielen. Diese Methode ist besonders dann zu empfehlen, wenn die Rechenleistung des Radarsystems nicht ausreicht, um die Algorithmen zur Kompensation der Zielbewegung in Echtzeit durchzuführen, die für den Erhalt der Kohärenz erforderlich sind.

Fazit zur Optimierung der Signalverarbeitung:

Neben integrierten Lösungsansätzen der kohärenten Integration der Empfangssignale kann eine Datenfusion auch zu einer verbesserten Detektionsreichweite und -genauigkeit führen. Durch eine Zusammenführung mehrerer

Sensorsysteme (z.B. ADS-B, optische Sensoren) oder eine Verknüpfung von mehreren passiven Radarsensoren zu einem Netzwerk kann eine erhöhte Systemintegration erreicht werden. Diese sind allerdings als rechenintensiv zu betrachten.

Auf der anderen Seite ist die Integration über längere Zeiträume eine leistungsstarke Methode, um die Detektionsreichweite passiver Radarsysteme zu erhöhen. Allerdings stellt die Bewegung des Ziels eine Herausforderung dar, die durch Range Cell Migration, Doppler-Verschiebung und Phaseninkonsistenzen verursacht wird. Durch den Einsatz fortschrittlicher Signalverarbeitungsalgorithmen, wie Range-Doppler-Integration, Migrationskompensation und adaptive Filterung, können diese Herausforderungen erfolgreich bewältigt werden. Diese Techniken ermöglichen es, die Vorteile längerer Integrationszeiten zu nutzen und gleichzeitig die Auswirkungen von Zielbewegungen zu minimieren. Gerade für die Parasol-Sensoren ist die Kombination aus kurzzeitig kohärenter und Langzeit inkohärenter Integration zu empfehlen, da es vermieden wird rechenintensive Algorithmen zu verwenden. Um die Annahmen für diese integrierten Ansätze zu validieren, wurden seit Juli 2023 kontinuierlich Messungen durchgeführt. Die Implementation dieses Verfahrens auf einem Parasol-Sensor wurde im folgenden Arbeitspaket angestoßen.

#### 5.1.5. Entwicklung und Untersuchung von Algorithmen zur Erhöhung der Detektionsreichweite)

Ziel dieses Arbeitspaketes war es aufbauend auf den Ergebnissen des AP4 eine realzeitliche Implementation eines Algorithmus zur Erhöhung der Detektionsreichweite speziell in den Sensoren der Parasol-Systeme zu erreichen. Viele der oben in AP 4 vorgestellten Algorithmen benötigen einen enormen Bedarf an Rechenleistung. Diese ist bei der verwendeten Hardware der Parasol-Sensoren nicht gegeben. Die Wahl fiel daher auf die Kombination der bereits vorhandenen kohärenten Integration und einer nicht-kohärenten Integration mit integrierter Bewegungskompensation. Dadurch wurden die Stärken beider Verfahren effizient genutzt und die Erkennungsleistung der Radarsysteme optimiert.

Kohärente Integration wird eingesetzt, um die Phaseninformationen eines Signals über einen kurzen Zeitraum zu erhalten. In diesem Prozess werden die Echosignale in einer Weise summiert, dass sowohl die Amplitude als auch die Phase der Wellenform berücksichtigt werden. Dies ermöglicht eine präzise Erfassung von Zielen, deren Bewegungen gering oder vorhersehbar sind, da die Phase des Signals über die Zeit stabil bleibt. Der Vorteil liegt in der Möglichkeit, das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) signifikant zu verbessern, was eine hohe Auflösung und Genauigkeit bei der Zielerkennung ermöglicht.

Nicht-kohärente Integration hingegen summiert nur die Energie des Signals (d.h. die Amplituden), nachdem die Phaseninformation ignoriert oder eliminiert wurde. Dieses Verfahren ist besonders nützlich, wenn das Ziel über längere Zeiträume hinweg

verfolgt werden soll oder wenn Phaseninkonsistenzen auftreten, z.B. bei stark manövrierenden Zielen oder in Szenarien mit vielen Interferenzen. Nicht-kohärente Integration wird oft verwendet, wenn die Zielbewegung während der Beobachtungszeit zu groß ist, um die Kohärenz über lange Intervalle zu bewahren, oder wenn das Radarsystem nicht in der Lage ist, Phasenkorrekturen in Echtzeit durchzuführen.

Diese Kombination bietet Vorteile, insbesondere wenn die Rechenleistung des Radarsystems nicht ausreicht, um komplexe Algorithmen zur Bewegungskompensation in Echtzeit durchzuführen. Bei kohärenter Integration können Phasenfehler durch unkompenzierte Zielbewegungen dazu führen, dass das Zielsignal über die Zeit hinweg an Kohärenz verliert, was die Erkennungsfähigkeit beeinträchtigt. Nicht-kohärente Integration bietet hier eine Lösung, indem sie über längere Zeiträume die Gesamtsignalenergie aufrechterhält, auch wenn das Signal nicht kohärent bleibt. Diese Technik ist daher ideal für Szenarien, in denen sich Ziele schnell bewegen oder das Radarsystem aufgrund von begrenzten Ressourcen nicht in der Lage ist, Bewegungs- oder Dopplerkompensationen durchzuführen.

Insgesamt ermöglicht diese hybride Methode eine effiziente Nutzung der vorhandenen Rechenressourcen, indem sie die Vorzüge kohärenter Genauigkeit mit den robusten Eigenschaften nicht-kohärenter Integration kombiniert.

Der implementierte Algorithmus zur nicht-kohärenten Integration umfasste zwei Prozessierungsstufen und einen Speicherbereich in dem eine Historie von kohärent integrierten Range-Doppler-Maps vorgehalten wird. Dabei war die Integrationszeit so gewählt, dass selbst das schnellste zu betrachtende Ziel weniger als eine Range-Zelle zurücklegt und die Geschwindigkeit in Relation zum Radargerät (d.h. die Änderung der Umweglaufzeit des Beleuchtersignals vom Sender über das Ziel zum Sensor) direkt proportional zur Dopplerfrequenzverschiebung. Daher konnte jeder Dopplerspalte in der Range-Doppler-Map eine zeitlich zu erwartende Verschiebung (Range-Walk-Compensation) für die Langzeit-Nicht-Kohärente Integration zugeordnet werden. In der ersten Prozessierungsstufe wurden die Dopplerspalten entsprechend der erwarteten Range-Verschiebung in der Historie verschoben. Dazu wurde folgender Zusammenhang genutzt:

$$s_n(i_{Doppler}, t) = X_{kohärent}\left(i_{Doppler} \cdot \frac{\Delta_{rate} \cdot \Delta_{update}}{\Delta_{range} \cdot B_{Doppler}}, t\right)$$

$X_{kohärent}$  : Ergebnis der kohärenten Kurzzeitintegration (1)  
 $i_{Doppler}$  : i-te Dopplerspalte  $[-I/2, I/2[$  (2)  
 $I$  : Anzahl der Dopplerspalten (3)  
 $\Delta_{rate}$  :  $[m/s]$  Geschwindigkeitsauflösung  $\Delta_{rate} = \Delta_{Doppler} \frac{c}{r_f}$  (4)  
 $\Delta_{Doppler}$  :  $[Hz]$  Dopplerauflösung (Kehrwert der Integrationszeit) (5)  
 $c$  :  $[m/s]$  Lichtgeschwindigkeit (6)  
 $r_f$  :  $[Hz]$  Sendefrequenz des Beleuchters (7)  
 $\Delta_{update}$  : Anzahl der Entfernungsprofile bis zum nächsten Update der Range-Doppler-Map (8)  
 $\Delta_{range}$  :  $[m]$  Entfernungsauflösung (9)  
 $B_{Doppler}$  :  $[Hz]$  Dopplerbandbreite  $B_{Doppler} = \Delta_{Doppler} \cdot I$  (10)

Abb. 13: Zusammenhang zur Berechnung der Range-Walk-Compensation der kohärenten Kurzzeitintegration.

Ein typisches sich daraus ergebendes Verschiebemuster ist im folgenden Bild zu erkennen.

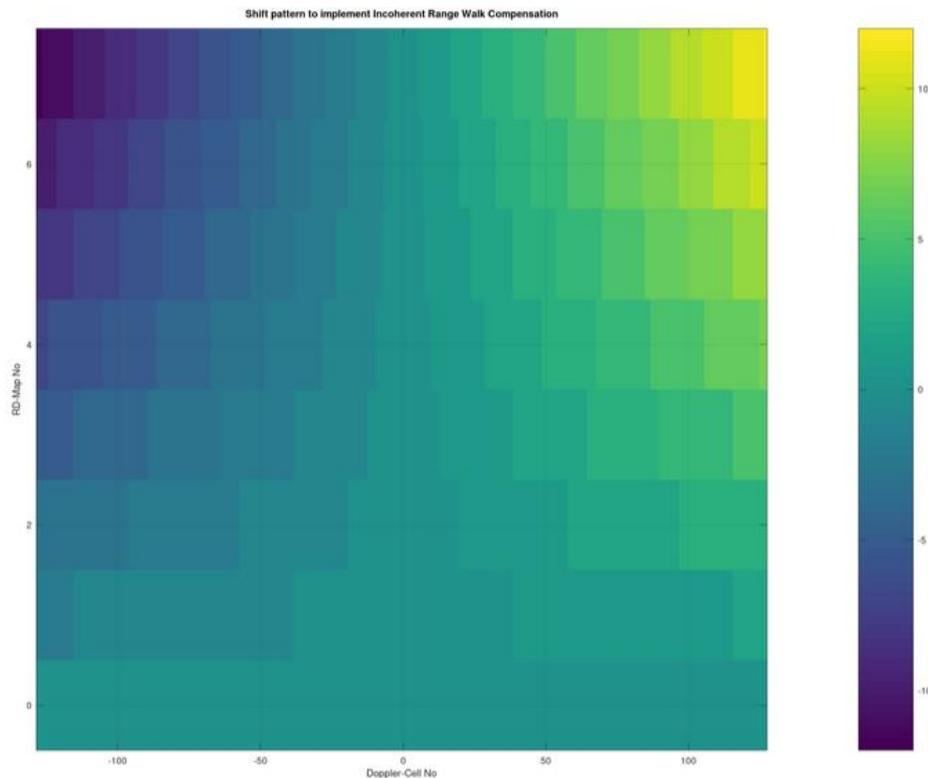


Abb. 14: Typisches Verschiebemuster für die Range-Walk-Compensation.

In der zweiten Prozessierungsstufe werden die verschobenen Range-Doppler-Maps aus der Historie Zelle für Zelle aufsummiert. Dies lässt sich mathematisch in folgender Formel darstellen:

$$P_{\text{nicht-kohärent}} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N |s_n(t)|^2$$

$P_{\text{nicht-kohärent}}$  : Gesamtsignalenergie, die nach der nicht-kohärenten Integration resultiert (11)  
 $s_n(t)$  : n-tes empfangenes Signal zum Zeitpunkt t (12)  
 $|s_n(t)|^2$  : Quadrat der Amplitude des Signals, d.h. die Signalenergie ohne Berücksichtigung der Phase (13)  
 $N$  : Anzahl der integrierten Signale (14)

Abb. 15: Formel zur Berechnung der Gesamtsignalenergie für die nicht-kohärente Integration.

Dieser neue Algorithmus wurde an die Prozessierungskette zur Bildung der Clutter-Map, Reduzierung des Clutters und Bildung der CFAR-Map (Constant False Alarm Rate) angehängt. Somit kommt die Langzeitintegration in den vollen Genuss der bereits erfolgreich angewandten Reduzierung der Störungen durch die Reflektionen an den Flügelblättern der Windenergieanlagen. Durch die Nicht-Kohärente Integration und die damit verbundene Quadrierung ändert sich die Statistik des Rauschens. Daher ist im Weiteren eine Analyse des Rauschens anhand von Messdaten zur richtigen Einstellung der Detektionsschwelle erforderlich.

Die Implementierung wurde an Daten aus einem Messflug vom September 2023 aus dem Bereich des Windparks Blye getestet. Dieser Windpark Blye wurde herangezogen, um die Software-Erweiterungen in unterschiedlichen Umfeldern und Umgebungsbedingungen zu erproben. Die Implementierung zeigt dabei sehr eindrucksvoll ihre Wirkung. Aus den Track-Bruchstücken (orange) im ersten der beiden folgenden Bilder kann eine nahezu geschlossene Spur im zweiten Bild auch außerhalb des Wirkraumes vernommen werden. Die Ausreißer in der orangefarbenen Spur im zweiten Bild kommen durch Zuordnungsmehrdeutigkeiten im verwendeten Single-Frequency-Netzwerk zustande. Sie sind für die hier gewonnenen Erkenntnisse nicht ausschlaggebend.

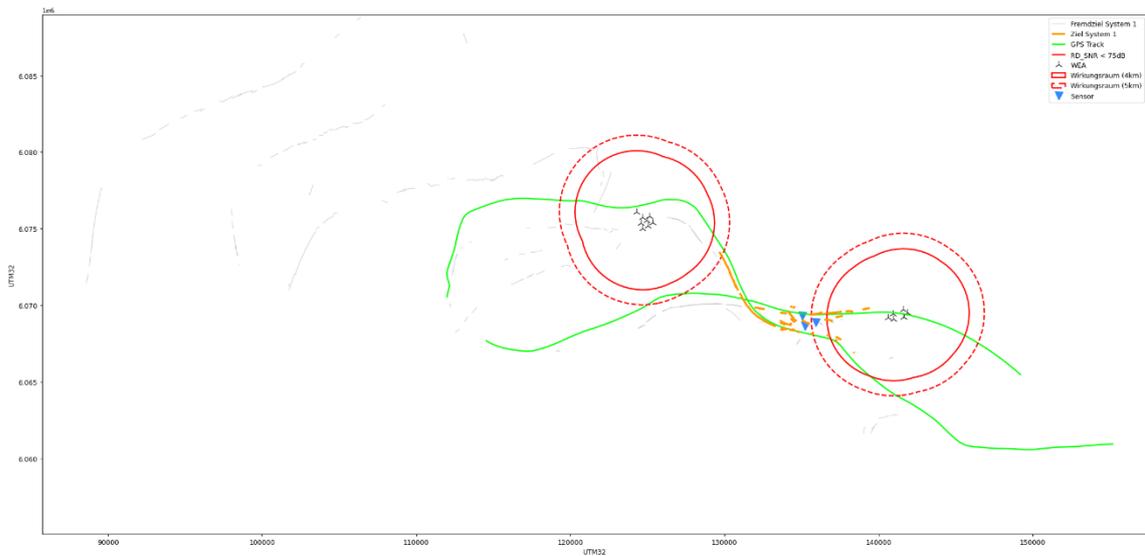


Abb. 16: Darstellung einer Testmessung ohne Langzeitintegration mit klar erkennbaren Track-Bruchstücken (orange).

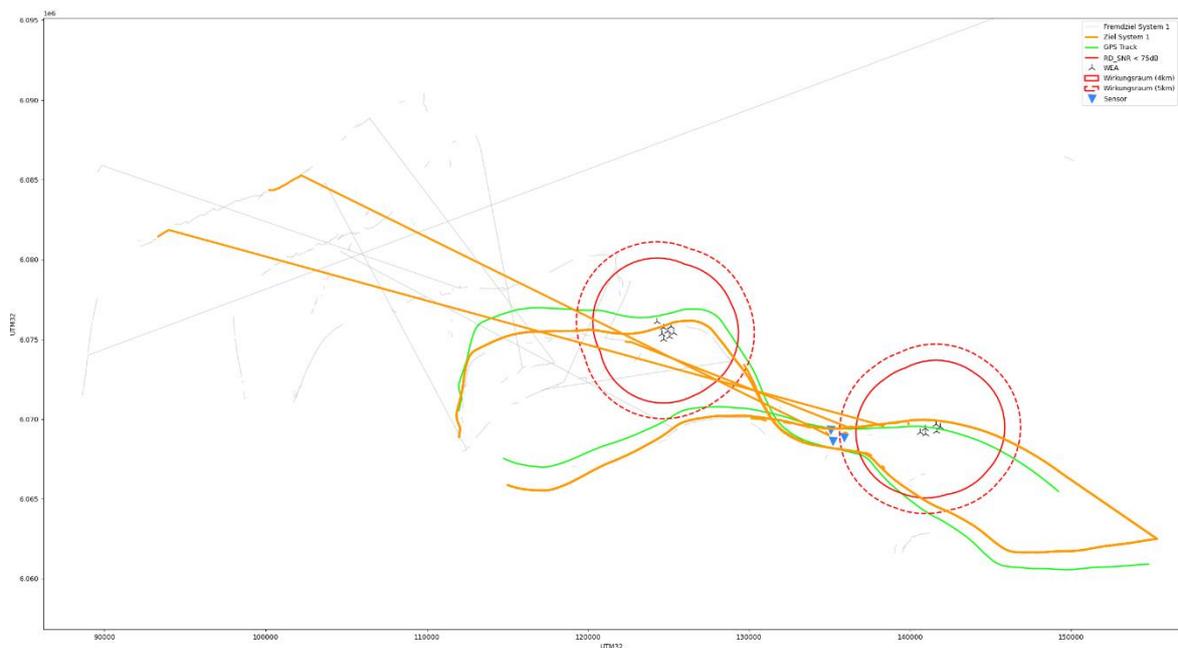


Abb. 17: Darstellung einer Testmessung mit Range-Walk kompensierter Implementierung der nicht-kohärenten Langzeitintegration zur Erhöhung der Detektionsreichweite mit nahezu geschlossener Tracking-Spur (orange).

Aus den aufgezeichneten Daten des Messfluges ließ sich die Statistik des Rauschens analysieren. Bisher wurde standardmäßig die kurzzeitige Integration einer CFAR-Prozessierung unterzogen und aus den Ergebnissen die Detektionsschwelle bestimmt. Das Ergebnis entsprach, wie zu erwarten wäre, einer Chi-Quadrat-Verteilung. Diese Verteilung läuft nach links hin in den Bereich der Detektionsschwelle einigermaßen flach aus, was zu Unsicherheiten und somit Falsch-Positiv-Alarmen im Nah- und teilweise Fernbereich führt. Erfreulicherweise wies die Statistik des Rauschens nach der Range-Walk-Kompensation und der anschließenden Nicht-kohärenten Integration eine nahezu Gauß-förmige Hüllkurve auf. Diese erlaubte die Detektionsschwelle niedriger zu wählen und gleichzeitig weniger Falsch-Positiv-Alarme zu erhalten. Ein repräsentatives Ergebnis ist in der Abb. 18 dargestellt.

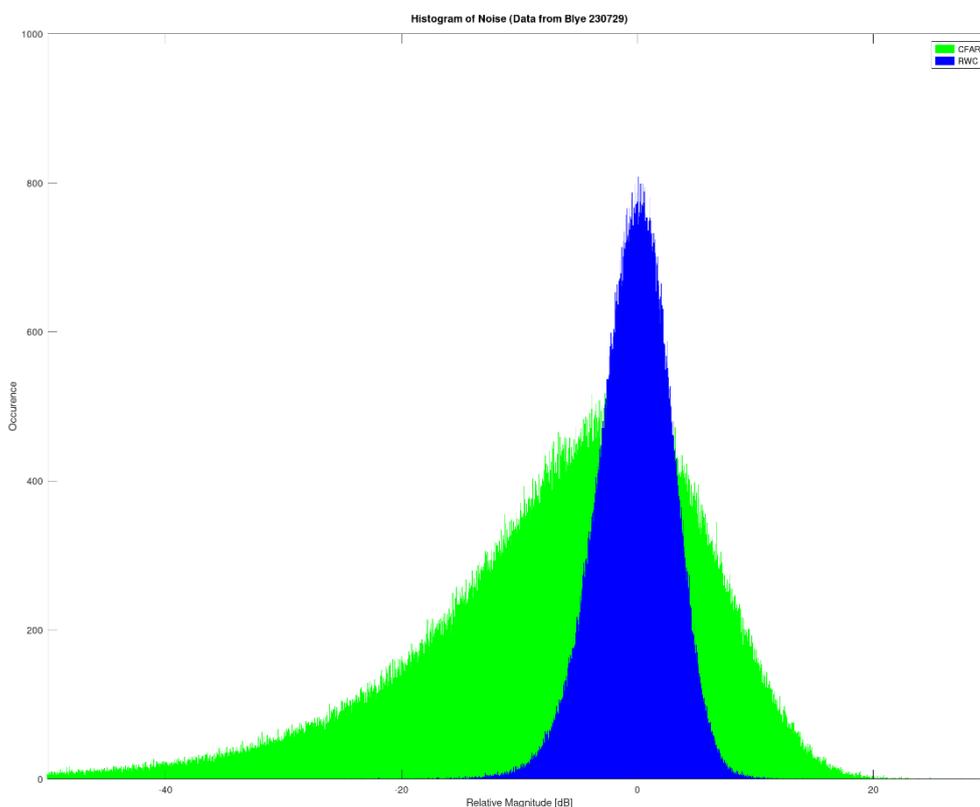


Abb. 18: Histogramm des Rauschens mit (blau) und ohne (grün) RWC mit Nicht-kohärenter Integration.

#### 5.1.6. Vorabanalyse von Konzepten zur optimierten Betriebsregulierung von Windparks

Im letzten Arbeitspaket Nummer sechs werden begleitend zum Projektfortschritt Vorabanalysen von Konzepten zur optimierten Betriebsregulierung durch die Fa. Parasol untersucht. Das beinhaltet insbesondere Betrachtungen, wie die erzielten Ergebnisse und unter welchen Rahmenbedingungen in einer nachgelagerten Phase zwei zu diesem Vorhaben genutzt werden können, um einen optimalen Praxistest zu ermöglichen. Hierzu wurde zum einen die Möglichkeit zur Ertüchtigung von WEA-Bestandsanlagen der Hersteller Enercon, General Electric, Nordex, Senvion, Siemens-Gamesa, Vensys und Vestas mit den entwickelten prototypischen Lösungen aus dem Vorhaben

„PARAPOFA“ untersucht. Bedingt durch den laufenden Wandel im technischen Bereich der WEA konnten allerdings nicht alle technischen Variationen betrachtet werden.

Tabelle 2: Übersicht Maßnahmen zur Ertüchtigung von WEA mit einem System von PARASOL.

Hersteller	Beschreibung
Enercon	<p>Um Enercon Flugbefeuerungen ins Parasol Netzwerk einbinden zu können ist es notwendig, dass Enercon eine zentrale Schnittstelle und das Infrarotfeuer bereitstellt. Derzeit bietet Enercon dieses für WEAs ab Steuerungstyp CS82A an. Die parkinterne Kommunikation für das BNK-System läuft über das Scada-Netzwerk. Die verbauten Komponenten (ab der Steuerung CS82A) für die Tages- und Nachkennzeichnung sind laut Enercon für die BNK-Systeme tauglich. Hier sind nur Anpassungen in den jeweiligen Anlagensteuerungen erforderlich. Die Schnittstelle ist lt. Enercon für Parasol freigegeben. An der zentralen WEA wird dann unser Parasol-Connector installiert, der das Parasol-Signal in das notwendige Signal der WEA umwandelt.</p>
General Electric, Nordex, Senvion, Siemens Gamesa, Vensys	<p>Bei Anlagen von General Electric, Nordex, Senvion, Siemens Gamesa, Vensys bestehen 2 Möglichkeiten.</p> <p>Variante 1: Sollte bereits eine Flugbefeuerung „W,rot“ oder „W,rot ES“ verbaut sein, ist eine Umrüstung der Flugbefeuerung grundsätzlich möglich. Zusätzlich wird ein Parasol-Connector benötigt. Es muss vorab geklärt werden, ob es eine freie Netzwerkverbindung vom Turmfuß ins Maschinenhaus gibt oder ob General Electric freie Leitungen in der Turmverkabelung zur Verfügung stellen kann. Über diese Leitung wird die Flugbefeuerung mit dem Parasol-Netzwerk verbunden. In den meisten Fällen sind ausreichend Leitungen vorhanden, sodass eine Reserveleitung durch den Turm in die Gondel mitgenutzt werden kann. In Einzelfällen kann es günstiger sein, direkt über den WEA-Hersteller eine Sammelschnittstelle zu beauftragen. Für die Erstellung des Angebotes ist in der Regel die Seriennummer der WEA ausreichend.</p> <p>Variante 2: Sollte die Flugbefeuerung keine „W,rot“ oder „W,rot ES“ Kennzeichnung besitzen, ist ein Tausch der Flugbefeuerung notwendig. Aufgrund der zu erwartenden Anfragen hat Firma Parasol bereits mit allen gängigen Flugbefeuerungsherstellern Kontakt aufgebaut und ist in der Lage Umrüstungsempfehlungen zu geben. Auf dieser Grundlage ist eine kosteneffiziente Umsetzung gewährleistet. Der Komplettausch der Flugbefeuerung bietet zeitgleich auch einige Vorteile wie eine zentrale Schnittstelle für das BNK. Somit wird pro Windpark nur ein Parasol Connector benötigt und auch die Verlegung des Kabels durch den Turm entfällt.</p>
Vestas	<p>Bei den Anlagen von Vestas bestehen 2 Varianten.</p> <p>Variante 1: Sollte bereits eine Flugbefeuerung „W,Rot“ oder „W Rot,ES“ verbaut sein, ist eine Ertüchtigung grundsätzlich möglich. Regulär verbaut Vestas Orga-Flugbefeuerungssysteme. Sollte eine ORGA Flugbefeuerung CIP300 oder CIP400 an der WEA verbaut sein, ist ein Software-Update der Flugbefeuerung direkt durch ORGA möglich. Es muss grundsätzlich auch ein</p>

	<p>Parasol-Connector im Maschinenhaus verbaut werden. Zusätzlich muss eine Netzwerkverbindung vom Turmfuß ins Maschinenhaus hergestellt werden. Über diese Leitung wird die Flugbefehrerung mit dem Parasol-Netzwerk verbunden. Sollte eine Leitung fehlen, kann diese kostengünstig durch Parasol eigene Fremdfirmen nachgerüstet werden.</p> <p>Variante 2: Sollte die Flugbefehrerung keine „W,Rot“ oder „W Rot,ES“ Kennzeichnung besitzen, ist ein Tausch der Flugbefehrerung notwendig. Aufgrund der zu erwartenden Anfragen hat Firma Parasol bereits mit allen gängigen Flugbefehrerungsherstellern Kontakt aufgebaut und ist in der Lage Umrüstungsempfehlungen zu geben. Auf dieser Grundlage ist eine kosteneffiziente Umsetzung gewährleistet. Der Kompletttausch der Flugbefehrerung bietet zeitgleich auch einige Vorteile, wie eine zentrale Schnittstelle für das BNK. Somit wird pro Windpark nur ein Parasol Connector benötigt und auch die Verlegung des Kabels durch den Turm entfällt.</p>
--	---

Fazit: Nach derzeitigem Sachstand steht einer Übertragbarkeit der Ergebnisse in Windparks mit WEA der oben aufgeführten Anlagenherstellern nichts im Wege. Die technische Ertüchtigung und Schnittstellenintegration erscheint machbar und ein Praxistest zur Erhöhung der Robustheit des Systems möglich. Bei den entsprechenden Anlagenherstellern konnten zudem Ansprechpartner für etwaige Unterstützung identifiziert werden.

Ferner wurde zu den bereits weiter oben geschilderten Untersuchungen die Detektion von Vögeln in Koblenz am südlichen Ufer des Moselstausees durchgeführt.

Grundlegende Überlegungen für Messungen zeigten, dass bei den derzeit existierenden Passiv-Radar-Algorithmen die Detektion von kleinen Objekten wie Vögeln erst durch Integration zur Erhöhung des Signal- zu Rauschverhältnisses erfolgen kann. Um eine ausreichend lange (~ 1 Sekunde) Erfassungszeit zu erreichen, war es erforderlich, dass der zu detektierende Vogel einen möglichst geradlinigen Flug durchführt. Daher wurden kleinere agile Vögel für den Anfang aussortiert. Die Konzentration auf große Zugvögel wurde für sinnvoll erachtet. Dabei wurden als zahlenmäßig bedeutendsten Zugvögeln in Deutschland Kraniche und Gänse identifiziert. Die Körpergröße dieser Vögel liegt in der Größenordnung der verwendeten Wellenlängen des Rundfunksignals. Dadurch überwiegt bei dem Mechanismus der Rayleigh- und Resonanzstreuung, was im letzteren Fall zu einem Radarrückstreuquerschnitt führen kann, der das Mehrfache ihrer eigentlichen optischen Projektionsfläche beträgt. Durch die Wahl einer niedrigen Sendefrequenz (z.B. 490 MHz) kann diese Bedingung zu einer Überhöhung des Rückstreuquerschnitts im Bereich der Resonanzstreuung verstärkt werden.

Für die Anwendung von passivem Radar zur Detektion von Kranichen und Gänsen waren die Unterschiede in Größe, Flugverhalten und Kommunikationsweisen zwischen diesen Vogelarten relevant. Folgend sind einige potenzielle Auswirkungen auf die Detektion durch passives Radar aufgeführt.

Größe und Radarsignatur: Kraniche sind in der Regel größer als Gänse, was zu einer größeren Radarsignatur führen könnte. Das bedeutet, dass Kraniche möglicherweise leichter von einem passiven Radarsystem erfasst werden können, insbesondere wenn das System auf die Erkennung größerer Objekte ausgelegt ist.

Flugmuster und Formationen: Die unterschiedlichen Flugmuster und Formationen von Kranichen und Gänsen könnten sich auf die Bewegungserkennung auswirken. Kraniche fliegen oft mit langsameren, gleichmäßigen Flügelschlägen, während Gänse schnellere Bewegungen in einer V-Formation machen. Ein passives Radarsystem muss möglicherweise in der Lage sein, diese unterschiedlichen Bewegungsmuster zu identifizieren.

Rufe und Kommunikation: Die charakteristischen Rufe von Kranichen und Gänsen könnten möglicherweise von einem empfindlichen passiven Radarsystem erfasst werden (Mikro-Doppler). Dies könnte dazu beitragen, nicht nur die Anwesenheit der Vögel zu bestätigen, sondern auch ihre Aktivitäten und Interaktionen besser zu verstehen.

Umweltfaktoren: Kraniche und Gänse bewegen sich oft in verschiedenen Umgebungen. Kraniche können in einer Vielzahl von Lebensräumen anzutreffen sein, während Gänse in der Nähe von Gewässern, insbesondere während der Brut- und Zugzeiten, präsent sind. Die Kenntnis der typischen Umgebungen und Verhaltensweisen könnte bei der Auslegung von passiven Radarsystemen berücksichtigt werden.

Dichte von Gruppen: Kraniche und Gänse neigen dazu, in großen Gruppen zu ziehen, was zu einer höheren Dichte von Vögeln in einem bestimmten Bereich führen kann. Die Fähigkeit eines passiven Radarsystems, große Gruppen zuverlässig zu identifizieren und zu verfolgen, könnte entscheidend sein.

Diese Überlegungen sind allgemeiner Natur und spezifische Anpassungen am passiven Radarsystem von PARASOL müssten durch umfassende Studien in einem Praxistest validiert werden. Fortgeschrittene Signalverarbeitungstechniken und maschinelles Lernen sind in der Lage, diese Unterschiede besser zu berücksichtigen und die Detektionsgenauigkeit weiter zu verbessern.

Neben den vorkommenden Vögeln kann im Rahmen eines Praxistests alternativ oder zusätzlich Kontakt zu einer Falknerei aufgenommen werden, um gezielte Vermessungen der dort verfügbaren Vögel durchzuführen. Der Messort sollte unter Berücksichtigung der von der Falknerei vorgegebenen Randbedingungen, als auch durch die Verfügbarkeit von DVB-T2 Beleuchtern ausgewählt werden. Die Auswahl von Mikro-GPS-Loggern sollte auch in Absprache mit der Falknerei erfolgen.

### Erste Messungen von Vögeln mit einem Mobilem Messaufbau

Für diese Messdurchführung wurde eine mobile Testumgebung am Standort Mosel bei Koblenz aufgebaut. Für diesen Messplatz lagen schon Erfahrung mit den Örtlichkeiten und den entsprechenden Ansprechpartnern vor Ort vor. Als verwendbarer Beleuchter stand der Sender Kühkopf etwa 7km südlich zur Verfügung. Dies ist der Abbildung 19 gezeigt.

Aus den Ergebnissen dieser Messungen kann auf die zu verwendeten Detektionsalgorithmen und die zu erwartenden Signalstärken geschlossen werden. Dabei kann auch untersucht werden, ob die Algorithmen zur Unterdrückung der entwickelten Detektionssignale in Arbeitspaket 3 die Detektion von Vögeln erschweren. Im bisherigen Setup wurde ein Schwellwert mit hohem Konfidenzintervall zur Identifikation von Vögeln von ca. 0,85 m<sup>2</sup> Rückstrahlfläche festgestellt. Bei geradlinigen Flugbewegungen kann dieser Wert unterschritten werden.

Das Messfahrzeug war direkt am Moselufer geparkt. Die Referenzantennen (Kreuz-Log-periodisch) waren Richtung Sender Kühkopf ausgerichtet. Die Überwachungsantennen (Wisycom) zeigten Richtung Mosel. Kanal 1 war oben, Kanal 2 unten angeschlossen. Der Abstand der Antennen betrug 50cm. Ein Absorber schützte die Überwachungsantennen vor dem direkten Sendesignal. Als Empfänger wurde ein Vierkanaliger HBH-Receiver verwendet. Der Aufzeichnungsrechner ein Supermicro Epyc war mit einer AD-Wandlertkarte von Spectrum-Instrumentation.

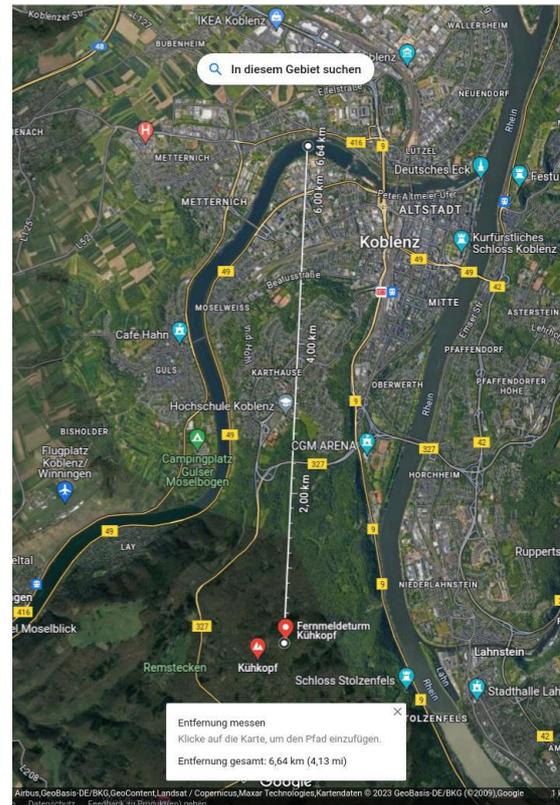


Abb. 19: Google Maps Darstellung der Messumgebung. Oben ist der Messplatz am Moselufer dargestellt. Unten ist der Beleuchter Kühkopf in etwa 7 km Entfernung markiert.

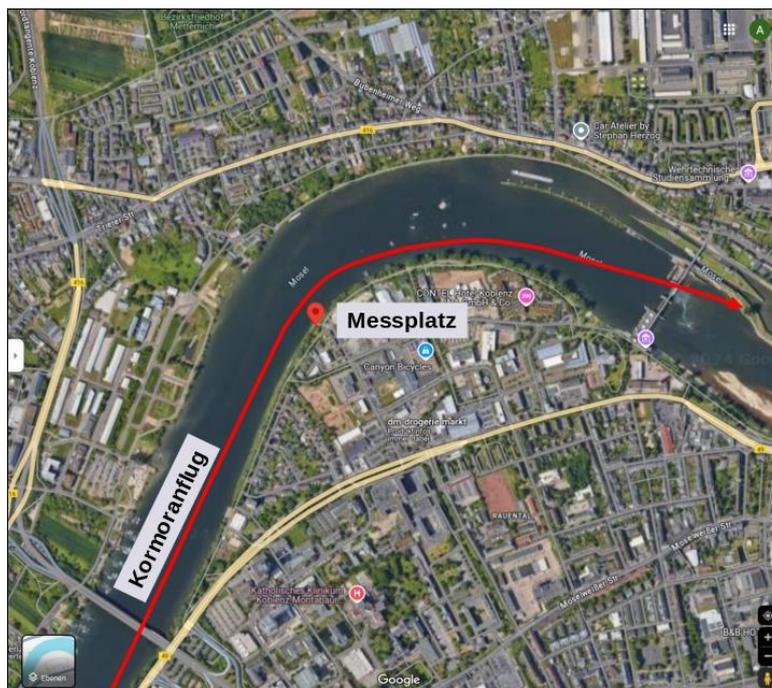


Abb. 20: Messplatz am südlichen Ufer des Moselstausees bei Koblenz.

Bei der Liveauswertung konnten die Echos zahlreicher Flüge erkannt werden. So ist in der Abbildung 21 der Flug von zwei Enten mit einer deutlichen Mehrwegreflektion bei 500 m und  $-60$  Hz zu erkennen und weitere schwächere in größerem Abstand.

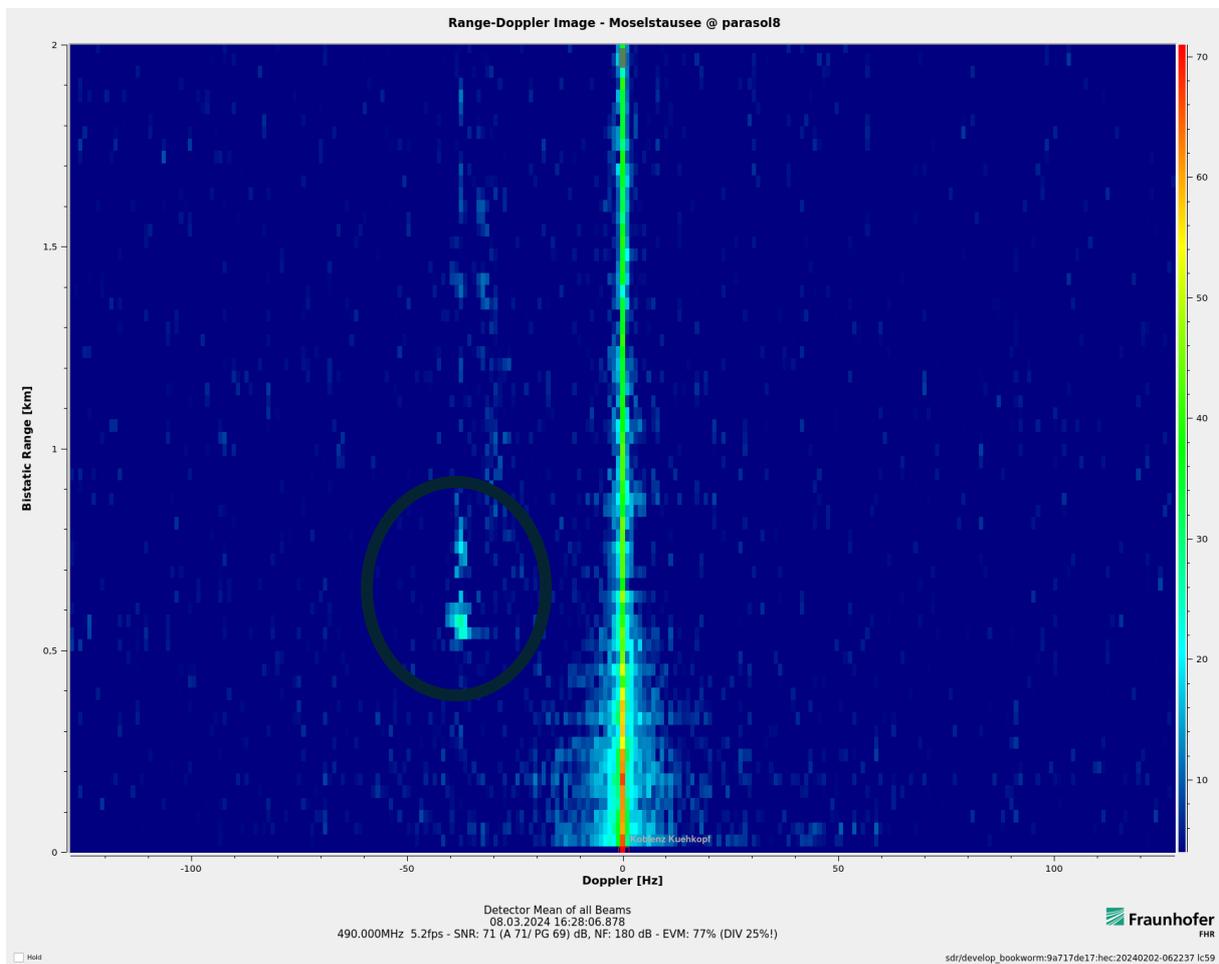


Abb. 21: Detektion von zwei Enten im Flug über der Mosel.

Auch eine Formation von vier Kanadagänsen konnte bei der Live-Prozessierung an der Mosel eine deutliche Mehrwegreflektion erkannt werden. Im Bereich um den Dopplernulldurchgang konnten die Tiere durch ihren unterschiedlichen Doppler separiert werden. Die Formation der Tiere und die Darstellung der Dopplerverschiebung ist in der Abbildung 22 zu sehen.

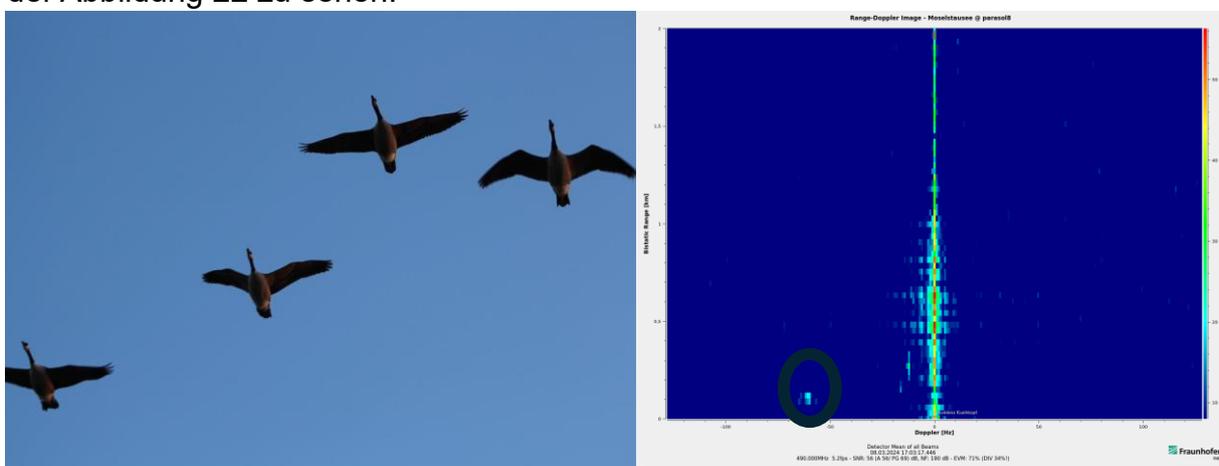


Abb. 22: Deutliche Detektion von Kanadagänsen bei 120 m und  $-60$  Hz.

Zuletzt konnte auch ein einzelner Kormoran in ca. 420 m Entfernung über der Mosel bei der abendlichen Rückkehr an den Netzplatz detektiert und in der Darstellung der Dopplerverschiebung separiert werden. Dieser Zusammenhang ist in der Abbildung 23 zu sehen.

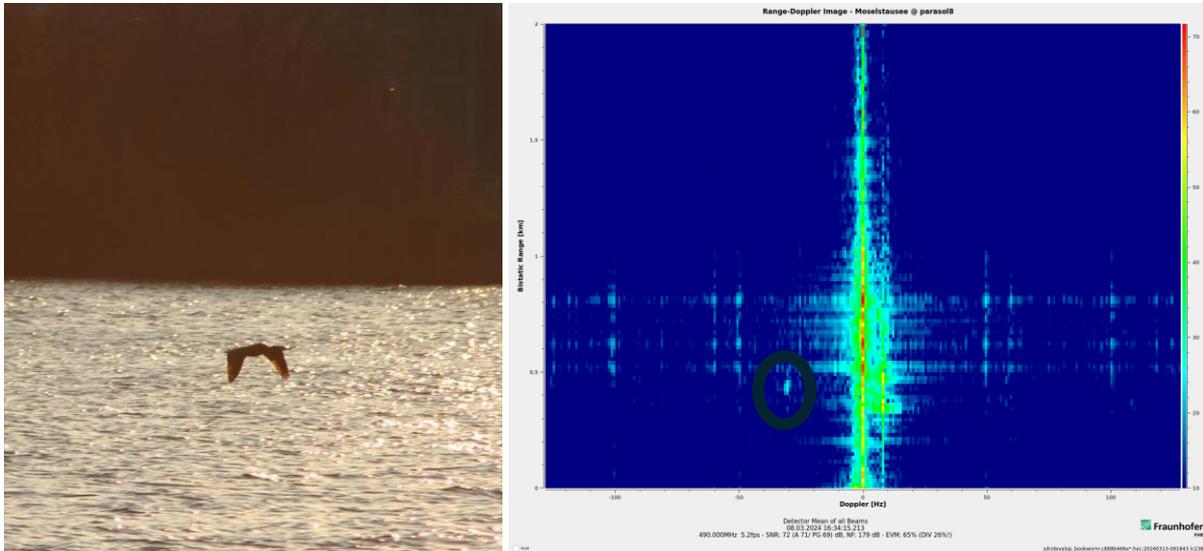


Abb. 23: Detektion eines einzelnen Kormorans bei 420 m und -30 Hz.

Ergänzend zu den Vogelmessungen wurde eine Abschätzung der möglichen Detektionsreichweite gegenüber einem Kormoran als Individuum durchgeführt. Das erreichte Signal- zu Rauschverhältnis der vorgenommenen Messung wurde hierzu untersucht. Die Darstellung in Abbildung 24 zeigt die Abhängigkeit der von der bistatischen Entfernung.

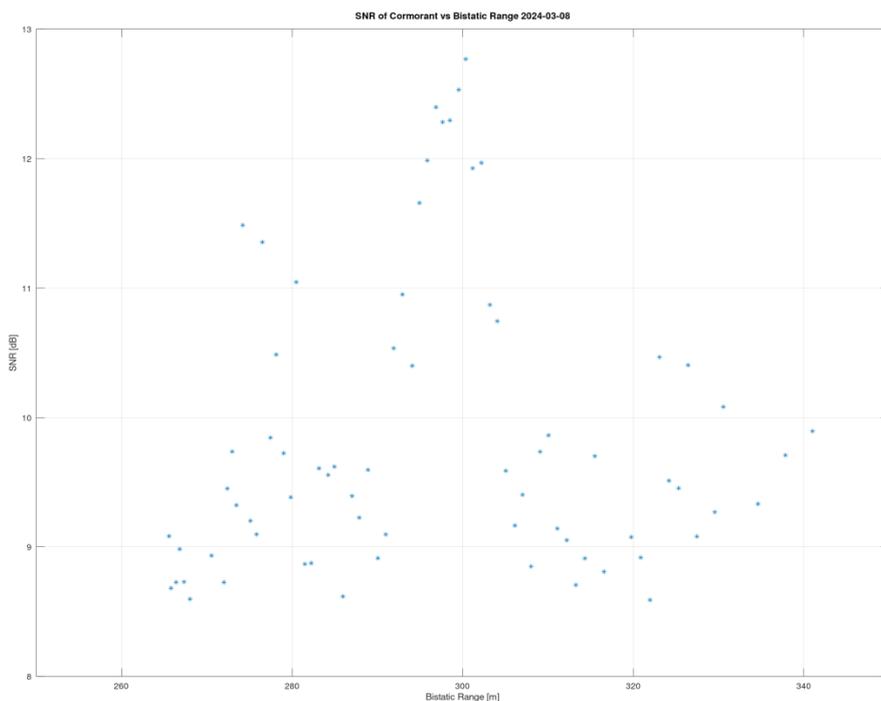


Abb. 24: SNR eines einzelnen Kormorans über die bistatische Entfernung.

Bei diesem Flug wurde der Vogel von hinten aufgenommen und hat sich stetig von der Empfangsantenne entfernt. Zu erwarten wäre eine deutliche Abnahme des Signal- zu Rauschverhältnisses mit der Entfernung. Stattdessen sehen wir zwei Peaks bei ca. 275 und 300 m in der Darstellung. Dies lässt auf eine Abhängigkeit des Radar-rückstreuquerschnitts vom Aspektwinkel schließen. Zur näheren Untersuchung dieses Effektes wäre für folgende Messungen eine begleitende Videoaufnahme hilfreich, um die Bewegung des Vogels während des Flugs zu analysieren.

Zur Abschätzung der Detektionsreichweite wurde die Radargleichung für passives Radar herangezogen.

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \frac{\lambda^2 \cdot \sigma \cdot A}{(4\pi)^3 \cdot R_{tt}^2 \cdot R_{tr}^2 \cdot L}$$

$P_r$  : Empfangene Leistung (1)

$P_t$  : Sendeleistung des primären Senders (2)

$G_t$  : Antennengewinn des Senders (3)

$G_r$  : Antennengewinn des Empfängers (4)

$\lambda$  : Wellenlänge des Senders (5)

$\sigma$  : Radarwirkungsquerschnitt des Vogels (6)

$A$  : Effektive Apertur des Empfängers (7)

$R_{tt}$  : Entfernung zwischen Sender und Vogel (8)

$R_{tr}$  : Entfernung zwischen Vogel und Empfänger (9)

$L$  : Systemverlust (10)

Abb. 25: Formel zur Abschätzung der Detektionsreichweite.

Dabei fließt die Entfernungsänderung in die beiden Größen  $R_{tt}^2$  und  $R_{tr}^2$  ein. Die zu erwartende Änderung ist gegenüber der Entfernung zum Sender klein. Daher kann diese für eine erste Abschätzung vernachlässigt werden. Damit bleibt die Auswirkung auf  $R_{tr}^2$  und damit eine quadratische Abhängigkeit des SNR von der Entfernung. Bei den gemessenen Parametern und der gegebenen Anordnung kann eine Detektion bis auf ein SNR von 8 dB sicher erfolgen. Der gemessene Mittelwert des SNR liegt bei 10 dB, so dass sich das Entfernungsquadrat noch um 2 dB beziehungsweise Faktor 1,6 vergrößern könnte. Ausgehend von diesem Puffer wäre im gegebenen Fall eine Reichweite von ~ 400m beziehungsweise eine Entfernung zwischen zwei Passiv-Radar Empfängern von ~ 800m denkbar. Weitere umfangreichere Untersuchungen und Messerhebungen in einem Praxistest müssten aber diese Annahmen validieren.

## 5.2. Maßnahmen zur Verbreiterung der Vorhabensergebnisse

Während der Projektlaufzeit wurde das Passiv-Radar-System über folgende Maßnahmen der Öffentlichkeit präsentiert.

### Webseiten:

- <https://www.passiv-radar.de/de/>
- <https://www.dirkshof.de/passiv-radar-system/>

### Teilnahme an Messen:

- WindEurope 2024 in Bilbao, 10-11 Juni 2024, Messebesuch
- WindEnergy Hamburg, 24-27 September 2024, Teilnahme als Aussteller gemeinsam mit dem Dirkshof in Halle A1 - 336

### Pressemeldung:

- Schleswig-Holsteinischer Zeitungsverlag, Husumer Nachrichten, Nr. 132, Freitag 9 Juni 2023, „Passiv-Radar gegen das ewige Blinken“.

## 6. Fazit

Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprojektes „PARAPOFA“ (DBU-Akz. 37768) wurden bestehende Herausforderungen zur Detektion und Behandlung von Falschsignalen und anspruchsvolle Funktionen wie Ortung, Objektverfolgung, Mustererkennung oder Klassifizierung zusammen mit dem Forschungspartner Fraunhofer FHR für das passive Radarsystem PARASOL weiterentwickelt und wirtschaftlich sinnvoll erfolgreich gelöst und umgesetzt. Das betrifft die Hardware und die Auswertungslogik des Systems. Gerade bei kleinen Flugobjekten (Flugdrohnen, Vogelschwärmen mit Rückstrahlflächen kleiner  $1 \text{ m}^2$ ) können externe Ereignisse (Radarstreuung durch die Vegetation) oder interne Effekte wie das Grundrauschen aus der Messelektronik, Kabeln etc. zu Störeinflüssen führen, die das Signalbild von kleinen oder weit entfernten Flugobjekten überdecken.

Zur Ursache der auffallenden Detektionsanhäufungen wurde festgestellt, dass das Beobachtete in weiten Teilen dem in der Lektüre "Ziellokalisierung mittels Laufzeitmessungen" von Franz Dommermuth dargelegten Verhalten der Lösungsinstabilitäten entspricht. Zur Unterdrückung dieser Signalanhäufungen wurden mehrere Sensorgrößen und Freiheitsgrade untersucht. Zum Beispiel wurden Werte der normierten Beschleunigung, der Vorzeichenklassifizierung und der Änderungsrate der Zustandsgrößen, der Transformation der Zustandsgrößen in den Frequenzbereich mittels Fast-Fourier-Transformation und der Kreuzkorrelation im beobachteten Zeitbereich herangezogen. Die aus diesen Untersuchungen entwickelte Lösung führte zu einer wesentlichen positiven Veränderung der Softwarebestandteile. Dieses entwickelte Konzept wurde als Basis zur Detektion und Klassifizierung von kleinen Flugobjekten (Vögeln, Drohnen etc.) erfolgreich erprobt und in allen Bestandssystemen der Firma Parasol integriert. Im bisherigen Setup wurde ein Schwellwert mit hohem Konfidenzintervall zur Identifikation von kleinen Flugobjekten von ca.  $0,85 \text{ m}^2$  Radarrückstrahlfläche festgestellt. Bei geradlinigen Flugbewegungen kann dieser Wert unterschritten werden, wobei die Signalgüte vom Anstrahlungswinkel der Objekte oder charakteristischen Merkmalen variiert. Grundsätzlich soll das System zukünftig in die Lage versetzt werden können, im Livebetrieb eine Klassifizierung und Sortierung der Flugobjekte vorzunehmen und diese Visuell auf Kartenmaterial wiederzugeben. Eine kombinierte BNK und Vogeldetektion auf Anlagen verschiedener Hersteller erscheint ausführbar, um eine Erschließung neuer WEA-Standorte mit kombiniertem Naturschutz zu ermöglichen. Erste Tests zeigten, dass eine Falschzielreduktion von 85% auf 95% angehoben werden konnte. Weiterhin konnten Individuen und kleinere Vogelgruppen erfolgreich gemessen werden. Allerdings wurde festgestellt, dass für die Merkmalextraktion immer eine gewisse Lernzeit von Nöten ist, um einerseits die erforderlichen Informationen zu gewinnen und andererseits die Klassifizierungsentscheidungen treffen zu können. Die dafür notwendige Zeitspanne (Latenz) muss für die Anwendung und aktuelle KI-Ansätze tragbar sein und hängt stark von der Rechenintensität des gewählten Ansatzes, der Häufung der Zielobjekte und der Verweildauer der Flugobjekte in der Nähe der WEA. Für die praktische Auswahl des richtigen Ansatzes ist daher eine Validierung der notwendigen Randbedingungen durch experimentelle Erprobung entscheidend. Eine Überführung



der bisher sehr guten Projektergebnisse, aller vereinbarten Projektschritte, in einen Praxistest wird daher von PARASOL GmbH & Co. KG angestrebt. Projektziel eines möglichen Nachfolgevorhabens wäre es bereits realisierte Prototypen zu einem funktionierenden und robusten Demonstrator weiterzuentwickeln. Um Lösungsansätze der BNK und des Naturschutzes zusammenzubringen würde eine Validierung in einem Windpark zusammen mit alternativen Systemen (z.B. Protectis Bird kamerabasiertes System in Windpark Reußenköge) sich bestens eignen. Die Rahmenbedingungen konnten hier bereits geschaffen werden. So hat sich der Windpark Reußenköge als zukünftiges Testfeld bereiterklärt und dort aus anderen Gründen des Naturschutzes bereits ein kamerabasiertes Vogelerkennungssystem eingerichtet. Parasol verfügt über notwendige Datenzugriffe, um gemeinsam mit den selbst erfassten Daten, eine eigenständige künstliche Intelligenz aufzubauen.

## 7. Literaturverzeichnis

1. *Passive radar detection range enhancement using for-ward scatter geometry.* **K. Kulpa, M. Malanowski, M. Baczyk and P. Krysik.** Dresden, Germany : s.n., 2015. 16th International Radar Symposium (IRS). S. 54-59.
2. *Multireceiver passive radar tracking.* **N. Millet, M. Klein.** No 10, October 2012, IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, Bd. Vol 27, S. 26-36.
3. *Motion Compensation for Long Time Integration in Passive Radar Scenarios with High-Speed Manoeuvring Target.* **A. Almodóvar-Hernández, N. Del-Rey-Maestre, D. Mata-Moya, M.P. Jarabo-Amores and M.C. Benito-Ortíz.** Berlin, Germany : s.n., 2023. 20th European Radar Conference (EuRAD). S. 185-188.
4. *Enhanced Cross-correlation Based Translational Motion Compensation in a Passive Radar with Data Gaps Filling.* **M. Soszka, R. Mularzuk, A. Krysinski.** Berlin, Germany : s.n., 2021. 2021 21st International Radar Symposium (IRS), Berlin. S. 1-10.
5. *The migration compensation methods for DTV based passive radar.* **Y. Feng, T. Shan, Z. Zhuo, R. Tao.** Ottawa, ON, Canada : s.n., 2013. 2013 IEEE Radar Conference (RadarCon13). S. 1-4.
6. *The CAF-DFRFT-KT Algorithm for High-Speed Target Detection in Passive Radar.* **L. Liu, R. Tao, N. Zhang.** Beijing, China : s.n., 2011. First International Conference on Instrumentation. S. 748-751.
7. *Target's range migration compensation in passive radar.* **M. Radmard, H. Habibi, M. H. Bastani, F. Behnia.** Rome, Italy : s.n., 2009. European Radar Conference (EuRAD). S. 457-460.
8. *Long-time integration by short-time cross-correlation and two-step Doppler processing for Passive Bistatic Radar.* **al., T. Hoshino et.** Nuremberg, Germany : s.n., 2013. European Microwave Conference. S. 1763-1766.
9. *Study of long integration time passive radar processing techniques for low reflectivity drone detection.* **A. Almodóvar-Hernández, N. Del-Rey-Maestre, D. Mata-Moya, M. -P. Jarabo-Amores, M. -C. Benito-Ortíz.** Sydney, Australia : s.n., 2023. IEEE International Radar Conference (RADAR). S. 1-5.
10. *Computationally effective range migration compensation in PCL systems for maritime surveillance.* **T. Martelli, F. Filippini, F. Pignol, F. Colone, R. Cardinali.** Oklahoma City, OK, USA : s.n., 2018. IEEE Radar Conference (RadarConf18). S. 1406-1411.
11. *A Method for Eliminating False Detection Results in FM-radio-based Passive Bistatic Radar.* **D. -H. Park, G. -H. Park, H. -N. Kim, K. -H. Song, J. -I. Ahn.** Barcelona, Spain : s.n., 2020. International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC). S. 1-3.

12. *Signal processing enhancements in passive radar systems*. **Kim, Y., Park, J., Lee, S.** 2017, Journal of Signal Processing Systems.
13. *Long Coherent Integration in Passive Radar Systems Using Super-Resolution Sparse Bayesian Learning*. **A. Filip-Dhaubhadel, D. Shutin.** February 2021, Bd. 1, S. 554-572.
14. *Lagrange-Polynomial-Interpolation-Based Keystone Transform for a Passive Radar*. **F. Pignol, F. Colone, T. Martelli.** 3, June 2018, Bd. 54, S. 1151-1167.
15. *Long range FM-based passive radar*. **M. Malanowski, K. S. Kulpa, P. Samczynski, J. Misiurewicz, J. Kulpa.** Glasgow, UK : s.n., 2012. IET International Conference on Radar Systems (Radar 2012). S. 1-4.
16. *OFDM Waveform Synchronisation for Multistatic Radar and DVB-T2 Illumination*. **D. Bok, J. Heckenbach.** Toulon, France : s.n., 2019. International Radar Conference (RADAR). S. 1-6.
17. *Reconstruction and Reciprocal Filter of OFDM Waveforms for DVB-T2 Based Passive Radar*. **Bok, D.** Brisbane, QLD, Australia : s.n., 2018. 2018 International Conference on Radar (RADAR). S. 1-6.
18. *A multistatic passive coherent location system with receiver location constraints*. **D. Bok, D. Galda, U. Siart.** Prague, Czech Republic : s.n., 2017. 2017 18th International Radar Symposium (IRS). S. 1-10.