Projektabschlussbericht
C2Land Phase C2

Volocopter

August 2024

Zuwendungsempfänger	Volocopter GmbH Werner-von-Siemens-Straße 2-6, 8, 9 76646 Bruchsal
Förderkennzeichen	50NA2018
Laufzeit des Vorhabens	10/2020 – 02/2024

Classification: Unrestricted Public

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS **2**

ABBILDUNGSVERZEICHNIS **3**

TABELLENVERZEICHNIS **4**

1. PROJEKTBESCHREIBUNG **5**

I. AUFGABENSTELLUNG 5
II. BEDINGUNGEN, UNTER DENEN DAS PROJEKT DURCHGEFÜHRT WURDE 5
III. PLANUNG UND DURCHFÜHRUNG DES PROJEKTS 5
a) Projektstrukturplan *5*
b) Liste der Volocopter-Arbeitspakete und der damit verbundenen Ziele: *6*
c) Terminplan *8*
IV. WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND DER DINGE 9
a) Internationaler Stand der Technik *9*
d) Daten und Patentsituation *9*
e) Vorherige Arbeiten der Projektpartner *9*
V. ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN ORGANISATIONEN 10

2. EINGEHENDE DARSTELLUNG **11**

I. 2400 INTEGRATION VON VERSUCHSPLATTFORMEN 11
a) Erstinstallation im älteren Prototyp *11*
b) Integration des C2Land-Systems in den neueren Prototyp *13*
II. 3200 FLUGVERSUCHE 16
a) 32x1: Definition und Planung, Umfang, Ziele, Durchführung, Testbewertungsmaßstäbe, Flugzeugmodifikationen. *16*
b) 32x2: Installations- und Integrationstests, Minimierung von Umgebungseinflüsse auf die Sensorik. *16*
c) 32x3: Fluggenehmigung und Flugtestvorbereitung. *18*
i. Erste Lackierung von FATOs 18
ii. Zusätzliche Aufbringung von FATOs aufgrund Wechsel des Testgeländes 19
iii. Planung von Flugrouten 20
d) 32x4: Durchführung der Flüge *21*
i. Kampagne A: Durchführung von open-loop Testflügen zur Aufzeichnung von Daten zur Prüfung des Systems. 21
ii. Kampagne B: Durchführung von Open-Loop-Flügen und Aufzeichnung von Daten zum Testen der Simulationsumgebungen. 24
iii. Kampagnen C und D: Test des Systems mit Flügen im geschlossenen Kreislauf / Durchführung automatischer Landungen 25
iv. Analyse der Algorithmen zum Erkennen und Vermeiden (DAA) 25
III. 3400 ÜBERLEGUNGEN ZUR ZERTIFIZIERUNG 28
a) Weiterentwicklung des Zertifizierungsplans von Volocopter und künftiger Produkte. *28*
b) Zertifizierungslücken im C2Land-System. *28*
i. Technische Lücken 29
ii. Operative Lücken 30
iii. Rechtliche Lücken 30

LITERATURVERZEICHNIS **32**

Classification: Unrestricted Public

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Arbeitspakete in C2Land Phase C2, Quelle: Projektbeschreibung Gemeinschaftsprojekt C2Land Phase C2 6
Abbildung 2: Terminplan 8
Abbildung 3: Die C2Land-Steuerungsarchitektur 12
Abbildung 4: Links: das Computer-Rack. Rechts: das Sensoren-Rack 13
Abbildung 5: Das Computergestell (Cockpit) und das Sensorgestell (Bauch) 13
Abbildung 6: Links: das C2Land-Avionik-Rack. Rechts, das C2Land-Sensor-Rack 14
Abbildung 7: Linke Ansicht der C2Land Avionik- und Sensorträger, montiert auf dem neuen Nutzlastträger 14
Abbildung 8: Sichtfeldanalyse der verschiedenen C2Land-Sensoren, überlagert mit einem Modell des unteren Teils des Versuchsträgers. Die linke Abbildung ist eine Ansicht von links, die mittlere Abbildung eine Ansicht von hinten, die rechte Abbildung eine Ansicht von oben. 15
Abbildung 9: Links: Das maßgefertigte Rack, die Avionik sitzt oben auf der Holzplatte, während die Sensoren an den unteren Aluminiumprofilen befestigt sind. Rechts: Das Gestell wird einem Shakedown-Test unterzogen, um die Zuverlässigkeit der Befestigungen zu gewährleisten. 15
Abbildung 10: Integration des C2Land-Systems in den Hardware-in-the-Loop-Aufbau 17
Abbildung 11: Hinten: das C2Land-Avionik-Rack, angeschlossen und bereit für den Test. 17
Abbildung 12: Modelle gemäß den EASA-Leitlinien zur Vertiport-Konstruktion für Advanced Aerial Mobility (European Union Aviation Safety Agency, 2022) 18
Abbildung 13: Quadratische und runde FATOs, ohne die ArUco-Marker 19
Abbildung 14: Der letzte Schliff für den runden FATO 19
Abbildung 15: FATOs Position auf dem Vorfeld vor dem Hangar. 20
Abbildung 16: Tatsächliche Bilder von, links: dem quadratischen FATO, rechts: dem runden FATO 20
Abbildung 17: Sinkflugprofil, bestehend aus einer 7-10 Grad Neigung und einem vertikalen Segment von 30 m bis zum Aufsetzen. In grün das Verfahrensvolumen, in rot das hindernisfreie Volumen, gemäß EASA PTS-VPT-DSN. 21
Abbildung 18: Links: Draufsicht auf die geplanten Anflüge und Schutzzonen. Beachten Sie, dass die Positionierung der FATOs in der obigen Abbildung nur annähernd richtig ist. Rechts, vertikales Flugprofil. 21
Abbildung 19: Abheben nach der Landung auf der runden FATO 22
Abbildung 20: Landung auf dem Platz FATO, Blickwinkel des Kameraprozessors 22
Abbildung 21: Die C2Land-Anzeige 23
Abbildung 22: Links, ein quadratisches FATO, das virtuell in die Szene augmentiert ist. Rechts, ein runder FATO, der virtuell in die Szene augmentiert ist und vom C2Land-Algorithmus erkannt wird 24
Abbildung 23: Sechs durch Optimierung des Energieverbrauchs erzeugte Flugbahnen. In Grün der fliegbare Bereich, in Orange und Rot die Notfallgrenzen. 25
Abbildung 24: Simulations- und Analysepipeline für eine nominelle Begegnung 26
Abbildung 25: Verfahren zur Erzeugung von Begegnungen (Quelle: MIT-LL) 27
Abbildung 26: Bewertungsmetriken für ein Detect-And-Avoid-System, gemäß DO-365 28

Classification: Unrestricted Public

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Arbeitspakete und Ziele von Volocopter 7
Tabelle 2: Empfehlungen zur technischen Optimierung 30

Classification: Unrestricted Public

1. Projektbeschreibung

I. Aufgabenstellung

C2Land Phase C2 "Total Capability Approach zur hochgenauen und sicheren Ortung und Bahnführung ohne bodenseitige Infrastruktur am Beispiel eines automatischen Landesystems für VTOL" war ein Projekt, das auf einzigartigen Erfolgen früherer Projektphasen aufbaute, um ein bordseitiges automatisches Landesystem für elektrisch senkrecht startende und landende (eVTOL) Flugzeuge zu entwickeln. Das System ermöglicht die Automatisierung der Flugsteuerung und die damit verbundene Erhöhung der Sicherheit in der kritischsten Phase des Fluges - der Landung. Dies erforderte keine oder nur minimale zusätzliche Installationen in der Nähe des Landeplatzes. Das bedeutet, dass der automatisierte Flug ohne größere Eingriffe in das Stadtbild stattfinden kann, so dass das Flugzeug konventionelle Hubschrauberlandeplätze, Flughäfen und eVTOL-spezifische Landeplätze sicher anfliegen kann.

C2Land C2 war die letzte Phase der seit 2013 durchgeführten Entwicklungen des Systems. In den Phasen A und B von 2013 bis 2019 wurde das Landesystem im Hinblick auf den Einsatz in konventionellen Flächenflugzeugen entwickelt und erreichte einen hohen Reifegrad. In der Phase C1 (September 2019 bis August 2020) erfolgte die konzeptionelle Anpassung des Systems für den Einsatz in eVTOL-Flugzeugen. In der Phase C2 (2020 bis 2024) erfolgte die anschließende Modifikation, Validierung und Flugerprobung des Systems.

II. Bedingungen, unter denen das Projekt durchgeführt wurde

Das Projekt wurde von Oktober 2020 bis Februar 2024 unter der Projektnummer 50NA2018 durchgeführt, gefördert durch das BMWK und im Rahmen des "Nationalen Raumfahrtprogramms" vom Projektträger des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. verwaltet.

Das Projektkonsortium setzte sich aus Partnern zusammen, die zum Teil seit mehreren Jahren von der Entwurfsphase bis zum erfolgreichen Flugtest zusammengearbeitet hatten, was für das Erreichen des anspruchsvollen Projektziels entscheidend war. Das Institut für Flugführung der Technischen Universität Braunschweig leitete das Projekt und war für die Teilsysteme Tracking und Navigation verantwortlich. Der Lehrstuhl für Flugsystemdynamik der Technischen Universität München war für die Flugbahnplanung und -steuerung sowie das Integrationsmonitoring zuständig, während die f.u.n.k.e. AVIONICS GmbH für die Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung verantwortlich war. Die Volocopter GmbH stellte einen eVTOL-Flugversuchsträger und die Integrationskapazitäten zur Verfügung, damit das Landesystem in relevanten Szenarien getestet werden konnte.

III. Planung und Durchführung des Projekts

a) Projektstrukturplan

Die Arbeitspakete des Projekts waren in drei Kategorien aufgeteilt, die die Algorithmen-Entwicklung, die Entwicklung des Demonstrators und die Validierungs- und Testphase umfassten. Volocopter war für die Arbeitspakete AP2400 (Integration der Experimentalplattform), AP3200 (Flugversuche) und AP3400 (Zertifizierungsüberlegungen) verantwortlich.

Classification: Unrestricted Public

Darüber hinaus hat Volocopter auch bei allen anderen Arbeitspaketen eine unterstützende Rolle gespielt.

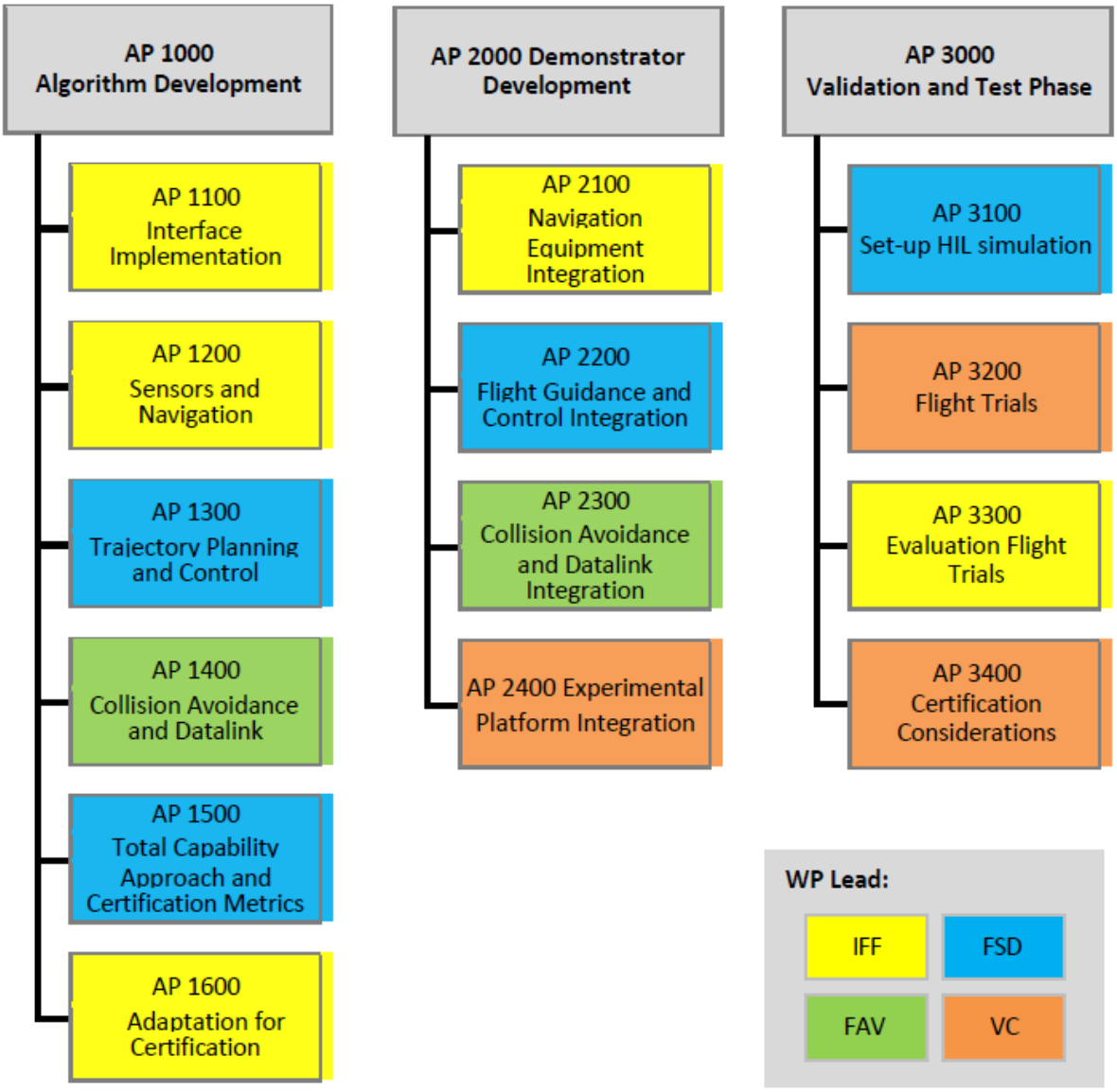

Figure 2: Work package planning C2Land Phase C2

Abbildung 1: Arbeitspakete in C2Land Phase C2, Quelle: Projektbeschreibung Gemeinschaftsprojekt C2Land Phase C2

b) Liste der Volocopter-Arbeitspakete und der damit verbundenen Ziele:

Gemäß der Projektbeschreibung war Volocopter für die folgenden 3 Arbeitspakete verantwortlich:

Classification: Unrestricted Public

Tabelle 1: Arbeitspakete und Ziele von Volocopter

Arbeitspaket	Bezeichnung	Zusammenfassung der Ziele
2400	Experimentelle Plattform-Integration	2400: Bereitstellung eines Versuchsträgers für die Integration und Flugerprobung des C2Land-Systems. 2410: Modifikation des Volocopter-Prototyps um die erforderlichen physikalischen Schnittstellen, Strukturen und Befestigungspunkte und Einbau zusätzlicher Ausrüstung für C2Land-Tests. 2420: Bordnetzversorgung für das C2Land-System.
3200	Flugversuche	3200: Vorarbeiten und Flugversuche zur Validierung des Gesamtsystems 32x1: Definition und Planung: Umfang, Zielsetzung, Durchführung und Beurteilungsmetriken zur Auswertung, Flugzeugmodifikationen. 32x2: Installations- und Integrationstests, Minimierung von Umgebungseinflüsse auf die Sensorik. 32x3: Aufstiegsgenehmigung. 32x4: Durchführung der Flüge A: Flüge im ‚open loop' und Aufzeichnung von Daten zur Prüfung der Systemanforderungen. B: Flüge im ‚open loop' und Aufzeichnung von Daten zur Validierung der entwickelten Simulationsumgebungen. C: Systemtests mit ‚closed loop'. D: Durchführung von Automatischen Landungen.
3400	Überlegungen zur Zertifizierung	Bewertung der Sicherheits- und Nachweisaspekte von Prozeduren und Sensoren. Untersuchung der Durchführbarkeit des unbemannten Fluges unter praktischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Einordnung des C2Land-Systems in den bestehenden Zulassungsrahmen (SC-VTOL, EASA Certified, ICAO Annex 14, EUROCAE WG112 SG5, ...). Zuführung der gewonnenen Erkenntnisse in EASA RMT-0230. Unterstützung der Übertragung der Technologie dieses Projekts in ein Produkt für "zertifizierte unbemannte Luftfahrzeuge". Aktiver Austausch und Dialog mit der EASA.

Classification: Unrestricted Public

c) Terminplan

Das folgende Balkendiagramm zeigt die letzte Version des Gesamtprojektzeitplans.

Nr.	Vorgangsname	Dauer	Anfang	Ende
1	C2Land, Phase C2	42,35 Monat	01.10.20	31.12.23
2	AP 0000 Project Management	42,35 Monate	01.10.20	31.12.23
3	Preliminary Design Review (PDR)	0 Monate	01.10.20	01.10.20
4	AP 1000 Algorithm Development	36,85 Monat	01.10.20	28.07.23
5	AP 1100 Interface Implementation	6,5 Monate	01.10.20	31.03.21
6	AP 1110 Hardware Interfaces	4 Monate	01.10.20	20.01.21
7	AP 1120 Software Interfaces	4,5 Monate	28.11.20	31.03.21
8	Interface Design Review	0 Monate	31.03.21	31.03.21
9	AP 1200 Sensors and Navigation	34,85 Monate	28.11.20	28.07.23
10	AP 1210 Development of Optical Positioning for Vertipads	17 Monate	28.11.20	16.03.22
11	AP 1220 Adaption of Integrated Navigation System for VTOLs	8 Monate	28.11.20	07.07.21
12	AP 1230 Enhancement of Situational Awareness by Optical Sensors	26,85 Monate	08.07.21	28.07.23
13	AP 1240 Performance Optimization	25,85 Monate	05.08.21	28.07.23
14	Final Navigation Algorithms Review	0 Monate	28.07.23	28.07.23
15	AP 1300 Trajectory Planning and Control	35,8 Monate	02.10.20	30.06.23
16	AP 1310 Flight Guidance and Flight Control Algorithms	19,5 Monate	02.10.20	31.03.22
17	AP 1320 Path Planning	10,7 Monate	02.10.20	28.07.21
18	AP 1330 Flight Dynamic Model for Target Platform	8 Monate	01.03.21	08.10.21
19	Controller Ready	0 Monate	31.03.22	31.03.22
20	AP 1340 Autoland Module for eVTOL Application	25,25 Monate	26.07.21	30.06.23
21	Autoland Ready	0 Monate	30.06.23	30.06.23
22	AP 1400 Collision Avoidance and Datalink	12 Monate	26.11.20	27.10.21
23	AP1410 Modifications for eVTOL Application	12 Monate	26.11.20	27.10.21
24	AP1420 Transponder and Datalink	12 Monate	26.11.20	27.10.21
25	AP1430 Ground Segment Development	12 Monate	26.11.20	27.10.21
26	AP 1500 Total Capability Approach and Certification Metrics	31,6 Monate	01.10.20	05.03.23
27	AP 1510 Total Capability Approach Toolchain	4 Monate	01.10.20	20.01.21
28	AP 1520 Capture, formalize and validate Requirements for Risk-Based Certification	6 Monate	21.01.21	07.07.21
29	AP 1530 Total Capability Method for Design Verification using Advanced Stochastic Methods	15,5 Monate	24.02.21	03.05.22
30	Certification Metrics Review	0 Monate	03.05.22	03.05.22
31	AP 1540 Development and Implementation of Real-Time Monitor	13,8 Monate	11.02.22	03.03.23
32	AP 1550 Deployment of Real-Time Monitor to Target Embedded Hardware and Verification	5 Monate	17.10.22	05.03.23
33	Real-Time Monitor Review	0 Monate	05.03.23	05.03.23
34	AP 1600 Adaption for Certification	20 Monate	23.12.21	05.07.23
35	AP 1610 Gap-Analysis: Current Software Design Standards and Paths to Certification	6 Monate	23.12.21	08.06.22
36	AP 1620 Module Certification Scalability Assessment	6 Monate	17.03.22	31.08.22
37	AP 1630 Software Optimization for Certifiability	12 Monate	04.08.22	05.07.23
38	Certifiability Status Review	0 Monate	05.07.23	05.07.23
39	Ground Test Readiness	0 Monate	01.08.21	01.08.21
40	Open-Loop Test Readiness	0 Monate	11.04.22	11.04.22
41	Closed-Loop Test Readiness	0 Monate	20.02.23	20.02.23
42	Algorithms Functional Review	0 Monate	28.07.23	28.07.23
43	AP 2000 Demonstrator Development	16,45 Monat	01.10.20	04.01.22
44	AP 2100 Navigation Equipment Integration	5 Monate	01.10.20	17.02.21
45	AP 2110 Hardware and Periphery	5 Monate	01.10.20	17.02.21
46	AP 2120 Optical Ground Aid	4 Monate	01.10.20	20.01.21
47	AP 2200 Flight Guidance and Control Integration	10,8 Monate	03.02.21	01.12.21
48	AP 2210 Hardware Selection and Implementation of Interface Drivers	5,5 Monate	03.02.21	06.07.21
49	AP 2220 Code Generation Toolchain including Trajectory Database	5,3 Monate	07.07.21	01.12.21
50	AP 2300 Collision Avoidance and Datalink Integration	12 Monate	03.02.21	04.01.22
51	AP 2310 Tablet PC Integration	12 Monate	03.02.21	04.01.22
52	AP 2320 Multi-Mode Transponder Integration	12 Monate	03.02.21	04.01.22
53	AP 2330 Ground System Integration	12 Monate	03.02.21	04.01.22
54	AP 2400 Experimental Platform Integration	16,45 Monat	01.10.20	04.01.22
55	AP 2410 Physical Interface Set-Up	5 Monate	18.08.21	04.01.22
56	AP 2420 Development and Set-Up Energy Supply	6 Monate	01.10.20	17.03.21
57	Critical Design Review	0 Monate	04.01.22	04.01.22
58	AP 3000 Validation and Test Phase	36,9 Monate	03.03.21	31.12.23
59	AP 3100 Set-Up HIL-Simulation	28,25 Monate	01.04.21	31.05.23
60	AP 3110 Integration of C2Land Components in HIL Environment	6 Monate	01.04.21	15.09.21
61	AP 3120 Transfer of Flight Dynamics Model to Real-Time System	4 Monate	11.10.21	28.01.22
62	AP 3130 Verification and Testing of Real-Time Monitor	5 Monate	17.10.22	05.03.23
63	AP 3140 Aircraft-in-the-Loop Test	15,15 Monate	04.04.22	31.05.23
64	AP 3200 Flight Trials	22 Monate	01.01.22	08.09.23
65	AP 3210 Campaign A - Open-Loop	4,25 Monate	01.01.22	29.04.22
66	AP 3211 Definition and Preparation Flight Test Program	2 Monate	01.01.22	25.02.22
67	AP 3212 C2Land System Installation	1 Woche	11.04.22	15.04.22
68	AP 3213 Permit to fly Acquisition	0 Monate	31.01.22	31.01.22
69	Permit to fly	0 Monate	18.04.22	18.04.22
70	AP 3214 Flight Trials	1 Woche	26.04.22	29.04.22
71	Open-Loop Flight Test Performed	0 Monate	01.05.22	01.05.22
72	AP 3220 Campaign B - Open-Loop / Partial Closed Loop	9,5 Monate	24.10.22	14.07.23
73	AP 3221 Definition and Preparation Flight Test Program	9,25 Monate	24.10.22	07.07.23
74	AP 3222 C2Land System Installation	1 Woche	03.07.23	07.07.23
75	AP 3223 Permit to fly Acquisition	3 Monate	17.04.23	07.07.23
76	Permit to fly	0 Monate	07.07.23	07.07.23
77	AP 3224 Flight Trials	1 Woche	10.07.23	14.07.23
78	AP 3230 Campaign C - Closed Loop	3,25 Monate	22.05.23	18.08.23
79	AP 3231 Definition and Preparation Flight Test Program	2 Monate	19.06.23	11.08.23
80	AP 3232 C2Land System Installation	2 Tage	10.08.23	11.08.23
81	AP 3233 Permit to fly Acquisition	3 Monate	22.05.23	11.08.23
82	Permit to fly	0 Monate	11.08.23	11.08.23
83	AP 3234 Flight Trials	1 Woche	14.08.23	18.08.23
84	AP 3240 Campaign D - Autoland	3,25 Monate		
85	AP 3241 Definition and Preparation Flight Test Program	1 Monat	07.08.23	01.09.23
86	AP 3242 C2Land System Installation	2 Tage	31.08.23	01.09.23
87	AP 3243 Permit to fly Acquisition	3 Monate	12.06.23	01.09.23
88	Permit to fly	0 Monate	01.09.23	01.09.23
89	AP 3244 Flight Trials	1 Woche	04.09.23	08.09.23
90	Autoland Flight Test Performed	0 Monate	08.09.23	08.09.23
91	AP 3300 Evaluation Flight Trials	36,95 Monate	03.03.21	31.12.23
92	AP 3310 Data Storage and Editing	3 Monate	03.03.21	25.05.21
93	AP 3320 Evaluation and Assessment Navigation	21,75 Monate	02.05.22	30.12.23
94	AP 3330 Evaluation and Assessment Trajectory Planning, Trajectory Control and Automatic Landing	21,75 Monate	02.05.22	31.12.23
95	AP 3340 Evaluation and Assessment Collision Avoidance	21,75 Monate	02.05.22	31.12.23
96	AP 3350 Evaluation and Assessment Total Capability Approach and Certification Metrics	21,75 Monate	02.05.22	31.12.23
97	AP 3360 Evaluation and Assessment Commercial Usability	21,75 Monate	02.05.22	31.12.23
98	AP 3370 Publication of Results	21,75 Monate	02.05.22	31.12.23
99	AP 3400 Certification Considerations	10 Monate	27.02.23	01.12.23
100	AP 3410 Feasibility Assessment on Operation Type #2 and Type #3	10 Monate	27.02.23	01.12.23
101	End of Project	0 Tage	31.12.23	31.12.23

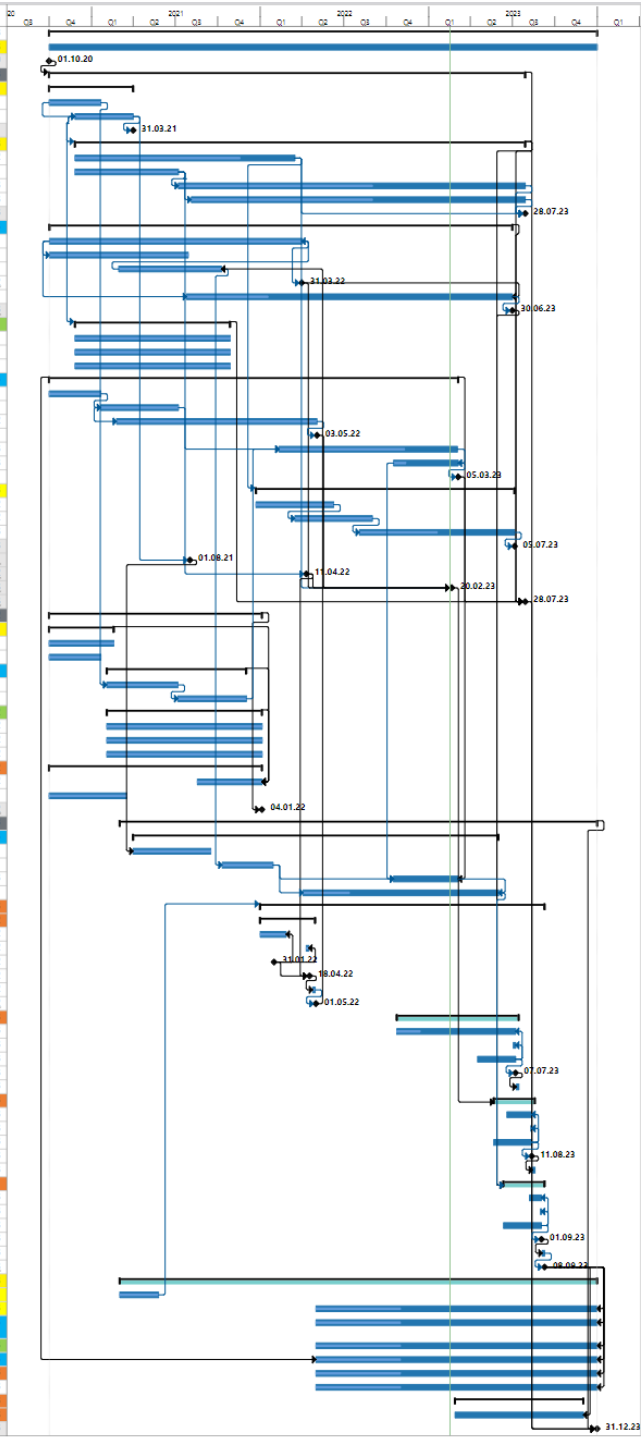

Abbildung 2: Terminplan

Classification: Unrestricted Public

IV. Wissenschaftlicher und technischer Stand der Dinge

a) Internationaler Stand der Technik

Zu Beginn des Projekts befand sich die Lufttaxi-Branche bereits in einer rasanten Entwicklung. Große Investitionen von Unternehmen wie Daimler und Airbus trieben die Entwicklung von innovativen eVTOL-Flugzeugen voran. Während die automatische Landung ohne Piloten eine entscheidende Komponente für den Erfolg der Branche ist, lag der Schwerpunkt bisher auf anderen Bereichen der Lufttaxi-Technologie. Dennoch haben Unternehmen wie Uber, Airbus, Lilium GmbH und AutoFlightX GmbH große Fortschritte bei der Entwicklung von eVTOL-Flugzeugen gemacht, die autonom und effizient arbeiten können. Fortschritte bei der Automatisierung und bei automatischen Landungssystemen sind der Schlüssel zur Erschließung des vollen Potenzials von Lufttaxis in städtischen Gebieten, und die Branche ist für ein erhebliches Wachstum in den kommenden Jahren bereit.

d) Daten und Patentsituation

Dem C2Land-Konsortium sind keine Patente bekannt, die das Projekt verhindert hätten. Einzelne funktionale Aspekte, wie Landeverfahren für kleinere Drohnen oder bemannte Flugzeuge, sind kaum oder gar nicht anwendbar. Die bisherigen Ergebnisse der Antragsteller, die die Grundlage für dieses Projekt bildeten, wurden bereits veröffentlicht.

e) Vorherige Arbeiten der Projektpartner

In den beiden vorangegangenen Projektphasen hat das C2Land-Konsortium erfolgreich ein vollautomatisches, optisch unterstütztes Landesystem für konventionelle Flugzeuge der allgemeinen Luftfahrt entwickelt. Die Systemarchitektur umfasste ein Display als Mensch-Maschine-Schnittstelle, den Flugsteuerungsrechner (FCC), verschiedene Sensoren und den Navigationsrechner. Der Entwurf erfolgte nach den RNP-Standards der ICAO und garantierte ein nahtloses Ineinandergreifen der Ortungsverfahren. Das Integritätskonzept mit Fehlererkennung wurde entwickelt und in Flugversuchen getestet, um die Lokalisierungsgenauigkeit unterhalb von 200 Fuß zu verbessern. Es wurden relevante Fehlerereignisse identifiziert und ein geeigneter Ansatz für die Ausbreitung von Fehlerwahrscheinlichkeiten gewählt, um die Kritikalität des Flugzustandes zu bewerten. Für die weitere Entwicklung und Erprobung wurden zwei Flugversuchsträger, die Dornier Do 128-6 und die Diamond DA42, eingesetzt und mehrere Flugkampagnen durchgeführt, um die Teilsysteme und das Gesamtsystem unter realen Betriebsbedingungen zu testen. Die Ergebnisse wurden im Hinblick auf ihre spätere Zulassungsfähigkeit analysiert und ein Handlungsbedarf für zukünftige Arbeiten abgeleitet. In zahlreichen Publikationen und Konferenzbeiträgen wurden die wissenschaftlichen Grundlagen für die Umsetzung des Projektes gelegt, u.a. optische Sensorkonzepte, erreichbare Genauigkeiten, Möglichkeiten der Infrarotkameras und die Fusion verschiedener Spektralbereiche. Mit diesem Erfolg wollte das C2Land-Konsortium die Fähigkeit zur automatischen und optisch unterstützten Landung auf VTOL-fähige Flugzeuge in einem wachsenden und vielversprechenden Markt übertragen.

Classification: Unrestricted Public

V. Zusammenarbeit mit anderen Organisationen

Obwohl kein externes Unternehmen direkt an dem Projekt beteiligt war, wurden die Projektergebnisse genutzt, um die Standardisierungsbemühungen innerhalb der EU und der globalen Normungsgremien zu fördern. Insbesondere wurden die Ergebnisse genutzt, um einen Beitrag zu leisten zu:

- (European Union Aviation Safety Agency, 2022) - Prototype Technical Specifications for the Design of VFR Vertiports for Operation with Manned VTOL-Capable Aircraft Certified in the Enhanced Category (PTS-VPT-DSN)
- (ASTM, 2021) - F3269-21: Standard Practice for Methods to Safely Bound Behavior of Aircraft Systems Containing Complex Functions Using Run-Time Assurance
- RTCA SC-147/EUROCAE WG-75 - ACAS Xr: Minimum Operational Performance Standard for Detect and Avoid (voraussichtliche Publikation Q3 2025)
- Kommentare zu (RTCA, 2022) - DO-397 Guidance Material: Navigation Gaps for Unmanned Aircraft Systems (UAS)

Classification: Unrestricted Public

2. Eingehende Darstellung

I. 2400 Integration von Versuchsplattformen

Zu Beginn des Projekts verwendete Volocopter einen älteren Prototyp für die Flugerprobung. Anfang 2023 schlug Volocopter jedoch vor, die Integration der C2Land auf eine aktuellere Version zu verlagern, da die gesamte autonome Entwicklung bei Volocopter auf diesem neueren Prototyp durchgeführt wurde. Durch diesen Wechsel des Fluggeräts gab es einige Nacharbeiten für die Integration und die Wiederholung einer Flugkampagne. Insgesamt wurden drei verschiedene Flugtestkampagnen mit zwei verschiedenen Luftfahrzeugen durchgeführt. Die ersten beiden Flugtestkampagnen dienten der Datenerfassung (open loop), wobei das Fluggerät in beiden Fällen manuell gesteuert wurde. In der dritten Flugtestkampagne wurde das C2Land-System für automatisierte Flüge (im closed loop/ geschlossenen Regelkreis) eingesetzt. In diesem Kapitel werden die Integrationsbemühungen zur Vorbereitung der FT-Kampagnen im Detail beschrieben:

a) Erstinstallation im älteren Prototyp

Für den Open-Loop-Flugtest wurde die in der folgenden Abbildung dargestellte vereinfachte Architektur umgesetzt.

Der Hauptunterschied zu einer ursprünglich geplanten Architektur bestand darin, dass die Volocopter Autonomy Suite entfernt wurde, da sie für die Open-Loop-Flugtests nicht benötigt wurde. Die Volocopter Autonomy Suite überträgt Steuer-Befehle des C2Land Systems an die Avionik des Flugzeugs.

Classification: Unrestricted Public

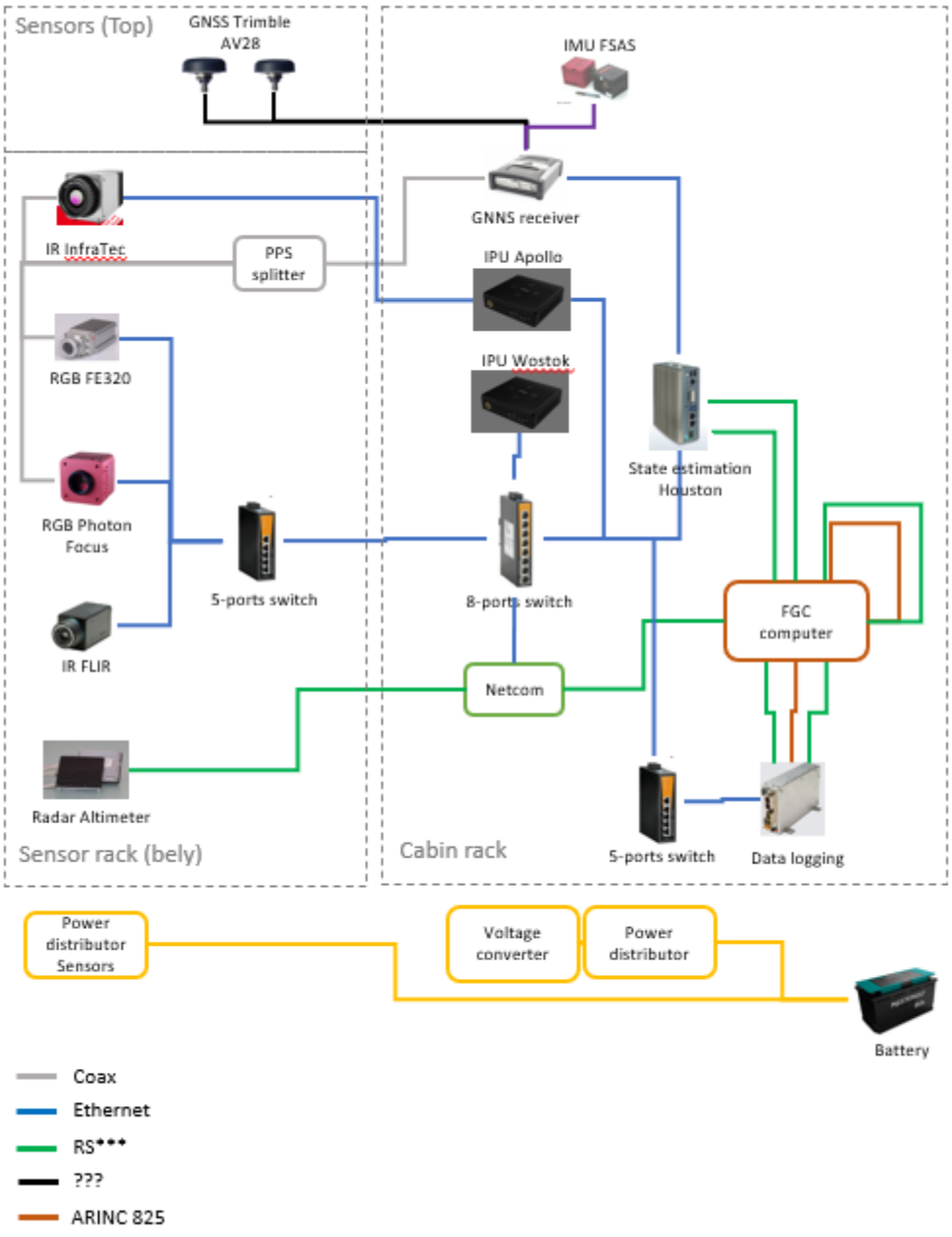

Abbildung 3: Die C2Land-Steuerungsarchitektur

Die C2Land-Ausrüstung selbst bestand aus zwei Racks, einem Computer-Rack (36,5 kg) und einem Sensor-Rack (13 kg), die in dem Fluggerät installiert werden mussten. Aufgrund der Größe und des Gewichts der Ausrüstung waren eine Strukturanalyse und Tests erforderlich, um die Sicherheit in allen Situationen zu gewährleisten. Diese Analyse wurde durch fehlende Steifigkeit und Festigkeit der Konstruktion der C2Land-Ausrüstung erschwert. Außerdem war wegen der elektromagnetischen Komponenten (insbesondere des Radarhöhenmessers) eine Studie über elektromagnetische Interferenzen erforderlich, um die Fluggenehmigung zu erhalten.

Classification: Unrestricted Public

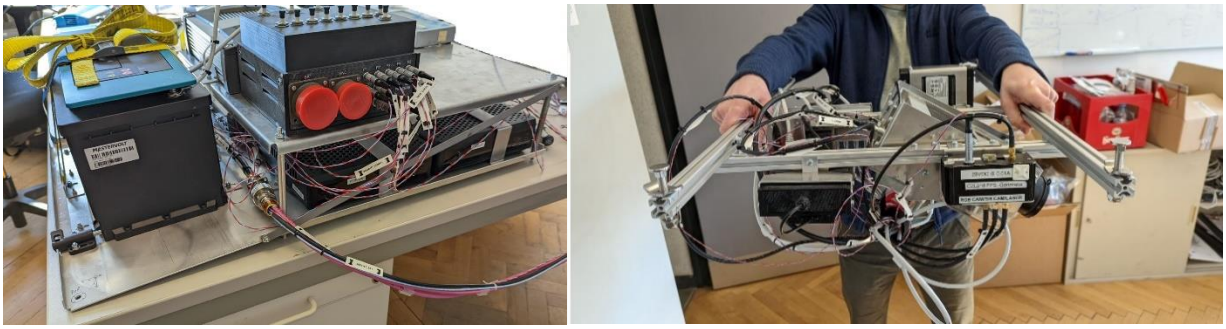

Abbildung 4: Links: das Computer-Rack. Rechts: das Sensoren-Rack

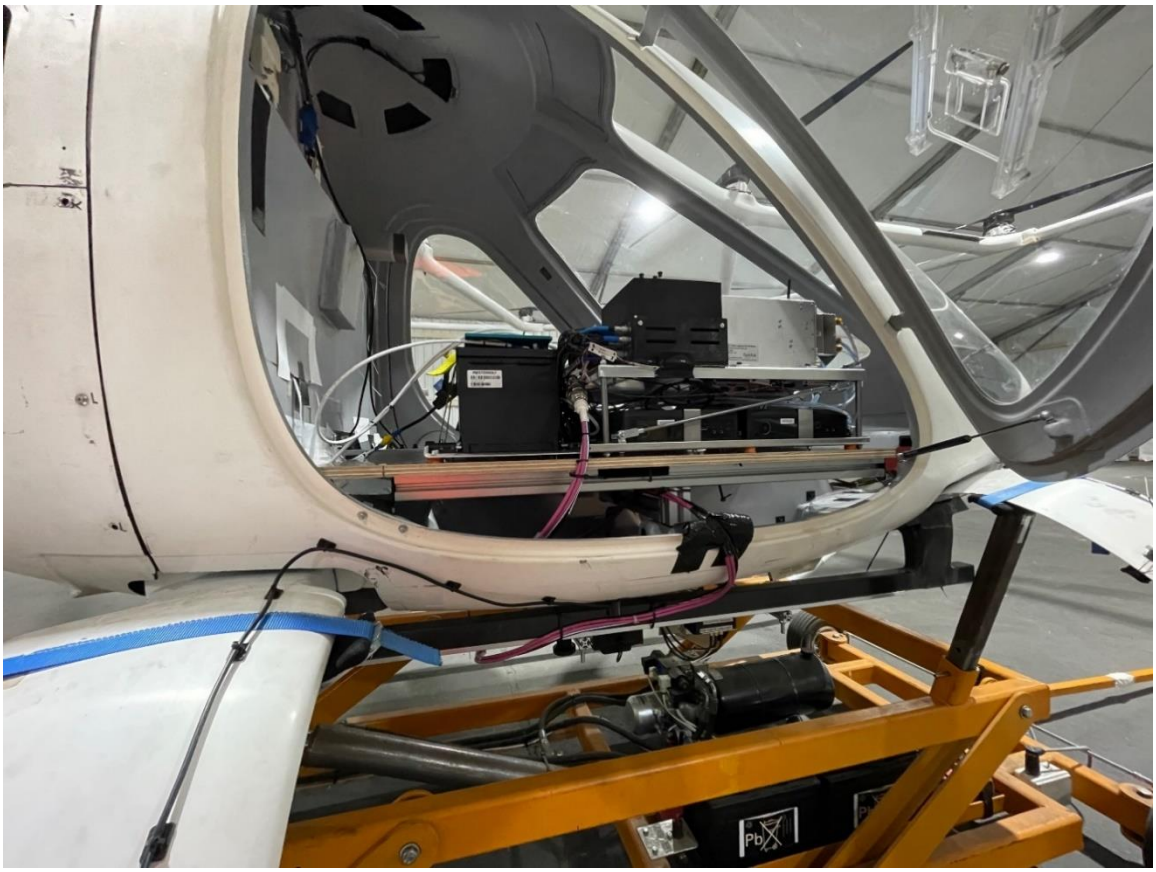

Abbildung 5: Das Computergestell (Cockpit) und das Sensorgestell (Bauch)

b) Integration des C2Land-Systems in den neueren Prototyp

Um den Weg zum Closed-Loop-Flug vorzubereiten, stellte Volocopter die Volocopter Autonomy Suite als Schnittstelle zwischen dem C2Land-System und der Flugzeug-Avionik zur Verfügung.

Im Vergleich zur ursprünglichen Architektur, die zu Beginn des Projekts entwickelt wurde, wurde die endgültige, für den neueren Prototyp verwendete Closed-Loop-Architektur gestrafft, um nur die für

Classification: Unrestricted Public

die Demonstration unbedingt erforderlichen Komponenten zu behalten und so den Aufwand für den vor den Flugkampagnen erforderlichen Installations- und Sicherungsprozess zu verringern.

Die wichtigste Schnittstelle befand sich zwischen dem C2Land Flight Guidance and Control Computer und der Autonomy Suite VCMM (Mission Manager). Diese Schnittstelle wurde definiert und eine ICD wurde erstellt.

In der ersten Iteration mit dem älteren Prototyp wurde das C2Land-System mithilfe von zwei Racks integriert, nämlich dem Computer- und dem Sensor-Rack. Um mögliche Unterbrechungen oder Verzögerungen bei unseren Tests zu reduzieren, wurden dieselben Racks auch für die Integration in den neueren Prototyp verwendet.

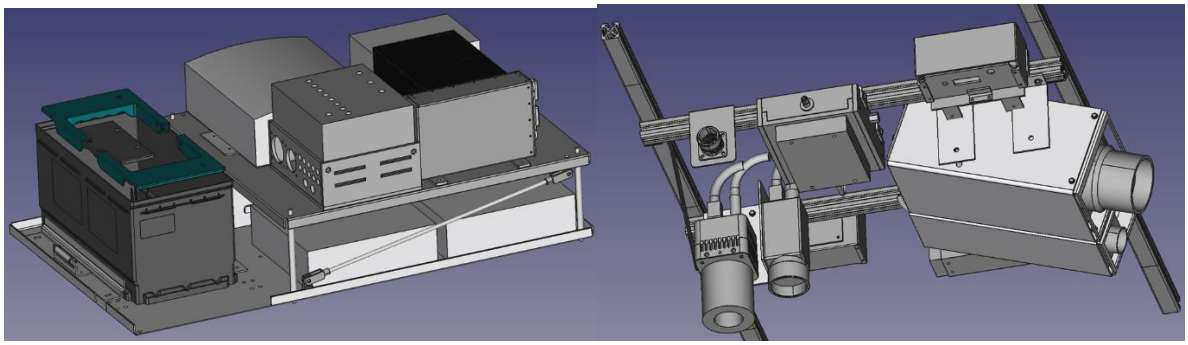

Abbildung 6: Links: das C2Land-Avionik-Rack. Rechts, das C2Land-Sensor-Rack

Es wurde erfolgreich ein Nutzlastrack entwickelt und gebaut, welches die sichere Befestigung des Computer- und des Sensorracks am neueren Prototyp gewährleistet. Damit ist sichergestellt, dass beide Komponenten während des Betriebs fest mit dem Fluggerät verbunden sind und ein Höchstmaß an Sicherheit und Zuverlässigkeit bieten.

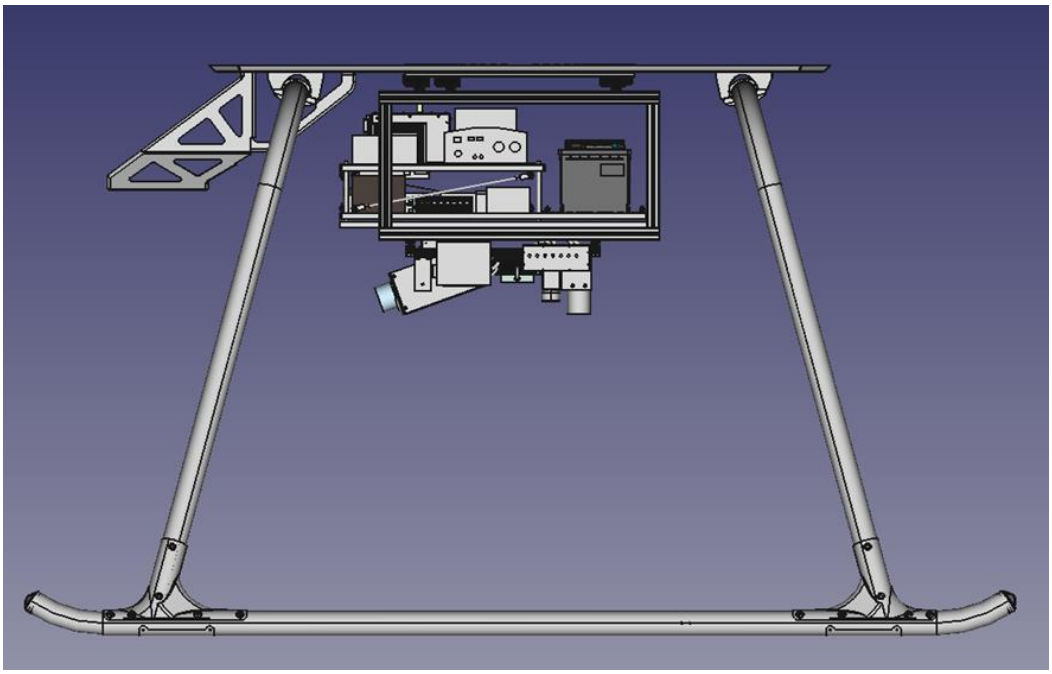

Abbildung 7: Linke Ansicht der C2Land Avionik- und Sensorträger, montiert auf dem neuen Nutzlastträger

Classification: Unrestricted Public

Der Wechsel der Plattform führte dazu, dass die mechanische Integration in das Flugzeug überdacht werden musste. Dazu musste untersucht werden, ob genügend Platz für die C2Land-Avionik vorhanden und ein ausreichendes, nicht verdecktes Sichtfeld verfügbar war.

Dazu wurde mit Hilfe eines 3-D-Modells des unteren Teils des Flugzeugs (einschließlich des Fahrwerks) und der C2Land-Racks (Avionik und Sensoren) erstellt. Die Sichtfelder der Sensoren wurden überlagert, um sicherzustellen, dass das Fahrwerk die Fähigkeiten der Sensoren nicht einschränkt (siehe folgende Abbildung).

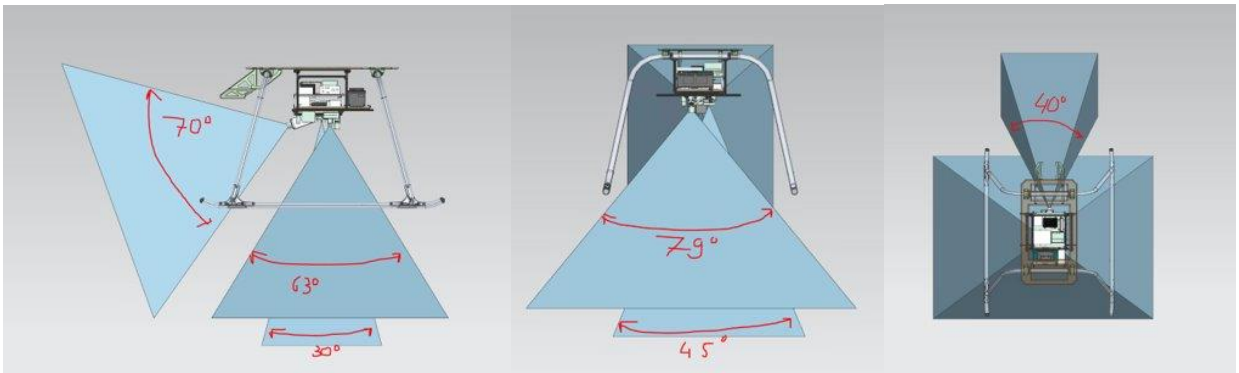

Abbildung 8: Sichtfeldanalyse der verschiedenen C2Land-Sensoren, überlagert mit einem Modell des unteren Teils des Versuchsträgers. Die linke Abbildung ist eine Ansicht von links, die mittlere Abbildung eine Ansicht von hinten, die rechte Abbildung eine Ansicht von oben.

Nachdem feststand, dass die Gestelle passen und ordnungsgemäß funktionieren würden, bestand der nächste Schritt darin, die C2Land-Ausrüstung am Fluggerät zu befestigen. Da es kein vorhandenes Nutzlastrack gab, in das eine so große Ausrüstung hätte eingebaut werden können, wurde ein eigenes Nutzlastrack entworfen und von den Mechaniker Teams gründlich getestet.

Abbildung 9: Links: Das maßgefertigte Rack, die Avionik sitzt oben auf der Holzplatte, während die Sensoren an den unteren Aluminiumprofilen befestigt sind. Rechts: Das Gestell wird einem Shakedown-Test unterzogen, um die Zuverlässigkeit der Befestigungen zu gewährleisten.

Der letzte mechanische Integrationsschritt betraf das Kabelbaumsystem. Da sich die Avionik zwischen den beiden Luftfahrzeugen unterschied, musste für die Integration ein spezifischer Adapter gebaut werden. Er verbindet die Avionik des Flugzeugs, die Autonomy Suite und den

Classification: Unrestricted Public

Flugsteuerungsrechner von C2Land. Da die mechanische Positionierung des Kabelbaums an einem 3-D-Modell nicht möglich ist (Kabel und ihre Bewegungen sind bekanntermaßen komplex zu modellieren), wurde die endgültige Anpassung vorgenommen, als die C2Land-Ausrüstung auf dem Fluggerät montiert war. Dieser Schritt war Bestandteil der Bodentests, die vor den Flugkampagnen stattfanden.

Entgegen der ursprünglichen Planung wurde das C2Land-System so konzipiert, dass es über eine eigene Stromversorgung verfügte, so dass keine Stromzufuhr vom Flugzeug aus erforderlich war, um das System zu betreiben.

II. 3200 Flugversuche

a) 32x1: Definition und Planung, Umfang, Ziele, Durchführung, Testbewertungsmaßstäbe, Flugzeugmodifikationen.

Wie bereits beschrieben in I 2400 Integration von Versuchsplattformen beschrieben, hat das Projektteam insgesamt drei Flugtestkampagnen mit zwei verschiedenen Prototypen durchgeführt. Die ersten beiden Flugtestkampagnen dienten der Datenerfassung (offener Kreislauf) und wurden zunächst mit dem älteren und später mit dem neueren Versuchsträger durchgeführt, wobei das Fluggerät in beiden Fällen manuell gesteuert wurde. Zur Vorbereitung der Flüge im geschlossenen Regelkreis wurde eine intensive Hardware-In-The-Loop (HIL)-Testkampagne durchgeführt. Anschließend wurde in der dritten Flugtestkampagne das C2Land-System eingesetzt, um automatisierte Flüge (mit geschlossenem Regelkreis) zu erzielen.

Die Detect und Avoid Algorithmen wurden, um das Risiko für das Flugzeug zu minimieren und die Erkenntnisse zu maximieren durch Monte-Carlo-Simulationen getestet.

b) 32x2: Installations- und Integrationstests, Minimierung von Umgebungseinflüsse auf die Sensorik.

Zur Freigabe der Flugversuche waren keine Tests mit Subscale-Drohnen möglich, da die C2Land-Nutzlast etwa 50 kg beträgt. Die beste Alternative für die Untersuchung der Robustheit des Regelkreises war daher die Durchführung von Hardware-in-the-Loop-Tests mit dem Volocopter HIL-Prüfstand und -Simulator.

Das C2Land-System verfügte über eigene Sensoren und Zustandsschätzungen. Für die HIL-Tests wurde der vorhandene Simulator so modifiziert, dass er Sensordaten an das C2Land-System lieferte. Die physikalische Architektur für die HIL-Tests ist unten dargestellt:

Classification: Unrestricted Public

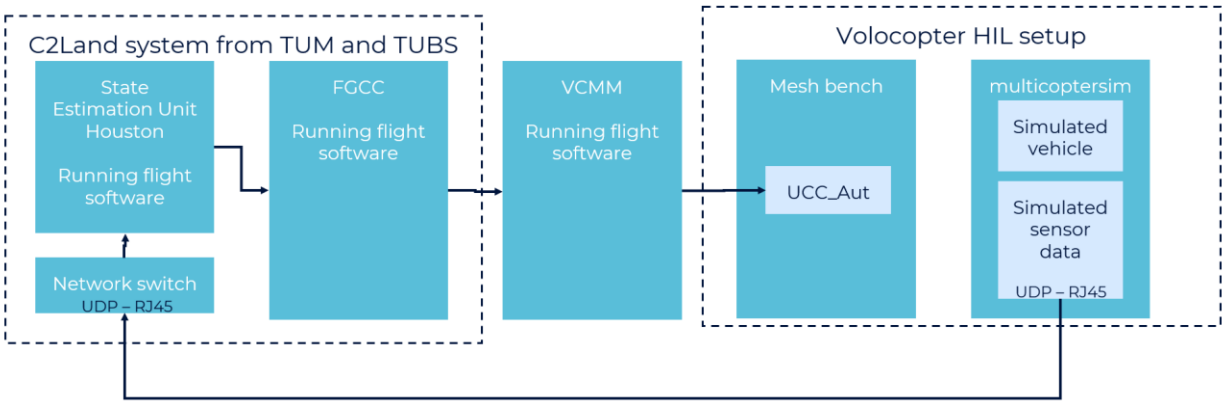

Abbildung 10: Integration des C2Land-Systems in den Hardware-in-the-Loop-Aufbau

Darüber hinaus wurden alle Teilsysteme des C2Land-Systems auf dem HIL-Prüfstand integriert. Dies half bei der Prüfung aller Schnittstellen des Systems:

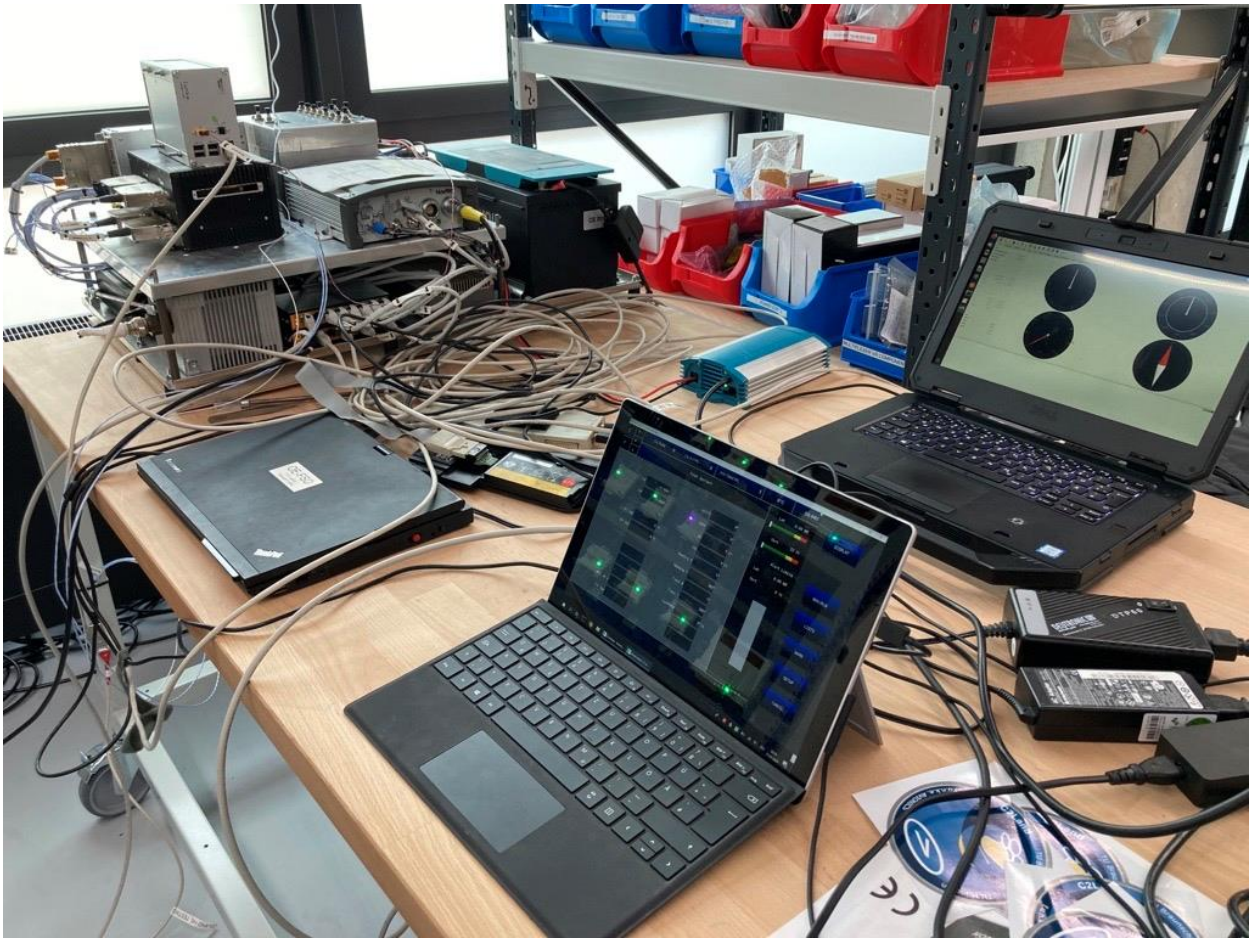

Abbildung 11: Hinten: das C2Land-Avionik-Rack, angeschlossen und bereit für den Test.

Classification: Unrestricted Public

c) 32x3: Fluggenehmigung und Flugtestvorbereitung.

i. Erste Lackierung von FATOs

Ein häufiger Fallstrick bei Forschungsaktivitäten ist die Präsentation von Ergebnissen aus einer einzigen Datenquelle, was zu starken Verzerrungen und einer Überanpassung an die vorliegenden Daten führen kann. Um eine größere Vielfalt an Daten für dieses Projekt zu ermöglichen, wurde beschlossen, drei Datenquellen zu verwenden: zwei reale Flugplätze in Deutschland und zusätzlich virtuelle Daten, die durch Bild-Augmentation generiert wurden und es ermöglichen, FATOs virtuell auf jedes beliebige Bild eines beliebigen Flughafens zu projizieren.

Um die kamerabasierte Verfolgung von Landeplätzen auf dem Flughafen für die erste Flugtestkampagne zu ermöglichen, wurden zwei FATOs auf dem Vorfeld der Volocopter-Halle aufgemalt. Sie folgten einem Modell, das den aktuellen Stand der regulatorischen Diskussionen über die FATOs der AAM widerspiegelt.

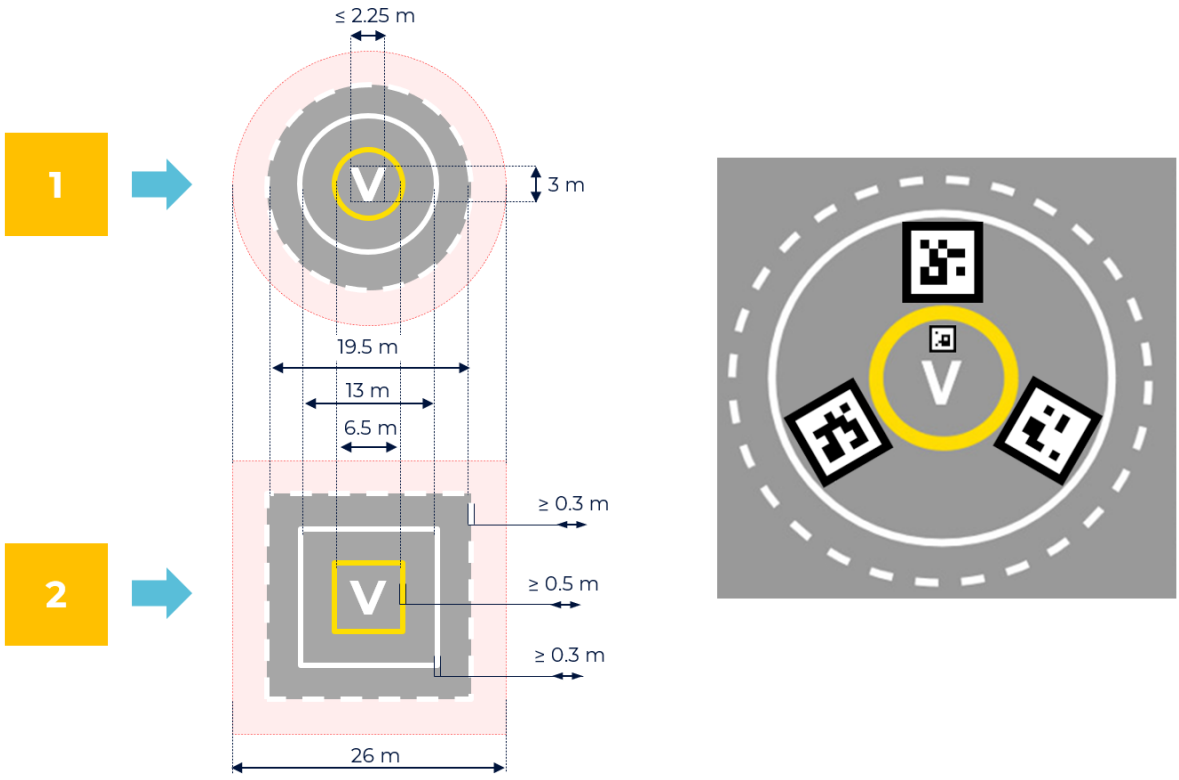

Abbildung 12: Modelle gemäß den EASA-Leitlinien zur Vertiport-Konstruktion für Advanced Aerial Mobility (European Union Aviation Safety Agency, 2022)

Classification: Unrestricted Public

Die Anbringung solcher Markierungen auf dem Vorfeld bedurfte einer behördlichen Genehmigung, die nur für einen sehr begrenzten Zeitraum erteilt wurde, so dass nur ein enges Zeitfenster für das Anbringen, Fliegen und Entfernen der Bilder zur Verfügung stand.

Die folgenden Bilder zeigen das Endergebnis der Bemalung der FATO-Markierungen.

Abbildung 13: Quadratische und runde FATOs, ohne die ArUco-Marker

Abbildung 14: Der letzte Schliff für den runden FATO

ii. Zusätzliche Aufbringung von FATOs aufgrund Wechsel des Testgeländes

Für die Flugkampagnen mit dem neueren Versuchsträger musste das C2Land-Projekt an einen anderen Flugplatz verlegt werden. Daher musste ein neuer Satz Markierungen gemalt werden. Die Lage dieser Markierungen ist im Folgenden zusammen mit aktuellen Bildern zu sehen.

Classification: Unrestricted Public

Abbildung 15: FATOs Position auf dem Vorfeld vor dem Hangar.

Abbildung 16: Tatsächliche Bilder von, links: dem quadratischen FATO, rechts: dem runden FATO

iii. Planung von Flugrouten

Die Anflug- und Landebahn wurde entsprechend dem EASA-Vertiport-Standard (European Union Aviation Safety Agency, 2022) entwickelt, wie in der Abbildung unten dargestellt. Der Sinkflug beginnt in einer Höhe oberhalb der Cat I Präzisionsanflug-Entscheidungshöhe und geht in einem Winkel zwischen 7 und 10 Grad nach unten. Der Sinkflug endet in einer Höhe von 30 m für ein vertikales Segment. Die Anflugprofile werden im Folgenden beschrieben.

Classification: Unrestricted Public

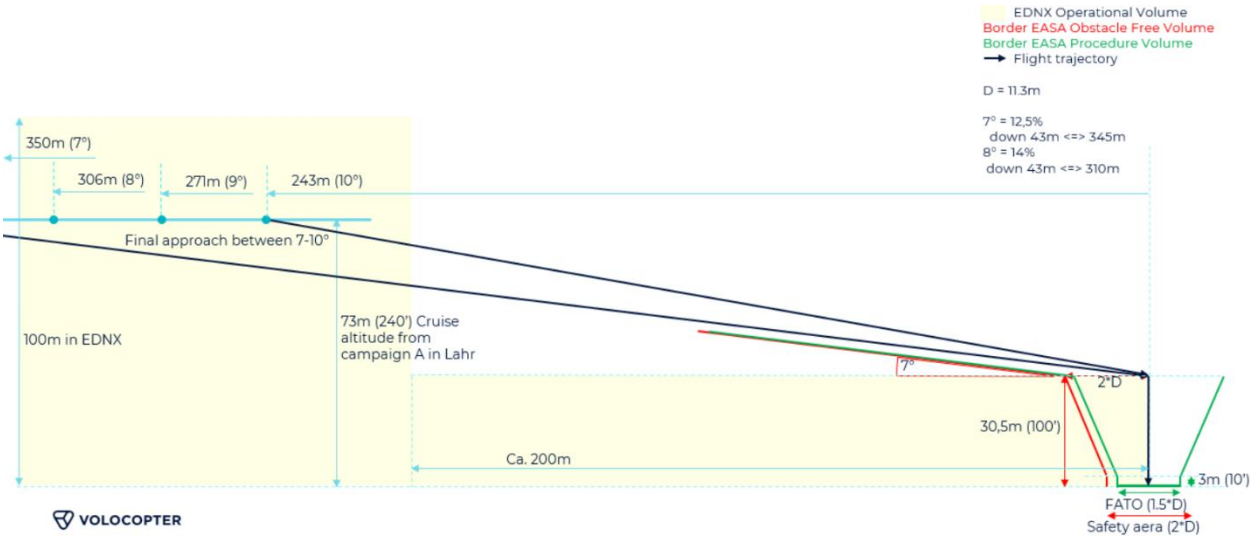

Abbildung 17: Sinkflugprofil, bestehend aus einer 7-10 Grad Neigung und einem vertikalen Segment von 30 m bis zum Aufsetzen. In grün das Verfahrensvolumen, in rot das hindernisfreie Volumen, gemäß EASA PTS-VPT-DSN.

d) 32x4: Durchführung der Flüge

i. Kampagne A: Durchführung von open-loop Testflügen zur Aufzeichnung von Daten zur Prüfung des Systems.

Die Flugversuche fanden auf dem Vorfeld des Volocopter-Hangars statt. Die detaillierten Flugbahnen und Sinkflugprofile sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

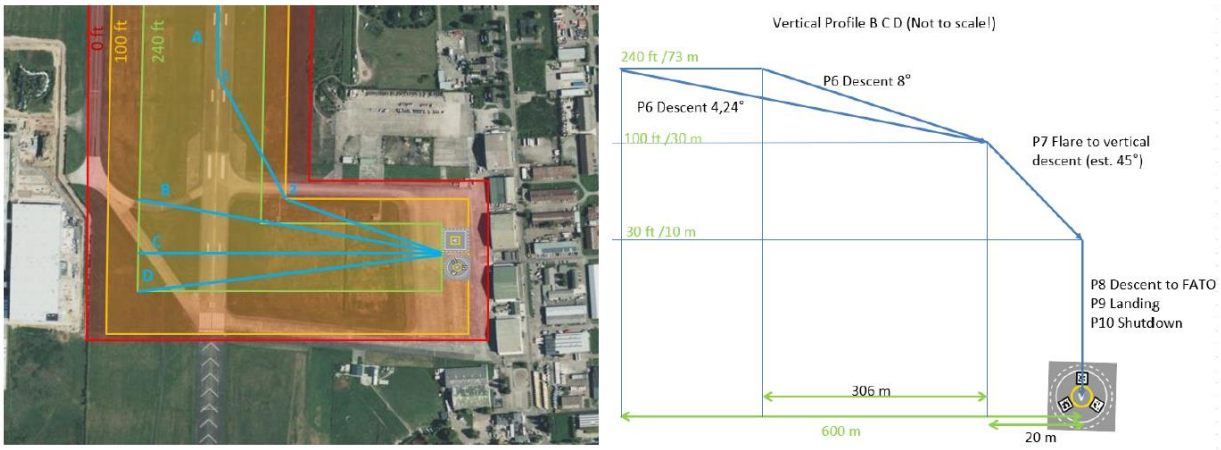

Abbildung 18: Links: Draufsicht auf die geplanten Anflüge und Schutzzonen. Beachten Sie, dass die Positionierung der FATOs in der obigen Abbildung nur annähernd richtig ist. Rechts, vertikales Flugprofil

Die Flugwege wurden so festgelegt, dass mehrere Anflugwinkel zu den FATOs mit unterschiedlichen Anfluglängen getestet werden konnten. Dabei mussten aufgrund vorhandener Lichtmasten die Sinkflugwinkel bei einigen Anflügen angepasst werden.

Die Flugtests fanden an zwei Tagen bei nahezu idealen Wetterbedingungen statt. Mehr als 15 Anflüge und Landungen wurden sowohl mit dem runden als auch dem quadratischen FATO-Design durchgeführt.

Classification: Unrestricted Public

Abbildung 19: Abheben nach der Landung auf der runden FATO

Die Ausrichtung mit dem FATO zur Vorbereitung der Landung erfolgte durch Kommunikation zwischen einem Team von Beobachtern am Boden und dem steuernden Piloten auf der Rollbahn.

Trotz teilweiser mangelnder Ausrichtung lieferten die durchgeführten Anflüge zufriedenstellende Videosequenzen und ermöglichten eine Sichtbarkeit des FATO fast bis zum Aufsetzen. Je länger die Sicht ist, desto länger kann das visuelle System überwachen.

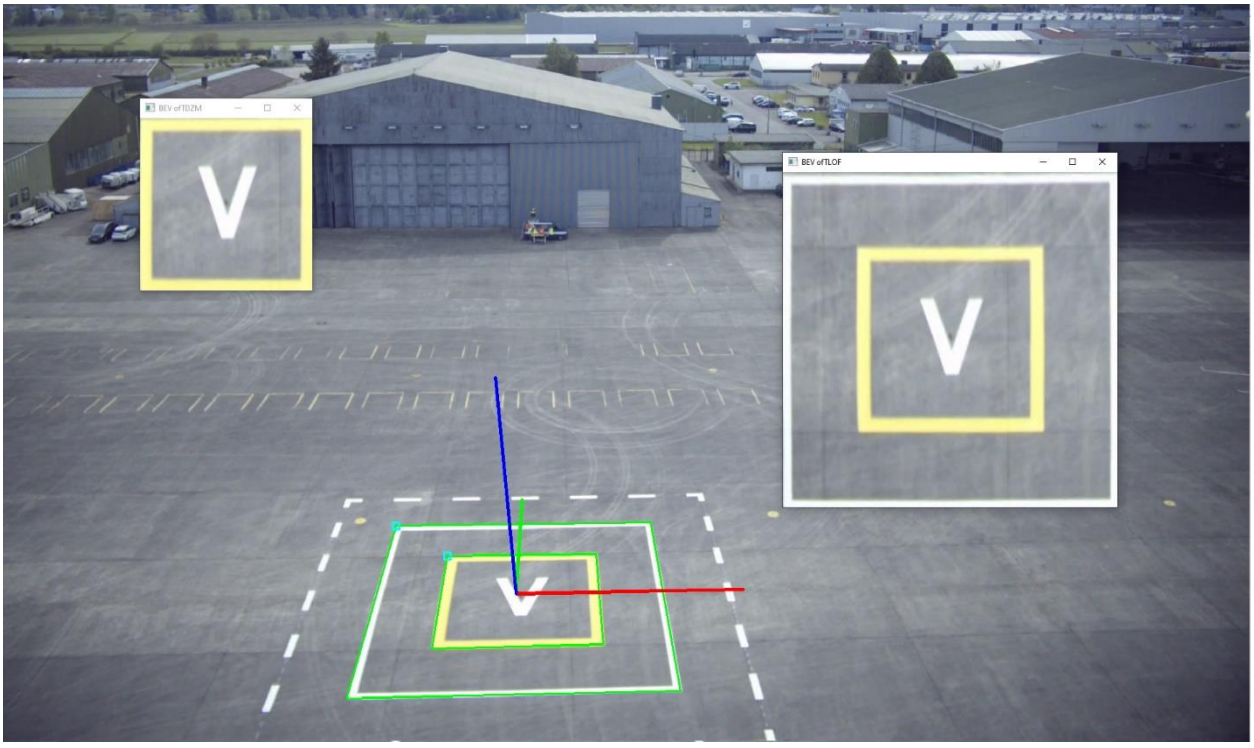

Abbildung 20: Landung auf dem Platz FATO, Blickwinkel des Kameraprozessors

Classification: Unrestricted Public

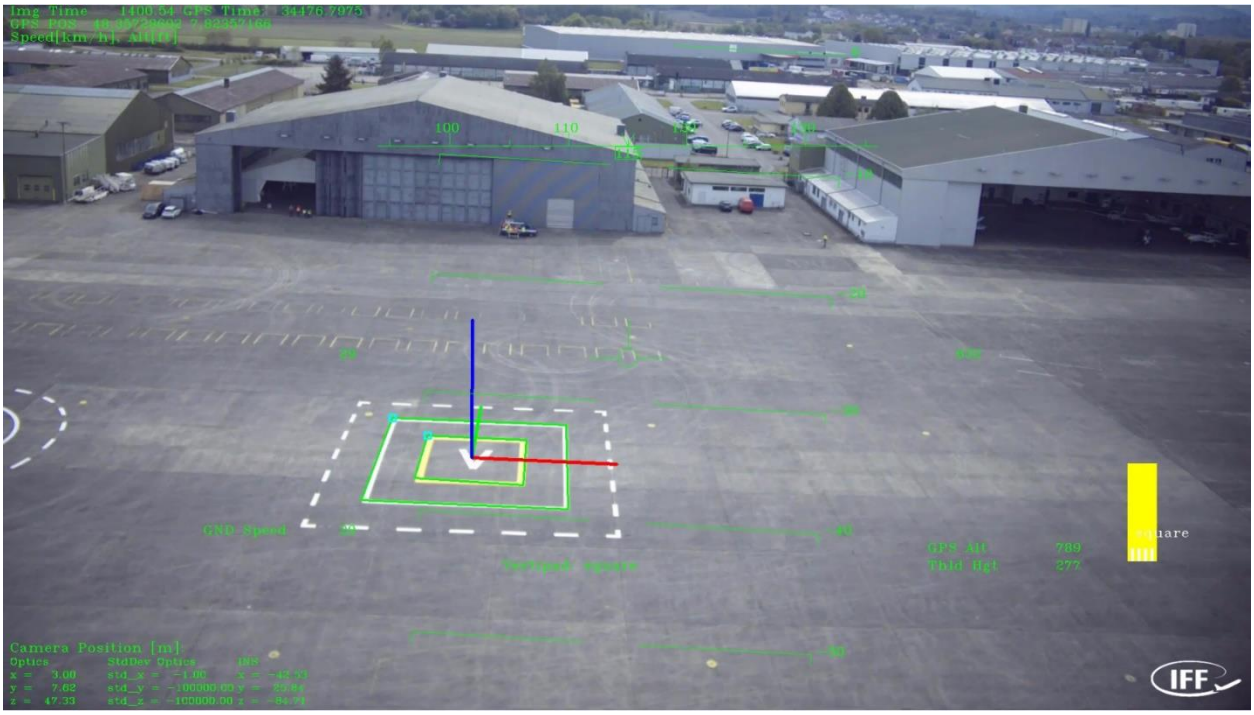

Abbildung 21: Die C2Land-Anzeige

Die C2Land-Schnittstelle zeigt ein Video des Anflugs, das von den C2Land-Kameras aufgenommen wurde, überlagert mit einer primären Fluganzeige. Diese Anzeige ist zwar vorhanden, wurde aber hauptsächlich von den Flugversuchsingenieuren verwendet, während die Testpiloten sich auf die direkte Sichtverbindung zur Steuerung verließen.

Um die Bilddatenbank zu erweitern und mit einer begrenzten Anzahl von realen Flugkampagnen ein höheres Maß an Variabilität zu schaffen, arbeiteten die C2Land-Partner mit Rabbit.ai zusammen, einem Startup-Unternehmen aus Heidelberg, das Dienstleistungen im Bereich der Bilderaugmentation anbietet.

Dazu haben die Projektpartner von TUBS mit ihrer DJI M600 Drohne Videomaterial gesammelt. Durch die Messung der Lichtfelder am Ort des Geschehens konnte Rabbit.ai die Lichtverhältnisse am virtuellen Objekt berücksichtigen und eine originalgetreue Bild-/Videoerweiterung liefern.

Die Ergebnisse zeigen, dass die erweiterten Daten von den Algorithmen erkannt und zu deren Verifizierung und Validierung (V&V) verwendet werden können. Dies öffnet die Tür für eine groß angelegte V&V von kamerabasierten Algorithmen, für die nur wenige Daten zur Verfügung stehen. Zukünftige Entwicklungen werden sich mit schlechten Sichtverhältnissen befassen, die in der realen Welt schwer zu finden oder zu gefährlich sind, um sie zu erfassen.

Classification: Unrestricted Public

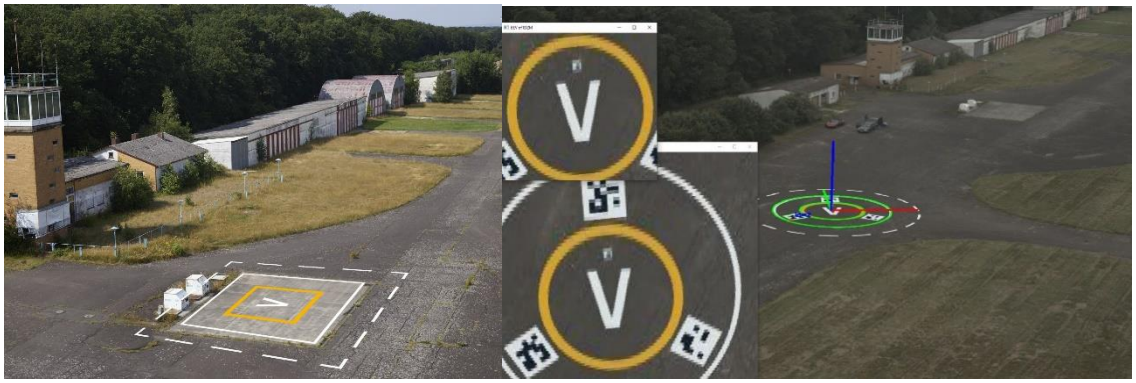

Abbildung 22: Links, ein quadratisches FATO, das virtuell in die Szene augmentiert ist. Rechts, ein runder FATO, der virtuell in die Szene augmentiert ist und vom C2Land-Algorithmus erkannt wird

ii. Kampagne B: Durchführung von Open-Loop-Flügen und Aufzeichnung von Daten zum Testen der Simulationsumgebungen.

Durch den Wechsel des Fluggerätes und den damit verbundenen Wechsel des Flugplatzes mussten die detaillierten Flugbahnen neu geplant werden, um dem Flugvolumen des neuen Flugplatzes gerecht zu werden.

Die Profile waren zwar ähnlich, aber die zu fliegenden Flugbahnen waren unterschiedlich. Zwei Sätze von Flugbahnen (siehe folgende Abbildung) wurden von TUM mit unterschiedlichen Steigungen in Richtung der beiden FATOs generiert, was insgesamt 12 Flugbahnen ergibt. Diese Flugbahnen sollten von einem Piloten während der Open-Loop-Kampagne (pilotiert) so genau wie möglich geflogen werden und während der Closed-Loop-Kampagne (automatisiert) als Planung für die Flugführung dienen.

Während der Open-Loop-Flugtestkampagne hat das Projektteam die modifizierte Integration in den neueren Versuchsträger erfolgreich validiert und die notwendigen Datenpunkte für die Hardware-in-the-Loop (HIL)-Validierung gesammelt, die die Closed-Loop-Flugtestkampagne vorbereitete.

Classification: Unrestricted Public

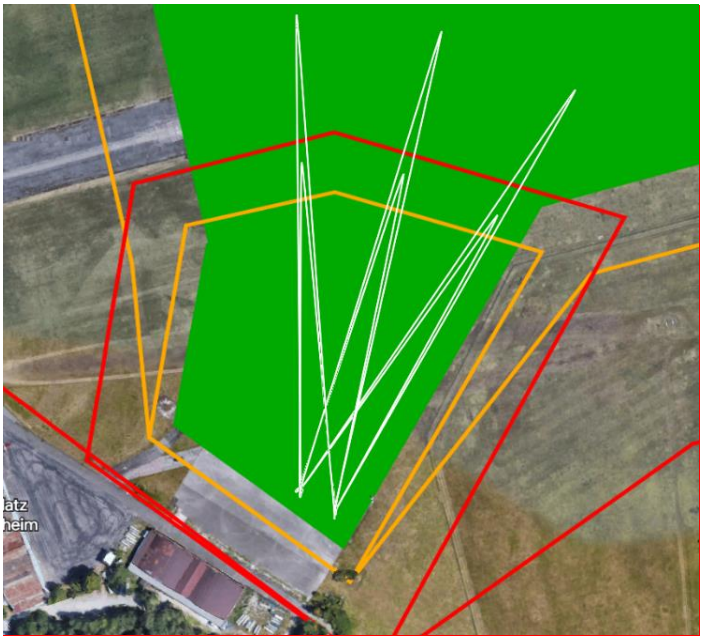

Abbildung 23: Sechs durch Optimierung des Energieverbrauchs erzeugte Flugbahnen. In Grün der fliegbare Bereich, in Orange und Rot die Notfallgrenzen.

iii. Kampagnen C und D: Test des Systems mit Flügen im geschlossenen Kreislauf / Durchführung automatischer Landungen

Die Vorbereitung des Flugzeugs für den Flug umfasste eine gründliche Inspektion und Prüfung verschiedener Komponenten, einschließlich der Motoren, der Zelle, der Batterien, der Telemetrie- und Befehlsverbindungen und der Nutzlast. Die Prüfungen vor dem Flug wurden durchgeführt, um sicherzustellen, dass alle Komponenten ordnungsgemäß funktionieren und für die Tests bereit sind.

Außerdem wurden HIL-Tests durchgeführt, bei denen die Flugumgebung nachgebildet wurde und die eine gründliche Untersuchung der Leistung der C2Land-Systeme im normalen Flugbetrieb und auch in Notfällen ermöglichten. Die Ergebnisse von mehr als 20 verschiedenen HIL-Tests wurden von einem internen Sachverständigenausschuss geprüft, was für die Genehmigung von Closed-Loop-Flügen entscheidend war. Diese Phase des Prozesses war entscheidend für die Identifizierung potenzieller Probleme oder Risiken und ermöglichte deren Behebung, bevor die eigentlichen Flüge stattfanden.

Die Closed-Loop-Flugkampagne musste aufgrund eines technischen Defekts der Versuchsträgers relativ früh beendet werden. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass das C2Land System in der Lage war das Fluggerät unter optimalen Bedingungen sicher in der Luft zu manövrieren.

An den Vorbereitungs- und Testverfahren waren mehrere Personen und Experten beteiligt, die alle ihr Wissen und ihre Fähigkeiten einbrachten, um die Sicherheit und den Erfolg der Flüge im geschlossenen Kreislauf zu gewährleisten.

iv. Analyse der Algorithmen zum Erkennen und Vermeiden (DAA)

Die C2Land-Flugarchitektur umfasste ursprünglich auch Detect And Avoid (DAA)-Elemente, die von f.u.n.k.e Avionics bereitgestellt wurden. Aus Sicherheitsgründen konnten diese nicht im realen Testflug evaluiert werden, da dies erfordert hätte, zwei Flugzeuge mehrmals auf Kollisionskurs zu

Classification: Unrestricted Public

steuern. Als Alternative schlug Volocopter vor, die DAA-Software mit Hilfe eines hauseigenen DAA-Evaluierungssimulators zu testen, mit dem Ziel, die Reife der Funke Avionics-Lösung zu bewerten und zu erhöhen. Der Simulator und die damit verbundenen Konzepte werden im Folgenden erläutert.

Der Simulator ermöglicht Monte-Carlo-Bewertungen, bei denen Tausende von Simulationen durchgeführt wurden, um das statistische Verhalten eines Systems zu charakterisieren, in diesem Fall der DAA-Software von Funke Avionics. Der Simulator wird in der nachstehenden Abbildung beschrieben. Er enthielt Modelle für zwei Flugzeuge (eigenes und fremdes), Sensoren (in diesem Fall ADS-B und eine Navigationssuite) und Metriken zur Bewertung der Begegnung (siehe weiter unten). Der gesamte Simulator wurde mit einer Reihe von Begegnungen durchgeführt, um statistisch signifikante Bewertungsergebnisse zu erhalten.

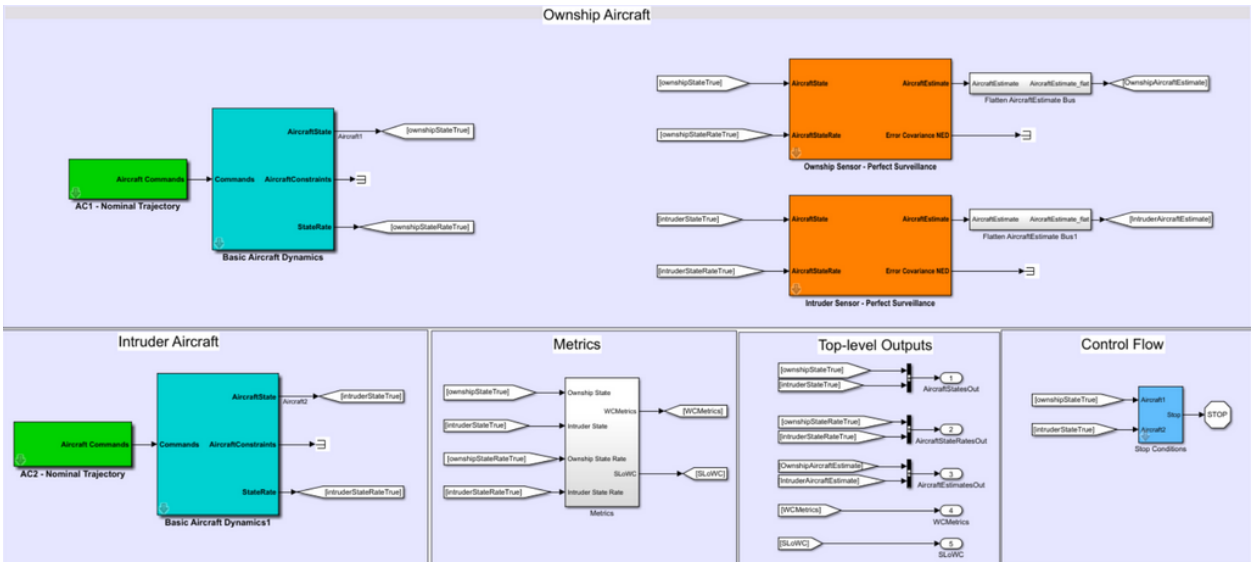

Abbildung 24: Simulations- und Analysepipeline für eine nominelle Begegnung

Um aussagekräftige Begegnungen zu generieren, haben wir den Ansatz verwendet, der am MIT-Lincoln Laboratory bei der Bewertung des ACAS X-Systems entwickelt wurde. Die Begegnungen wurden auf der Grundlage eines statistischen Modells generiert, das am MIT-LL für unkorrelierte Begegnungen entwickelt wurde (Begegnungen, die nicht von einem Fluglotsen beeinflusst werden). Aus dem statistischen Modell wurden Flugbahnpaare ausgewählt, deren Geometrie den zuvor definierten Parametern entsprach. Der Generierungsprozess ist in folgender Abbildung dargestellt.

Classification: Unrestricted Public

Das Ergebnis dieses Generierungsprozesses war ein Satz von Flugbahnpaaren in einem Format, das dem Simulator zur Verfügung gestellt werden kann.

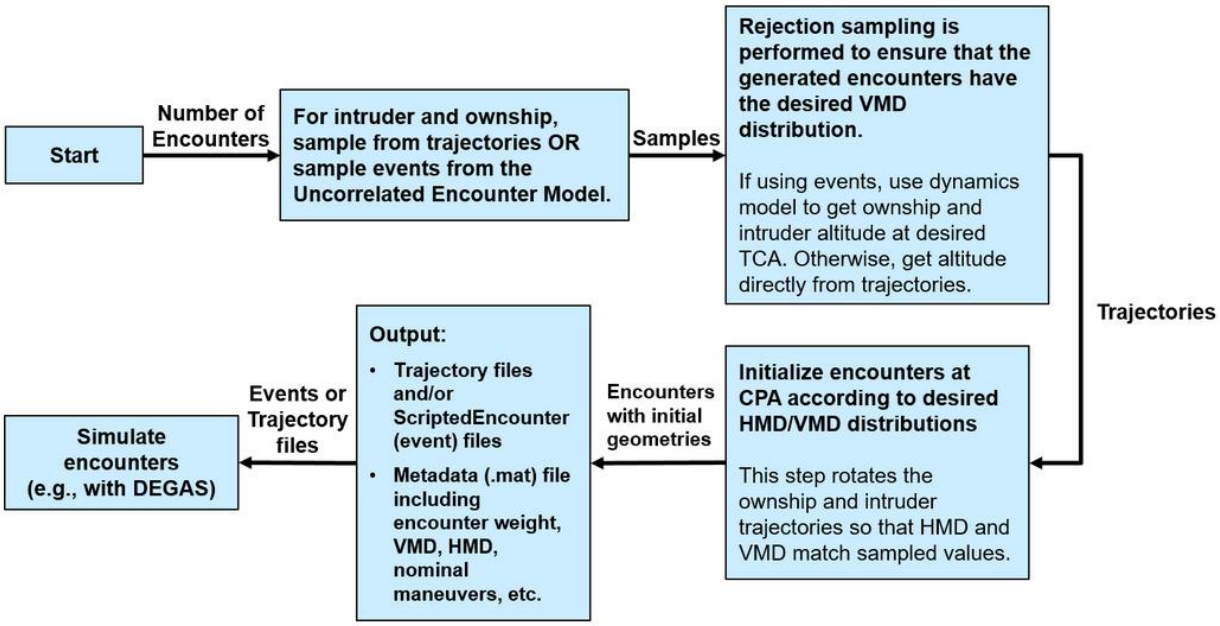

Abbildung 25: Verfahren zur Erzeugung von Begegnungen (Quelle: MIT-LL)

Es wurden Simulationen mit und ohne DAA durchgeführt, um den Sicherheitsbeitrag des Systems in einer Kollisionssituation zu bewerten. Es gab zwar eine Reihe von Standardkennzahlen, konzentrierten sich die geplanten Simulationen auf Sicherheitsmetriken zur Kollisionsvermeidung.

Classification: Unrestricted Public

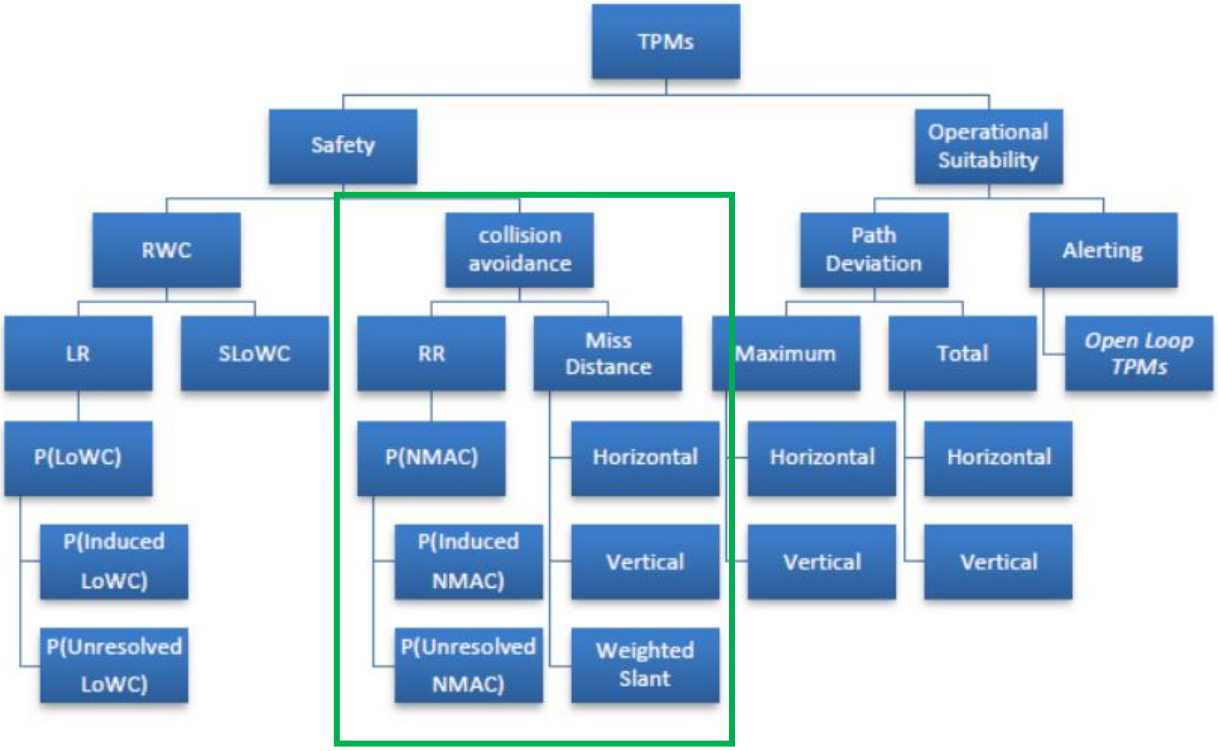

Abbildung 26: Bewertungsmetriken für ein Detect-And-Avoid-System, gemäß DO-365

Mit Hilfe eines Simulators konnte die Leistung der DAA-Lösung von Funke Avionics quantifiziert werden. Begegnungen, die nicht zufriedenstellend gelöst werden konnten, wurden analysiert, um Verbesserungsmöglichkeiten für die Funke Avionics-Logik zu finden.

III. 3400 Überlegungen zur Zertifizierung

a) Weiterentwicklung des Zertifizierungsplans von Volocopter und künftiger Produkte.

C2Land hat es Volocopter ermöglicht, automatische Funktionen für die Landung zu bewerten. Bei Volocopters aktuellem Flugzeug, dem VoloCity, wurden Größe, Gewicht und Leistung (SWaP) bereits optimiert, und da das Flugzeug derzeit die Musterzulassung durchläuft, ist es nicht möglich, das C2Land-System in dieses Modell einzubauen. Darüber hinaus ist für die erste Markteinführung von Volocopter eine Autoland-Funktion nicht erforderlich.

Dies bedeutet, dass das die Technik des C2Land-Systems besser für die Integration in künftige Flugzeuge von Volocopter geeignet ist.

b) Zertifizierungslücken im C2Land-System.

In Anbetracht der Tatsache, dass das Projektziel darin bestand, eine Technologie, nicht eine Funktion, bis TRL 6 zu bewerten, muss das C2Land-System noch Lücken schließen, um ein (oder mehrere) zertifizierte(s) System(e) zu werden. Im Folgenden werden diese Lücken in drei Kategorien unterteilt: technisch, operativ und rechtlich.

Classification: Unrestricted Public

i. Technische Lücken

Das Zielflugzeug für Hochrisikobetrieb, an dessen Bord der C2Land-Ausrüstung sein könnte, ist ein noch zu entwickelndes Luftfahrzeug für ein noch genau zu definierendes Konzept. In Ermangelung der beiden Aspekte für den autonomen Betrieb kann zum jetzigen Zeitpunkt keine Gefahrenabschätzung erstellt werden, um die Sicherheitsanforderungen an die Architektur und ihre Elemente zu bewerten.

Nichtsdestotrotz gibt dieser Abschnitt einen Überblick über die verschiedenen Elemente, für die zusätzliche Arbeiten erforderlich sein werden, wobei der Umfang der Arbeiten vom angestrebten Sicherheitsniveau abhängt. In Anbetracht der Tatsache, dass der Ausfall einer Funktion katastrophale Folgen haben kann, muss die Architektur ein hohes Maß an Robustheit für die Landefunktion bieten.

- Die Architektur muss robust gegenüber Ausfällen sein, möglicherweise durch Redundanz von Sensoren und Computern, z. B. mit dreifach redundanten Anordnungen, um Mehrdeutigkeit zu vermeiden.
- Obwohl nicht kritisch, muss die Kommunikationsverbindung ebenfalls redundant sein, mit einer Multiprotokoll-Mehrfrequenz-Lösung. Die Verbindungen zwischen den verschiedenen Computern des C2Land Systems basierten auf Standard-Ethernet, CAN und seriellen Bussen. Während CAN und serielle Busse für Luftfahrtanwendungen verwendet werden können, ist es wünschenswert, eine einheitliche moderne Datennetzlösung wie ARINC 664 zu haben.
- Was die Hardware betrifft, so ist keine der verwendeten Hardware für eine kommerzielle Anwendung geeignet. Die COTS-Computer sind zwar robust, haben aber einen weitaus höheren Funktionsumfang und SWaP als eingebettete Computer.
- Ein Wechsel der Computer würde eine Überarbeitung der Software erfordern, um die Einbettung des Codes zu ermöglichen. Der Code muss gemäß den DO-178C-Richtlinien für luftgestützte Geräte neu geschrieben werden.
- Die Systembatterie, die den schwersten Teil des Systems darstellt, muss durch einen direkten Anschluss an die Stromversorgung des Flugzeugs mit den erforderlichen Stromschnittstellen ersetzt werden.
- Schließlich müssen auch die Auswahl und Platzierung der Sensoren überdacht werden. Sie müssen in das Flugzeug integriert werden, um Verschleiß zu vermeiden und die Wartung zu erleichtern. Eine Studie über die Platzierung und Integration der Sensoren ist erforderlich, um die Integration der Sensoren in das Flugzeug zu gewährleisten und gleichzeitig ein angemessenes Sichtfeld zu bieten.
- Der Sensortyp muss ebenfalls bestätigt werden, da die Radartechnologie auf dem Weg ist, der obligatorische Sensor für den automatisierten Betrieb zu werden.

Classification: Unrestricted Public

Tabelle 2: Empfehlungen zur technischen Optimierung

Bereich	Optimierungspotential	Empfehlung
Architektur	DAL-Ebenen Zuweisung Zertifizierbare Architektur	Redundanz der Systeme
Kommunikation	Link	Multi-Protokoll, Multi-Frequenzen
Hardware	Hardware für die Luftfahrt SWaP	Entwicklung gemäß RTCA DO-160B
Software	Luftfahrttaugliche Software	Entwicklung gemäß RTCA DO-178C
Energie	Batterie SWaP	Anschluss an die Flugzeugbatterie
Sensoren	Platzierung der Sensoren Auswahl der Sensoren	Optimierte Integration in die Flugzeugzelle Wechsel von EO/IR zu Radar

Die obige Tabelle fasst die verschiedenen analysierten Bereiche, die gefundenen Lücken und Verbesserungsmöglichkeiten zusammen, um einem zertifizierbaren Produkt näher zu kommen. Neben der Ausrüstung selbst wurde im Rahmen des C2Land-Projekts auch ein operativer Ansatz für das Auto-Land-Problem vorgeschlagen, der es ermöglicht, Lücken im Betriebsverfahren zu finden.

ii. Operative Lücken

Die Einsatzszenarien, die in den C2Land-Demonstrationen entwickelt wurden, entsprachen den Vorschriften zum Zeitpunkt des Projektbeginns. Die Vorschriften haben sich seitdem weiterentwickelt, die Fähigkeiten der Luftfahrzeuge von Volocopter haben sich geändert. Folglich weist das C2Land-Konzept jetzt Lücken auf, wie die tatsächlichen Szenarien aussehen könnten.

- Die in C2Land definierten Anflüge gehen davon aus, dass die ArUco-Marker während des gesamten Anflugs sichtbar sind. Dies schließt alle Kurvenanflüge und Anflüge mit Hindernissen aus. Im letzteren Fall, bei vordefinierten Präzisionsanflügen, sind die Schutzbereiche für Hindernisse jedoch breiter als die navigierbaren Bereiche, so dass die Abwesenheit von Hindernissen in der Sichtlinie gewährleistet ist.
- Der als Modell für das Flugprofil verwendete Point-in-Space-Präzisionsanflug erfordert ein IFR-fähiges Flugzeug. In Anbetracht der Tatsache, dass kurz- bis mittelfristige Operationen unter VFR mit einem Piloten, der die Navigation durchführt, durchgeführt werden, ist diese Art von Konzept in den kommenden Jahren für Passagierflüge nicht direkt anwendbar.
- Aus Sicht der Instandhaltung ist festzustellen, dass der Betrieb von Flughäfen/Flugplätzen Spuren auf den für die Steuerung benötigten FATO-Markierungen hinterlässt, was die Instandhaltung der Markierungen und die Robustheit der Algorithmen gegenüber solchen Beeinträchtigungen stark einschränkt.

iii. Rechtliche Lücken

Die wichtigste rechtliche Lücke für die Autoland-Funktion ist die Anforderung im Luftfahrtrecht, dass ein Pilot während der Landung ein visuelles Segment durchfliegen muss. Obwohl es in der Vergangenheit vorgekommen ist, dass ein Pilot diese Erfassung durch eine Kamera durchgeführt hat (siehe X-Plane der NASA), ist diese Anforderung für den kommerziellen Betrieb immer noch Teil

Classification: Unrestricted Public

der Vorschriften. Wenn sich die Vorschriften nicht weiterentwickeln, kann das C2Land-System immerhin den Piloten unterstützen, ohne jedoch eine autonome Landung zu ermöglichen.

Classification: Unrestricted Public

Literaturverzeichnis

ASTM. (2021). *F3269-21 Standard Practice for Methods to Safely Bound Behavior of Aircraft Systems Containing Complex Functions Using Run-Time Assurance*. ASTM.

European Union Aviation Safety Agency. (2022). *Prototype Technical Specifications for the Design of VFR Vertiports for Operation with Manned VTOL-Capable Aircraft Certified in the Enhanced Category (PTS-VPT-DSN).* Cologne: European Union Aviation Safety Agency.

RTCA. (2022). *Guidance Material: Navigation Gaps for Unmanned Aircraft Systems (UAS)*. RTCA.

Classification: Unrestricted Public