

Projekt: LuFo KOKO 2
Titel: Schlussbericht
Dok. ID: 1309-A-00016A00 EDO R01

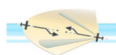
Erstellt durch:
HENSOLDT Sensors GmbH
Sitz der Gesellschaft:
Willy-Messerschmitt-Straße 3
82024 Taufkirchen
Deutschland

Unberechtigt geschützt. Weitergabe sowie Vervielfältigung dieses Dokuments, Verwertung und Mitteilung seines Inhalts sind verboten, soweit nicht ausdrücklich gestattet. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadensersatz. Alle Rechte für den Fall der Patent-, Gebrauchsmuster- oder Geschmacksmusteranmeldung vorbehalten.

	Name:	Abtl.:	Datum:	Unterschrift:
Erstellt: durch PVE	Jens Hennig	HAYA1		
Validiert: durch	Dr. Guy Kouemou	HST		
Bestätigt: durch PQM	Frank Graf	HOQE1		
Freigegeben: durch PL	Maurice Tennigkeit	HAAP		

Benutzungshinweise nach VG 95034 beachten!

Titel: Schlussbericht				
Cage Code: D1901	Datum: 28.03.2023	Dokument Identifikation: 1309-A-00016A00 EDO R01	Version: 01	Seite 1 / 76



Änderungsnachweis

Version	Änderungsdatum	Geänderte Seiten/Kapitel	Kurze Änderungsbeschreibung	Änderungsnummer
01D1	15.03.2023	alle	Initiale Version	715389
01	28.03.2021	Alle	Review Kommentare eingearbeitet	715389

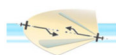
Verteilerliste

Eine projektspezifische Verteilerliste für ausgedruckte Dokumente ist nicht notwendig. Die gültige Version dieses Dokuments ist für jedes Projektmitglied im verwendeten KM Tool (PLM) verfügbar.

Firma	Name	Bereich	Funktion	Anzahl
TIB Leibnitz- Informationszentrum Technik und Naturwissenschaften				1
Profi Online				1

elektronisch

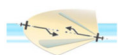
Titel: Schlussbericht				
Cage Code: D1901	Datum: 28.03.2023	Dokument Identifikation: 1309-A-00016A00 EDO R01	Version: 01	Seite 2 / 76



Inhalt

1	Allgemeine Informationen	7
1.1	Bedeutung des Dokuments	7
1.2	Referenzdokumente	7
1.3	Vertragsdokumente	8
1.4	Abkürzungen	8
1.5	Begriffe und Definitionen	9
2	Kurzdarstellung	9
2.1	Aufgabenstellung.....	9
2.2	Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	10
2.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	10
2.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde.....	13
2.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	13
3	Eingehende Darstellung.....	14
3.1	Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse im Einzelnen	14
3.1.1	AP 1.1 Concept of Operations (CONOPS)	14
3.1.1.1	Szenario 1: IFR Anflug auf nicht kontrollierte Flugplätze	14
3.1.1.2	Szenario 2: Helikopter PINS Anflug	15
3.1.1.3	Szenario 3: Detect and Avoid für Unmanned Cargo.....	16
3.1.2	AP 1.2 System Definition.....	18
3.1.3	AP 1.3 Simulation.....	19
3.1.3.1	MBSE Simulation	19
3.1.3.2	Pilot in the Loop Simulation.....	20
3.1.3.3	Simulation mit Flugtestdaten.....	21
3.1.4	AP 1.4 Validation CONOPS	21
3.1.5	AP 2.1 Radar Systems Engineering	22
3.1.5.1	Radar Systemanforderungen	23
3.1.5.1.1	DAA Mode	23
3.1.5.1.2	Wetterdetektion und Ground Mapping	23
3.1.6	AP 2.2 S&A Moden	24
3.1.7	AP 2.3 S&A Radar Tracker	26
3.1.8	AP 2.4 Wettermoden	28
3.1.8.1	Definition der Wettermoden	28
3.1.8.2	Scherwinddetektion.....	32
3.1.8.3	Turbulenzdetektion	35
3.1.8.3.1	Must-Detect Szenario	37

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	3 / 76



3.1.8.3.2	Must-Not-Detect Szenario	38
3.1.8.4	Wolkenerkennung und Wetterradar	39
3.1.9	AP 2.5 A2G Moden	41
3.1.10	AP 2.6 Radar Integration und Test	43
3.1.11	AP 4.1 Fusion und Avoid Systems Engineering	43
3.1.12	AP 4.2 Realisierung Fusion und Avoid	46
3.1.12.1	Detektion	46
3.1.12.2	Tracking	47
3.1.12.3	Bewertung der verfolgten Ziele	47
3.1.12.4	Bewertung der Gefährlichkeit	48
3.1.12.4.1	Berechnung von Tau_mod	49
3.1.12.5	Definition der Alarme	50
3.1.12.6	Entscheidung über Ausweichen und Auswahl des Ausweichmanövers	51
3.1.13	AP 4.3 Integration Fusion und Avoid	53
3.1.14	AP 5.1 KOKO 2 System Integration und Test	54
3.1.15	AP 5.2 Plattform Integration	55
3.1.16	AP 5.3 Flight Test	55
3.1.17	AP 5.4 System Bewertung	64
3.1.17.1	Systembewertung Avoid	64
3.1.17.1.1	Analyse einzelner Szenarien	64
3.1.17.2	Systembewertung Wetter Moden	72
3.2	Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	75
3.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	75
3.4	Darstellung des voraussichtlichen Nutzens und der Verwertbarkeit	76
3.5	Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	76
3.6	Erfolgte Veröffentlichungen	76

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1:	Systemkonzept	9
Abbildung 2:	Haupt- und Unterarbeitspakete	11
Abbildung 3:	PINS Anflug	15
Abbildung 4:	KOKO 2 Systemarchitektur	18
Abbildung 5:	MBSE Modell	19
Abbildung 6:	Pilot in the Loop Simulation	20
Abbildung 7:	Simulation mit Flugversuchsdaten	21
Abbildung 8:	Encounter Model MBSE Block	22
Abbildung 9:	DAA Radar in Zieltechnologie	22

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	4 / 76

Abbildung 10: Wetterdetektionsdisplay	23
Abbildung 11: Performance Wetterdetektionsmode im D&A Radardemonstrator.....	24
Abbildung 12: Air-to-Air Radar Ressource Management	25
Abbildung 13: Lücken in der Toolchaine zur Codegenerierung aus dem MBSE Model.....	26
Abbildung 14: Ressourcenverteilung D&A Radar Demonstrator	30
Abbildung 15: Visualisierung Scherwind Landung	32
Abbildung 16: Vergleich Scherwind 90cm Parabolspiegel und Hensoldt Antenne	33
Abbildung 17: Vergleich Scherwind Range-Doppler-Matrix, 90cm Parabolspiegel (links) und Hensoldt Antenne (rechts).....	34
Abbildung 18: Vergleich radiale Windgeschwindigkeiten	34
Abbildung 19: Performance Scherwindmode D&A Radardemonstrator	35
Abbildung 20: Performance Turbulenzdetektionsmode D&A Radardemonstrator	36
Abbildung 21: Intensitätsdaten Must-Detect-Szenario	37
Abbildung 22: Vergleich Schätzer und Truth-Daten Must-Detect-Szenario	37
Abbildung 23: Intensitätsdaten Must-Not-Detect-Szenario.....	38
Abbildung 24: Vergleich Schätzer und Truth-Daten Must-Not-Detect-Szenario	39
Abbildung 25: Schematische Darstellung Wolkenerkennung	40
Abbildung 26: Ground Clutter und Regengebiet	42
Abbildung 27: Vergleich reale GoogleMaps Daten mit Radardaten des Wetterdetektionsmodes	42
Abbildung 28: Vermessung des DAA Radars in der Messkammer	43
Abbildung 29: Anbindung des KOKO 2 DAA Systems an ein FMS.....	44
Abbildung 30: Algorithmus zur Aktivierung einer Avoid Trajektorie	45
Abbildung 31: Distanz am CPA	49
Abbildung 32: Remain Well Clear und Collision Volume (nach [2])	51
Abbildung 33: Ausweichtrajektorien für Remain Well Clear und Kollisionsvermeidung	52
Abbildung 34: Ausweichtrajektorien während der "Remote Integration	53
Abbildung 35: Ausweichtrajektorie nach der Integration	54
Abbildung 36: Integration der DAA Radar Antenne und Lage der DAA Systemkomponenten in der Do 228	55
Abbildung 37: Avoid-Szenario A8 mit Wegpunkten.....	65
Abbildung 38: Avoid-Szenario A8 zum Zeitpunkt der geringsten Annäherung	65
Abbildung 39: Avoid-Szenario A4 ohne Konflikt.....	66
Abbildung 40: Avoid Szenario A3: Zu frühe Aktivierung des Avoidmanövers.....	67
Abbildung 41: Avoid Szenario A3 kein Konflikt	67
Abbildung 42: Szenario A11	68
Abbildung 43: Überflug Wegpunkt	69
Abbildung 44: Wetterkonfiguration, Langpuls 1, 05.07.21 13:12.....	72
Abbildung 45 Wetterkonfiguration, Langpuls 1, 05.07.21, 13:40.....	73
Abbildung 46: Wetterkonfiguration, Kurzpuls 5, 05.07.21, 13:40.....	74

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	5 / 76

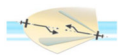


Abbildung 47: Wetterkonfiguration, Kurzpuls 1, 05.07.21, 13:40.....	74
---	----

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Puls/Wetterfunktion.....	29
Tabelle 2: Konfiguration während Avoid Szenarien	29
Tabelle 3: Konfiguration während Wetterszenarien 1	31
Tabelle 4: Konfiguration während Wetterszenarien 2	31
Tabelle 5: Testflugszenarien	56
Tabelle 6: Wegpunkte DAA System und FMS	69
Tabelle 7: Optimierungspotenzial Avoid	71

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	6 / 76

1 Allgemeine Informationen

1.1 Bedeutung des Dokuments

Dieser Schlussbericht zum LuFo Verbundprojekt 20V1707A KOKO 2 „Kollisionserkennung / Kollisionsvermeidung für Single-Pilot-Cockpit und Unmanned Cargo“ beschreibt die Entwicklung des Systems als Simulationssystem und Technologiedemonstrator und die Funktionale Überprüfung der Fähigkeiten, sowie die Durchführung des Projekts.

Kapitel 2 gibt hierzu eine Kurzdarstellung der Voraussetzungen, Randbedingungen und programmatischer Aspekte.

Kapitel 3 gibt eine eingehende Darstellung der Entwicklung und des Tests des Simulationssystems und des Technologiedemonstrators.

Als Anlage ist diesem Schlussbericht ein kurzgefasster Erfolgskontrollbericht beigelegt.

1.2 Referenzdokumente

Hensoldt Projektdokumente:

1. 1309-A-00000A00 EDO PP3 01 Concept of Operation
2. 1309-A-20100A00 EDO DD1 01 ADS-B Decoder
3. 1309-A-20200A00 EDO DD1 01 GECO Databridge
4. 1309-A-20300A00 EDO DD1 01 Encounter Model
5. 1309-A-20400A00 EDO DD1 01 S2 Main Computer
6. 1309-A-20500A00 EDO DD1 01 System Simulationsumgebung

Externe Referenzen

- [1] ICAO Doc 10019, AN/507, ‚Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS)‘, 2015
- [2] RTCA Document DO-365A, ‚Minimum Operational Performance Standards (MOPS) for Detect and Avoid (DAA) Systems‘, Washington, DC, USA, 2020
- [3] "Luftverkehrs-Ordnung vom 29. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1894), die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 11. Juni 2017 (BGBl. I S. 1617) geändert worden ist"
- [4] Jing Wang, Yunkai Zou & Jianli Ding, ‚ADS-B spoofing attack detection method based on LSTM‘, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2020
- [5] RTCA Document DO-220A, Minimum Operational Performance Standards (MOPS) For Airborne Weather Radar Systems, Washington, DC, USA, 2017
- [6] César Munoz, Anthony Narkawicz, George Hagen, Jason Upchurch, Aron Dudle, María Consiglio and James Chamberlain, DAIDALUS: Detect and Avoid Alerting Logic for Unmanned Systems, Proceedings of the 34th Digital Avionics Systems Conference (DASC 2015), Prague, Czech Republic, 2015.

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	7 / 76

- [7] César Munoz and Anthony Narkawicz. Formal analysis of extended well-clear boundaries for unmanned aircraft, Proceedings of the 8th NASA Formal Methods Symposium (NFM 2016), Lecture Notes in Computer Science, Vol. 9690, 2016
- [8] Dudek, A., Kunstmann, F., Stütz, P., Hennig, J., 2021, 'Detect and Avoid of Weather Phenomena on-board UAV: Increasing Detection Capabilities by Information Fusion', 2021 IEEE/AIAA 40th Digital Avionics Systems Conference (DASC), San Antonio, TX, USA, 03-07 October 2021
- [9] Sesar Joint Undertaking 2020, European ATM Master Plan, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020
- [10] RTCA Dokument DO-366A, Minimum Operational Performance Standards (MOPS) for Air-to-Air Radar for Traffic Surveillance, Washington, DC, USA, 2020
- [11] ICAO Doc 'Annex 2 to the Conventions in International Civil Aviation: Rules of the Air', Montreal, Canada, 2005

1.3 Vertragsdokumente

Die folgenden Vertrags- bzw. Kundendokumente werden in diesem Dokument referenziert:

1. Vorhaben KOKO 2 Zuwendungsbescheid - 20V1707A - Verbundprojekt:
"Kollisionserkennung / Kollisionsvermeidung für Single-Pilot-Cockpit und Unmanned Cargo"

1.4 Abkürzungen

A/C	Aircraft
ATC	Air Traffic Control
ATM	Air Traffic Management
DFS	Deutsche Flugsicherung GmbH
KOKO	Kollisionserkennung / Kollisionsvermeidung
KOKO 2	Kollisionserkennung / Kollisionsvermeidung für Single-Pilot-Cockpit und Unmanned Cargo
MIDCAS	Mid Air Collision System – Ein europäisches Detect and Avoid Programm
ProSA-n	Projekt Sense and Avoid national

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	8 / 76

SiPO Single Pilot Operations

1.5 Begriffe und Definitionen

Intruder	Das Luftfahrzeug in einem Kollisionsszenario welches in einen Konflikt mit dem Ownship kommt.
Ownship	Das Luftfahrzeug in einen Kollisionsszenario welches das zu untersuchende Detect and Avoid System trägt
Detect and Avoid	Das technische System welches Piloten oder Remote Piloten bei der Vermeidung von Kollisionen unterstützt.

2 Kurzdarstellung

2.1 Aufgabenstellung

Das Verbundvorhaben KOKO 2 baute auf dem Verbundprojekt KOKO auf und soll den operationellen Nutzen des Kollisionswarn- und Kollisionsvermeidungssystems von einem Unterstützungssystem für Piloten von Geschäftsreise- und Verkehrsflugzeugen zu einem System mit größerer Reichweite und Sensorredundanzen für den Einsatz in unbemannten Transportflugzeugen (Unmanned Cargo A/C) oder für Crew-reduzierte Transportflugzeuge (Single Pilot Cargo) sowie in großen unbemannten Fluggeräten erweitern.

Hensoldt wollte mit dem Vorhaben KOKO 2 seine in den militärisch geprägten Projekten MIDCAS und ProSA-n erarbeiteten Fähigkeiten im Detect and Avoid Kontext auf zivile Anwendungsbereiche erweitern.

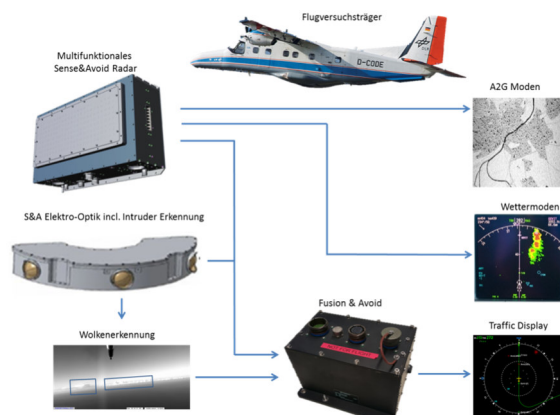


Abbildung 1: Systemkonzept

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	9 / 76

KOKO 2 soll unter Berücksichtigung bestehender ATM/ATC Regulierungen durch die Hinzunahme bordseitiger, nicht kooperativer redundanter Sensorik (Radar/Elektro-Optik) einerseits die Crew von der Belastung der Kollisionsvermeidung in den unteren Lufträumen entlasten und somit Ein-Mann Crew Konzepte unterstützen und andererseits sogar eine sichere Luftraumnutzung von unbemannten Transportflugzeugen ermöglichen. Das KOKO 2 DAA System wurde als reiner Technologiedemonstrator entwickelt. Die zulassungsrelevanten Standards und European Technical Standard Orders befinden sich derzeit noch in der Entwicklung.

2.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben wurde bei Hensoldt im Wesentlichen durch das Team „Detect and Avoid“ innerhalb der Abteilung Radar System Concepts in Ulm durchgeführt. Unterstützung wurde von Abteilungen Multi-Sensor Datafusion und Avionics Systems aus Immenstaad geleistet. Hensoldt arbeitet schon seit vielen Jahren an der Weiterentwicklung und Standardisierung von Detect and Avoid Systemen. Mitarbeiter des Projekts sind in den Arbeitsgruppen zu Detect and Avoid und Wetterradar in den Gremien zur Standardisierung von EUROCAE und RTCA aktiv.

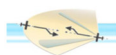
Teile des Detect and Avoid Radars mit seiner Testumgebung sowie der Elektro-Optische Sensor stehen dem Vorhaben aus des dem Projekt ProSA-n zur Verfügung.

2.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Rahmen des Vorhabens war folgende wissenschaftliche und technische Vorgehensweise mit folgenden konkreten Vorhabenzielen vorgesehen:

1. Entwicklung eines Operationellen Gesamtkonzeptes für Crew-reduzierte oder unbemannten Transportflugzeugen;
2. Definition, Untersuchung und Konzeption einer geeigneten weitreichenden Radar-Sensorik und einer geeigneten Elektro-Optik-Sensorik (als redundanter dissimilarer Sensor für die nicht kooperative Erkennung von potentiellen Kollisionen);
3. Definition und Konzeption einer integrierenden Sensordatenverarbeitung;
4. Definition und Konzeption einer Kollisionsvermeidungsfunktion; Aufbau einer Simulationsumgebung; Demonstration der Funktionsfähigkeit und Systemleistungen in zwei Flugtest- Phasen.

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	10 / 76



Zur Strukturierung der Arbeiten wurde das Vorhaben in folgende Haupt- und Unterarbeitspakete aufgeteilt:

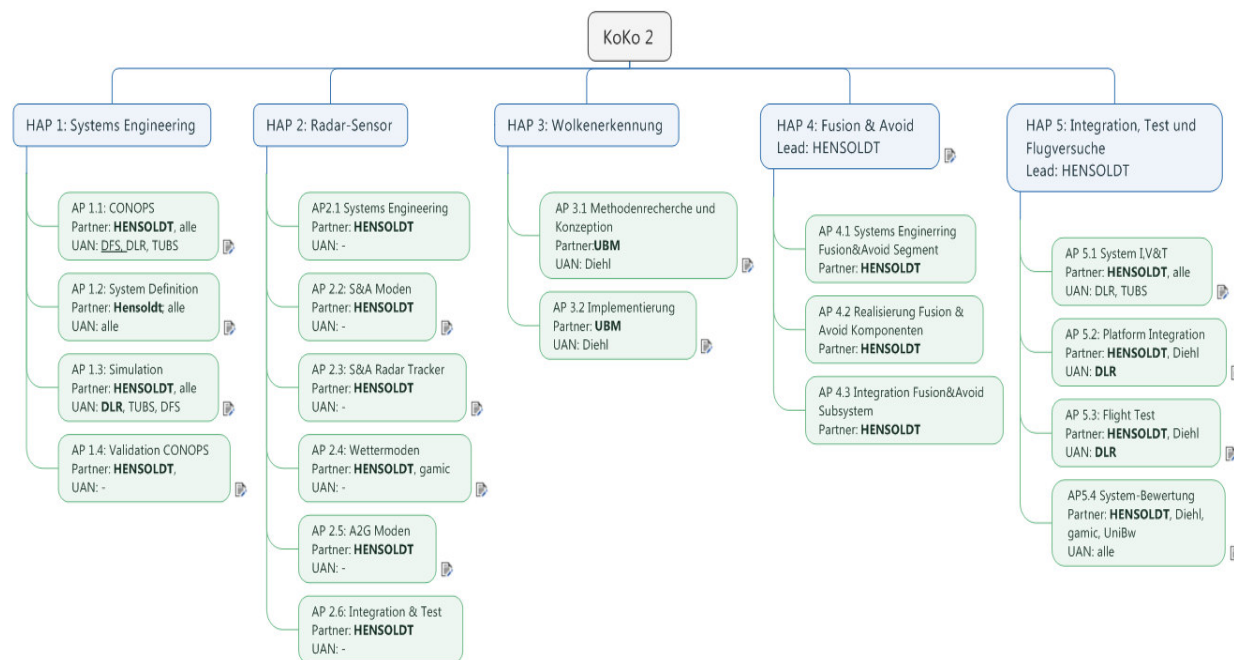


Abbildung 2: Haupt- und Unterarbeitspakete

Die Durchführung des Vorhabens war in großen Teilen durch die Einschränkungen der Corona Pandemie geprägt.

Der erste Teil des Projekts mit den Arbeitspaketen CONOPS und System Definition konnte nach Plan abgearbeitet werden. Durch die Erfahrungen aus einer langjährigen Zusammenarbeit von Hensoldt mit dem DLR, der Technischen Universität Braunschweig und der Deutschen Flugsicherung konnte schnell ein guter Arbeitsmodus gefunden werden. Es wurden verschiedene Workshops in Ulm und in Braunschweig durchgeführt, bei denen das Concept of Operation und das System Design erarbeitet wurden.

Auch bei der Zusammenarbeit mit der Universität der Bundeswehr hat sich schnell eine gute Zusammenarbeit entwickelt. Die Zusammenarbeit mit der Universität der Bundeswehr war in den ersten Planungen bei Hensoldt nicht vorgesehen. Die Zusammenarbeit hat sich erst im Laufe der Verhandlungen zum Antrag auf Vorschlag des Projektträgers ergeben, was sich in der Rückschau als großer Erfolg darstellt. Bei den Arbeiten zum Wetterradar bei Hensoldt und den Arbeiten zur Wolkenerkennung bei der Universität der Bundeswehr hat sich gezeigt, dass sich die Daten der

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	11 / 76

beiden Sensoren gegenseitig sehr gut zu einem erweiterten Wetterlagebild ergänzen. Aus der Zusammenarbeit ist ein Konferenzbeitrag und ein Antrag für ein Patent erwachsen¹.

Die weitere Durchführung des Vorhabens ab 2020 war stark von den Einschränkungen durch die Corona Pandemie geprägt. Die Arbeit bei Hensoldt wurde weitgehend auf Home-Office umgestellt. Damit konnten Entwicklungen am KOKO 2 Main Computer nicht im Labor durchgeführt werden. Der KOKO 2 Main Computer sollte die Ausführung des KoKo 2 Detect and Avoid Systems auf einer Avionic Computer Plattform demonstrieren. Da eine solche Plattform nicht im Home-Office betrieben werden kann wurde beschlossen die Ausführung auf einer PC Hardware zu implementieren, die schon im Flight Test Equipment Rack vorhanden war. Das System konnte auf dieser Plattform aber im geplanten Funktionsumfang entwickelt werden.

Die Arbeiten zur Simulation waren nach einer leichten Erholung der Corona Lage im Sommer 2020 von der verschärften Corona Lage im Herbst 2020 geprägt. Die Integration des KOKO 2 Avoid Systems mit dem Do 228 Autopiloten wurde im Sommer 2020 weitgehend über eine Internetverbindung durchgeführt.

Die Planung hatte für diesen Zeitraum auch die Durchführung der ersten Flugprobung des KOKO 2 Detect and Avoid Systems vorgesehen. Die Flugprobung musste aufgrund technischer Probleme mit dem Do 228 Testflugzeug der DLR mehrmals verschoben werden. Als sich dann im Herbst 2020 die Corona Lage verschärfte, wurde beschlossen die erste Flugprobungskampagne mit der zweiten Kampagne zusammenzulegen und auf den Sommer 2021 zu verschieben.

Im Folgenden wurden im ersten Halbjahr 2021 Arbeiten am DAA Radar Air-to-Air Mode und am Wetterradar durchgeführt.

Die Flugversuche konnten dann im Juni 2021 mit einem Hygienekonzept durchgeführt werden. Bei der Durchführung der Flugtests gab es einige Probleme mit dem ADS-B Empfang und der Verarbeitung von Radartracks im System, die vermutlich nicht aufgetreten wären, wenn man ohne Einschränkungen durch die Pandemie hätte arbeiten können.

Im Herbst 2021 wurden dann die Flugtestdaten ausgewertet und eine Systembewertung vorgenommen. Dazu wurde auch ein Workshop mit Teilnehmern von DFS und TU Braunschweig in Ulm durchgeführt.

¹ Europäische Patentanmeldung 21 198 830.8

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	12 / 76

2.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde

Bei der Bestimmung des technischen Stands an den im Vorhaben KOKO 2 angeknüpft wurde, wurde im Wesentlichen der Stand der Standardisierung von Detect and Avoid Systemen recherchiert. Zum Projektstart war nach Recherchen bei EUROCAE, RTCA und EASA kein Detect and Avoid System Standard für Europa verfügbar. Zum Start des Vorhabens KOKO 2 existiert ein Standard für ein DAA System „Minimum Operational Performance Standards (MOPS) for Detect and Avoid (DAA) Systems“ [2] für den US-Amerikanischen Luftraum, dass den Transit eines RPAS von einem segregierten Luftraum in einen anderen segregierten Luftraum unter Einschränkungen erlaubt. Der Entwicklung des Standards gehen einige wissenschaftliche Untersuchungen voraus wie z.B. [6] und [7].

Die höchste Internationale Autorität bei der Festlegung von Standards in der Luftfahrt ist die ICAO. Von der ICAO wurde das RPAS Manual [1] veröffentlicht, dass Hinweise für die Entwicklung von Detect and Avoid Systemen gibt.

Weitere Grundlagen für die Entwicklung des KOKO 2 DAA Systems sind die Verordnungen der Europäischen Kommission zu unbemannten Luftfahrzeugen:

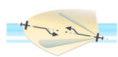
- DELEGIERTE VERORDNUNG (EU) 2019/945 DER KOMMISSION vom 12. März 2019 über unbemannte Luftfahrzeugsysteme und Drittlandbetreiber unbemannter Luftfahrzeugsysteme.
- DURCHFÜHRUNGSVERORDNUNG (EU) 2019/947 DER KOMMISSION vom 24. Mai 2019 über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge

2.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Verbundvorhabens wurde mit folgenden Stellen außerhalb des Projektteams oder der Unterauftragnehmer gearbeitet:

- Bundesnetzagentur bezüglich der Radar Frequenzfreigabe für die Gebiete der Flugversuche.

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	13 / 76



3 Eingehende Darstellung

3.1 Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse im Einzelnen

In den folgenden Abschnitten werden die wesentlichen Ergebnisse der Arbeitspakete dargestellt.

3.1.1 AP 1.1 Concept of Operations (CONOPS)

Ziel dieses Arbeitspakets war die Erstellung eines Concepts of Operations für die Anwendungsfälle:

- Single Pilot Cockpit (Pilotenassistenz)
- Unmanned Cargo (mit Bodenstation, nicht autonom)

Im Rahmen des Arbeitspakets wurde der Einsatz des KoKo 2 Detect and Avoid Systems in drei Szenarien untersucht, die hier dargestellt werden sollen.

3.1.1.1 Szenario 1: IFR Anflug auf nicht kontrollierte Flugplätze

Mit der Einführung von SERA 2014 wurden zunehmend RNP basierte IFR Verfahren für kleine unkontrollierte Flugplätze entwickelt und zugelassen, wie z.B. Emden EDWE, Husum-Schwesing EDXJ oder Norden-Norddeich EDWS. Diese IFR An- und Abflüge finden hierbei teilweise im unkontrollierten Luftraum statt, der Nahbereich der Flugplätze wird aber durch eine Radio Mandatory Zone (RMZ) geschützt. Eine RMZ ist ein Bereich des Luftraums, bei dessen Durchfliegen auch für Sichtflüge das Mitführen und Verwenden eines Sprechfunkgerätes vorgeschrieben ist. Vor dem Einflug ist Kontakt mit der angegebenen Bodenfunkstelle aufzunehmen und es sind Angaben zu Luftfahrzeugmuster, Standort, Flughöhe und Flugabsichten zu machen. Innerhalb der RMZ ist Hörbereitschaft aufrechtzuerhalten, auch der Ausflug ist zu melden. Da es sich bei der Bodenfunkstelle um einen unkontrollierten Flugplatz im Luftraum G (Golf) handelt (Flugplatzinformationsdienst, „AFIS“), werden jedoch von dieser weder für VFR- noch für IFR-Verkehr Verkehrslenkung und Staffeln durchgeführt. Flugverkehrskontrollfreigaben werden durch den Flugplatzinformationsdienst unter Absprache mit dem jeweils zuständigen Center der Flugsicherung an abfliegende Luftfahrzeuge weitergeleitet.

Die RMZ wurden 2014 eingeführt, um IFR-Verkehr auch an unkontrollierten Flugplätzen zu ermöglichen. Sie reichen vom Boden bis 1000 Fuß (ca. 300 m) über Grund. Oberhalb befindet sich abgesenkter kontrollierter Luftraum E (Echo). Durch die Häufung von Windenergieanlagen in diesem Bereich ist die Radarabdeckung teilweise lückenhaft. Radargestützte Verkehrsinformation zu nicht gemeldetem Verkehr kann unter Umständen nicht stattfinden. Das zu entwickelnde Zielsystem hätte hier einen Schwerpunkt, nicht kooperative und nicht gemeldete Störer des eigenen Flugweges zu entdecken und entsprechende Ausweich-Empfehlungen zu geben.

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	14 / 76

3.1.1.2 Szenario 2: Helikopter PINS Anflug

Die zunehmende Navigationsgenauigkeit auch in niedrigen Flughöhen durch Satellitenbasierte Systeme (GPS, GNSS...) öffnet neue Möglichkeiten für Hubschrauber unterhalb der Minimum Vector Altitude (MVA) teilweise im unkontrolliertem Luftraum nach Instrumentenflugregeln zu fliegen. Besonders in gebirgigen Geländen und über der hohen See ergeben sich hier neue Möglichkeiten, Flüge wetterunabhängig durchzuführen.

Die zunehmenden wirtschaftlichen Interessen im Bereich der Rettungsdienste, Krankentransporte und der Versorgung der Ölplattformen oder Offshore Windparks einhergehend mit der Notwendigkeit, diese regelmäßig zu bedienen, erhöhen den Druck, bislang weiße Flächen mit detaillierter Luftraumstruktur zu füllen.

Die ICAO Vorschrift Doc 8168 Procedures for Air Navigation Services Volume II (PANSOPS) erlaubt sogenannte Point In Space Verfahren (PINS) für Anflüge auf Helikopter Plattformen.

Besonders für Anwendung fern von bestehenden Flugplätzen mit solider Infrastruktur zeigen PINS An- und Abflüge ihre Stärken. Beispielsweise erlaubt ein PINS im Hafengebiet von New York kommerziellen Hubschraubern den hindernisfreien Übergang vom IFR Streckennetz zum Sichtanfluganteil und der anschließenden Landung auf einer Vielzahl von Hubschrauberlandeplattformen der umliegenden Hochhäuser.

Im Katastrophenfall (z.B. Erdbeben, Überschwemmungen, etc.) erlaubt die Kombination von RNAV oder RNP Verfahren mit PINS sehr flexibel eine sicherere und wetterunabhängigere Flugdurchführung und damit die Rettung von einer Vielzahl von Opfern oder verwundeten auch unter schwierigen Bedingungen.

Die folgende Abbildung zeigt beispielhaft einen PINS Anflug.

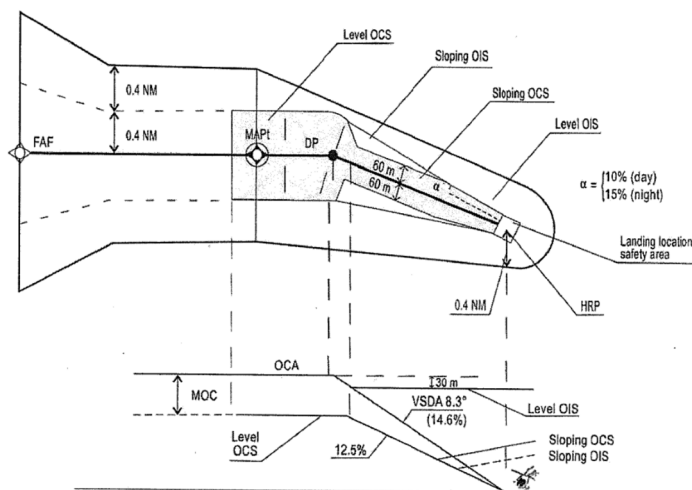
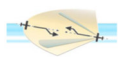


Abbildung 3: PINS Anflug



Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	15 / 76



Die Verfahrenserstellung für PINS nach PANSOPs berücksichtigt die bekannten festen Hindernisse und die Luftraumstruktur für die Berechnung der nötigen Freiflächen.

Im Umfeld der Helikopter Plattformen muss jedoch mit weiteren Luft- oder Wasserfahrzeugen gerechnet werden. Besonders in der Umgebung von Windenergieanlagen ist mit Aktivität von UAVs zur Überwachung der Anlagen sowie beweglichen Hindernissen - z.B.: Schiffe, autonome Wasserfahrzeuge – zu rechnen.

Diese Unwägbarkeiten erschweren derzeit eine positive Sicherheitsbewertung für PINS im Offshore Bereich.

Ein Zielsystem, welches in verschiedenen Betriebsarten - Wetter, Air to Ground Radar zur Entdeckung von festen oder beweglichen Hindernissen am Boden sowie Sense and Avoid von anderen Luftfahrzeugen - einen sicheren Betrieb bei Schlechtwetter zulässt, erhöht die Akzeptanz zukünftiger Verfahren und auch die Wirtschaftlichkeit in diesem Wachstumsmarkt.

3.1.1.3 Szenario 3: Detect and Avoid für Unmanned Cargo

Während die Szenarien für Single Pilot Operations von aktuell durchgeführten Szenarien abgeleitet werden können, können für den zukünftigen Betrieb von unbemannten Transportflugzeugen nur Annahmen getroffen werden. Diese Annahmen wurden im Rahmen des Arbeitspakets entwickelt.

Es wird angenommen, dass kleine bis mittlere unbemannte Transportflugzeuge in den Lufträumen D und E unter IFR betrieben werden. Das KOKO2 Detect and Avoid System soll alle zur Kollisionsvermeidung notwendigen Funktionen übernehmen. Ein parallelbetrieb des KOKO2 Systems zu einem TCAS II wie im bemannten Fall soll im unbemannten Fall für den KOKO 2 Demonstrator nicht erfolgen.

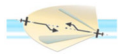
Die Detektion der Intruder erfolgt über Radar und ADS-B. ADS-B Detektionen werden vom Radar validiert.

Das unbemannte Transportflugzeug ist mit einem Mode S Transponder ausgerüstet. Intruder mit TCAS oder einem anderen ACAS werden dem unbemannten Transportflugzeug nach ACAS Regeln ausweichen. Das Ausweichmanöver der Plattform muss mit diesem Manöver kompatibel sein.

Im Luftraum E muss mit nicht-kooperativen Intrudern, die nach VFR Regeln unterwegs sind gerechnet werden. Diesen Intrudern muss das unbemannte Transportflugzeug nach den entsprechenden Regeln der Luft-VO [3] ausweichen.

Der Flug wird von der Flugsicherung wie ein bemannter Flug überwacht werden. Der Remote Pilot steht über geeignete Kommunikationswege mit der Flugsicherung in Kontakt.

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	16 / 76



Dem Remote Pilot werden Alarme mit einem von der Standardisierung vorgegebenen Zeit vor der Verletzung „Remain Well Clear“ angezeigt, die es erlaubt eine Kommunikation mit ATC über die Freigabe eines Ausweichflugpfades zu bekommen.

Dem Remote Pilot werden Collision Avoidance Alarme und eine Ausweichtrajektorie bei einer drohenden Verletzung des Collision Volumes angezeigt. Falls der Remote Pilot die Ausweichtrajektorie bestätigt, wird sie direkt auf das FMS geladen und ausgeführt.

Der Remote Pilot kann jeder Zeit manuell in die Flugsteuerung eingreifen.

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	17 / 76

3.1.2 AP 1.2 System Definition

Ziel dieses Arbeitspakets war die Definition des KOKO 2 Systems auf Basis des Concepts of Operation.

Zu diesem Zweck wurden

- Anforderungen an das KoKo II-System definiert,
- eine Architektur zusammen mit den internen und externen Schnittstellen ausgearbeitet,
- und Anforderungen an die Segmente abgeleitet.

Ausgehend von den Anforderungen aus den CONOPS und den Erfahrungen aus dem Projekt ProSA-n wurde die Systemarchitektur für das KOKO 2 DAA System entwickelt. In früheren Entwürfen zur Systemarchitektur war neben dem Detect and Avoid Radar auch ein Elektro-Optischer (EO) Sensor zur Erkennung von nicht-kooperativen Intrudern vorgesehen. Die Fusion von Tracks des EO Sensors mit denen des Radars verspricht in der Theorie sehr genaue Tracks. Die Auswertung der Versuche aus dem Projekt ProSA-n hat jedoch gezeigt, dass die im Standard DO-366 [10] geforderten Genauigkeiten für die Detektion von nicht-kooperativen Intrudern auch mit einem Radar alleine und ohne EO Sensor erreicht werden können. Nachdem sich die Fa. Diehl auch aus dem KOKO 2 Projekt zurückgezogen hat, wird der EO Sensor nicht mehr als Sensor für nicht-kooperative Ziele genutzt werden. Die Datenfusion hat in der aktuellen Architektur die Aufgabe die Detektionen von Radar und ADS-B zu assoziieren, um dem Piloten ein konsistentes Traffic Situation Picture zu liefern.

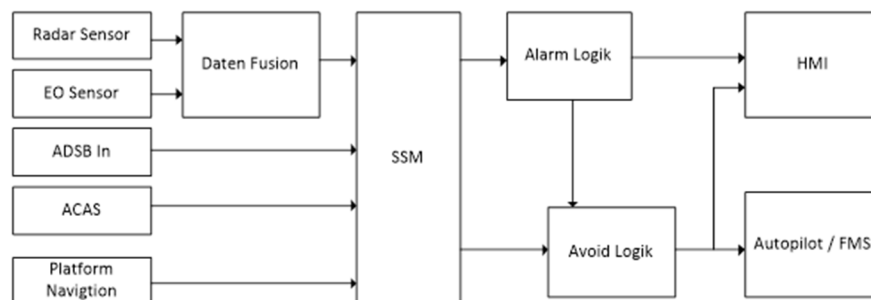


Abbildung 4: KOKO 2 Systemarchitektur

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	18 / 76

3.1.3 AP 1.3 Simulation

Ziel des Arbeitspakets war die Konzeption und Implementierung einer Simulationsumgebung für das KOKO 2 Detect and Avoid System.

Der Einsatz von Simulationen ist essenziell bei der Entwicklung und beim Nachweis der Anforderungen eines Detect and Avoid Systems da die für den statistischen Nachweis erforderlichen Flugstunden nicht erbracht werden können.

Im Vorhaben KOKO 2 wurden verschiedene Simulationsumgebungen aufgebaut:

- Eine System Engineering Simulation auf Basis des SW Packets MATLAB / Simulink
- Komponenten zur Verbindung dieser Simulation mit dem GECO Simulator des DLR
- Eine Simulationsumgebung zum Abspielen von Flugversuchsdaten

3.1.3.1 MBSE Simulation

Die folgende Abbildung zeigt das Model Based System Engineering Modell des KOKO 2 Systems mit der Simulation der Schnittstellen zum Flugversuchsträger. Die Sensoren Radar und ADS-B wurden als Modelle realisiert. Die Schnittstelle zum FMS der Do 228 wurde als Verhaltensmodell nachgebildet. Der Avoid Algorithmus wurde im Main Computer Modell modelliert. Aus dem Modell wurde nach dem Test in der Simulation C-Code generiert, der dann ohne weitere Tests direkt im Demonstrator verwendet werden konnte.

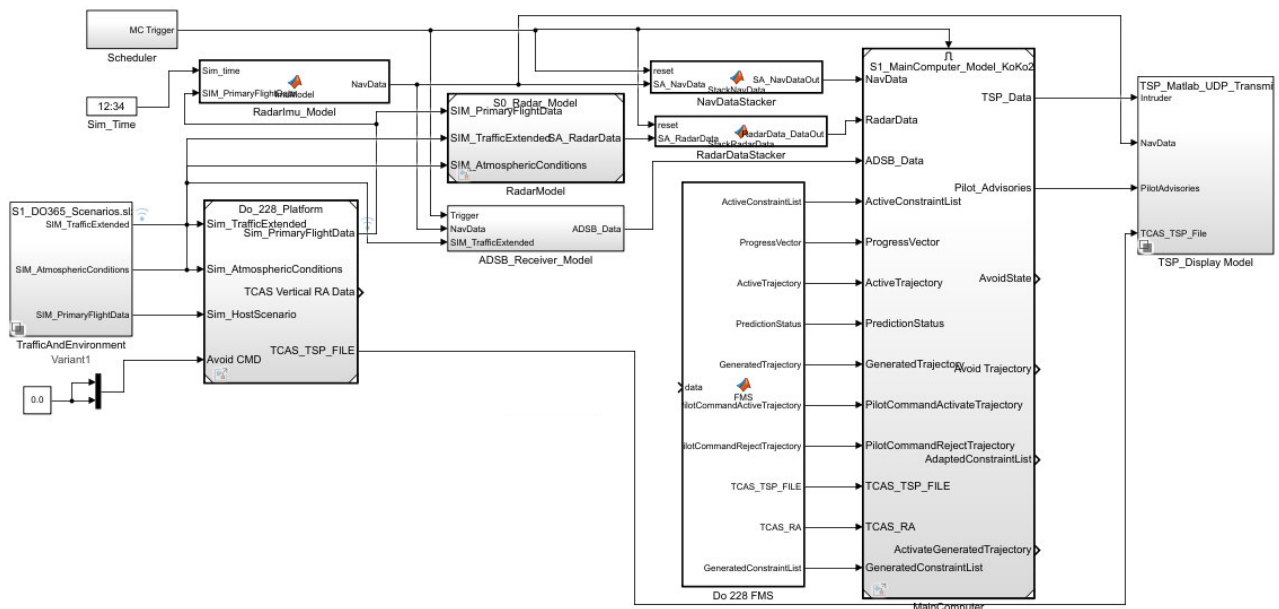


Abbildung 5: MBSE Modell

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	19 / 76

3.1.3.2 Pilot in the Loop Simulation

Weitere Tests des KOKO 2 Detect and Avoid Systems sollten als sog. „Pilot in the Loop“ Simulationen stattfinden, um den Nutzen des Systems für den Piloten zu untersuchen. Die „Pilot in The Loop“ Simulationen wurden vor Beginn der Flugtests bei DLR in Braunschweig durchgeführt. Bedingt durch die Einschränkungen der Corona Pandemie konnten die Tests nur unter Einhaltung strenger Abstandsregeln im GECO Simulator durchgeführt werden. Der ursprünglich geplante Einsatz von mehreren Piloten zur Bewertung des Systems war nicht möglich.

In der GECO Simulation wurde auch die Schnittstelle des KOKO 2 Systems zum FMS der Do 228 integriert und getestet. Weitere Informationen zu diesen Tests finden sich im Abschnitt 3.1.12. Die folgende Abbildung 6 zeigt das Systemkonzept der „Pilot in the Loop“ Simulation. Das KOKO 2 System wird über den sog. Data Pool an den GECO Simulator angeschlossen. Der Data Pool ist eine DLR-Software, die den flexiblen Austausch von Daten zwischen verschiedenen Simulationssystemen und Avionik Komponenten erlaubt. Systeme melden sich am Data Pool an und können Daten einspeisen. Der Data Pool verteilt diese Daten dann an andere Systeme, die mit diesen Daten weiterarbeiten. Die Data Pool Schnittstelle des GECO Simulators steht in der gleichen Form auch im Testflugzeug als Schnittstelle zum FMS zur Verfügung.

Die folgende Abbildung zeigt die wesentlichen Teile der „Pilot in the Loop“ Simulation. Die gelben Teile wurden während des Vorhabens bei Hensoldt und den UAN TU Braunschweig entwickelt.

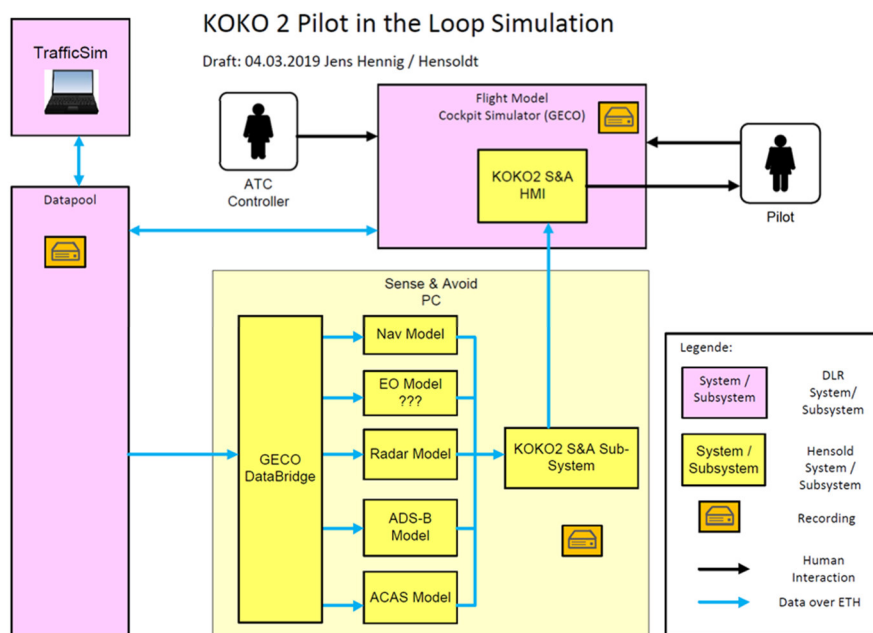


Abbildung 6: Pilot in the Loop Simulation

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	20 / 76

3.1.3.3 Simulation mit Flugtestdaten

In der Simulationsumgebung zum Abspielen der im Flugversuch gewonnenen Aufzeichnungen der Flugpfade wird das Modell des Main Computers, das die Komponenten SSM und Avoid enthält, in ein separates Simulink Modell eingebaut.

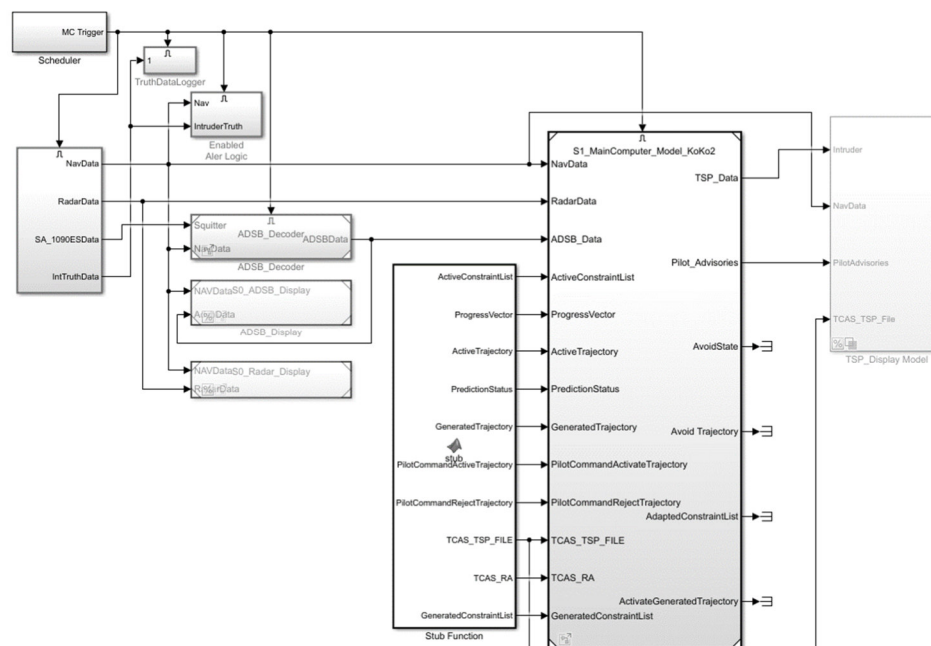


Abbildung 7: Simulation mit Flugversuchsdaten

3.1.4 AP 1.4 Validation CONOPS

Während im AP 1.3 die Simulation des Single Pilot Cockpit Systems im Generic Cockpitsimulator (GECO) der DLR im Vordergrund stand, sollen in diesem Arbeitspaket die Aspekte der Integration von Unmanned Transport Luftfahrzeugen in den allgemeinen Luftraum untersucht werden. Um eine realistische Simulation des Flugverkehrs zu ermöglichen, wird ein sog. Encounter Modell des Luftraums benötigt. Aus dem Encounter Modell können beliebig viele Szenarien generiert werden, mit denen das DAA System getestet werden kann. Für die weitere Entwicklung des DAA Systems bei Hensoldt werden diese Szenarien benötigt. Im Rahmen des Vorhabens wurde ein Encounter Modell von EUROCONTROL implementiert. Das Modell kann als Simulink Komponente in die MBSE Simulationsumgebung integriert werden.

Titel: **Schlussbericht**

Cage Code:

D1901

Datum:

28.03.2023

Dokument Identifikation:

1309-A-00016A00 EDO R01

Version:

01

Seite

21 / 76

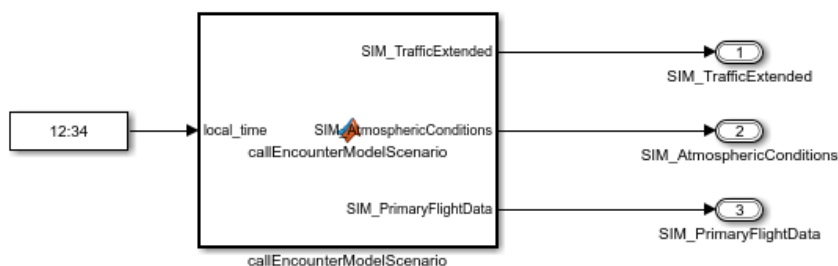


Abbildung 8: Encounter Model MBSE Block

Im Vorfeld der Flugversuche wurden verschiedene Encounter aus dem Simulationsmodell simuliert, um die Funktion des KOKO 2 DAA Systems zu testen.

3.1.5 AP 2.1 Radar Systems Engineering

Ziel dieses Arbeitspakets war die Erarbeitung von Systemdokumenten auf Basis der Anforderungen an das Segment S&A-Radar.

Ergebnisse dieses Arbeitspakets sind

- Radar-Systemanforderungen
- Radar-Konzept
- Radar-Architektur und Interfaces

Im Rahmen des Vorhabens wurde im Arbeitspaket Radar Systems Engineering kontinuierlich an der Weiterentwicklung des DAA Radars gearbeitet. Aus den Anforderungen die im Vorhaben selber sowie aus den Anforderungen, die sich aus der Mitarbeit in den Gremien zur Standardisierung ergaben, wurden die Radarkonzepte weiter entwickelt. Die Ergebnisse aus dem AP Radar System Engineering ermöglichen den Aufbau eines neuen DAA Radars, welches nahe an der Produktreife steht. Die folgende Abbildung zeigt ein Modell des neuen Radars, welches auf Basis der im AP gewonnenen Erkenntnisse in der Entwicklung ist.

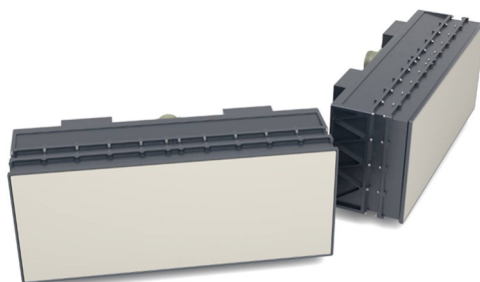


Abbildung 9: DAA Radar in Zieltechnologie

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	22 / 76

3.1.5.1 Radar Systemanforderungen

3.1.5.1.1 DAA Mode

Die Radar Systemanforderungen wurden aus den aktuellen Projekten zur Standardisierung abgeleitet und in Simulationen mit dem MBSE Modell für KOKO 2 validiert.

Die Radarreichweite wird definiert über die Fähigkeit mit 99% Wahrscheinlichkeit einen Intruder Track aufzubauen, der in das Überwachungsvolumen des Radars einfliegt.

Das Überwachungsvolumen wird durch eine äußere und eine innere Reichweite sowie durch eine horizontale Abdeckung (Azimut) und eine vertikale Abdeckung (Elevation) bestimmt.

Die äußere Reichweite beträgt:

- Für kleine 1m² RCS Ziele 10 km
- Für mittlere 2 m² RCS Ziele 11 km
- Für große 4 m² RCS Ziele 12,4 km

Die horizontale Abdeckung wird abgeleitet von der Pilotensicht aus dem Cockpit mit +/- 110° festgelegt

Die Vertikale Abdeckung wird mit +/-15° festgelegt.

3.1.5.1.2 Wetterdetektion und Ground Mapping

Die Anforderungen an die Wetterdetektionsfunktion und das Ground Mapping wurden nach RTCA DO-220A [5] spezifiziert. Diese Anforderungen betreffen prinzipiell nur die Performance des Radars, ein bestimmtes Volumenziel muss somit mindestens in einer bestimmten Reichweite detektierbar sein. Auf einem Display (Abbildung 10) soll nur die reine Intensität des detektierten Ziels über Azimut ($\pm 40^\circ$) und Reichweite angezeigt werden. Je nach Flugzeugklasse betragen die instrumentierten Reichweiten zwischen 25 und 150nm.

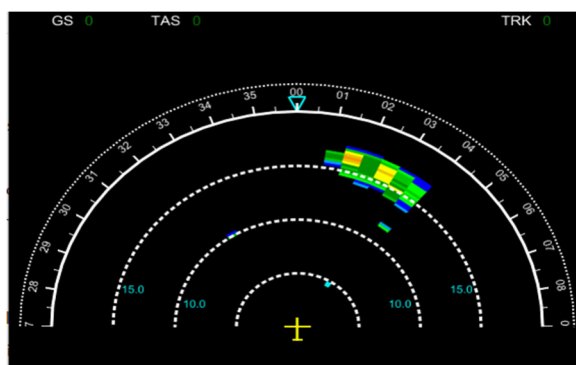


Abbildung 10: Wetterdetektionsdisplay

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	23 / 76

Über den in der DO-220A beschriebenen Performance Index (PI) lässt sich die minimal zu detektierende Leistung berechnen. Für ein Klasse 6 Flugzeug (650 kt Geschwindigkeit) muss ein 50 dBZ Volumenziel in mindestens 150nm Entfernung noch erkennbar sein, wie in Abbildung 11 dargestellt.

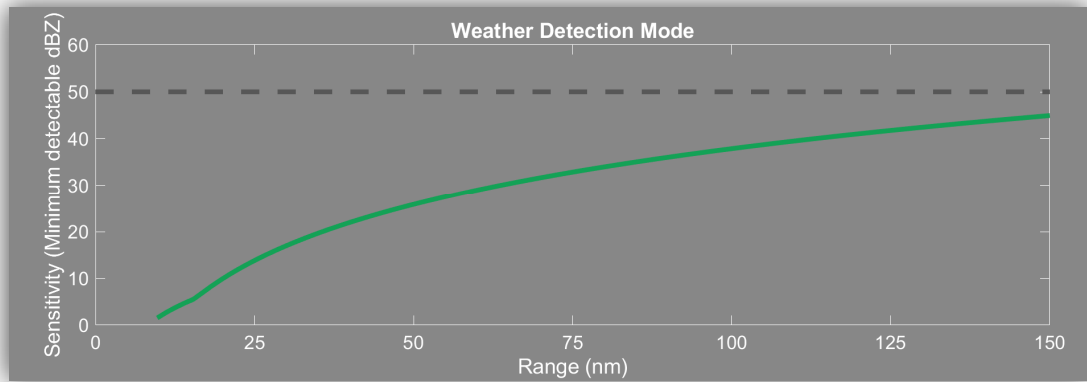


Abbildung 11: Performance Wetterdetektionsmode im D&A Radardemonstrator

3.1.6 AP 2.2 S&A Moden

Ziel dieses Arbeitspakets war die Erarbeitung geeigneter Radar-Moden für die Funktion Sense & Avoid auf Basis der Anforderungen aus dem AP 1.2, sowie die Implementierung auf dem S&A-Radardemonstrator

Ein Active Electronically Scanned Array (AESA) Radar kann seine Vorteile gegen über konventionell mechanisch geschwenkten Radaren besonders dann ausspielen, wenn das Radar verschiedene Funktionen übernehmen soll. Im Falle des KOKO 2 DAA Radars werden die Funktionen Air-to-Air, Wetter und Ground implementiert. Das Radar Ressource Management steuert den Radarstrahl nach Priorisierungsregeln so, dass alle Radar Funktionen optimal bedient werden. Innerhalb des Air-to-Air Modes kann es vorteilhaft sein, bestimmte Ziele länger zu beleuchten, um eine genauere Positionsbestimmung zu erhalten. Die im September 2020 erschienene RTCA Norm DO-366A [10] für Air-to-Air Traffic Surveillance Radare fordert eine erhöhte Track Genauigkeit für Ziele, die ein erhöhtes Konfliktpotenzial für Kollisionen haben. Diese „High-Priority-Track“ Funktion wurde im KOKO 2 Detect and Avoid Radar untersucht und implementiert. Die neue Funktion ist in das Radar Ressource Management für den Air-to-Air Mode eingebunden, dessen Algorithmus in der folgenden Abbildung skizziert ist.

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	24 / 76

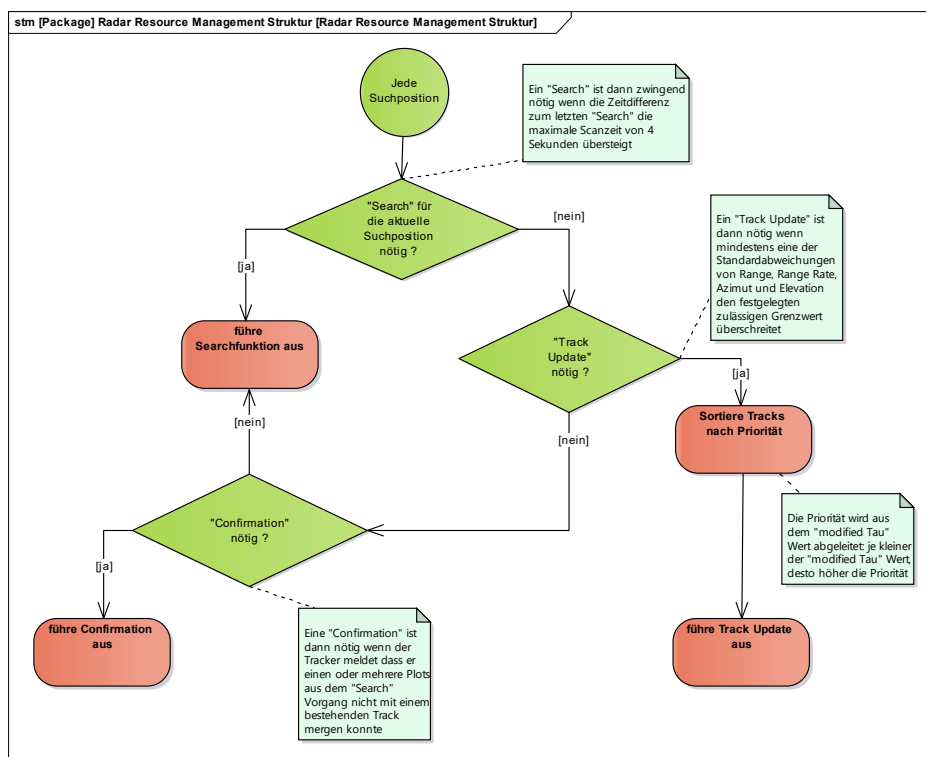
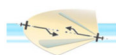


Abbildung 12: Air-to-Air Radar Ressource Management

Der Air-to-Air Mode des KoKo 2 DAA Radars führt grundsätzlich drei Funktionen aus. Die Search Funktion sucht nach Zielen, die noch nicht vom Tracker verfolgt werden. Ein Search Beam ist immer dann notwendig, wenn die entsprechende Position in den letzten 4 Sekunden nicht abgesucht wurde.

Die „Confirm“ Funktion beleuchtet einen Bereich, für den es Radar-Reflektionen gibt, die keinem Ziel zugeordnet werden können. Damit kann die Zeit von der ersten Detektion bis zum Aufbau eines Tracks verringert werden.

Die Track-Update Funktion beleuchtet ein Ziel, das vom Tracker bereits verfolgt wird und für das der Tracker ein Update angefordert hat. Der Tracker arbeitet bei der Verfolgung der Ziele mit einem Kalman-Filter. Wenn die Abschätzung der Standardabweichung der Positionsbestimmung einen bestimmten Grenzwert überschreitet, wird vom Tracker eine neue Messung angefordert. Mit diesem Verfahren können die Radar Ressourcen optimal zwischen manövrierenden Zielen, die eine höhere Updaterate benötigen und nicht-manövrierenden Zielen verteilt werden. Mit einer erhöhten Updaterate kann die Genauigkeit der Tracks erhöht werden, was für die Detect and Avoid Funktion des Gesamtsystem vorteilhaft ist, da die Zeit bis zu einer potenziellen Kollision genauer bestimmt werden kann.

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	25 / 76

Die Radar Tracks werden über den gleichen Parameter priorisiert, der auch zur Auslösung von Alarmen vor möglichen Kollisionen für den Piloten verwendet wird, dem sogenannten „modified-Tau“, das wie folgt definiert ist DO-366A [10]:

$$\tau_{mod} = \frac{-(r^2 - DMOD^2)}{r \dot{r}}$$

Ziele mit einem $\tau_{mod} < 85$ Sekunden bei DMOD = 4000 ft bekommen Track Updates mit einer erhöhten Priorität. Dieser Wert wurde aus dem Standard DO-366A [10] abgeleitet und soll in der Auswertung der Flugversuche für das KoKo 2 DAA System validiert werden.

3.1.7 AP 2.3 S&A Radar Tracker

Im AP 2.3 wurde der Einsatz von MBSE Techniken zur Entwicklung eines zertifizierbaren Radar Tracker untersucht. Dies sollte auf Basis der Produkte MATLAB / Simulink von Mathworks erfolgen. Die Produkte von Matlab und Simulink und die zugehörigen Tools zur Verifikation der Modelle wurden an Fallbeispielen aus der KOKO 2 DAA Entwicklung untersucht. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Anwendung der Produkte zur zertifizierbaren Code-Generierung große Lücken aufweist, die im Vorhaben nicht geschlossen werden konnten.

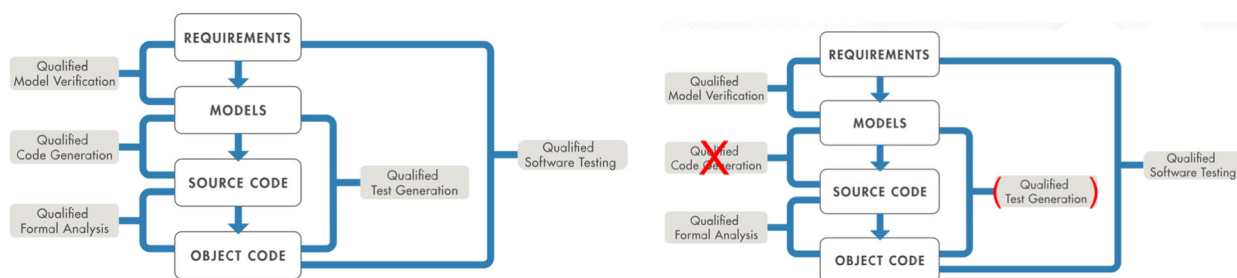


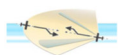
Abbildung 13: Lücken in der Toolchaine zur Codegenerierung aus dem MBSE Model

Abbildung 13 zeigt die zur Codegenerierung untersuchte Toolchaine. Die Ergebnisse der Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Die MathWorks Tools sind nur eingeschränkt für die Entwicklung von Tracking Software nach DO-178C geeignet. Die Nutzung von Simulink, Simulink Design Verifier, Simulink Test, Embedded Coder und Simulink Code Inspector bringt eine Vielzahl an Problemen und Einschränkungen mit sich, die zu Lasten der Kosten-Nutzen-Rechnung gehen.

Eine der Hauptursachen, für die im Zuge der Analyse aufgedeckten Probleme ist im Hauptanwendungsgebiet von Simulink zu suchen. Simulink ist vor allem im Bereich der Regelungstechnik weit verbreitet. Entsprechend ist Simulink vor allem auf die Arbeit mit einer Vielzahl relativ einfach gehaltener Datenstrukturen, wie z.B. Eingangsdaten von Lagesensoren, ausgelegt. Die Erstellung von Modellen erfolgt meist, indem Simulink-Blöcke zu einem (geschlossenen) Regelkreis zusammengefügt werden. Im Gegensatz dazu müssen im Bereich des Radartrackings vergleichsweise komplexe Datenstrukturen über längere Zeit gespeichert und verarbeitet werden. Die in Simulink enthaltenen Blöcke sind hierfür nur beschränkt ausgelegt. Entsprechend ist ein Großteil der Algorithmik und Datenhaltung in Form von Matlab Funktionen

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	26 / 76



umzusetzen. Diese können zwar ohne weiteres in einem Simulink Modell aufgerufen werden, führen jedoch an verschiedenen Stellen des Entwicklungsprozesses zu Problemen, da keine vollständige Unterstützung durch die MathWorks Tools gegeben ist.

Im Folgenden werden die wichtigsten Argumente gegen die Nutzung von MathWorks Tools für die Entwicklung von Tracking Software genannt:

Die Nutzung von Simulink Test ist nur eingeschränkt möglich, da Simulink Test nicht voll mit den gegebenen Datenstrukturen kompatibel ist. Entsprechend können die auf Modellebene durchgeführten Tests nicht für Software und Hardware in the Loop Tests wiederverwertet werden. Weiterhin kann für die Verarbeitung der Ein- und Ausgangsdaten des Trackers nicht auf die vorgefertigten Simulink Test Blöcke zurückgegriffen werden, was die zeitaufwändige Implementierung eigener Funktionen erfordert.

Simulink Design Verifier kann für viele mathematische Funktionen nur eingeschränkt genutzt werden. Beispiele hierfür sind Cosinus, Sinus und Wurzel Berechnungen. Werden diese Funktionen in Form von Simulink Blöcken eingesetzt, können die Probleme mit Hilfe von Block-Stubbing umgangen werden. Für Matlab Funktionen ist dies nicht, bzw. nur eingeschränkt möglich.

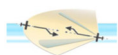
Das Tracing zwischen generiertem C Source Code und Matlab Code ist nur bis auf Modell Ebene detailliert möglich. Da ein Großteil der Funktionalität in Matlab Funktionen umgesetzt wurden, welche im Design Modell aufgerufen werden, kann nicht garantiert werden, dass die grobe Granularität des Tracings den Anforderungen der Zertifizierungsbehörde genügen.

Im Zuge dieser Arbeit konnte keine Implementierung der Datenhaltung erstellt werden, welche die benötigte Variabilität mit den Kompatibilitätsanforderungen des Simulink Code Inspectors vereinigen kann. Entsprechend ist somit entweder bei der gesamten Entwicklung mit deutlichem Pflegeaufwand einer suboptimalen Datenstruktur zu rechnen oder aber der Simulink Code Inspector kann nicht eingesetzt werden, was eine manuelle Verifikation des erstellten Source Code gegen das Design Modell erfordert. Eine manuelle Verifikation ist auf Grund des hohen Zeit- und Kostenaufwands nicht zielführend!

Auf Grund der genannten Probleme ist an vielen Stellen mit deutlichem Zusatzaufwand zu rechnen. Entsprechend bietet die Entwicklung mit diesen Tools am Ende, wenn überhaupt, nur einen sehr geringen Zeitvorteil gegenüber der Nutzung „klassischer“ Methoden. Zusätzlich entstehen jedoch hohe Lizenzkosten.

Für DO-178C Entwicklungen in C/C++ bietet sich, unabhängig davon, die Nutzung der Polyspace Tools an, da diese auch zur Prüfung von selbst geschriebenem C Code eingesetzt werden können.

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	27 / 76



3.1.8 AP 2.4 Wettermoden

Ziel dieses Arbeitspakets war die Erarbeitung und Implementierung geeigneter Radar-Moden für Wetter-Radar-Funktionen

- Wetterdetektion,
- Turbulenzdetektion
- und Scherwind-Detektion

3.1.8.1 Definition der Wettermoden

Die Modendefinition zur Abdeckung der Wetterfunktionalitäten gestaltete sich als Herausforderung, da verschiedene Einschränkungen beachtet werden mussten. Zum einen soll jede Funktion einen auf deren Anforderungen abgestimmten Mode erhalten, zum Anderen steht für den Betrieb von Wetterfunktionen nur wenig Zeit (ca. 10 %) im gesamten Ressourcenmanagement des Radarsystems zur Verfügung.

Aus diesem Grund wurden mehrere Modi und Pulsconfigurationen entwickelt, die in den Flugversuchen auch parallel getestet wurden. Generell wird es einen Langpuls geben, der die Wetterintensitätsfunktion abbildet und einen Kurzpuls, der den Blindbereich des Langpulses abdeckt und gleichzeitig die Turbulenzdetektion übernehmen kann. Für Scherwinddetektion wird es einen eigenen Puls geben, da die Scherwindfunktion nur bei Start und Landung aktiv sein soll. Die Aufgaben der beiden verschiedenen Pulsarten sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Generell gilt, dass Wind und Turbulenzen vom Radar nur detektiert werden können, wenn in der Luft größere Partikel, wie z.B. Tropfen enthalten sind, weswegen Turbulenz- und Scherwindgebiete feucht sein müssen.

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	28 / 76

Tabelle 1: Puls/Wetterfunktion

Puls	Langpuls	Kurzpuls
Wetterdetektion	Hohe Reichweite	Abdeckung Blindzone / Kurze Reichweite
Air to Ground Mode / Ground Mapping	Hohe Reichweite	Abdeckung Blindzone / Kurze Reichweite
Turbulenzdetektion	-	X
Scherwinddetektion	-	Alternative Konfiguration

In Tabelle 2 wird die Pulsconfiguration gezeigt welche, während der Detect & Avoid Szenarien mit begrenzten Ressourcen gelaufen ist. Bis auf kleinere Anpassungen bei der Wahl der eindeutigen Reichweite sind „Langpuls 1“ und „Kurzpuls“ die zukünftig verwendeten Modi. Langpuls 2 ist zu Test- und Validierungszwecken in der Konfiguration enthalten.

Tabelle 2: Konfiguration während Avoid Szenarien

Standardkonfiguration	Langpuls 1	Langpuls 2	Kurzpuls
Pulslänge	55,68 µs	55,68 µs	6,08 µs
Entfernungsauflösung	449,7 m = 0,243 NM	449,7 = 0,243 NM	911,4 m = 0,492 NM
Eindeutige Reichweite	222,28 km = 120 NM	111,14 km = 60 NM	27,82 km = 15 NM
Eindeutige Geschwindigkeit	+/- 5,24 m/s	+/- 10,47 m/s	+/- 41,84 m/s
Anzahl kohärenter Pulse	64	64	128

Die Ressourcenverteilung zwischen den einzelnen Radarmoden sieht wie in Abbildung 14: Ressourcenverteilung D&A Radar Demonstrator dargestellt aus. Dort sind die begrenzten Ressourcen für die Wetterfunktion (gelb, blau und magenta) deutlich ersichtlich.

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	29 / 76

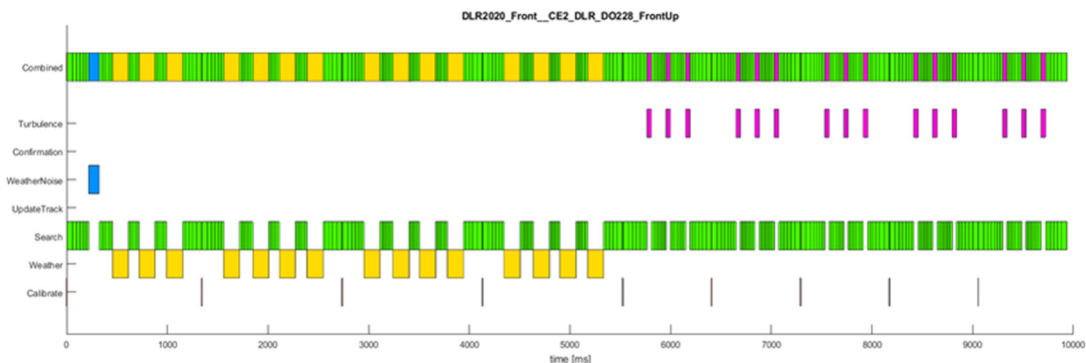


Abbildung 14: Ressourcenverteilung D&A Radar Demonstrator

Des Weiteren wurde an Flugtagen mit ausgeprägten Regenfronten und klaren Wettersituationen das Radar für eine reine Wetteraufzeichnung ohne D&A Mode genutzt. Diese in Tabelle 3 und Tabelle 4 beschriebene Konfiguration enthielt zwei Bursts im Langpuls und sechs Bursts im Kurzpuls. Im Langpuls wurde eine möglichst hohe Anzahl kohärenter Pulse benutzt, um Auswertungen zur Bestimmung der bestmöglichen Anzahl an Pulsen zu ermöglichen. Im Kurzpuls wurden mehrere Pulswiederholfrequenzen getestet, um in Zukunft die beste Konfiguration zwischen eindeutiger Reichweite und eindeutiger Geschwindigkeit finden zu können. Ebenso wurden Phasenmodulationen zwischen den Pulsen getestet, die es ermöglichen sollen, Überreichweiten bei Bursts mit geringer eindeutiger Reichweite zu identifizieren oder Wetter-/Turbulenzphänomene von Clutter zu unterscheiden.

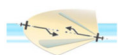
Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	30 / 76

Tabelle 3: Konfiguration während Wetterszenarien 1

Wetterkonfiguration	Langpuls 1	Langpuls 2	Kurzpuls 1	Kurzpuls 2
Pulslänge	55,68 µs	55,68 µs	6,08 µs	6,08 µs
Entfernungsauflösung	449,7 m = 0,243 NM	449,7 = 0,243 NM	911,4 m = 0,492 NM	911,4 m = 0,492 NM
Eindeutige Reichweite	222,28 km = 120 NM	111,14 km = 60 NM	27,82 km = 15 NM	27,82 km = 15 NM
Eindeutige Geschwindigkeit	+/- 5,24 m/s	+/- 10,47 m/s	+/- 41,84 m/s	+/- 41,84 m/s
Anzahl kohärenter Pulse	128	128	256	256
Phasenmodulation	Nein	Nein	Nein	Ja

Tabelle 4: Konfiguration während Wetterszenarien 2

Wetterkonfiguration	Kurzpuls 3	Kurzpuls 4	Kurzpuls 5	Kurzpuls 6
Pulslänge	6,08 µs	6,08 µs	6,08 µs	6,08 µs
Entfernungsauflösung	911,4 m = 0,492 NM	911,4 m = 0,492 NM	911,4 m = 0,492 NM	911,4 m = 0,492 NM
Eindeutige Reichweite	74,83 km = 40,4 NM	10,1 km = 5,4 NM	50 km = 27 NM	10,1 km = 5,4 NM
Eindeutige Geschwindigkeit	+/- 15,55 m/s	+/- 115,54 m/s	+/- 23,26 m/s	+/- 115,54 m/s
Anzahl kohärenter Pulse	256	256	256	256
Phasenmodulation	Nein	Nein	Nein	Ja



3.1.8.2 Scherwinddetektion

Die Detektion von Scherwinden ist besonders bei Start und Landung essenziell. In Abbildung 15 ist ein solcher Wetterereignis während eines Landeanfluges visualisiert. Man spricht von

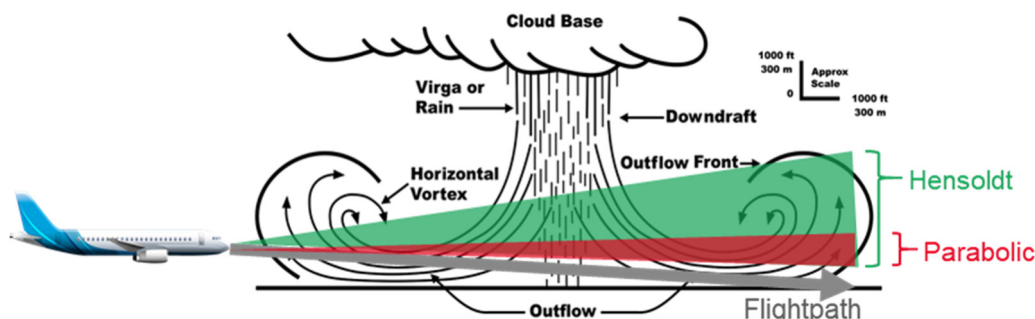


Abbildung 15: Visualisierung Scherwind Landung

Scherwinden, wenn stehende Fallwinde auf den Boden treffen und von dort reflektiert werden. Dadurch entstehen vom Radar detektierbare Winde in positiver und negativer Richtung zum Flugzeug. Die Kraft vom Fallwind Richtung Boden ist eine Maßzahl für gefährliche Scherwinde, da ein Flugzeug diese Kraft durch seine eigene Auftriebskraft kompensieren können muss, um nicht abzustürzen. Die Ausprägung der gegensätzlichen Windgeschwindigkeiten fließen in die Berechnung eines in der DO-220A [5] definierten F-Faktors ein, der als Maß zur Erzeugung einer Scherwindwarnung herangezogen wird. Da Radarsysteme keine vertikalen Windgeschwindigkeiten messen können, wird in der Formel zur Schätzung der Maßzahl die radiale Windgeschwindigkeit, aus der die horizontale Geschwindigkeit w_x und die vertikale Geschwindigkeit w_z geschätzt wird, herangezogen. Ebenso ist der F-Faktor abhängig von der Fluggeschwindigkeit v und der Schwerkraft g , daraus folgt

$$F = \frac{\dot{w}_x}{g} - \frac{w_z}{v} \quad (1)$$

Bei Überschreitung einer gewissen Größe dieser Maßzahl F , soll eine Warnung vor Scherwinden ausgegeben werden.

Für ein Radar mit den Maßen des D&A Radardemonstrators ist es eine große Herausforderung den F-Faktor richtig zu bestimmen. Physikalisch bedingt führt eine kleine Antennenapertur zu einer großen Beambreite. Eine schmale Beambreite ist wichtig, um die richtigen Geschwindigkeiten \dot{w}_x und w_z aus Formel (1) zu ermitteln. In Abbildung 15 ist dies visualisiert, der rote Kegel stellt einen Beam eines großen Parabolspiegels eines handelsüblichen Wetterradars dar, während der grüne Kegel den Beam des D&A Radardemonstrators visualisiert. Der grüne Beam ist in Elevation so breit, dass gerade bei den hinteren Entfernungstoren eine Mittelung der radialen Windgeschwindigkeit stattfindet, da die gesamten wirbelnden Rotoren erfasst werden, was zu entgegengesetzten Windgeschwindigkeiten führt. Die RTCA DO-220A spezifiziert aus diesem Grund eine maximale Beambreite von 10° in Azimut und Elevation. Die

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	32 / 76

Hensoldt Demonstrator Antenne kann dies in Elevation jedoch nicht einhalten (ca. 14° Elevation). Die Firma GAMIC GmbH hat aus diesem Grund eine Untersuchung dazu gemacht, diese ist in Abbildung 16 dargestellt. Die Darstellung links oben zeigt die Truth-Daten eines idealen Scherwinds, die anderen Darstellungen die simulierten Radardaten aus dem ADWRS. Rechts oben ist das Ergebnis mit einem 90cm Parabolspiegel zu sehen, der Scherwind wird deutlich und hochauflösend angezeigt. Die unteren beiden Bilder zeigen die simulierten Ergebnisse mit den Parametern des Radardemonstrators von Hensoldt, einmal mit simuliertem Bodenclutter (links) und ohne Clutter (rechts). Mit Bodenclutter ist der Scherwind nicht mehr in den Sensordaten zu erkennen, bei guter Entfernung des Bodenclutters kann der Scherwind jedoch auch mit dieser Antenne detektiert werden.

Simulationsbeispiel: Regenreflektivität Flughöhe 500m

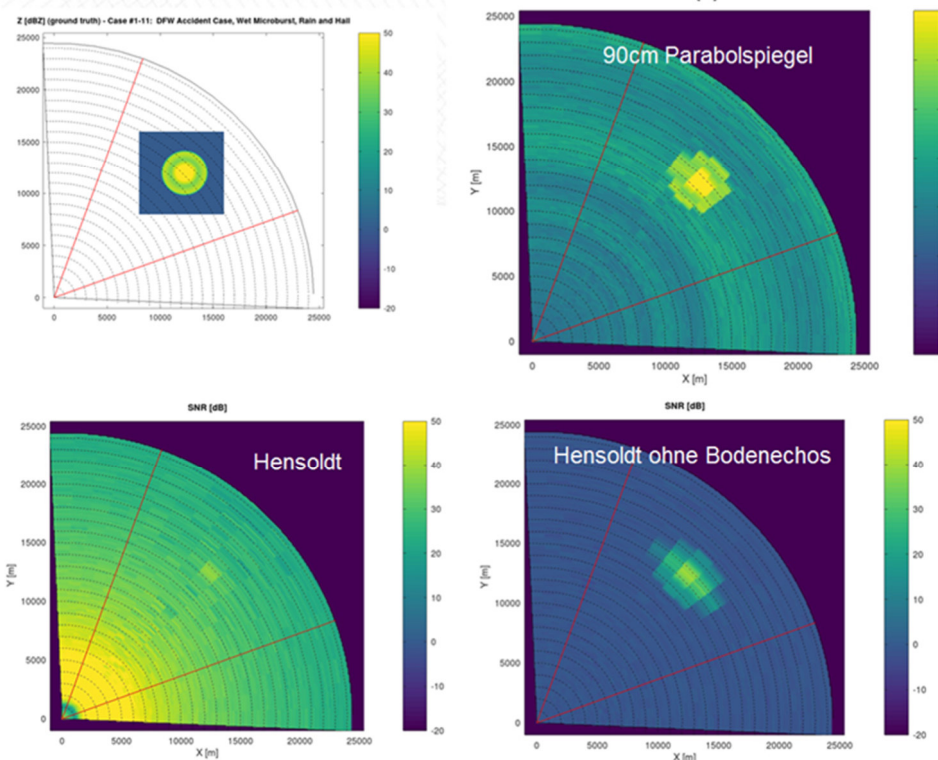


Abbildung 16: Vergleich Scherwind 90cm Parabolspiegel und Hensoldt Antenne

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	33 / 76

Ähnliche Ergebnisse zeigen sich, wenn man aus den simulierten Daten versucht, den F-Faktor zu berechnen.

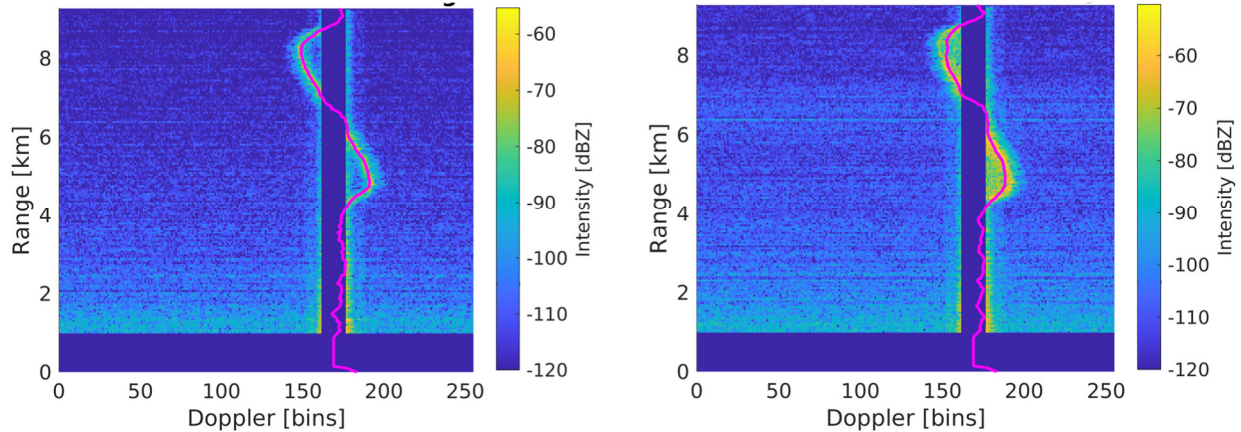


Abbildung 17: Vergleich Scherwind Range-Doppler-Matrix, 90cm Parabolspiegel (links) und Hensoldt Antenne (rechts)

Die Range-Doppler-Matrizen in Abbildung 17 zeigen, dass zwar bei der Hensoldt Antenne (rechts) die Geschwindigkeitsverteilung in den einzelnen Entfernungstoren trotz Clutterunterdrückung (blauer Balken) sehr viel breiter ist als beim Parabolspiegel (links), welcher die Signatur des Scherwindes sehr gut abbildet, jedoch wird die Ermittlung der radialen Windgeschwindigkeit (Linie, magenta) davon nur leicht beeinflusst.

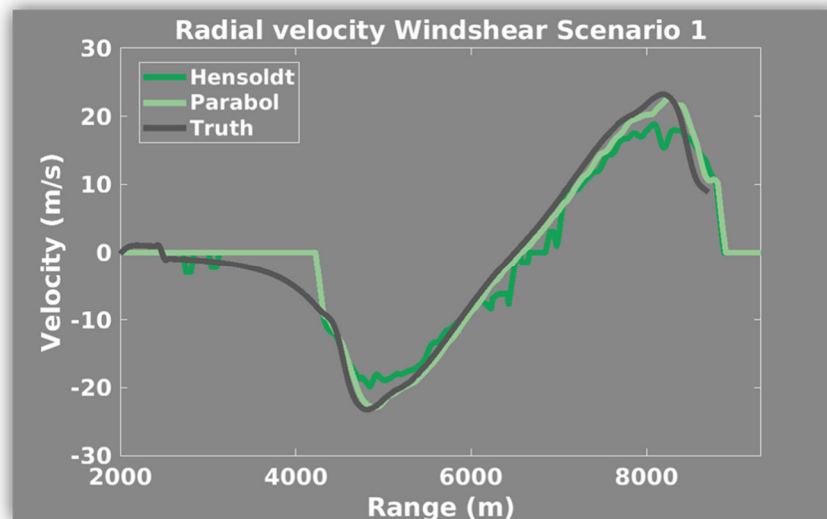


Abbildung 18: Vergleich radiale Windgeschwindigkeiten

Deutlich wird dies ebenfalls, wenn die radialen Windgeschwindigkeiten über Reichweite wie in Abbildung 18 geplottet werden. Die Truth und Parabolspiegel-Daten sind nahezu identisch, die

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	34 / 76

Daten der Hensoldt Antenne geben jedoch die Signatur des Scherwindes ebenfalls richtig wieder. Lediglich die Minimal und Maximalwerte werden durch die Mittelung der Geschwindigkeiten nicht exakt erreicht.

Rein von der Performance, ist das Hensoldt Radar in der Lage, die geforderten Scherwindereignisse zu detektieren. In der DO-220A [5] wird gefordert, dass Ziele mit einer Reflektivität ab 0 dBZ in bis zu 5nm Entfernung detektierbar sein müssen, was in Abbildung 19 gezeigt wird. Jedoch kommt es wie oben beschrieben zu Herausforderungen bei der exakten Bestimmung der radialen Geschwindigkeiten in den Scherwindereignissen. Eine Lösung dafür können Techniken wie eine intelligente Gewichtung der Geschwindigkeitsdaten oder Machine Learning sein.

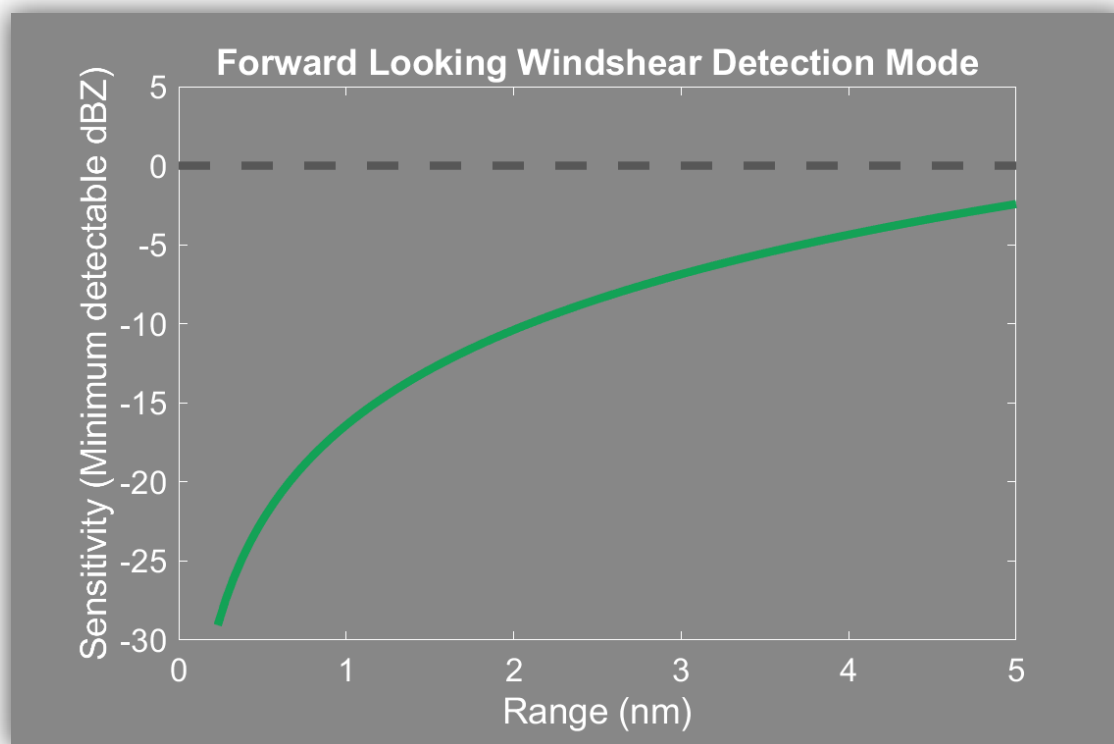


Abbildung 19: Performance Scherwindmode D&A Radardemonstrator

3.1.8.3 Turbulenzdetektion

Eine ähnliche Herausforderung lässt sich bei der Turbulenzdetektion beobachten. Auch in diesem Fall gibt es in der DO-220A [5] definierte Testszenarien für Must-Detect und Must-Not-Detect Turbulenz. Diese beiden Testfälle werden im Folgenden simulativ analysiert. Für die Ermittlung der potenziellen Gefährlichkeit von turbulenten Regengebieten wird, ähnlich wie bei den Scherwinden, eine Maßzahl $\hat{\sigma}_{\Delta n}$ definiert, die den Einfluss der vertikalen Last im Turbulenzfall auf ein Flugzeug angibt.

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	35 / 76

$$\hat{\sigma}_{\Delta n} = \left[\frac{\sigma_{\Delta n}}{\text{unit } \sigma_w} \right]_{\text{table}} \cdot \frac{[\bar{M}_2(\vec{x})]^{0.5}}{\frac{\sqrt{\langle \sigma_v^2(r) \rangle}}{\sigma}} \quad (2)$$

In Formel (2) beschreibt $\left[\frac{\sigma_{\Delta n}}{\text{unit } \sigma_w} \right]_{\text{table}}$ eine Größe, die abhängig von der Tragflächenbelastung, der Flughöhe und der Geschwindigkeit des Flugzeugs abhängt. Weiter gibt $[\bar{M}_2(\vec{x})]^{0.5}$ die spektrale Breite der Windgeschwindigkeit im Turbulenzgebiet an. Dieser Term wird aus den Radar Sensordaten berechnet. Zuletzt ist $\frac{\sqrt{\langle \sigma_v^2(r) \rangle}}{\sigma}$ ein Kompensationsfaktor, der abhängig vom verwendeten Puls ist. Überschreitet $\hat{\sigma}_{\Delta n}$ bestimmte in der DO-220A [5] definierten Werte, soll eine Turbulenzwarnung ausgegeben werden, ebenso darf keine Warnung ausgegeben werden, wenn bestimmte Werte unterschritten werden. Die spektrale Breite kann mit Schätzern aus den Intensitätsdaten, den mittleren Geschwindigkeitsdaten oder der Breite der Geschwindigkeitsverteilung ermittelt werden. Alle genannten Werte können im Signal Processing mithilfe des Pulse Pair Processing berechnet werden. Im Folgenden werden die Schätzer T0/1 (Intensität und mittlere Geschwindigkeit) und T1/2 (mittlere Geschwindigkeit und Breite der Geschwindigkeitsverteilung) gegenübergestellt.

Rein von der Performance, ist das Hensoldt Radar auch bei der Turbulenz in der Lage, die geforderten Turbulenzereignisse zu detektieren. In der DO-220A [5] wird gefordert, dass Ziele mit einer Reflektivität ab 20 dBZ in bis zu 12nm Entfernung detektierbar sein müssen. Das wird rein von der Sensitivität her mit genügend Puffer erreicht (Abbildung 20).

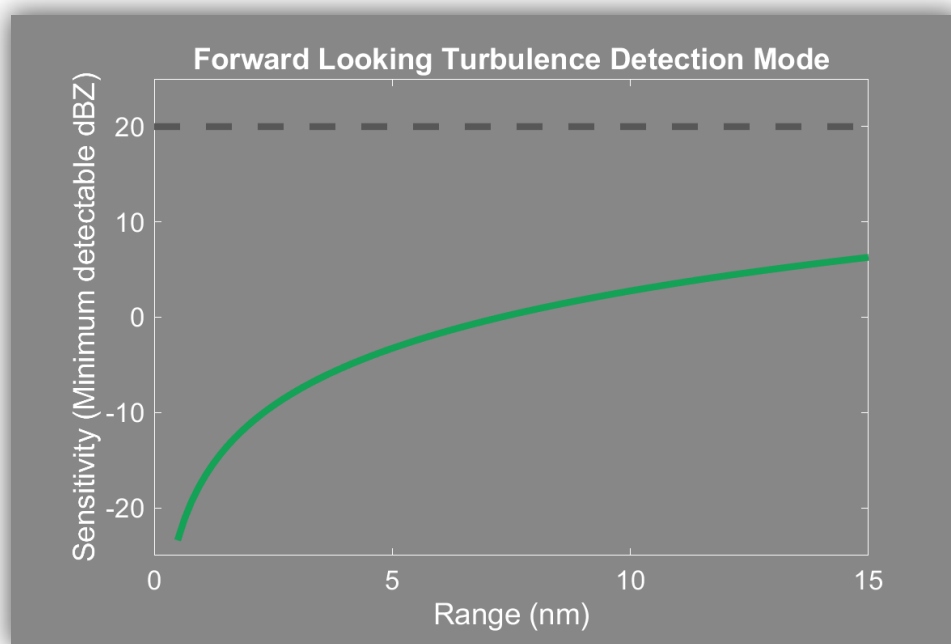


Abbildung 20: Performance Turbulenzdetektionsmode D&A Radardemonstrator

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	36 / 76

3.1.8.3.1 Must-Detect Szenario

Das Must-Detect Szenario aus der DO-220A [5] enthält ein Turbulenzgebiet in ca. 25km Entfernung vom Flugzeug. Abbildung 21 visualisiert den relevanten Bereich mit Intensitätsdaten

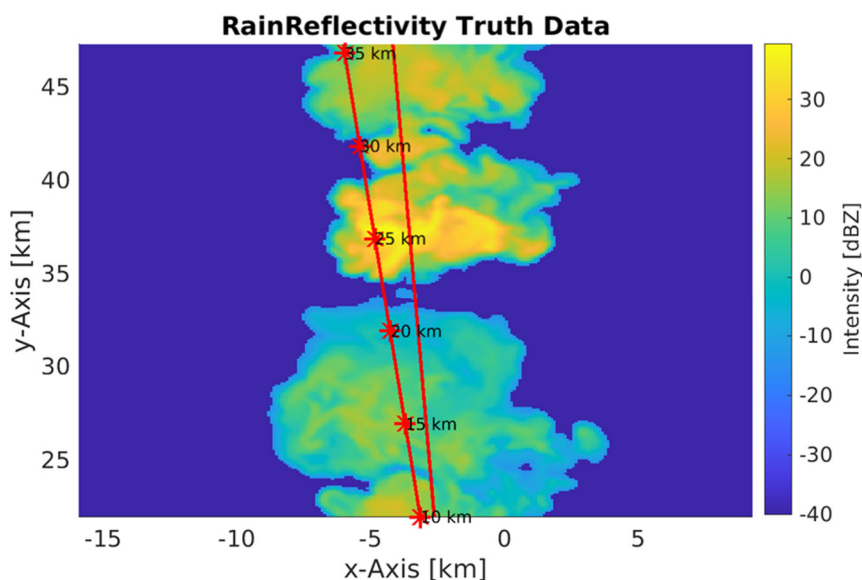


Abbildung 21: Intensitätsdaten Must-Detect-Szenario

und enthält

den Radarkegel in Rot. In der folgenden Abbildung 22 werden die Truth-Daten den Schätzern aus den Sensordaten gegenübergestellt.

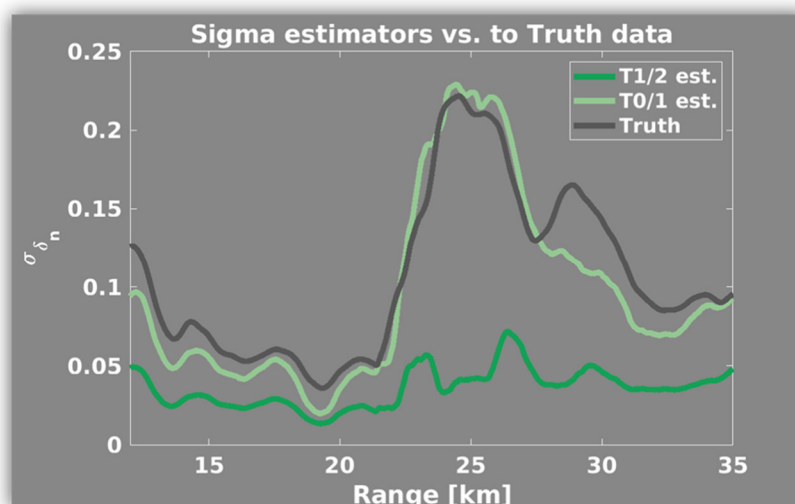


Abbildung 22: Vergleich Schätzer und Truth-Daten Must-Detect-Szenario

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	37 / 76

In der Abbildung wird deutlich, dass es einen großen Unterschied in der Qualität der Schätzer gibt. Der T0/1 Schätzer trifft relativ genau die Truth-Daten und ist in diesem Fall ein guter Indikator für die Berechnung von $\hat{\sigma}_{\Delta n}$. Der T1/2 Schätzer hingegen kann die Turbulenzsignatur bei ca. 25km nicht darstellen.

3.1.8.3.2 Must-Not-Detect Szenario

Dieselbe Auswertung kann für das zweite Szenario vorgenommen werden. In diesem Szenario liegt zwar ein Gebiet mit hoher Intensität, jedoch keinen turbulenten Winden (Abbildung 23). Auch in diesem Fall können wieder die Schätzer mit den Truth-Daten verglichen werden. Das Ergebnis ist Abbildung 24 zu entnehmen. Im Gegensatz zum Must-Detect-Szenario gibt hier der Schätzer T1/2 die Signatur am besten wieder. Das absolute Niveau ist zwar nicht exakt, dies lässt sich jedoch mit Gewichtungen ausgleichen. Außerdem ist es bei einem Must-Not-Detect-Szenario besser, wenn es eher eine Unter- als Überschätzung gibt. Schätzer T0/1 überschätzt sich doch recht signifikant in diesem Szenario in den Höchstwerten.

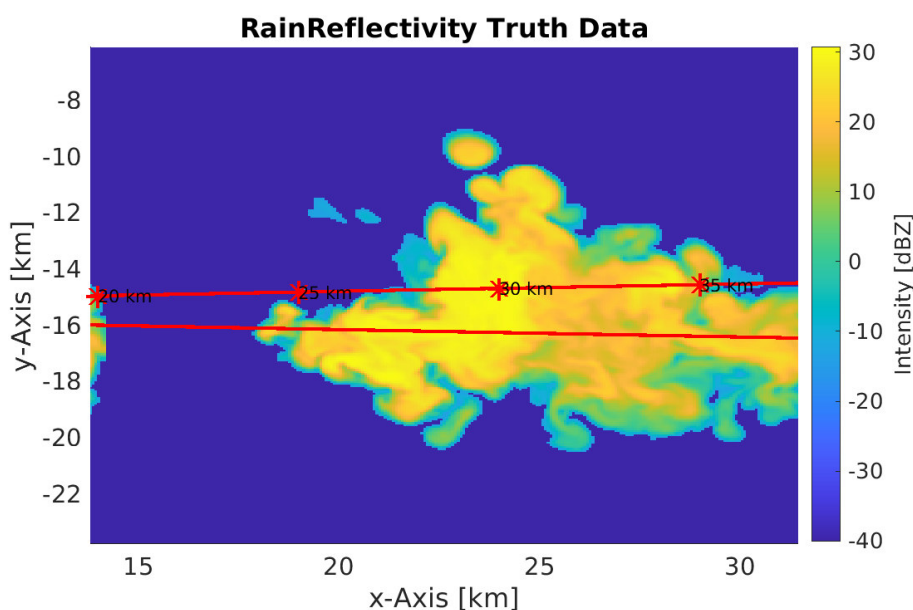


Abbildung 23: Intensitätsdaten Must-Not-Detect-Szenario

Um einen zuverlässigen Schätzer zur Ermittlung der Turbulenz bereit stellen zu können, muss eine Kombination der beiden Schätzer T0/1 und T1/2 gefunden werden. Dafür müssen jedoch mehr Daten verfügbar sein. Die DO-220A [5] stellt bedauerlicherweise nur diese beiden Szenarien zur Verfügung und in den bisherigen Flugversuchen war es Hensoldt nicht möglich Turbulenzgebiete aufzunehmen und mit Truth-Daten zu vergleichen, um die Schätzer weiter verifizieren zu können.

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	38 / 76

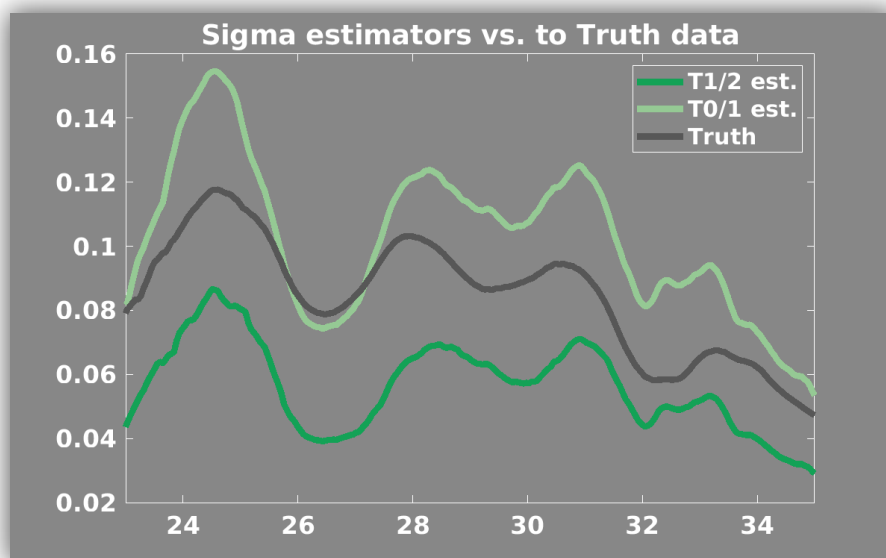


Abbildung 24: Vergleich Schätzer und Truth-Daten Must-Not-Detect-Szenario

3.1.8.4 Wolkenerkennung und Wetterradar

Zu Beginn des Vorhabens KOKO 2 war nicht klar, ob das System zur Wolkenerkennung ein TRL Level erreicht, der eine sinnvolle Integration der Wolkenerkennung in das Gesamtsystem erlaubt. Jedoch hat sich gezeigt, dass die Algorithmen zur Wolkenerkennung gut funktionieren und dass ein Test der Wolkenerkennung mit dem Gesamtsystem machbar und erfolgversprechend ist. Dadurch hat sich dann in Diskussionen ein Konzept zur Integration der Wolkenerkennung der Universität der Bundeswehr in das KOKO 2 Detect and Avoid System ergeben. Bei der Analyse der Bilddaten des EO Sensors aus den ProSA-n Flugversuchen wurden die Wetterradardaten des Detect and Avoid Radars mit den Wolkenformationen verglichen. Obwohl die Bilddaten aus den ProSA-n Flugversuchen von der Uni BW nicht direkt verwendet werden können wurde abgeschätzt wie die Wolkenerkennung mit dem ProSA-n Bildmaterial funktionieren würde, wenn Farbinformationen vorhanden wären. Da auch in den KOKO 2 Flugversuchen keine Farbbilder zur Verfügung stehen, wurden Algorithmen entwickelt, die eine Charakteristiken Detektion auf Schwarz-Weiß-Basis ermöglicht. Dabei wurde festgestellt, dass eine Kombination der Informationen aus der Wolkenerkennung mit den Informationen des Wetterradars für einen RPAS Operator Vorteile bei der Analyse der Wetterlage und bei der Flugplanung bringen könnte. Die Wolkenerkennung liefert sehr exakte Informationen über die Form der Wolke vor dem Hintergrund, wie in Abbildung 25 skizziert.

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	39 / 76

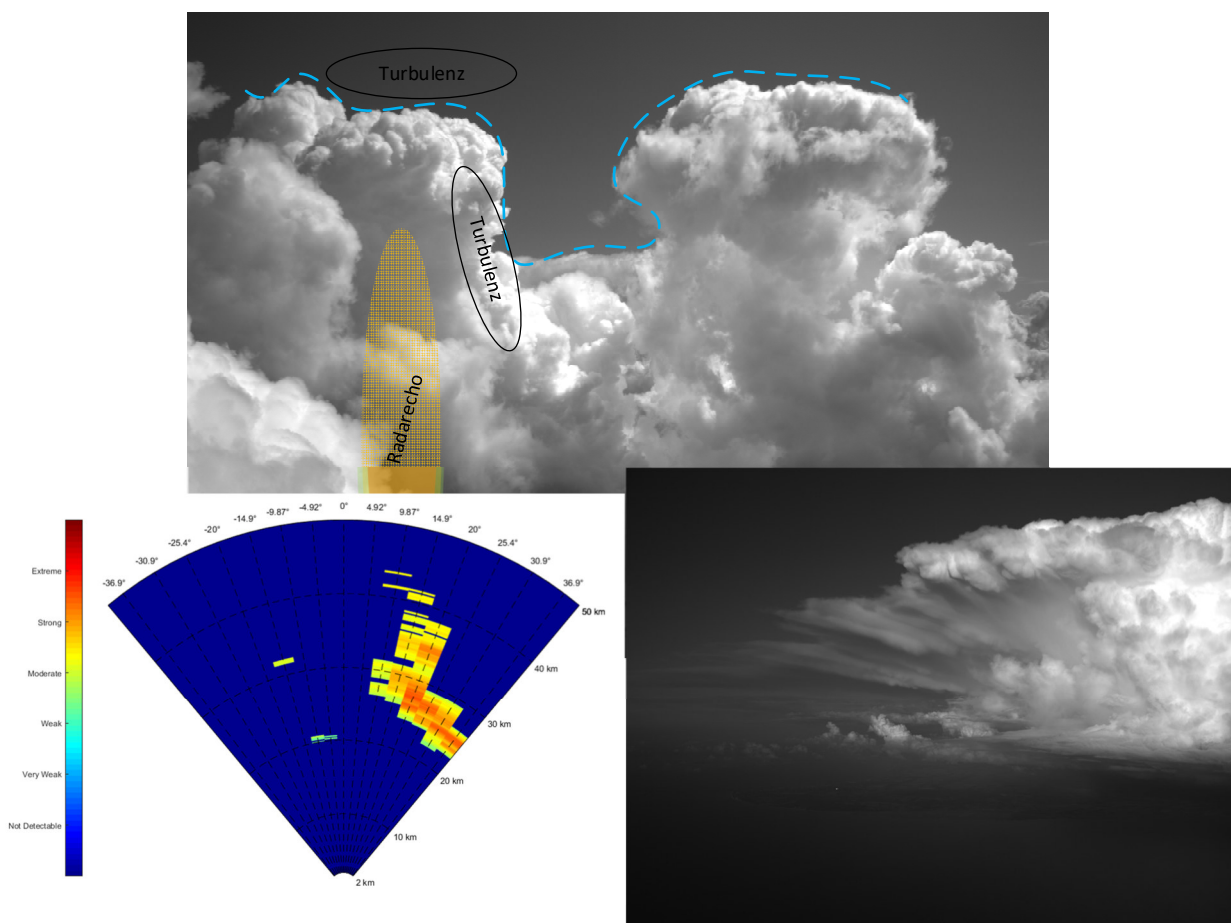


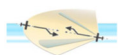
Abbildung 25: Schematische Darstellung Wolkenerkennung

Eine optische Entfernungsbestimmung der Wolke ist möglich, ist jedoch mit Fehlern behaftet, die sich mit der Lage der Wolke zum Luftfahrzeug verändern. Das Wetterradar kann die Entfernung zur Wolke jeder Zeit sehr exakt bestimmen und kann auch die zu erwartenden Turbulenzen darstellen. Die Darstellung ist jedoch auf Bereiche mit Niederschlag begrenzt. Das Radar kann einzelne Regenzellen in den Wolken gut detektieren. Die turbulenten Bereiche, die eine Gefahr für ein RPAS darstellen, sind aber auch außerhalb der Regen Zelle vorhanden. Eine kombinierte Betrachtung der optischen Wolkenerkennung und radarbasierten Wettererkennung beseitigt die Defizite beider Methoden.

Die Konzeptstudie der Kombination von optischer Wolkenerkennung und radarbasierter Wettererkennung wurde auf der DASC 2021 – The 40th Digital Avionics Systems Conference vorgestellt. Das Konzept wurde außerdem als Patent angemeldet.

Am Beispiel in Abbildung 25 sieht man die Aufnahmen eines Schlechtwettergebiets aus den ProSA-n Flugversuchen. Auf der linken Seite ist das Radarbild zu sehen, auf der rechten Seite

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	40 / 76



die Aufnahme des EO-Sensors. Bei der Untersuchung der Daten wurden die Vorteile des Verfahrens für den Betrieb von RPAS untersucht und mehrere Aspekte identifiziert, die direkt oder indirekt einen Einfluss auf die Flugsicherheit haben.

Der erste Aspekt betrifft die Clutterunterdrückung für die Wetterradarfunktion. Wenn an einer Stelle Niederschlag detektiert wird, für den keine Wolke zugeordnet werden kann, kann die Intensität der Clutterunterdrückung angepasst werden. Damit wird die Anzeige des Wetterradars für den RPAS Piloten besser interpretierbar.

Der zweite Aspekt betrifft die Möglichkeit die Ausdehnung von Schlechtwettergebieten wesentlich genauer zu bestimmen, so dass ein automatisches Umfliegen von Schlechtwettergebieten machbar wird. Da die Bundeswehr in Deutschland zurzeit die einzige Organisation ist, die Erfahrungen mit dem Betrieb von RPAS hat, wurde das Konzept mit Piloten der Bundeswehr diskutiert. Die Überlegungen wurden in der Diskussion bestätigt und lassen sich aller Voraussicht nach auch auf den zivilen Betrieb von RPAS übertragen.

3.1.9 AP 2.5 A2G Moden

Ziel dieses Arbeitspakets war die Untersuchung der Multifunktionsfähigkeit des DAA Radars im Hinblick auf die Abbildung von Geländestrukturen. Die so gewonnen (Bild-)Daten können der Navigations-Unterstützung dienen und bilden somit eine Redundanz zu GNSS-basierten Systemen.

Das KOKO 2 DAA Radar soll nach Möglichkeit auch für die nach ICAO im DAA System definierte Funktion eines Systems zur Vermeidung von Kollisionen am Boden verwendet werden können. Zurzeit werden zwei Ansätze zur Erkennung von Hindernissen am Boden untersucht. Die eine Methode basiert auf der Verarbeitung der Radardaten mit Algorithmen, die bei SAR zum Einsatz kommen. Eine erste Auswertung der bei ProSA-n gewonnenen Daten hat keine zufriedenstellenden Ergebnisse geliefert, da die Radarsignale für die ProSA-n Flugtests für den Air to Air Mode optimiert waren. Des Weiteren war die Antenne leicht nach oben geneigt, um Ground Clutter zu verringern. Eine SAR Verarbeitung ist auch aufgrund der limitierten Ressourcen schwierig umzusetzen. Die zweite Methode zur Erkennung von Hindernissen am Boden nutzt den Wetterdetektionsmode und dessen detektierten Bodenclutter, der für die Erkennung von Zielen in der Luft unterdrückt werden muss. Die folgende Abbildung 26 zeigt ein Wetterradarbild aus den Flugversuchen ohne (links) und mit (rechts) Clutterunterdrückung. Hierbei wird deutlich, dass Küstenlinien zur Navigationshilfe sehr gut dargestellt werden können.

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	41 / 76

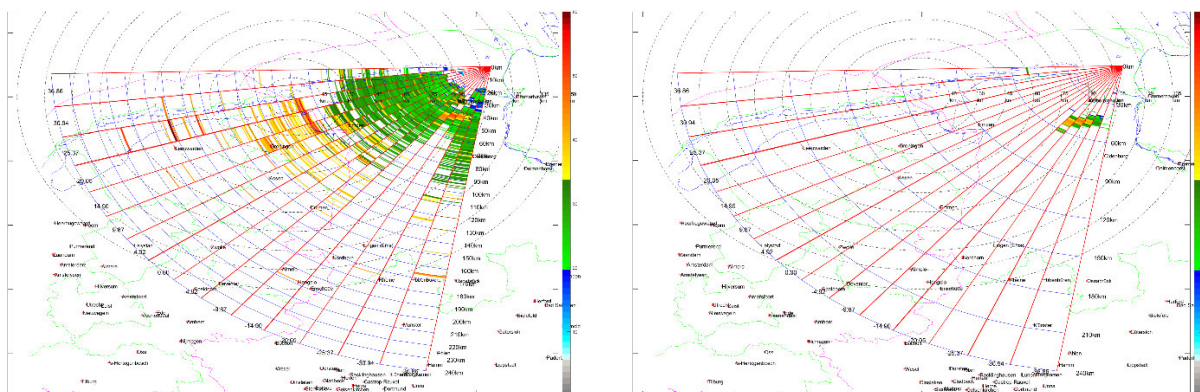
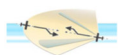


Abbildung 26: Ground Clutter und Regengebiet

In einem anderen Beispiel lassen sich Signaturen auf dem Festland erkennen. Abbildung 26 zeigt rechts die Radardaten aus den Flugversuchen, als Richtung Harz geflogen worden ist. Im

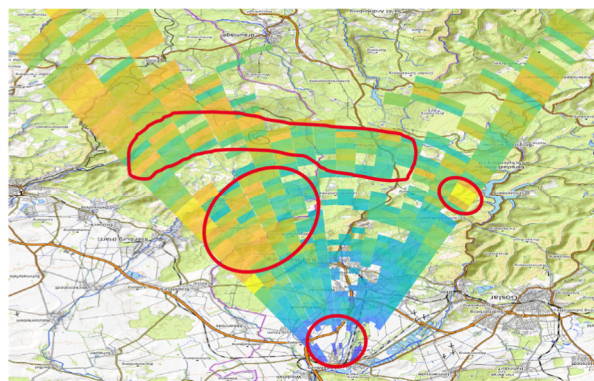


Abbildung 27: Vergleich reale GoogleMaps Daten mit Radardaten des Wetterdetektionsmodes

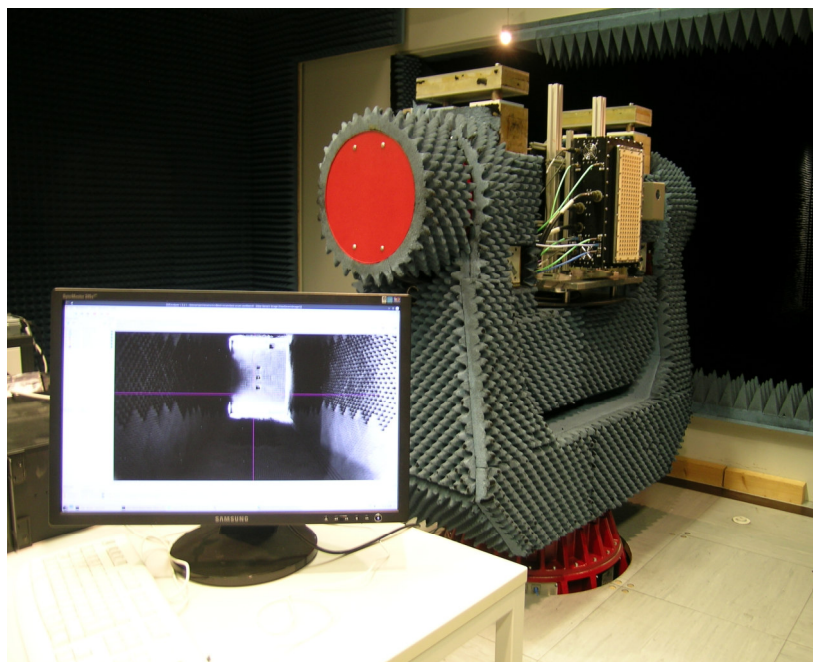
linken Bild sind zur Visualisierung und besseren Einordnung die Satellitendaten aus Sicht des Flugzeugs dargestellt. Bei richtiger Interpretation der Radarbilder wird deutlich, dass alle Signaturen erkennbar sind. Mittig in kurzer Entfernung sind flache Felder ohne Reflexion zu erkennen, auf der linken Seite ist der erste Gebirgskamm erkennbar, da dahinter ein Tal liegt und dort durch den Radarschatten keine Reflexion auftritt. Auch der lange Gebirgskamm mit dem Brocken als Höhepunkt ist deutlich erkennbar, auch die höchste Erhebung ist aufgrund des dahinter liegenden Radarschattens deutlich erkennbar. Auf der rechten Seite lässt sich im Satellitenbild ein Steinbruch erkennen, der eine erhöhte Reflexion zeigt. Bei Ausfall der Navigation lässt sich mithilfe solcher Charakteristiken eine rudimentäre Ersatznavigation durchführen.

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	42 / 76

3.1.10 AP 2.6 Radar Integration und Test

Ziel dieses Arbeitspakets war es, die in AP 2.2 bzw. 2.4 ausgearbeiteten Moden für Sense & Avoid und Wetterradar-Funktionen in den Radar-Demonstrator zu integrieren, zu testen und zu verifizieren.

Das KOKO 2 DAA Radar wurde vor den Flugtests umfangreichen Tests in der Messkammer bei Hensoldt unterworfen.



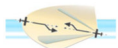
**Abbildung 28: Vermessung des DAA Radars in der
Messkammer**

3.1.11 AP 4.1 Fusion und Avoid Systems Engineering

Ziel dieses Arbeitspakets war die Erstellung der für die Realisierung der Fusion & Avoid Segments notwendigen System Engineering Artefakte.

Im Arbeitspaket Fusion und Avoid System-Engineering wurde an der Integration des KOKO2 System mit dem experimentellen Autopiloten der DLR gearbeitet. Abbildung 29 zeigt die Komponenten der Flugsteuerung der Do 228 und die potentiellen Punkte für einen Eingriff des DAA Systems.

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	43 / 76



Über den direkten Eingriff an den Flight Controls (Punkt A) könnte das DAA System die volle Kontrolle über das Luftfahrzeug übernehmen und das Ausweichkommando direkt ausführen. Die Funktionen zur Fluglageregelung, Flight Envelope Protection und Navigation müssten vom DAA System übernommen werden, was einen sehr hohen Entwicklungs- und Zulassungsaufwand bedeuten würde.

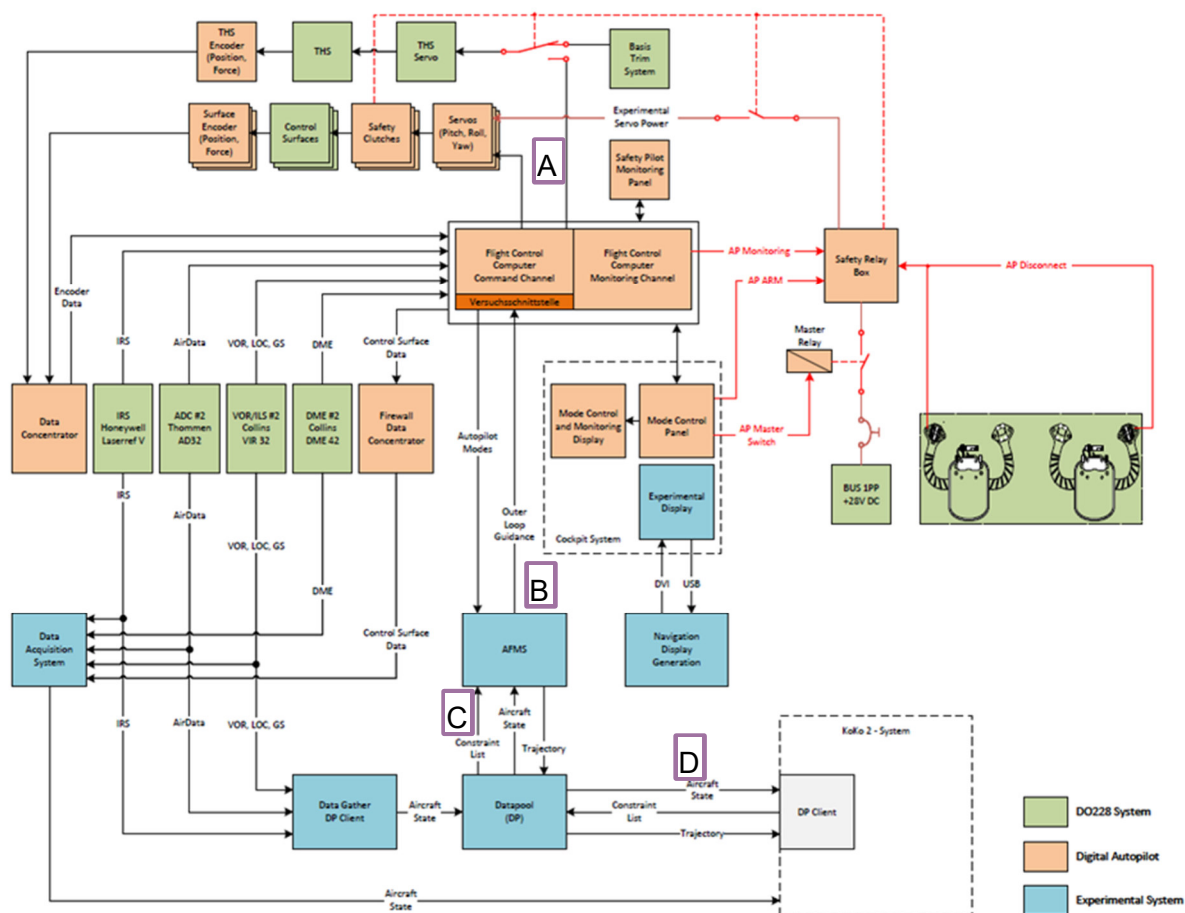


Abbildung 29: Anbindung des KOKO 2 DAA Systems an ein FMS

Die nächste Möglichkeit zur Steuerung des Luftfahrzeugs bietet sich am Punkt B mit der Ansteuerung des Autopiloten. Fluglageregelung und Flight Envelope Protection würden vom Autopiloten durchgeführt und die Flugführung entlang der Ausweichtrajektorie würde vom DAA System durchgeführt. Zur Flugführung müsste das DAA System gut auf die Flugeigenschaften der Do 228 abgestimmt werden, was auch einen erheblichen Aufwand bedeutet. Da die Versuchsaufbauten in der Do 228 der DLR auch ein experimentelles Flight Management System (FMS) beinhaltet, bietet sich der Eingang des FMS (Punkt C) zur Steuerung des Luftfahrzeugs an. Das FMS erwartet zur Steuerung eine sog. Constraint Liste, in der Wegpunkte für einen Flugpfad vorgegeben sind. Das FMS berechnet aus der Constraint Liste eine Trajektorie, die von

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	44 / 76

der Do 228 geflogen werden kann und gibt diese zur Kontrolle aus. Die Verbindung von DAA System erfolgt nicht direkt, sondern über eine Zwischenschicht in Form des Datapools (Punkt D). Der Datapool ist eine Vermittlungsschicht nach einem DLR internen Standard, die einheitliche Schnittstellen und die Aufzeichnung von Daten auf diesen Schnittstellen ermöglicht.

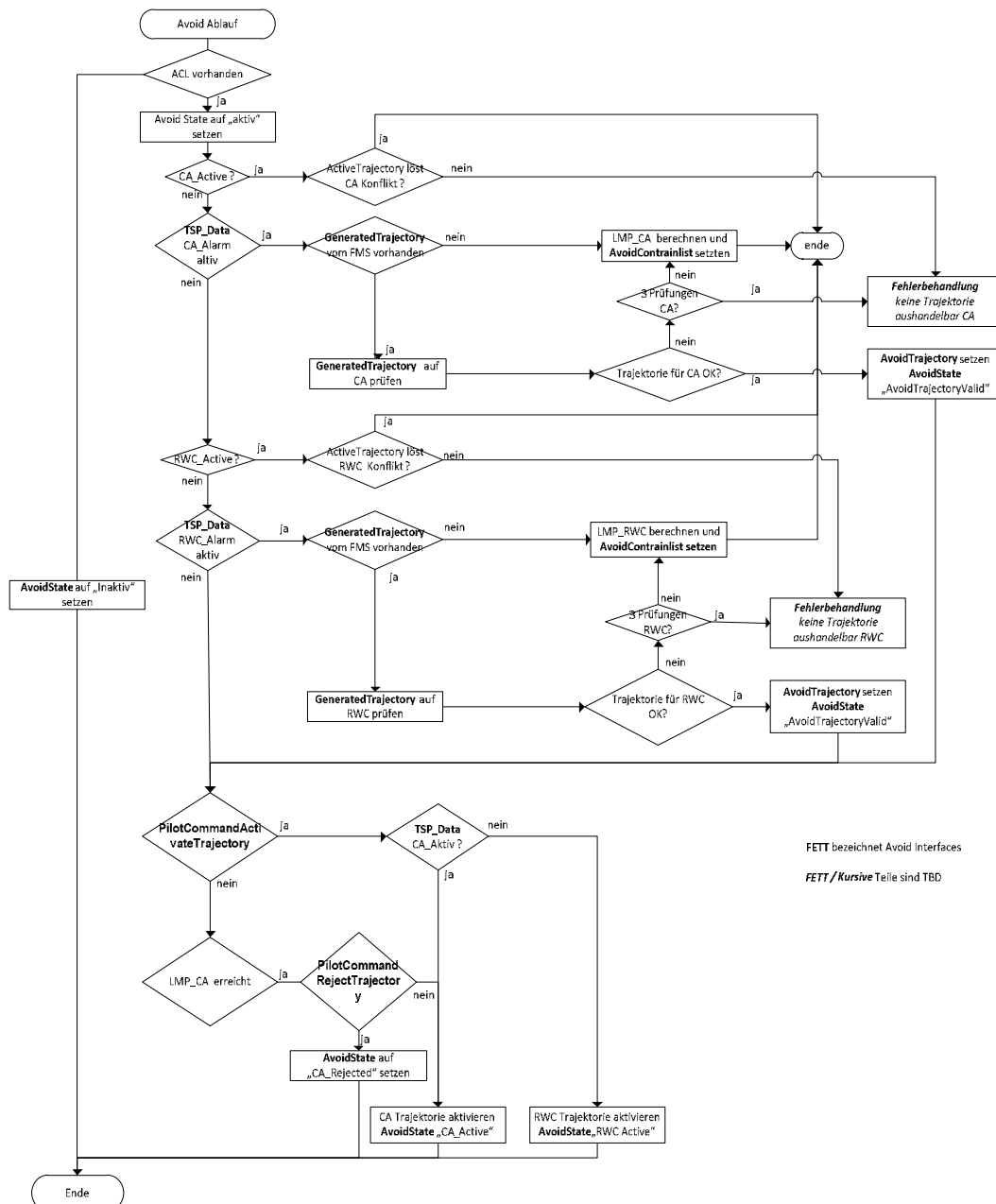


Abbildung 30: Algorithmus zur Aktivierung einer Avoid Trajektorie

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	45 / 76

Die Steuerung der Ausweichtrajektorie erfolgt wie oben erwähnt über eine Liste von Bedingungen an den Flugpfad. Diese Bedingungen werden über Wegpunkte definiert, die mit weiteren Bedingungen wie z.B. Überflugzeit und Turnrates erweitert werden. Das DAA System sendet nach der Auslösung eines Alarms und der Berechnung der Avoid Trajektorie eine Constraint Liste an das FMS, die die Avoid Trajektorie beschreibt. Das FMS berechnet daraus unter Berücksichtigung des aktuellen Flugzustands eine Trajektorie die vom Ownship geflogen werden kann. Falls das FMS die vom Avoid geforderte Trajektorie nicht fliegen kommt es zu einer Fehlermeldung, die vom Remote Piloten aufgelöst werden muss. Dies kann z.B. über ein Ausweichen entgegen der vom Avoid vorgeschlagenen Richtung erfolgen.

3.1.12 AP 4.2 Realisierung Fusion und Avoid

Ziel des Arbeitspakets war die Realisierung der Komponenten des Fusion & Avoid Segments.

Die wesentlichen Unterfunktionen des DAA Systems sind:

- Detektion möglicher Intruder durch Sensoren
- Tracking: Verfolgung der detektieren Ziele
- Bewertung der Tracks auf Konsistenz zwischen Sensoren und Plausibilität
- Berechnung der Gefährlichkeit möglicher Intruder
- Ausgabe von Alarmen
- Entscheidung über Ausweichen und Auswahl des Ausweichmanövers
- Kommandierung des Ausweichmanövers.

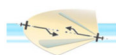
3.1.12.1 Detektion

Zur Detektion von möglichen Intrudern steht eine Vielzahl von Sensoren zur Verfügung. Grundsätzlich wird zwischen kooperativen Sensoren, die auf einer wie auch immer gearteten Kommunikation zwischen Luftfahrzeugen basieren und nicht-kooperativen Sensoren, die unabhängig von der Ausrüstung eines möglichen Intruders sind, unterschieden.

Die Detektion von kooperativen Intrudern soll im KOKO2 DAA System im durch ADS-B erfolgen. Falls die Plattform mit einem TCAS II System ausgerüstet ist, sollen die Informationen, die vom TCAS II System zu den Intrudern bereitgestellt werden als Detektionen im KOKO 2 DAA System verarbeitet werden.

Das TCAS II System bietet die Möglichkeit, die Transponder von kooperativen Intrudern abzufragen, um somit Informationen über die Entfernung und Höhe eines Intruders zu bekommen. Damit kann das TCAS II auch als Sensor für kooperative Ziele betrachtet werden.

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	46 / 76



Das TCAS II System des für die Flugversuche vorgesehenen Flugzeugs Do 228 der DLR ist für die Zulassung des Flugzeugs dringend vorgeschrieben und kann nicht so modifiziert werden, dass es in den Flugversuch integriert werden kann. Kooperative Ziele werden im KOKO 2 DAA nur über ADS-B detektiert.

Als Sensor für nicht-kooperative Ziele kommt ein elektronisch geschwenktes Puls-Doppler-Radar (AESA) zum Einsatz.

3.1.12.2 Tracking

Die detektierten Ziele werden vom DAA System verfolgt, um die Detektionen der Sensoren einem realen Ziel zuordnen zu können. Kooperative ADS-B Ziele werden eindeutig über ihre Mode-S ICAO Adresse identifiziert und einer Spur (Track) zugeordnet.

Ziele, die von TCAS detektiert werden, sollen ebenfalls über die ICAO Adresse verfolgt werden. Dazu muss die im TCAS vorgesehene Schnittstelle von TCAS Computer zum TCAS Display um die Information zur ICAO Adresse erweitert werden.

Im Falle des Radars ist die Verfolgung nicht deterministisch.

3.1.12.3 Bewertung der verfolgten Ziele

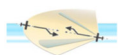
Bevor eine Bewertung der Gefährlichkeit eines Ziels vorgenommen wird, muss eine Bewertung der Sensor Tracks erfolgen. Dazu werden die verschiedenen Sensor Tracks assoziiert und auf Konsistenz geprüft.

Es gilt als allgemein anerkannt, dass ADS-B Tracks nicht ohne Überprüfung für flugsicherheitsrelevante Funktionen verwendet werden sollen. An den ADS-B Installationen auf Luftfahrzeugen werden regelmäßig Fehler festgestellt [4]. Es besteht auch die Gefahr, dass falsche ADS-B Signale in krimineller Intention ausgesendet werden, um den Betrieb von unbemannten Luftfahrzeugen zu stören. Daher sollen ADS-B Informationen nicht ohne Verifizierung verwendet werden.

Am Boden werden die ADS-B Signale mit Hilfe der sog. Multilateration verifiziert. Dabei wird das ADS-B Signal von mehreren Bodenstationen empfangen und die Position des Senders durch Vergleich der Signallaufzeiten abgeschätzt. Wenn die Abschätzung mit definierten Abweichungen mit der gesendeten Position übereinstimmt, wird der Track als gültig bewertet.

Dieses Verfahren ist im Flug nicht anwendbar, da die zur Verfügung stehenden Abstände von Empfängern zu klein sind. Im KOKO2 System soll die Verifikation der ADS-B Informationen auf Basis von assoziierten Radartracks und TCAS Informationen erfolgen.

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	47 / 76



Wenn ein ADS-B Ziel in einer gleichen Entfernung und Höhe zu einem TCAS Ziel erkannt wird, soll davon ausgegangen werden, dass auch die weiteren von ADS-B übermittelten Informationen gültig sind.

Diese Art der Validierung von ADS-B Informationen durch TCAS versagt, wenn in krimineller Absicht fehlerhafte ADS-B Informationen zu einem realen Ziel gesendet werden. Die Information über Höhe, Entfernung und ICAO Adresse sind aber auch in diesem Fall gültig.

Eine Validierung der ADS-B Informationen soll auch durch Detektionen über das Radar erfolgen.

3.1.12.4 Bewertung der Gefährlichkeit

Bei der Bewertung der Gefährlichkeit spielen die aktuelle Distanz eines Intruders und die Zeit bis zu einer möglichen Kollision eine Rolle.

Die Schwellen für die Alarmierung können über räumliche oder zeitliche Variablen definiert werden. Grundsätzlich stehen die folgenden Modelle für die Definition von Alarmierungsschwellen zur Verfügung:

- Berechnung der Zeit bis zur geringsten Annäherung zweier Luftfahrzeuge unter der Annahme von linear extrapolierten Trajektorien (Tcpa) mit Hilfe der Annäherungsgeschwindigkeit und der Winkelrate.
- Die zeitliche Variable Tau (Entfernung/Annäherungsgeschwindigkeit) wie sie bei TCAS verwendet wurde ist eine Abschätzung der Zeit bis zum CPA. Aus der Zeit bis zum CPA kann der Abstand der Luftfahrzeuge am CPA und damit das Risiko einer Kollision abgeschätzt werden.
- Die zeitliche Variable Tau erweitert um eine räumliche Komponente um einen räumlichen Mindestabstand zu gewährleisten (Tau_mod). Auch hier kann aus der Zeit bis zum CPA der Abstand der Luftfahrzeuge am CPA und damit das Risiko einer Kollision abgeschätzt werden.
- Die Zeit bis zum Eintritt in ein räumlich definieren Bereich unter der Annahme von linear extrapolierten Trajektorien (Tep).

Beim Radar System steht für die Berechnung des Abstands am Closest Point of Approach die aktuelle Range, die Range Rate und die Azimuth Rate zur Verfügung.

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	48 / 76

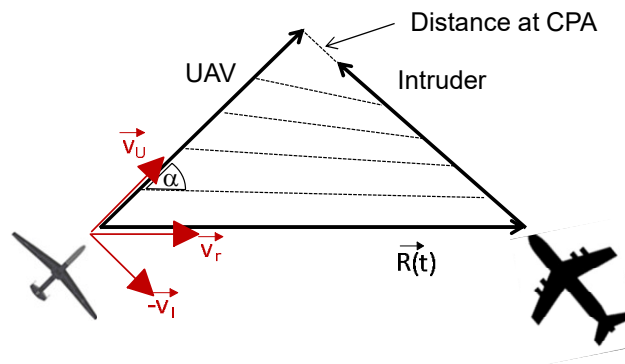


Abbildung 31: Distanz am CPA

Der Abstand der Luftfahrzeuge zum Zeitpunkt **t_{CPA}** lässt sich dann wie folgt berechnen.

$$|\vec{R}(t_{CPA})| = |\vec{v}_r| \cdot t_{CPA}^2 \cdot \dot{\alpha} = \frac{|\vec{R}(t_0)|^2 \cdot \dot{\alpha}}{|\vec{v}_r|}$$

Im Falle von ADS-B Detektionen erfolgt die Berechnung besser im kartesischen Koordinatensystem über:

$$t_{cpa}(s, v) = \begin{cases} -\frac{s \cdot v}{v^2} & \text{if } v \neq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Beim TCAS System erfolgt die Abschätzung der Zeit bis zur geringsten Annäherung über

$$\tau = -\frac{r(0)}{\dot{r}(0)}$$

Die Abschätzung ist gültig für große Abstände und versagt beim Vorbeiflug wenn die Annäherungsgeschwindigkeit null wird.

Die Festlegung einer Alarmschwelle basierend auf Tau ist problematisch, da die Luftfahrzeuge bei geringen Annäherungsgeschwindigkeiten sehr nahekommen können.

3.1.12.4.1 Berechnung von Tau_mod

Das Problem mit geringen Abständen bei geringen Annäherungsgeschwindigkeiten umgeht man

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	49 / 76

$$\tau_{\text{mod}} = -\frac{r(0)^2 - DTHR^2}{\dot{r}(0)} = \frac{DTHR^2 - s^2}{s \cdot v}$$

bei der Definition einer Alarmschwelle basierend auf Tmod.

Ab einer Annäherung auf eine definierte Distanz DTHR geht der Wert für Tau_mod gegen null und der Alarm wird auch bei geringen Annäherungsgeschwindigkeiten ausgelöst

3.1.12.5 Definition der Alarme

Die Alarme sollen den Piloten oder RPAS Piloten eine bestimmte Zeit vor dem Eintritt in eine gefährliche Situation, die zu einer Kollision führen könnten, warnen.

Die Situation wird durch virtuelle Schutzräume um den Intruder herum definiert. Die Alarme für den Piloten sollen zu einem Zeitpunkt ausgelöst werden, an dem der Pilot noch Zeit hat, die zur Vermeidung der gefährlichen Situation notwendigen Aktionen durchzuführen. Diese Aktionen können neben dem eigentlichen Ausweichmanöver auch Kommunikationen mit ATC beinhalten.

Es werden zwei potenziell gefährliche Situationen berücksichtigt:

Loss of Well Clear. Der entsprechende Alarm soll eine Zeit T_RWC_Alarm vor dem letzten Punkt (Last Manöver Point LMP RWC) an dem ein Ausweichmanöver zur Vermeidung der Situation geflogen werden kann ausgelöst werden.

Near Mid Air Condition:

Um den Intruder wird auf rein räumlicher Basis ein sog. Collision Volume definiert, das nicht unterschritten werden darf. Die Größe des Collision Volume soll zunächst über einen Zylinder mit einem horizontalen Abstand von 500ft und einer vertikalen Höhe von 200ft definiert werden. Diese Festlegung ist im Rahmen des Projekts zu überprüfen und ggf. anzupassen.

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	50 / 76

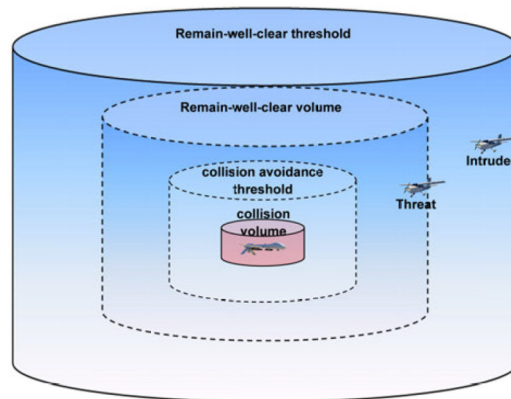


Abbildung 32: Remain Well Clear und Collision Volume (nach [2])

Der Alarm soll eine Zeit T_{CA_Alarm} vor dem Punkt ausgelöst werden, an dem ein Ausweichmanöver zur Vermeidung des NMAC geflogen werden kann.

Die endgültige Definition der Vorwarnzeiten ist der Standardisierung vorbehalten. Für die Projekt KOKO 2 wurde mit dem Radar eine Remain Well Clear Vorwarnzeit von 60 Sekunden erreicht bei einer Ausdehnung des RWC Collision Volume von 1NM Radius.

3.1.12.6 Entscheidung über Ausweichen und Auswahl des Ausweichmanövers

Bei der Entscheidung über das Ausweichen und der Auswahl des Ausweichmanövers sollen eine Reihe von Aspekten berücksichtigt werden, die in den Beschreibungen der Einsatzszenarien genauer erläutert werden sollen. Ein Algorithmus zur Entscheidung über das Ausweichen und die Auswahl des Ausweichmanövers wird im Projekt entwickelt. Folgende Aspekte sollen bei der Entwicklung des Avoid Algorithmus berücksichtigt werden:

- Bemannte oder unbemannte Plattform
- Flugregeln: IFR oder VFR
- Ausweichen zur Einhaltung von Remain Well Clear oder Ausweichen zur Kollisionsvermeidung
- Aktuelle Vorgaben der Flugsicherung
- Aktuelle Flugphase

Zur Unterstützung des Piloten bzw. RPAS Piloten bei der Entscheidung über ein Ausweichmanöver soll das System Alarme in ausreichender Zeit vor dem Eintreffen einer gefährlichen Situation geben.

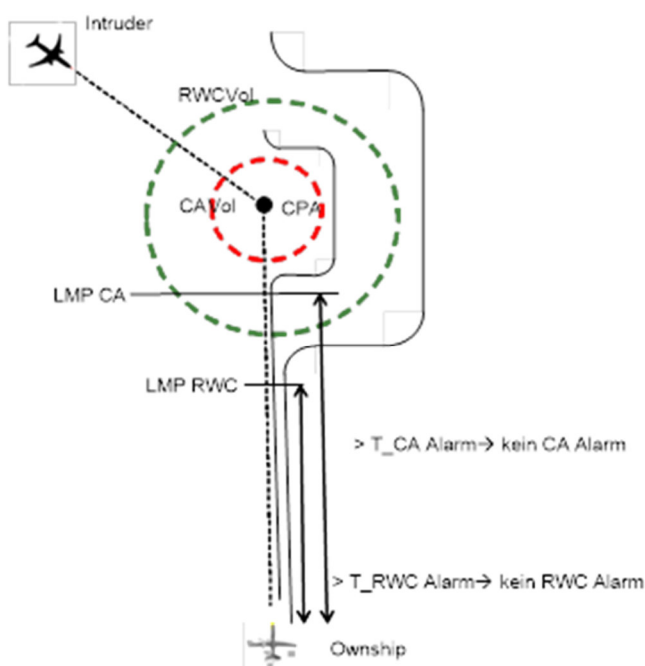
Bei der Entscheidung über die Auswahl des Ausweichmanövers soll der Pilot bzw. der RPAS Pilot durch die Anzeige einer von einem Algorithmus berechneten Ausweichtrajektorie unterstützt werden.

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	51 / 76

Wenn eine Reaktion des Piloten im Falle einer Drohenden Kollision ausbleibt (z.B. durch einen gestörten C2 Link) soll das System automatisch die Entscheidung über ein Manöver zur Kollisionsvermeidung treffen und dieses Manöver auch einleiten.

Die folgende Abbildung zeigt schematisch die Ausweichtrajektorien im Falle von Manövern zur Aufrechterhaltung von Remain Well Clear bzw. zur Kollisionsvermeidung.

Das KOKO2 System soll das Luftfahrzeug nach der Auflösung des Konflikts wieder auf den ursprünglich geplanten Flugpfad führen.



**Abbildung 33: Ausweichtrajektorien für
Remain Well Clear und Kollisionsvermeidung**

In der Praktischen Implementierung wird das DAA System die Funktion zur Berechnung der Ausweichtrajektorien für alle Intruder laufend ausführen und im Falle einer vorliegenden Alarmierung eine horizontale Ausweichtrajektorie berechnen. Die Punkte LMP (Last Manöver Point) stellen die letzten Zeitpunkte dar an denen ein Manöver mit einer definierten Rate zur Kursänderung den Konflikt lösen kann. Die Alarmer für den Piloten bzw. Remote Piloten werden in Abhängigkeit von den berechneten LMPs generiert (siehe auch Funktion „Alarmer in Abschnitt 3.1.12.5).

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	52 / 76

3.1.13 AP 4.3 Integration Fusion und Avoid

Ziel dieses Arbeitspakets war die Integration und der Test des Fusion und Avoid Segments. Zur Integration und Test wird das Fusion und Avoid Segment in einer HIL Simulation mit Sensormodellen und einer Flugsimulation betrieben. Basis ist die Simulationsumgebung aus dem Projekt ProSA-n. Diese Simulationsumgebung wird um ein einfaches Verhaltensmodell für die Wolkenerkennung erweitert.



Abbildung 34: Ausweichtrajektorien während der "Remote Integration"

Die Abbildung 34 zeigt Ausweichtrajektorien, die vom KOKO 2 Detect and Avoid System kommandiert und vom FMS generiert wurden. Während der Integration wurden verschiedene Probleme gelöst, wie die Abbildungen zeigen.

Das KOKO 2 Detect and Avoid System soll im Flugversuch auf einem speziell für Avoid Anwendungen konzipierten Computer mit ARINC 653 Betriebssystem ausgeführt werden. Dieser Computer konnte auf Grund der Einschränkungen im Betrieb durch die Corona-Pandemie im Berichtszeitraum nicht wie geplant integriert werden, da der Laborbetrieb eingeschränkt war. Die Algorithmen wurden dann im Flugversuch auf einer PC Hardware unter dem Windows 7 Betriebssystem ausgeführt. Tests haben gezeigt, dass die Algorithmen mit den notwendigen Echtzeitanforderungen ausgeführt werden können. Die im Flugversuch gewonnenen Daten können ohne Einschränkungen für die Optimierung der Avoid-Algorithmen verwendet werden.

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	53 / 76

3.1.14 AP 5.1 KOKO 2 System Integration und Test

Ziel dieses Arbeitspakets war die Integration des KOKO 2 Systems zu einem Demonstrator für den Flugtest.

Die Avoid SW Anteile der TU Braunschweig wurden in das MBSE Modell integriert. Die wesentlichen Tests der SW fanden auf Modellebene statt. Anschließend wurde das Modell aus dem Modell C-Code generiert, der auf einer PC Hardware im Radar Flight Test Rack ausgeführt wurde. Der ursprüngliche Plan, das Detect and Avoid System auf einer Avoinic HW Plattform zu demonstrieren konnte aufgrund von Einschränkungen durch die Corona Pandemie nicht realisiert werden.

Das System wurde im Anschluss an die Integration auf Modellebene mit einem FMS System im Labor der DLR integriert und getestet. Die folgende Abbildung zeigt eine fehlerfrei generierte Ausweichtrajektorie, die an das FMS gesendet wurde.

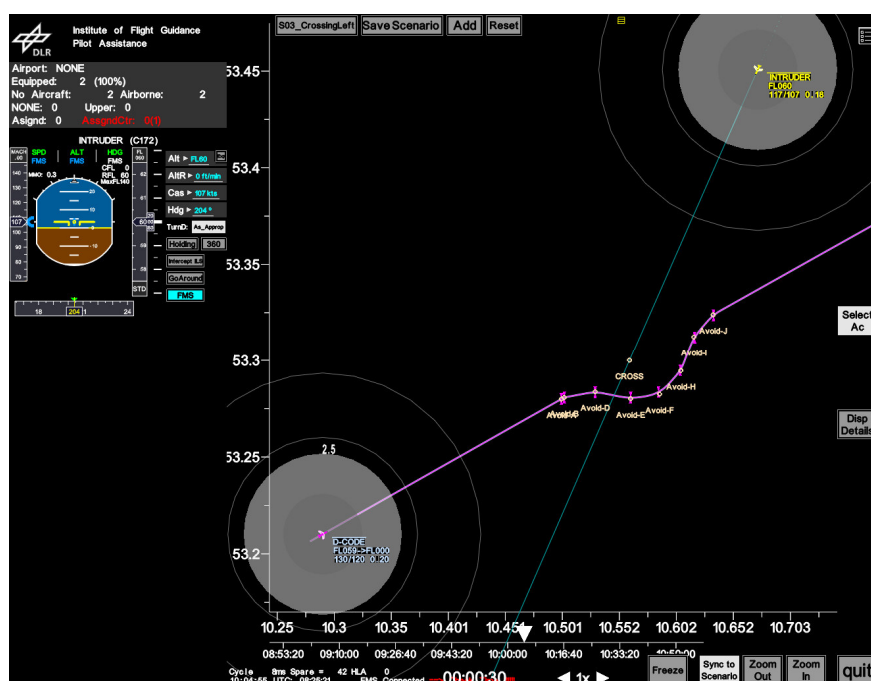


Abbildung 35: Ausweichtrajektorie nach der Integration

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	54 / 76

3.1.15 AP 5.2 Plattform Integration

Ziel dieses Arbeitspakets war die Konzeptionierung, die Vorbereitung und die Durchführung der Integration der zu testenden Komponenten in den Flugversuchsträger „D-CODE“ des DLR. Dieses Arbeitspaket wurde vom DLR im Unterauftrag der Firma Hensoldt durchgeführt. In diesem Arbeitspaket wurde ein Konzept zur Integration der Komponenten erstellt und die erforderlichen Modifikationsarbeiten inklusive der Dokumentation für die vorläufige Verkehrszulassung durchgeführt. Abschließend wurde das Experimentalsystem in das Testflugzeug eingerichtet und konnte für Erprobungsflüge genutzt werden. Abbildung 36 zeigt die Lage der 4 KOKO 2 DAA System Komponenten in der Do 228.

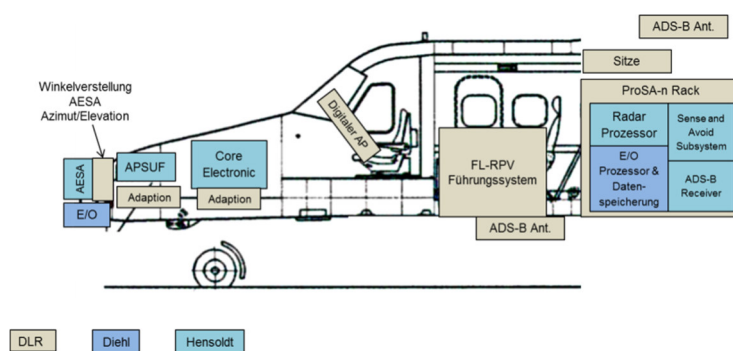


Abbildung 36: Integration der DAA Radar Antenne und Lage der DAA Systemkomponenten in der Do 228

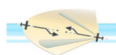
3.1.16 AP 5.3 Flight Test

Das Ziel dieses Arbeitspakets war die Vorbereitung, die Durchführung und die Auswertung von Flugversuchen mit dem entwickelten Gesamtsystem.

Ab KW 25 / 2021 konnten die Flugtests mit den folgenden Schwerpunkten durchgeführt werden:

- Test der Schnittstelle zwischen KOKO 2 DAA System und dem FMS der Do 228
- Test der Avoid Funktion
- Tests für den Ground Mode
- Tests der Wetterfunktion

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	55 / 76



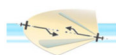
Aus den Aufzeichnungen der Testflüge wurden Szenarien extrahiert die in Tabelle 5 zusammengefasst sind. Die Flugnummern starten mit der Nummer 21, da im Projekt ProSA-n bereits Flüge mit dem Radar alleine durchgeführt wurden. Die Flugtestdaten werden unter der entsprechenden Nummer archiviert.

Tabelle 5: Testflugszenarien

Flug Nr	Datum	Start (UTC)	Ende (UTC)	Szenario	Avoid Manöver erfolgt	Kommentar
21	21.06.2021					
22	22.06.2021	12:25:21	12:28:00	*Flugabbruch		Aufzeichnung von Clutter Plots + Intruder Tracks vor Flugabbruch
23	23.06.2021	11:51:15		Altimetercheck Clutter	+ -	
23	23.06.2021	12:05:12	12:09:00	90° Beam	X	ADS-B Probleme Cluttertracks in links Kurve späte Radarplots u. -tracks
23	23.06.2021	12:15:13	12:20:00	90° Beam	X	Aufnahme startet im Kurvenflug / keine Cluttertracks 12:17 Intruder in Sicht, aber keine Tracks
23	23.06.2021	12:23:42		90° Beam	X	ab 12:25 Clutterplots in südlicher Linkskurve 12:28 Clutterplots auf 2 Uhr (Windpark?) 12:30 vereinzelte Intrudertracks 12:31 vereinzelte Intrudertracks 12:31:39 durchgehender Intrudertrack
23	23.06.2021	12:33:46		90° Beam	X	12:33 Radatracks von Fremdflugzeug ID: 11360853 12:37 Bodenplots 12:43 Bodenfalschtracks

Titel: Schlussbericht

Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	56 / 76



Flug Nr	Datum	Start (UTC)	Ende (UTC)	Szenario	Avoid Manöver erfolgt	Kommentar
23	23.06.2021	12:47:25		FastBeam	-	12:48 Abbruch wegen Segelflieger 12:48 Segelflieger Plots + Tracks 12:51 IntruderPlots 12:55 Boden - Falschziele 12:58 Falschziele
23	23.06.2021	13:02:55	13:11:00	FastBeam	X	13:04 Cluttertracks 13:05 vereinzelte Intruder Plots 13:06 Intruder Tracks
23	23.06.2021	13:13:40	13:21:00	FastBeam	X	13:14 Clutter Plots 13:16 Intruder Plots + Tracks 13:22 viele Falsch Tracks in südlicher Kurve
23	23.06.2021	13:25:42		FastBeam	-	13:25 falsch Tracks 13:27 beginn Intruder Tracks ohne Avoid 13:28 zusätzlich Segelflugzeug Tracks
23	23.06.2021	13:35:22	13:39:00	HeadOn	X	13:36 erste Intruder Plots 13:37 erste Intruder Tracks
23	23.06.2021	13:44:32		HeadOn	X	13:45 viele Bodenclutter 13:46 erste Intruder Plots + Tracks
23	23.06.2021	13:53:51	14:00:00	Heimflug/Landeanflug	-	
24	24.06.2021	11:13:17		HeadOn	X	Intruder nicht gesehen / nur sporadische Tracks 11:19 Fremdziel detektiert (laut Audiodurchsage Flugzeug kreuzt Flugbahn mit 500ft Höhenunterschied)

Titel: **Schlussbericht**

Cage Code:

D1901

Datum:

28.03.2023

Dokument Identifikation:

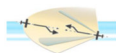
1309-A-00016A00 EDO R01

Version:

01

Seite

57 / 76



Flug Nr	Datum	Start (UTC)	Ende (UTC)	Szenario	Avoid Manöver erfolgt	Kommentar
24	24.06.2021	11:22:18		HeadOn	X	11:22 massive Falschtracks in südlicher Linkskurve (wahrscheinlich Windkraftanlage) 11:26 Intruder sicher detektiert
24	24.06.2021	11:34:20		HeadOn	X	Clutter Tracks zu Beginn / nur sporadische Intrudertracks 11:36 Intruder steigt auf 2600ft
24	24.06.2021	11:41:33		HeadOn	X	11:44 Cluttertracks 11:45 Falschtracks 11:46 sichere Intrudertracks
24	24.06.2021	11:53:54		FastBeam	X	11:57 erste Intrudertracks 11:59 Cluttertracks beim Ausweichen / Falschtracks 10km auf 2 Uhr (evtl. Radioantenne laut Malte)
24	24.06.2021	12:05:01		FastBeam	X	12:05 Cluttertracks in südlicher Kurve 12:06 weitere Falschtracks 12:08 erste Intrudertracks
24	24.06.2021	12:16:06		90° Beam	X	12:16 Clutterplots 12:18 Intrudertracks 1. Anflug 12:25 / 12:27 Cluttertracks 12:28 Intrudertracks 2. Anflug
24	24.06.2021	12:38:15		90° Beam	X	
24	24.06.2021	12:45:40		90° Beam	X	12:47 Clutterplots und Tracks 12:49 erste intruder Tracks
24	24.06.2021	12:53:58		Die Doppelacht / Clutter	-	Keine Auffälligkeiten in Clutterplots weder in rechts noch links kurve

Titel: **Schlussbericht**

Cage Code:

D1901

Datum:

28.03.2023

Dokument Identifikation:

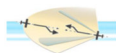
1309-A-00016A00 EDO R01

Version:

01

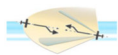
Seite

58 / 76



Flug Nr	Datum	Start (UTC)	Ende (UTC)	Szenario	Avoid Manöver erfolgt	Kommentar
25	28.06.2021	11:40:11	14:48:00	Radial 90° Beam	-	Anflug 45°
25	28.06.2021	11:51:01	11:54:00	Radial 90° Beam	-	Anflug 30°
25	28.06.2021	12:00:55	12:07:00	Radial SlowBeam	-	Anflug 60°
25	28.06.2021	12:13:19	12:16:00	Radial SlowBeam	-	Anflug 45°
25	28.06.2021	12:21:10	12:27:00	Radial SlowBeam	-	Anflug 70°
25	28.06.2021	12:32:26	12:38:00	Radial SlowBeam	-	Anflug -50°
25	28.06.2021	12:43:17	12:47:00	Radial SlowBeam	-	Anflug 30°, EO Recording
25	28.06.2021	12:53:35	13:00:00	Manöv. Anflug 90° Beam	-	EO Recording
25	28.06.2021	13:03:43	13:09:00	Manöv. Anflug 90° Beam	-	EO Recording
25	28.06.2021	13:24:35	13:30:00	Radial 90° Beam	-	Recording bei der Landung
26	29.06.2021	07:47:01	07:49:02	Weather	-	Test Recording

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	59 / 76



Flug Nr	Datum	Start (UTC)	Ende (UTC)	Szenario	Avoid Manöver erfolgt	Kommentar
26	29.06.2021	07:51:39	08:23:21	Clutter	-	08:01 Anflug Brocken 08:02 Überflug Brocken, Störung sichtbar 08:02 Übersteuerung Wetter Langpuls 08:05 Flug Richtung Magdeburg 08:07 B6 entlang, Windpark auf 11 Uhr in 2nm Entfernung 08:14 Windpark 10nm Entfernung 08:21 Windpark 1 Uhr, 3-4nm Entfernung, Überflug Wasser 07:55 - 08:09 EO-Sensor Recording, Anflug auf Regengebiet 08:14 - 08:22 EO-Sensor Recording
26	29.06.2021	08:25:42	08:43:53	Weather	-	08:27 Wetter 10km 10° links 08:28 Wetter 75km 20° rechts 08:35 Autobahn entlang geflogen 08:37 Wetter 60km 20° links 08:39 5km voraus See/Tagebau/Windkraft 08:42 Flugzeugnase nach unten / Clutter 08:25 - 08:37 EO-Sensor Recording 08:39 - 08:43 EO-Sensor Recording

Titel: **Schlussbericht**

Cage Code:

D1901

Datum:

28.03.2023

Dokument Identifikation:

1309-A-00016A00 EDO R01

Version:

01

Seite

60 / 76



Flug Nr	Datum	Start (UTC)	Ende (UTC)	Szenario	Avoid Manöver erfolgt	Kommentar
27	02.07.2021	10:09:57	11:52:00	Clutter	-	Cluttermessung 10:44 Linkskurve über PV-Anlage 10:45 über Autobahnkreuz 10:48 Überflug Kühlturm VW-Werk 10:54 ICE kommt entgegen, 3nm, Schiff auf Kanal rechts 11:02 Segelflieger rechts vor uns 11:21 HeadOn Kühlturm VW-Werk
28	05.07.2021	12:40:51	13:25:00	Weather	-	12:46 Anflug auf Wetter 12 Uhr 12:46 Wetter auf 1 Uhr, ca. 60km 12:54 Flug um Wolke 12:59 Flug um Wolke 13:04 Störung 120nm Display 40° rechts, Umrundung Wolke fertig 13:05 Störung 120nm und 60nm Display 60° links 13:06 - 13:10 Wolkenevents 13:15 Störungen im Display, Regenfront gut sichtbar
28	05.07.2021	13:25:57	14:20:00	Weather	-	13:37 Anflug zwischen zwei Wettergebieten 14:03 Anflug auf Wetter nahe Leipzig, 150km - 90km 14:10 20° rechts Magdeburg, kein Wetter 14:19 Verkehr auf Autobahn 14:22 Wetter 45km 15° links beim Anflug
29	06.07.2021	08:27:31		Weather	-	08:30 Anflug auf Kassel (Wetter erst spät sichtbar) 08:50 Anflug auf Wetter Kassel, sichtbar ab 85km 08:35 Windpark 25° links

Titel: **Schlussbericht**

Cage Code:

D1901

Datum:

28.03.2023

Dokument Identifikation:

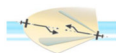
1309-A-00016A00 EDO R01

Version:

01

Seite

61 / 76



Flug Nr	Datum	Start (UTC)	Ende (UTC)	Szenario	Avoid Manöver erfolgt	Kommentar
29	06.07.2021	09:03:15		Weather	-	
29	06.07.2021	09:07:38		Weather	-	09:07 Anflug auf Wetter Kassel Kurs Süd, kein Wetter gesehen 09:20 Abdrehen nach Westen, Wetter gesehen
29	06.07.2021	09:28:17		Weather	-	09:30 Anflug auf Wettergebiet, kurs West 09:35 5°rechts 25km entfernt tiefere Wolken 09:41 Abdrehen nach Westen Richtung Wetter 09:49 Anflug 220° Richtung Wetter, kompletter Sichtbereich Wetter aufgezeichnet
29	06.07.2021	10:01:40		Weather	-	10:12 Anflug BS mit -5° Pitch
30	07.07.2021	07:53:04	07:57:27	HeadOn	x	07:56:50 Avoid, beim Gelben Alarm aktiviert
30	07.07.2021	08:03:47	08:08:20	HeadOn	x	08:03:38 Trajektorie erhalten 08:05:20 Ads-B Track stabil von EDVE 08:07:20 Avoid
30	07.07.2021	08:14:24	08:19:38	HeadOn	-	08:17:07 stabile Tracks Kein Avoid, es gab auch keinen Alarm
30	07.07.2021	08:26:08	08:30:20	Radial FastBeam	x	08:28:34 stabiler Radar Track 08:29:15 Avoid, ohne Alarm ausgelöst
30	07.07.2021	08:36:31	08:41:13	Radial FastBeam	x	08:40:00 Avoid ohne Alarm ausgelöst

Titel: **Schlussbericht**

Cage Code:

D1901

Datum:

28.03.2023

Dokument Identifikation:

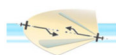
1309-A-00016A00 EDO R01

Version:

01

Seite

62 / 76



Flug Nr	Datum	Start (UTC)	Ende (UTC)	Szenario	Avoid Manöver erfolgt	Kommentar
30	07.07.2021	08:48:12	08:52:39	90° Beam	X	08:46:50 Ads-B Track stabil 08:50:21 Radar Track 08:51:19 Avoid eingeleitet, bei gelbem Alarm aktiviert
30	07.07.2021	08:58:48	09:03:27	90° Beam	X	09:00:20 stabiler Radar und Ads-B Track 09:02:40 Avoid, gelber Alarm, kein roter Alarm, Traj. Spät
30	07.07.2021	09:09:43	09:14:28	Radial SlowBeam	-	Groundtracks beim Inbound Turn kein Avoid, kein Radar und Ads-B Track in Jplot, aber valid in SchmidelGUI
30	07.07.2021	09:20:54	09:26:06	Radial SlowBeam	-	kein Ads-B Track 09:25:03 Avoid, beim Umschalten der Avoidtrajektorie Kurskorrektur der CODE, weil Trajektorie zu alt
31	07.07.2021	11:24:43	11:30:14	Altimetercheck Clutter +	-	Überflug VW-Werk, Altimetercheck, AdsB + Radartrack von EDVE
31	07.07.2021	11:36:08	11:41:30	Manöv. Anflug 90° Beam	-	Am Anfang Groundtracks, keine Trajektorie
31	07.07.2021	11:48:30	11:52:50	Manöv. Anflug 90° Beam	-	keine Trajektorie
31	07.07.2021	12:00:32	12:05:45	Manöv. Anflug 90° Beam	X	12:03:44 Avoid sehr knapp
31	07.07.2021	12:11:23	12:15:30	Manöv. Anflug FastBeam	X	12:14:33 Avoid
31	07.07.2021	12:23:49	12:27:12	Manöv. Anflug FastBeam	-	

Titel: **Schlussbericht**

Cage Code:

D1901

Datum:

28.03.2023

Dokument Identifikation:

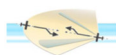
1309-A-00016A00 EDO R01

Version:

01

Seite

63 / 76



Flug Nr	Datum	Start (UTC)	Ende (UTC)	Szenario	Avoid Manöver erfolgt	Kommentar
31	07.07.2021	12:35:26	12:39:09	Manöv. Anflug FastBeam	X	12:38:15 Avoid
31	07.07.2021	12:41:41	12:42:30	Outbound	-	Recording beim Outbound mit EDVE quasi HeadOn
31	07.07.2021	12:46:41	12:50:40	Manöv. Anflug FastBeam	X	12:49:37 Avoid

Während der Flugversuche konnten insgesamt 27 Avoid-Manöver erfolgreich geflogen werden. Bei einer ersten Auswertung der aufgezeichneten Daten wurden einige technische Probleme in der Verarbeitung der Sensordaten festgestellt. Es gab durchgängig Probleme beim Empfang von ADS-B Daten des Intruders die, während der Flugtestkampagne nicht gelöst werden konnten. Um die Flüge dennoch für die Bewertung des KOKO 2 DAA Systems zu nutzen sollten aus den Intruder GPS Daten die fehlenden ADS-B simuliert werden. Die simulierten Daten sollen dann mit den Radar Sensordaten aus dem Flugversuch in die Simulationsumgebung aus der Entwicklungsphase des Systems eingespielt werden. Für die folgenden Arbeiten zur Bewertung des KOKO 2 DAA Systems stehen aber in jedem Falle ausreichend Daten zur Verfügung.

3.1.17 AP 5.4 System Bewertung

Ziel des Arbeitspakets war die Bewertung der Leistungsfähigkeit des KOKO 2 Detect and Avoid Systems.

3.1.17.1 Systembewertung Avoid

3.1.17.1.1 Analyse einzelner Szenarien

Szenario A8

Der Head-On Szenario Anflug A8 wurde exakt, wie in der Simulation berechnet, ausgeführt. Die folgende Abbildung 37 zeigt in Rot die Flugspur des Intruders und in Blau die Flugspur des Ownships. In der Abbildung sind die in der Simulation berechneten Wegpunkte für das Avoid-Manöver dargestellt.

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	64 / 76

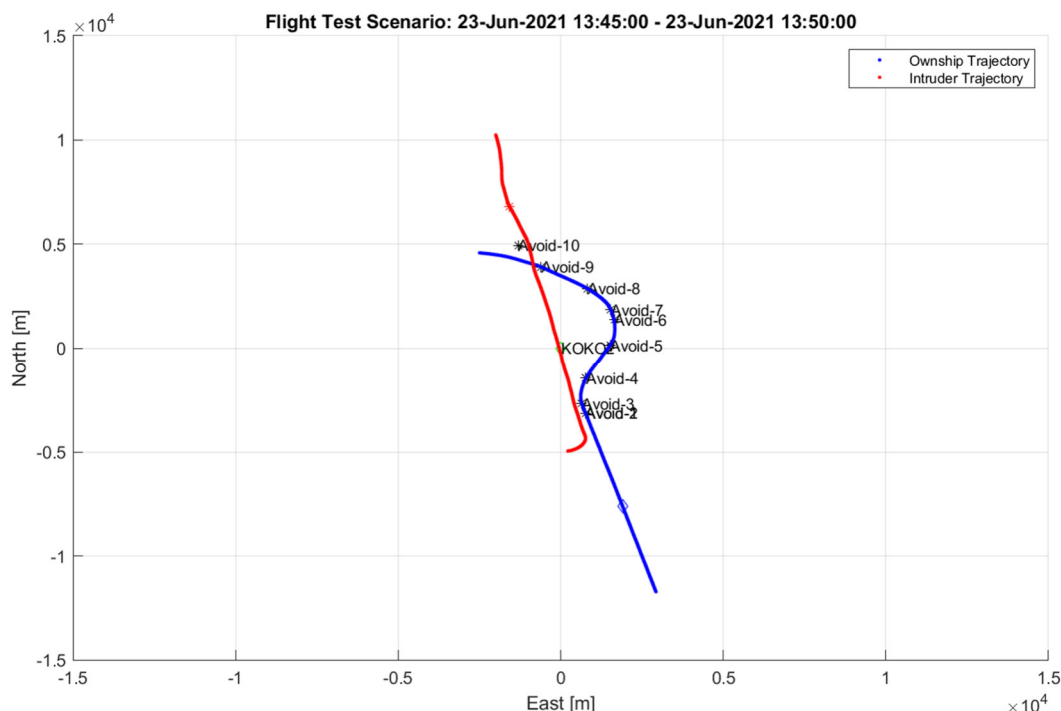


Abbildung 37: Avoid-Szenario A8 mit Wegpunkten

Die folgende Abbildung 38 zeigt die Situation zum Zeitpunkt der geringsten Annäherung von Ownship und Intruder, die hier 1609 m beträgt.

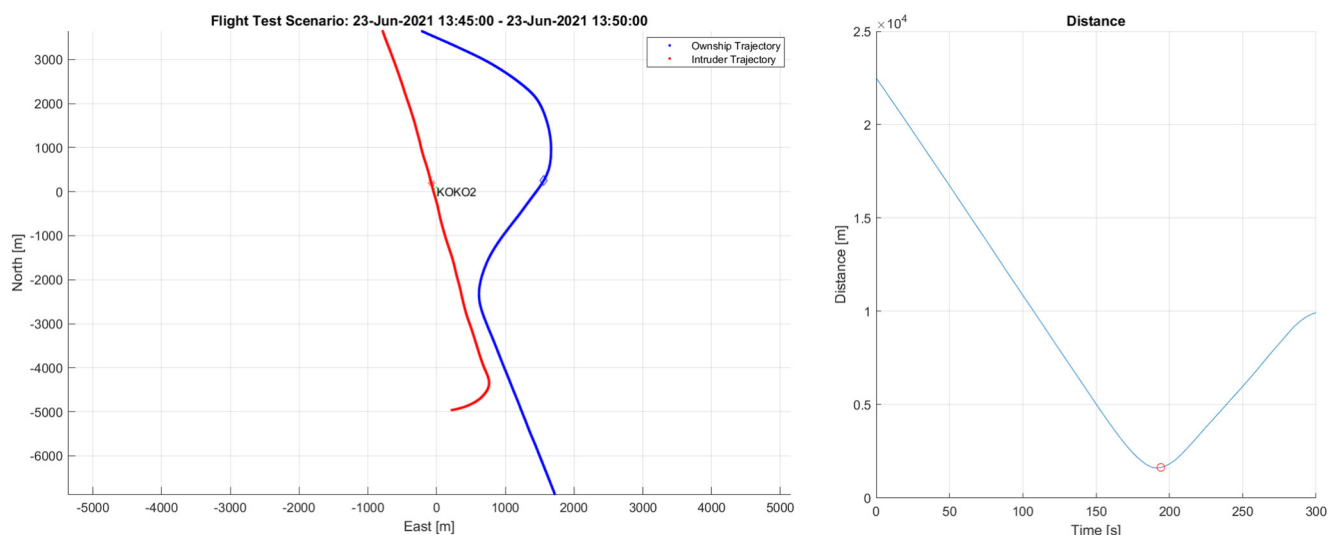


Abbildung 38: Avoid-Szenario A8 zum Zeitpunkt der geringsten Annäherung

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	65 / 76

Szenario A4

Im Szenario A4 wurde kein Avoid ausgelöst. Die Analyse zeigt, dass hier kein Konflikt vorhanden war. Die geringe minimale Annäherung des Intruders wird durch das Manöver des Intruders nach links nach dem geplanten Kollisionspunkt KOKO2 verursacht. Szenario A4 ist in Abbildung 39 dargestellt.

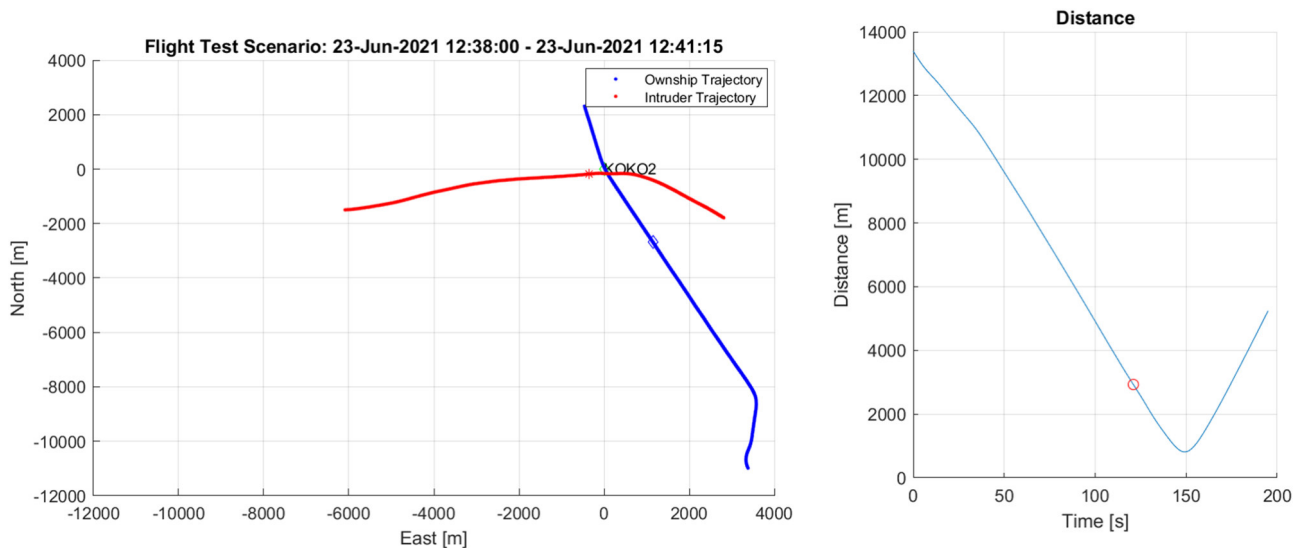


Abbildung 39: Avoid-Szenario A4 ohne Konflikt

Szenario A3:

Die Auswertung von Szenario A3 zeigt ein Problem, dass durch den gestörten ADS-B Empfang verursacht wurde. Nachdem sich in den ersten Anflügen gezeigt hatte, dass der ADS-B Empfang nicht immer stabil ist, wurde versucht die Trajektorie früher wie eigentlich notwendig an das FMS zu kommandieren, damit im Falle eines ausbleibenden ADS-B Empfangs zu einem späteren Zeitpunkt des Szenarios wenigstens eine Avoid Trajektorie kommandiert wurde. Das Szenario ist wie folgt abgelaufen. Der ADS-B Empfang hat in einer großen Entfernung von 14 km gut funktioniert. Zu diesem Zeitpunkt ist der Intruder aber noch nicht exakt auf dem Kurs zum Kollisionspunkt, der sich genau an der Kreuzung der beiden Flugpfade befindet. Das Ownship hat noch nicht die exakte Geschwindigkeit, um den Kollisionspunkt zum vereinbarten Zeitpunkt zu erreichen. Trotzdem ergibt sich in der Konstellation ein Konflikt der vom Avoid korrekt angezeigt und gelöst wurde. Aufgrund der bekannten Probleme wurde das Avoid kommandiert und in das FMS übertragen. Diese Situation ist in der folgenden Abbildung 40 dargestellt.

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	66 / 76

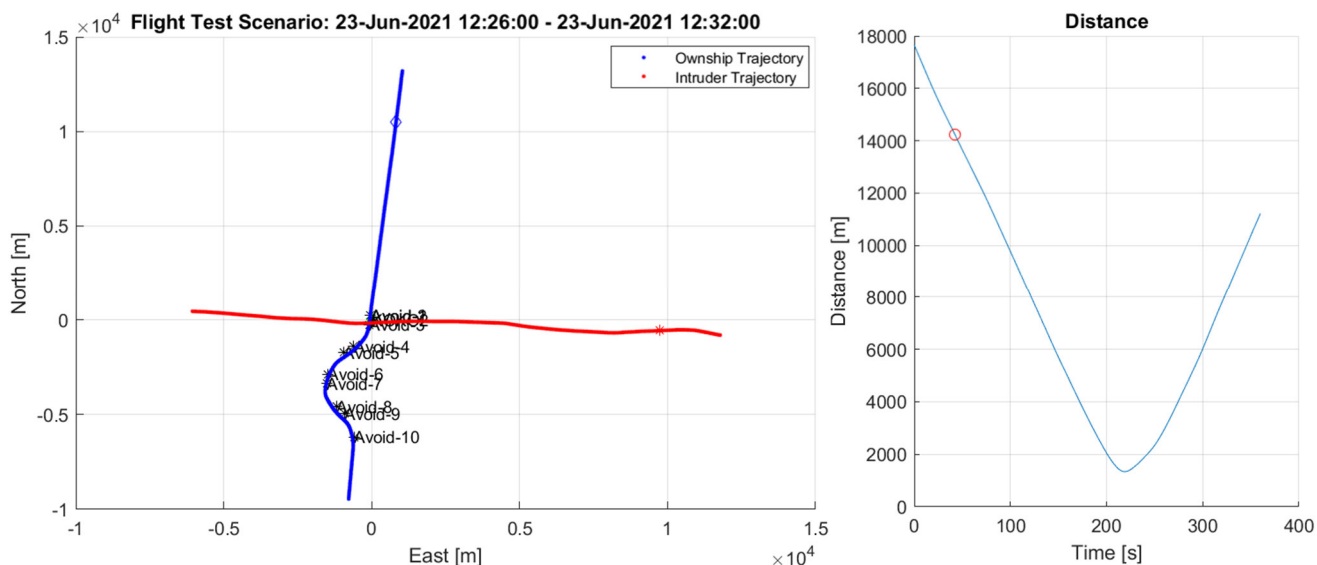


Abbildung 40: Avoid Szenario A3: Zu frühe Aktivierung des Avoidmanövers

Im folgenden Verlauf des Szenarios korrigiert der Intruder seinen Kurs um exakt zur vereinbarten Zeit am Kollisionspunkt zu sein. Die Koordination funktioniert jedoch nicht, so dass sich der Konflikt auflöst wie in der folgenden Abbildung 41 dargestellt.

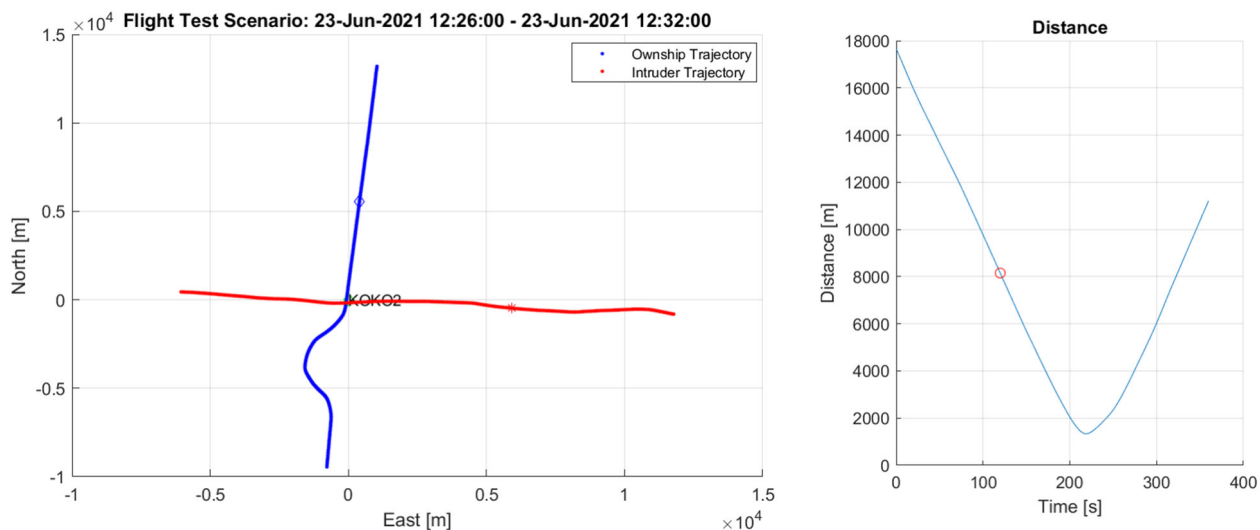


Abbildung 41: Avoid Szenario A3 kein Konflikt

Die Kommandierung der Avoid Trajektorie hätte jetzt wieder zurückgenommen werden müssen, was jedoch in der aktuellen SW nicht vorgesehen ist.

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	67 / 76

Szenario A11:

Dieses Szenario hat im Flugversuch nur eine geringe horizontale Separierung erreicht. Die Kommandierung ist hier zu früh erfolgt. Die Simulation mit einer Berechnung der Avoid Trajektorie in Abbildung 42 zu einem späteren Zeitpunkt zeigt eine größere Separierung.

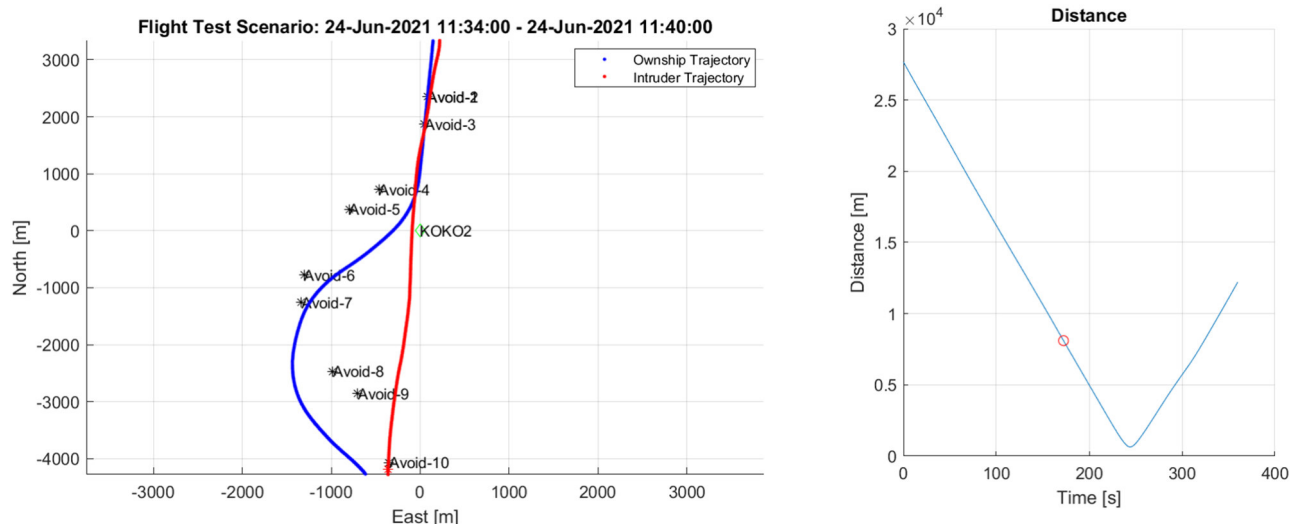


Abbildung 42: Szenario A11

Wie bereits in Absatz 3.3 beschrieben, wird ein Avoid Manöver mithilfe der Vorgabe von Wegpunkten an das Flight Management System kommandiert. Bei dieser Art der Kommandierung hat das DAA System keinen direkten Einfluss auf den Flugpfad, der vom FMS System gewählt wird. Das DAA System muss sicherstellen, dass der vom FMS gewählte Flugpfad die Anforderungen an die Avoid Trajektorie erfüllt. Das Verfahren über die FMS Kommandierung wurde im Vorhaben KOKO 2 gewählt. Die Kommandierung wurde im Vorfeld der Flugtests mit der DLR im GECCO Simulator umfangreich getestet. In den Flugtests konnte für jede Avoid Trajektorie eine FMS Trajektorie generiert werden, die dann auch exakt abgeflogen wurde. Eine Statistik über die Genauigkeit der Flugpfade lässt sich aus den KOKO 2 Daten mangels einer geeigneten Anzahl von Flügen nicht ableiten. Stichproben zeigen aber Abweichungen in der Größenordnung von 10 Metern.

Die Abbildung 43: Überflug Wegpunkt zeigt beispielhaft den Flugpfad des Versuchsträgers über einem Avoid Wegpunkt.

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	68 / 76

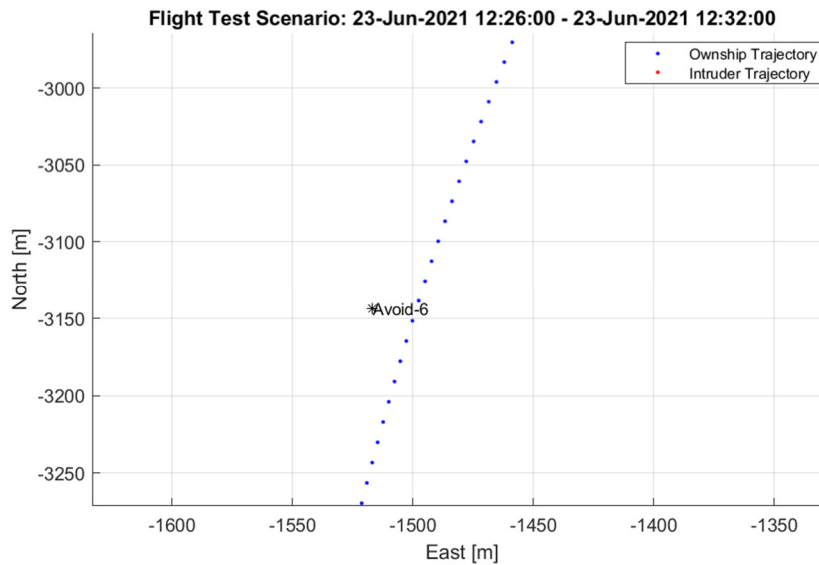


Abbildung 43: Überflug Wegpunkt

Das FMS nimmt typischerweise eine Optimierung der Wegpunkte vor. Im Falle der Flugtest Szenarien würde regelmäßig der Wegpunkt zur Anpassung der Steig- oder Sinkrate des Ownships mit dem Wegpunkt des ersten Segments (dem Turn zur Vermeidung des Konflikts) zusammengelegt. Die folgende Tabelle 6 zeigt die Kommandierung von Szenario A5.

Tabelle 6: Wegpunkte DAA System und FMS

WP	FMS_Generate vom DAA System				Wegpunkte vom FMS			
	WP Name	Wegpunkt Latitude [deg]	Wegpunkt Longitude [deg]	WP Type	WP Name	Wegpunkt Latitude [deg]	Wegpunkt Longitude [deg]	WP Type
1	Avoid-A	52,4132085	11,0467783	no	Avoid-A	52,4132085	11,0467783	no
2	Avoid-B	52,4132085	11,0467783	no				
3	Avoid-C	52,4173886	11,0450263	sot	Avoid-C	52,4173886	11,0450263	sot
4	Avoid-D	52,4285594	11,0468432	no	Avoid-D	52,4285594	11,0468432	no
5	Avoid-E	52,4427730	11,0580507	sot	Avoid-E	52,4427730	11,0580507	sot
6	Avoid-F	52,4539404	11,0598726	no	Avoid-F	52,4539404	11,0598726	no
7	Avoid-G	52,4581239	11,0581198	sot	Avoid-G	52,4581239	11,0581198	sot
8	Avoid-H	52,4673924	11,0477319	no	Avoid-H	52,4673924	11,0477319	no
9	Avoid-I	52,4765893	11,0266958	sot	Avoid-I	52,4765893	11,0266958	sot
10	Avoid-J	52,4858544	11,0162960	no	Avoid-J	52,4858544	11,0162960	no
11	X34512	52,6373480	10,9718503	mot	X34512	52,6373480	10,9718503	mot
12	DIRBO	52,8321177	10,8441582	mot	DIRBO	52,8321177	10,8441582	mot
13	ALESI	52,3999716	10,8200040	sotac3.00	ALESI	52,3999716	10,8200040	sotac3.00
14	VE028	52,3354707	10,8300000	mot	VE028	52,3344940	10,8301469	mot
15	LIDMO	52,3281215	10,7146714	no	LIDMO	52,3281215	10,7146714	no
16	M1500	52,3240780	10,6439662	mot	M1500	52,3240780	10,6439662	mot

Titel: **Schlussbericht**

Cage Code:

D1901

Datum:

28.03.2023

Dokument Identifikation:

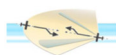
1309-A-00016A00 EDO R01

Version:

01

Seite

69 / 76

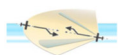


WP	FMS_Generate vom DAA System				Wegpunkte vom FMS			
	WP Name	Wegpunkt Latitude [deg]	Wegpunkt Longitude [deg]	WP Type	WP Name	Wegpunkt Latitude [deg]	Wegpunkt Longitude [deg]	WP Type
17	M800	52,3215030	10,5968609	no	M800	52,3215030	10,5968609	no
18	RW26	52,3200550	10,5713698	no	RW26	52,3200550	10,5713698	no

Bei der Optimierung der Kollisionsvermeidung steht der Betrieb von unbemannten Luftfahrzeugen in Lufträumen in denen mit nicht-kooperativen Intrudern gerechnet werden muss im Fokus. Nicht-kooperative Intruder werden in der Regel nach Sichtflugregeln betrieben. Damit gelten die Ausweichregeln nach ICAO „Rules of the Air“ und daraus abgeleitete nationale Regeln. Die Ausweichregeln geben nicht für alle Situationen eine klare Ausweichrichtung vor. So schreiben die ICAO Regeln im Falle eines Head-on Szenarios „[...] shall alter it's heading to the right[...]“ vor, aber im Fall von „Converging“ Aircraft wird nur ein „[...] shall give way [...]“ gefordert. Piloten nutzen diese Möglichkeit um Konflikte, die mit einem Ausweichen nach rechts den Konflikt zwischenzeitlich verschärfen würden mit einer geringen Kursänderung nach links. Dabei wird die vorhandene Separierung ausgenutzt und die Abweichung vom geplanten Flugpfad minimiert. Dieses Verfahren ist für einen Algorithmus schwer umsetzbar. In einem DAA System nach DO-365 [2]. Standard werden dem Remote Piloten nur Hinweise gegeben wie der Konflikt gelöst werden kann. Falls eine Lösung nach rechts oder nach links möglich ist, kann der Pilot entscheiden welche Lösung praktikabel und sicher ist. Für das KOKO 2 DAA Avoid wurde vorerst entschieden immer nach rechts auszuweichen. Die Bewertung der Leistungsfähigkeit erfolgt bei den aktuell durchgeführten Tests nach folgenden Kriterien. In einem Head-On Szenario soll die berechnete Ausweichtrajektorie nach rechts immer zu einer ausreichenden Separierung führen und so berechnet werden, dass nicht zu früh ausgewichen wird. In allen anderen Szenarien soll eine sichere Separierung erreicht werden. Die Trajektorie ist aber nicht immer optimal in dem Sinne, dass eine vorhandene Separierung ausgenutzt wird.

Zum Testen werden Szenarien für folgende Fälle unterschieden, die sich aus den ICAO „Rules of the Air“ [11] ergeben.

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	70 / 76



Die folgende Tabelle zeigt verschiedene Szenarien, das Verhalten des KOKO 2 DAA Systems und mögliche Optimierungen:

Tabelle 7: Optimierungspotenzial Avoid

Szenario	ROW ¹	Reaktion nach ICAO	KoKo 2 DAA	Optimierung
Head on	nein	Rechtskurve	Rechtskurve	
RPAS überholt	nein	Rechtskurve	Rechtskurve	
RPAS wird überholt	Ja	keine	Rechtskurve	Überholen erkennen und kein Manöver einleiten
Slow beam links	Nein	Manöver gefordert	Rechtskurve	
Slow beam rechts	Nein	Manöver gefordert	Rechtskurve	Rechtsmanöver kreuzt Flugpfad des Intruders, Optimierung möglich
Fast beam links	Ja	Keine Reaktion für RWC, Rechts für CA	Rechtskurve	RWC Situation erkennen und kein Manöver einleiten
Fast beam rechts	Nein	Manöver gefordert	Rechtskurve	

Der zweite Punkt der Optimierung des Avoid Algorithmus betrifft die Einführung einer Entscheidung ob eine Remain Well Clear oder eine Collision Avoidance Situation vorliegt. Besonders im Fall „Fast Beam links“ ist klar, dass das RPAS ein Vorflugrecht hat. Falls erkannt wird, dass der Intruder manövriert, um RWC zu erreichen sollte ein Manöver ausbleiben. Im Falle einer CA Situation sollte auch das Ausweichen nach Links berücksichtigt werden um die zum Zeitpunkt der Konflikterkennung vorhandene Separierung optimal ausnutzen zu können.

Der dritte Punkt zur Optimierung des Avoid Algorithmus besteht in der Nutzung der Rückmeldungen des FMS auf eine Anfrage zur Berechnung einer Trajektorie aus den Avoid Wegpunkten. Wenn dem FMS Wegpunkte vorgegeben werden, die zu einer Trajektorie führen, die aufgrund der aktuellen Konfiguration des RPAS nicht geflogen werden kann, wird das FMS eine Fehlermeldung ausgeben. Das Avoid sollte erkennen ob für den Konflikt eine CA Situation vorliegt und sollte dann evtl. versuchen eine Linkskurve zu kommandieren.

Titel: Schlussbericht

Cage Code:

D1901

Datum:

28.03.2023

Dokument Identifikation:

1309-A-00016A00 EDO R01

Version:

01

Seite

71 / 76

3.1.17.2 Systembewertung Wetter Moden

Aus den Wetteraufzeichnungen in den KOKO2 Flügen konnten ca. 40 Wetterszenarien abgeleitet werden. Dies beinhaltet mehrere Anflüge auf unterschiedliche Regenfronten mit teilweise unterschiedlicher Ausprägung und Intensität. Weiterhin konnte in geringer Flughöhe viel Bodenclutter aufgezeichnet werden, bei vollständiger Abwesenheit von Wetterreflektivität. Dieser kann zum Vergleich herangezogen werden, wenn Wetter und Bodenclutter nicht eindeutig trennbar sind oder als Referenzdaten für einen Ground Mapping Mode.

Im Folgenden sollen nun an zwei Beispielen die aufgezeichnete Radarwetterdaten mit den Wetterdaten der Wetterradare des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verglichen werden. In den folgenden Abbildungen sind Städte (rote Sterne) und Bundesländergrenzen (grüne Linien) zur Orientierung eingezeichnet. Die Daten des DWD sind transparent eingezeichnet, die Radardaten sind ohne Transparenz in der Radarsicht mit Reichweiteninformationen dargestellt. Der Radarkegel deckt -40° bis $+40^{\circ}$ in jeweils ungefähr 5° großen Schritten ab.

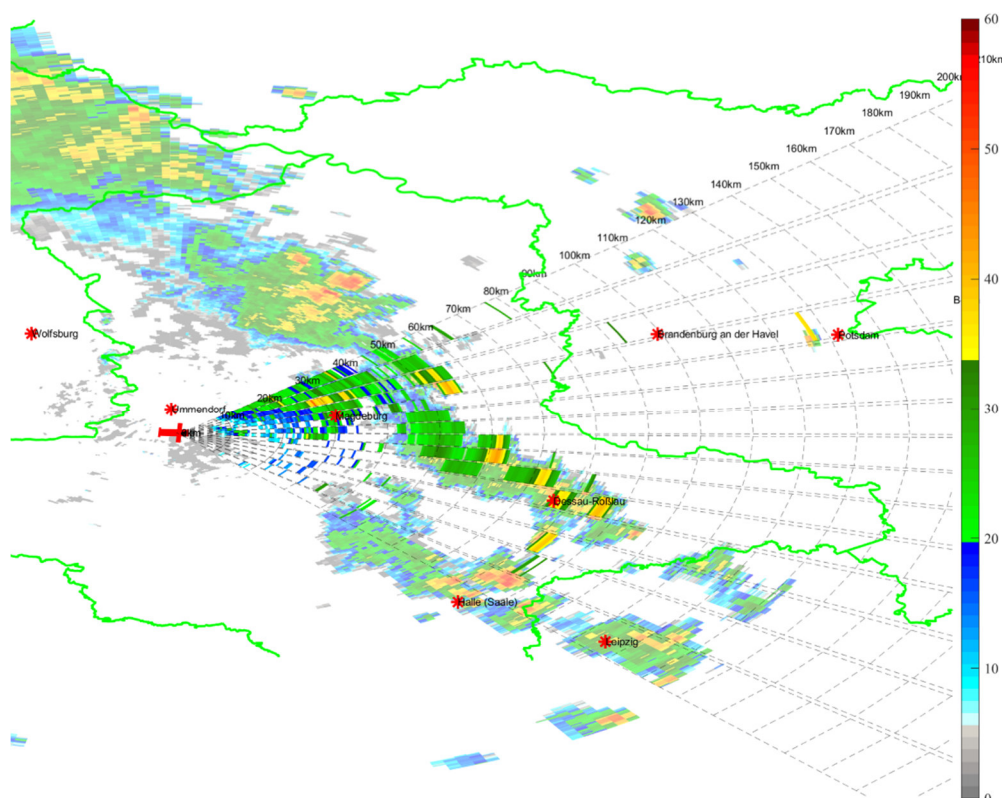


Abbildung 44: Wetterkonfiguration, Langpuls 1, 05.07.21 13:12

In Abbildung 44 kann im Langpuls 1 die Wetterfront zwischen -10° und $+25^{\circ}$ bis 90km Entfernung nahezu exakt in Ausbreitung und Intensität dargestellt werden. Das stärkere, isolierte Wettergebiet kurz vor Potsdam kann ebenso in knapp 130km Entfernung mit der richtigen Intensität angezeigt werden. An den Rändern des Radarkegels ist eine Detektion aus mehreren

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	72 / 76

Gründen herausfordernd. Durch den elektronischen Strahlschwenk sind hohe Schwenkwinkel mit Leistungsverlust verbunden. Außerdem können diese Winkel bei Kurven des Flugzeugs problematisch werden. In Abbildung 45 wird die Wetterfront bei ca. 50km zwischen -40° und -25° zwar korrekt angezeigt werden, jedoch ist bei 30km Clutter zu sehen, der nicht vom Wetter unterschieden werden kann. Dieser Clutter resultiert daraus, dass zu diesem Zeitpunkt das Flugzeug mit einem Rollwinkel von $-4,5^\circ$ in einer Linkskurve geflogen ist und somit die äußeren Beleuchtungswinkel Richtung Boden leuchten. Ebenso kann damit erklärt werden, warum das intensive Wettergebiet bei 30° bis 40° auf der rechten Seite nicht angezeigt wird. Dort leuchtet die Radarkeule stärker Richtung Himmel, weswegen das Wetter nicht von diesem Strahl erfasst werden kann.

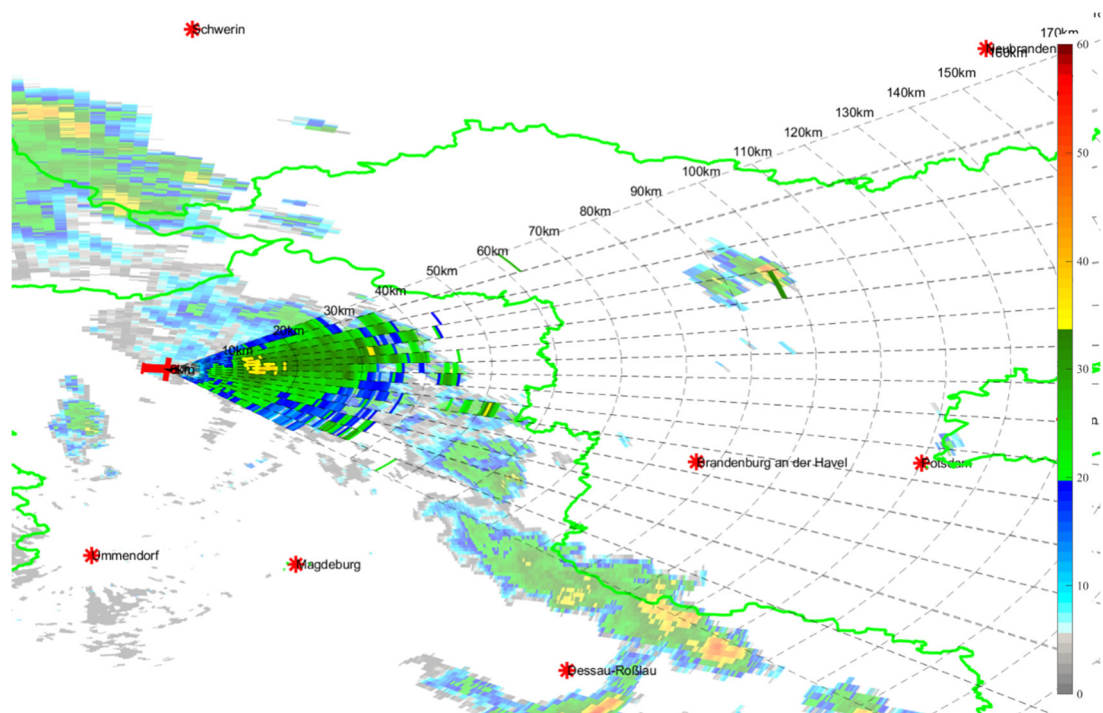


Abbildung 45 Wetterkonfiguration, Langpuls 1, 05.07.21, 13:40

In Abbildung 45 ist ebenfalls die Langpuls 1 Konfiguration zu sehen. In diesem Szenario konnte sehr dicht an das Regengebiet herangeflogen werden. Die Ausprägung und Intensität stimmt wieder sehr genau mit den Daten des DWD überein. Obwohl sehr viel Intensität bis 40km über die gesamte Radarbeleuchtung vorherrscht, ist es trotzdem noch möglich, das stärkere Regengebiet in knapp 100km Entfernung zu detektieren, wenngleich die Intensität dadurch nicht mehr exakt stimmt.

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	73 / 76

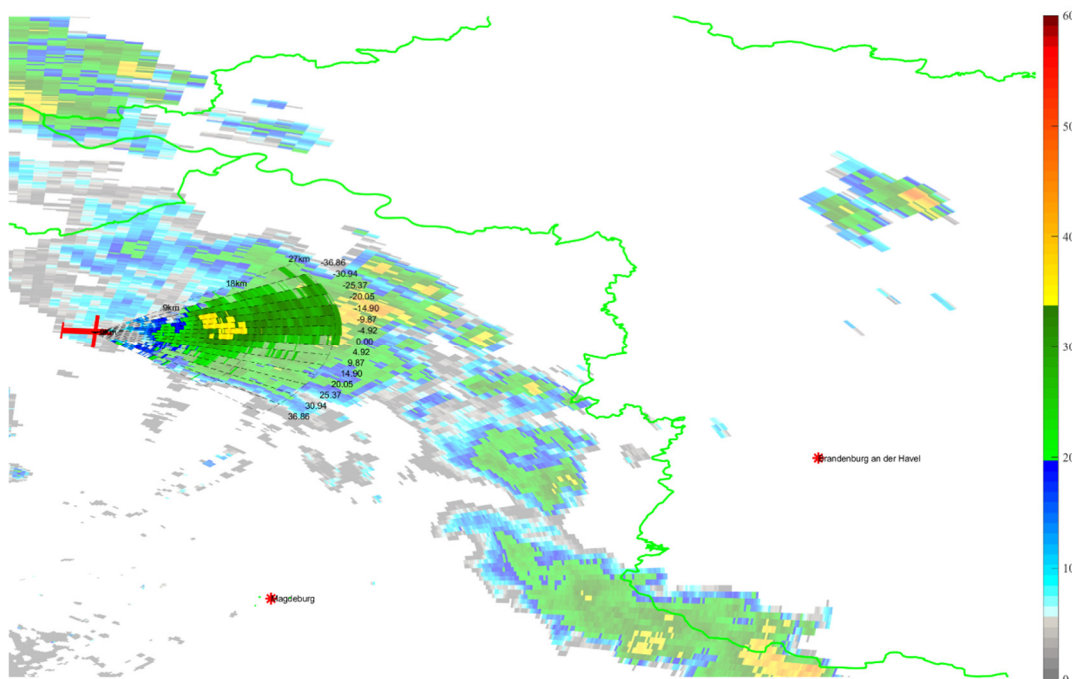


Abbildung 46: Wetterkonfiguration, Kurzpuls 5, 05.07.21, 13:40

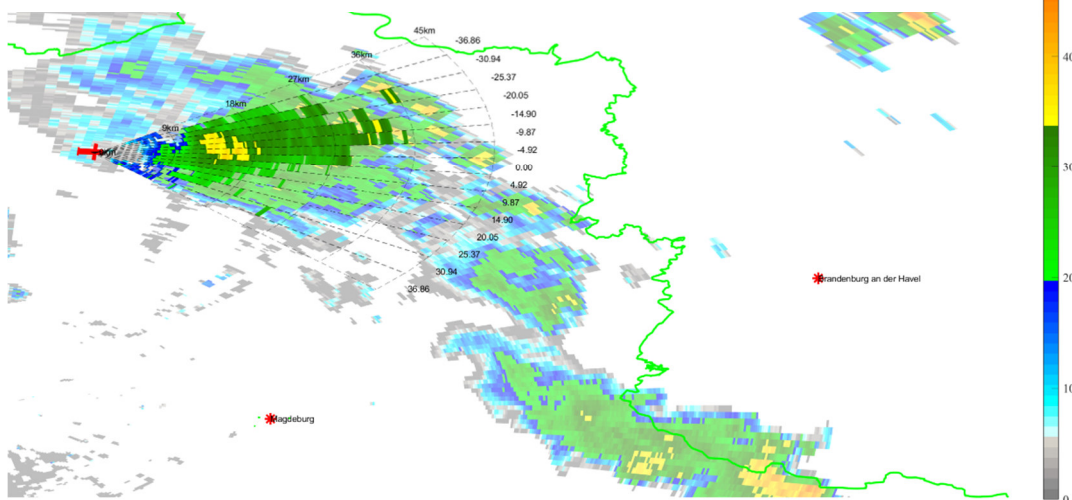


Abbildung 47: Wetterkonfiguration, Kurzpuls 1, 05.07.21, 13:40

Dasselbe Wetterszenario ist in Abbildung 46 und Abbildung 46 für die zwei Kurzpulse 1 und 5 zu sehen. Diese unterscheiden sich in der eindeutigen Reichweite. In beiden Fällen wird der Kern des Wettergebiets richtig erkannt. Jedoch wird gerade am rechten Rand der Radarsicht die Abgrenzung nicht exakt detektiert. Das liegt daran, dass dort das Wetter mit der Clutterkorrektur

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	74 / 76

herausgefiltert wird, da die Geschwindigkeitssignatur des Wetters zu sehr der Signatur des Bodenclutters ähnlich ist.

Alle diese Phänomene lassen sich bei mehreren Szenarien beobachten. Manche Herausforderungen lassen sich algorithmisch lösen, andere sind Limitierungen physikalischer Natur. Eine Weiterentwicklung und Optimierung der Algorithmik kann zu einer Verbesserung der Leistung und Anzeige von Wettergebieten führen. Schon jetzt ist jedoch die Wetterdetektionsleistung auf einem überdurchschnittlich hohen Niveau, verglichen mit den physikalischen Limitierungen, welche die elektronisch geschwenkte Antenne beinhaltet.

Eine Auswertung der Detektionsleistung von Turbulenzen und Scherwinden muss mit Simulationen oder weiteren Flug- oder Feldtests erfolgen, da die Regengebiete der Flugversuche keine turbulenten Gebiete enthielten und eine mögliche Scherwindaufzeichnung bei Start und Landung, bedingt durch eine Senderrestriktion für das Radar auf über 1000 Fuß, nicht möglich war.

3.2 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des Zahlenmäßigen Nachweises sind im kurzgefassten Erfolgskontrollbericht LuFo Verbundprojekt: 20V1707A "Kollisionserkennung / Kollisionsvermeidung für Single-Pilot-Cockpit und Unmanned Cargo" dargestellt.

3.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Vorhabenziele von KOKO 2 konnten in Zusammenarbeit mit den Unterauftragnehmern und Projektpartnern erreicht werden. Die Verfügbarkeit eines Detect and Avoid Systems gilt als Grundvoraussetzung für die volle Integration von unbemannten Luftfahrzeugen in den allgemeinen Luftraum [1].

Durch die Arbeiten im Vorhaben KOKO 2 konnten die bei Hensoldt in den Projekten MIDCAS und ProSA-n gewonnenen Erkenntnisse zu Detect and Avoid Systemen ausgebaut werden. Im Projekt KOKO 2 konnte die gesamte Funktionskette eines Detect and Avoid Systems vom Sensor bis zur Schnittstelle des Flight Management Systems demonstriert werden. In den Arbeitsgruppen zur Standardisierung kann Hensoldt die im Vorhaben KOKO 2 gewonnenen Erkenntnisse einbringen. Die im Vorhaben KOKO 2 gewonnenen Techniken können bei Hensoldt bei der Entwicklung eines Detect and Avoid Radars und eines Detect and Avoid Systems für Crew reduzierte Transportflugzeuge eingesetzt werden.

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	75 / 76

3.4 Darstellung des voraussichtlichen Nutzens und der Verwertbarkeit

Der aktuelle European ATM Master Plan von 2020 [9] skizziert die Integration von Unbemannten Luftfahrzeugen in alle Lufträume. Die Verfügbarkeit eines Detect and Avoid Systems wird dabei immer wieder als Voraussetzung genannt. Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten für die Verwertung der im Vorhaben KOKO 2 erarbeiteten Technologien und Erfahrungen werden stark von der Verfügbarkeit eines Standards für Detect and Avoid Systeme abhängen. Im Vorhaben KOKO 2 konnte ein Detect and Avoid System zur Detection nicht kooperativer Intruder demonstriert werden. Die endgültigen Leistungskennwerte eines DAA Systems werden jedoch von einem DAA Standard definiert werden, der in einer European Technical Standard Order der EASA referenziert wird. Derzeit sind zwei Standardisierungsaktivitäten bekannt. Auf Europäischer Ebene arbeitet die EUROCAE Working Group 105 an einem Standard für DAA Systeme. Auf US-Amerikanischer Ebene ist die RTCA SC 228 aktiv an der Standardisierung des ACAS Xu Systems. Die im Vorhaben KOKO 2 gewonnenen Erkenntnisse lassen sich voraussichtlich in DAA System Realisierungen nach beiden Standards unterbringen.

Das Konzept der Single Pilot Operations wird von der EASA derzeit in der Studie „eMCO-SiPO - Extended Minimum Crew Operations – Single Pilot Operations – Safety Risk Assessment Framework“ untersucht. Eine Standardisierung des DAA Systems zur Unterstützung der Piloten bei Single Pilot Operations wird auch hier eine Voraussetzung für einen wirtschaftlichen Erfolg sein.

3.5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Das Thema Detect and Avoid hat in den Jahren 2019 – 2021, wie schon im Abschnitt 3.4 beschrieben, bei der Standardisierung einige Fortschritte erzielt. Dennoch ist von der EASA für Europa kein DAA Standard referenziert. Es ist auch kein kommerziell verfügbares DAA System bekannt. In Europa wird die Standardisierung derzeit im Wesentlichen vom Projekt EUDAAS unterstützt. Das Projekt EUDAAS wird aus Mitteln der EU-Kommission finanziert.

3.6 Erfolgte Veröffentlichungen

Das Konzept zur Fusion von Daten des Wetterradars und der Wolkenerkennung wurde veröffentlicht unter:

Dudek, A., Kunstmann, F., Stütz, P., Hennig, J., 2021, 'Detect and Avoid of Weather Phenomena on-board UAV: Increasing Detection Capabilities by Information Fusion', 2021 IEEE/AIAA 40th Digital Avionics Systems Conference (DASC), San Antonio, TX, USA, 03-07 October 2021

Titel: Schlussbericht				
Cage Code:	Datum:	Dokument Identifikation:	Version:	Seite
D1901	28.03.2023	1309-A-00016A00 EDO R01	01	76 / 76