

Abschlussbericht des Forschungsverbundprojektes:

**UAV-Assisted Ad Hoc Networks for Crisis Management and
Hostile Environment Sensing**

Akronym: ANCHORS

Planzeitraum: 01.04.2012 – 31.10.2015

Förderkennziffer: 13N12205

Teilvorhaben: **Robuste Missionssteuerung und –regelung
für autonomen Betrieb von unbemannten
Flugsystemen bei Großschadenslagen**

Ausführender Forschungspartner:

Institut und Lehrstuhl für Flugsystemdynamik der RWTH Aachen

Aachen, den 29.04.2016

i. Inhaltsverzeichnis

i. Inhaltsverzeichnis	2
ii. Abkürzungen	3
iii. Abbildungsverzeichnis	4
I. Kurzdarstellung des Forschungsverbundprojektes	5
I.1 Aufgabenstellung	5
I.2 Voraussetzungen	8
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	8
I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde	10
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Forschungspartnern / Stellen	11
II. Eingehende Darstellung der getätigten Forschungsarbeiten	12
II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen.....	12
II.1.1 Health-Monitoring der unbemannten Flugsysteme [Tasks 1.3, 3.1, 3.6, 5.4, 6.2, 6.3, 6.6]	12
II.1.2 Mobile Bodenstation auf Basis eines VW Crafter [Task 5.1 & AP6].....	14
II.1.3 Automatische Landung auf dem Mobilien Transport System MTS [Tasks 3.1, 3.5 & AP6]	18
II.2 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	23
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	23
II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des Verwertungsplanes.....	23
II.5 Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	23
II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	24

ii. Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
IMU	Inertial Measurement Unit
GLONASS	Globales Satellitennavigationssystem
GPS	Global Positioning System
GUI	Graphical User Interface
KMS	Kamera-Marker-System
MTS	Mobiles Trägersystem
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UGV	Unmanned Ground Vehicle
WLAN	Wireless Local Area Network

iii. **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1-1: Darstellung des ANCHORS -Projektverlaufes.....	9
Abbildung 2-1: Die GUI des entwickelten Health-Monitoring Systems.	13
Abbildung 2-2: Darstellung des Kartenwerkzeuges.	14
Abbildung 2-3: Der von der Volkswagen AG gelieferte Crafter zum Zeitpunkt der Übergabe.	15
Abbildung 2-4: Die mobile Bodenstation während der ANCHORS Abschlussdemonstration am 15.04.2015.....	15
Abbildung 2-5: Aufbau des Kommunikations- und Sensordecks.....	16
Abbildung 2-6: Das ANCHORS-Kommunikationskonzept.....	16
Abbildung 2-7: Darstellung des Bediener-Arbeitsplatzes.	17
Abbildung 2-8: Das Transport und Verstauesystem in der mobilen Bodenstation.	18
Abbildung 2-9: ANCHORS Final Demonstrator UAV auf MTS.....	19
Abbildung 2-10: Funktionsprinzip des optischen Trackingsystems	21
Abbildung 2-11: Landetrajektorie ohne Windeinfluss	22

I. Kurzdarstellung des Forschungsverbundprojektes

Dieses Kapitel umfasst eine kurze Beschreibung der Aufgabenstellung, der Voraussetzungen, der Planung und des Ablaufes des Vorhabens, des bereits bei Projektbeginn vorhandene technischen und wissenschaftlichen Stands sowie der Zusammenarbeit mit anderen Forschungspartnern / Stellen. Das Forschungsverbundprojekt: „UAV-Assisted Ad Hoc Networks for Crisis Management and Hostile Environment Sensing“ soll dabei im Folgenden mit ANCHORS abgekürzt werden.

I.1 Aufgabenstellung

Ziel des Projektes ANCHORS ist es, durch die intelligente Kombination autonomer, unbemannter Systeme in der Luft und am Boden eine schnelle und effektive Fernerkundung sicherheitsrelevanter Ereignisse wie z.B. Unfällen oder Terrorakten mit Freisetzung von Radioaktivität bzw. großflächigen Großschadenslagen mit zerstörter Infrastruktur zu ermöglichen. Darüber hinaus soll ein effizienter Informationsfluss durch eine neue ad-hoc Vernetzung aller beteiligten Einsatzkräfte und technischen Systeme erreicht werden um damit die Handlungsfähigkeit des Krisenmanagements sowie die Sicherheit der Krisenreaktionskräfte unterstützen.

Nachfolgend werden die Aufgabenstellungen der vier vom Lehrstuhl für Flugdynamik (FSD) bearbeiteten Arbeitspakete im Rahmen der Einzelvorhabenbeschreibung aufgeführt:

Arbeitspaket 1:

1. User Requirements & Scenario Definition [Task 1.1]

Ausarbeitung der flugmechanischen Randbedingungen mit Bezug auf die ANCHORS Benutzeranforderungen und Anwendungsszenarien.

2. Technical Requirements Analysis [Task 1.2]

Zulieferung zum technischen Anforderungsdokument D1.2: „Kommunikations- und Systemanforderungen zur heterogenen Vernetzung der UxV-Systeme und Einsatzkräfte“

3. Architecture Design [Task 1.3]

Beiträge zum Spezifikationsdokument D1.3: Struktur des Flugführungs- und Flugsteuerungssystems für automatische Starts und Landungen und für das Fliegen im Schwarm (inkl. Gesundheitsmanagement, Redundanzkonzept, Fehlermanagement).

Arbeitspaket 3:

1. Unmanned Aerial and Ground System Requirements [Task 3.1]

Beitrag zum Spezifikationsdokument D3.1: Anforderungen an das Flug- und Bodensystem aus flugdynamischer Sicht:

- a. Anforderungen an das unbemannte Flugsystem
- b. Anforderungen an das unbemannte Bodensystem
- c. Anforderungen aus der Interaktion der Systeme untereinander und deren Interaktion mit der Umgebung inklusive Gesundheitsmanagement

2. Aerial Vehicle Concept and Design [Task 3.2]

Testreport zu Windkanalmessungen für ANCHORS UAV inklusive Betrachtungen zur Energieeffizienz.

3. Guidance Navigation and Control Interface for the MUAV [Task 3.3]

Aufbau einer Simulation zur Validierung der Interaktion der inneren und äußeren Regelschleifen. Diese muss die Onboard Kapazitäten und Verzögerungen der eingesetzten Hardware abbilden können und soll außerdem zur Auslegung der äußeren Regelschleifen dienen.

Definition, Implementierung und Validierung der Schnittstelle der äußeren Flugregelkreise zur inneren Fluglageregelung, die vom Forschungspartner ASC entwickelt wird.

Definition und Implementierung der Schnittstelle zu Arbeitspaket 5 bezüglich Schwarm- und Teamstrategien. Insbesondere sind hier die äußeren Regelkreise zur Flugsteuerung so auszulegen, dass Kommandos von der Bodenstation oder anderen Schwarmteilnehmern die Stabilität des Systems nicht beeinträchtigen.

4. Autonomous Landing and Recharging [Task 3.5]

Systemanalyse und Evaluierung von vorhandenen Trackingsystemen zur präzisen Positionsbestimmung von MUAVs.

Analyse der Systeme in Simulationen und Aufbau einfacher Teststände zur Überprüfung von Genauigkeit und Anwendbarkeit.

Anpassung und Entwicklung einer geeigneten Positions- und Lagebestimmung für die UAVs und Bodenroboter.

Adaption und Entwicklung von Filteralgorithmen und Flugsteuerungsalgorithmen. Diese Algorithmen müssen ein hohes Maß an Robustheit gegenüber Störungen durch Wind und Böen aufweisen.

5. Health Management, Redundancy and Reliability Mechanisms [Task 3.6]

Ermittlung möglicher Fehlerfälle, die bei dem UAV System auftreten können, und möglicher Folgen. Analyse dieser Fehlerfälle in der in Task3.3 aufgebauten Simulation.

Entwicklung softwarebasierter Notverfahren für kritische Fehlerfälle und Systemausfälle. In Zusammenarbeit mit ASC Entwicklung hardwarebasierter Änderungen, die nötig sind, um Systemausfällen vorzubeugen.

Integration des Gesundheitsmanagementsystems in die Flugsteuerung und Flugregelung und Auswirkungen auf das Schwarmverhalten.

Arbeitspaket 5:

1. Swarm Control Architecture and Interfaces [Task 5.1]

Anforderungen an die Schwarmkontrolle mit Leistungszielen und Spezifikation der Schnittstellen zum Missionssteuerungssystem .

Spezifikation der Schwarmkontrollsystems und, in Zusammenarbeit mit der TU Dortmund, Implementierung von schwarmspezifischen Komponenten in das ANCHORS Missions- und Flugführungssystem.

2. Energy and Health Management Strategies [Task 5.4]

Simulation des Swarm Health Managements. Kommunikationsaspekte der Energie- und Health Management Strategien. Health Management Strategien unter Kommunikationsbeschränkungen.

3. Collaboration between Ground and Aerial Vehicles [Task 5.5]

Simulationsteilmodell für den Simulator für die Kooperation der heterogenen Einheiten.

4. Cooperative Mission Control Algorithmus using Dynamic Role Management [Task 5.6]

Softwaremodule zur Simulation des Rollenmanagements und des Aufgabenverteilungsystems Abschlussbericht Schwarm-Subsystem.

Arbeitspaket 6:

1. Onboard Integration of Aerial Vehicle and Ground Vehicle and Command Interface [Task 6.1]

Demonstrator des UAVs für Task 6.3

- a. Fähigkeitsnachweis zur Interaktion von Bodenroboter und Fluggerät
- b. Robustheitsnachweis gegenüber ausgesuchten Umwelteinflüssen (Wind, Böen, Turbulenz) und ausgesuchten Systemdegradationen / Fehlerfällen für den Missionsflug.

2. User Control Interface and Sensor Data Visualization [Task 6.2]

Anzeigen von Messdaten, insbesondere des Gesundheitsmanagements, in der UAV Mess- und Bodenstation.

3. System Integration [Task 6.3]

Vollintegriertes ANCHORS System mit UAVs/UGVs/Schwarmkontrolle Early-/Final Demonstrator des ANCHORS Systems

- a. Robustheitsnachweis gegenüber ausgesuchten Umwelteinflüssen (Wind, Böen, Turbulenz) und ausgesuchten Systemdegradationen/ Fehlerfällen für den vollständigen Missionsbereich (Start, Missionsflug, Landung, Aufladung)
- b. Nachweis des Gesundheitsmanagements (Start, Missionsflug, Landung, Aufladung)

4. Interoperability Testing [Task 6.4]

In diesem Task werden komplette Systemtests der integrierten Plattformen durchgeführt.

5. System Integrity Trials [Task 6.5]

Periodische Feldtests (u.a. EMV) im Labor und auf freiem Feld werden in diesem Arbeitspaket vom FSD unterstützt, um die Teilnachweise aus AP3 auf das gesamte ANCHORS System auszuweiten.

6. Validation and Demonstration [Task 6.6]

Für die ausgewählten Referenzszenarien werden Robustheitsnachweise des ANCHORS Systems geführt. Das Gesundheitsmanagement und Notfallmaßnahmen werden durch ausgewählte absichtlich verursachte Fehlerfälle nachgewiesen.

I.2 Voraussetzungen

Das Vorhaben ist im Zuge einer bilateralen Kooperation zwischen Deutschland und Frankreich im Rahmen des Programms „Forschung für die zivile Sicherheit“ der Bundesregierung gefördert worden. Innerhalb dieses Förderprogramms wurde der Forschungspunkt „Schutz der Bevölkerung vor Großschadensfällen“ adressiert. Siehe dazu: <http://www.kooperation-international.de/detail/info/bekanntmachung-des-bmbf-ueber-die-foerderung-zum-themenfeld-zivile-sicherheit-neue-oekonomische.html>

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Forschungsvorhaben wurde in Abstimmung mit den beteiligten Forschungspartnern anhand des in Abbildung 1.1 dargestellten zeitlichen Verlaufsplans organisiert. Aufgrund von Verzögerungen insbesondere bedingt durch eine verspätete Auslieferung der Final-Demonstrator Fluggeräte und der dadurch bedingten verspäteten Implementierung des in Task 3.5 adressierten Autolandeverfahrens wurde eine kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit beantragt und bewilligt. Dadurch konnten die bis zum ursprünglichen Projektende erst prototypisch durchgeführten Arbeiten zum Abschluss gebracht und am Gesamtsystem demonstriert werden.

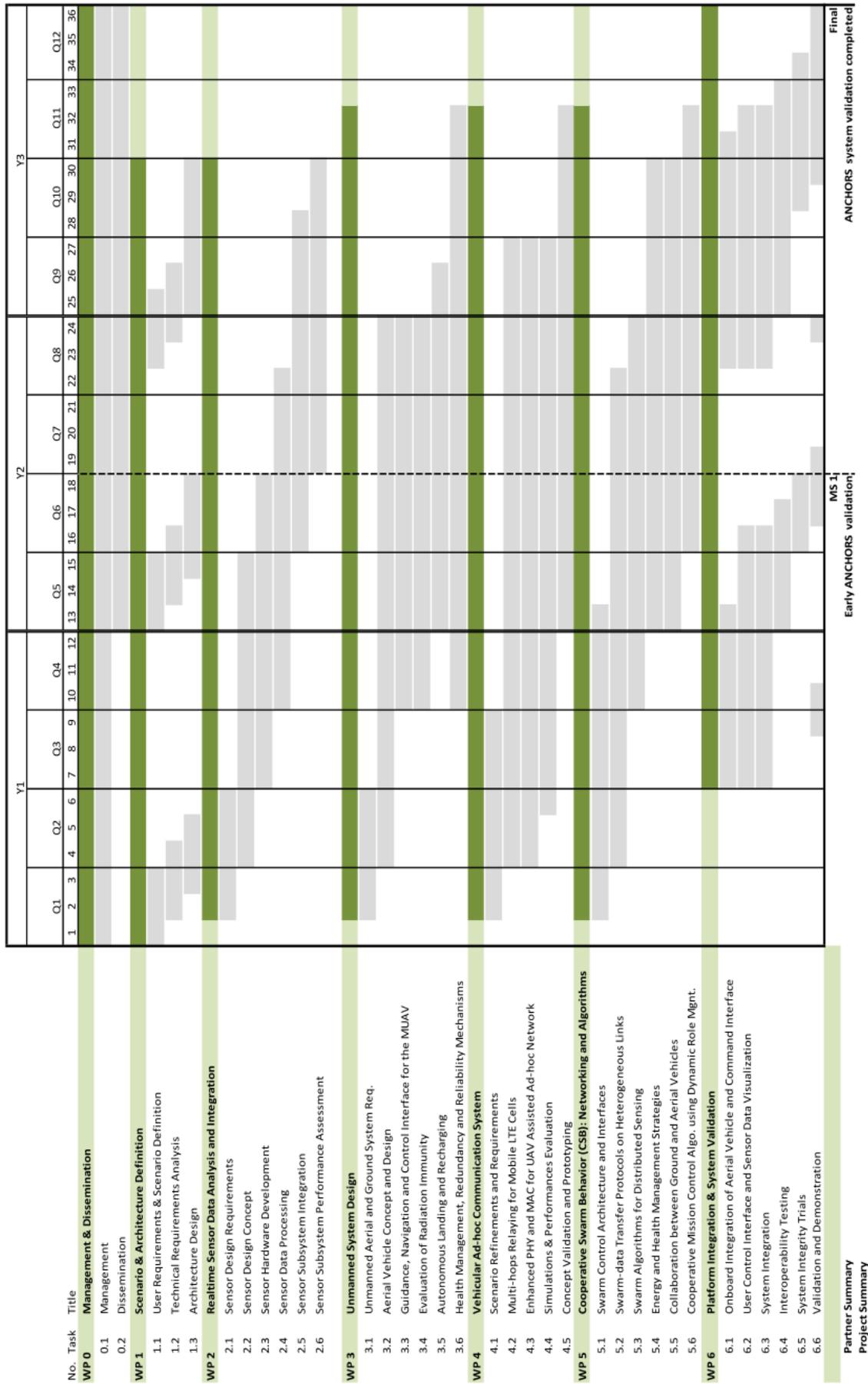


Abbildung I-1: Darstellung des ANCHORS -Projektverlaufes.

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde

Für die spezifischen Aufgaben des FSD innerhalb der Einzelvorhabenbeschreibung wurden einige Vorarbeiten getätigt. Dabei handelt es sich insbesondere um die im Folgenden aufgeführten Arbeiten:

Forschungsprojekt AVIGLE (www.avigle.de)

- Vernetzter Schwarm von autonomen UAVs als fliegende Serviceplattformen für unterschiedliche Dienste insbesondere zum Katastrophenschutz
- Akquirierung von Bilddaten zum Aufbau von 3D Stadt- und Objektmodellen mit Kameras als Nutzlast
- Aufbau von ad-hoc on-demand Mobilfunknetzen /-zellen
- Entwicklung eines multifunktionalen Kippflügel (Tiltwing) Luftfahrzeugs für die verschiedenen Missionsanforderungen
- Modellierung und Simulation der Flug- und Systemdynamik
- Aufbau der Flugregelungs- und Flugführungsstrukturen für den autonomen Betrieb mit Hinblick auf gemeinsame Operationen im Schwarmverbund

Anders als im AVIGLE Projekt, in dem die Entwicklung, Flugregelung und Schwarmintegration eines neuartigen, multifunktionalen Kippflügel-Fluggeräts die große Herausforderung darstellte, stand im ANCHORS-Projekt für den von ASC entwickelten Flugroboter die Forderung nach einem automatischen Start- und einer automatischen Landung auf einer mobilen Plattform im Vordergrund. Das präzise Landen auf einer möglichst kleinen Landeplattform unter „Allwetterbedingungen“ ist in diesem Projekt, neben einem effektiven Gesundheitsmanagement auch unter hoher Strahlenbelastung, ein wesentliches Entwurfsziel.

Forschungsprojekt CESAR (www.fsd.rwth-aachen.de/Deutsch/Forschung/Cesar.php)

- Entwicklung eines skalierten Fluggerätemodells zur Identifizierung der flugmechanischen Kenngrößen des Fluggerätes in Originalgröße
- Skalierung des Modells unter Einbehaltung der Ähnlichkeitsgesetze
- Implementierung von Sensorik zur Messdatenerfassung

Wie im CESAR Projekt ist auch im ANCHORS Projekt die flugmechanische Identifizierung von großer Bedeutung für die Optimierung und Verbesserung des Fluggerätes. Erweiternd zu den Forschungsschwerpunkten des CESAR Projekts für ein konventionelles Fluggerät ging es beim ANCHORS Projekt um die Optimierung einer flugmechanisch vergleichsweise ungewöhnlichen Multicopter-Konfiguration. Zudem spielten im Rahmen der Untersuchungen zum Gesundheitsmanagement auch Degradationszustände aufgrund von Systemausfällen eine Rolle, die im Rahmen dieses Projekts in Windkanaluntersuchungen und im Freiflugexperiment analysiert und flugdynamisch bewertet wurden.

Forschungsprojekt SHARC

(www.fsd.rwth-aachen.de/Deutsch/Forschung/Drehfluegler.php)

- Multifunktionale UAV Drehflügler Testplattform
- Modellierung und Simulation der Drehflügler Systemdynamik sowie der wichtigsten Einflussparameter
- Entwicklung von Flugregelungsalgorithmen für den autonomen Betrieb

Auch im SHARC Projekt stand die Modellierung, Simulation und Regelung eines unbemannten Drehflüglers im Mittelpunkt. Ergänzend zu den Forschungsschwerpunkten aus dem SHARC Projekt stellte in ANCHORS die extrem miniaturisierte Sensorik zur automatischen Landung die große Entwicklungsherausforderung dar.

ANCHORS baute auf den bisher gewonnenen Erkenntnissen auf und profitiert in der Startphase durch Erfahrungen im Bereich Systemidentifikation von dem Projekt CESAR und SHARC und im Bereich der Flugsteuerung unbemannter Plattformen von dem Projekt AVIGLE.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Forschungspartnern / Stellen

Die Forschungstätigkeiten im Rahmen der Aufgabenstellungen der Einzelvorhabensbeschreibung erfolgten in Kooperation mit den deutschen und französischen Forschungspartnern. Eine enge Zusammenarbeit sowohl auf technischer, also auch auf konzeptioneller und gestalterischer Ebene erfolgte dabei vor allen mit den Partnern (in alphabetischer Reihenfolge):

- Ascending Technologies
- Feuerwehr Dortmund
- Kerntechnische Hilfsdienst GmbH (KHG)
- Landekriminalamt Berlin (LKA)
- Lehrstuhl für Kommunikationsnetze der TU Dortmund (TU Dortmund)
- Mirion Health Physics (Mirion)
- Spezialgeräteentwicklung GmbH (SGE)

II. Eingehende Darstellung der getätigten Forschungsarbeiten

II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen

II.1.1 Health-Monitoring der unbemannten Flugsysteme [Tasks 1.3, 3.1, 3.6, 5.4, 6.2, 6.3, 6.6]

Ein Schwerpunkt der ANCHORS-Forschungsarbeiten am Institut für Flugsystemdynamik stellte die Konzeption und Implementierung des Health-Monitoring Werkzeuges sowohl auf Flugsystem- als auch Bodenstationsseite.

In Absprache mit den Forschungspartnern wurde eine Bewertung der verfügbaren Sensordaten bezüglich ihres Informationsgehaltes über den Gesundheitszustand des Fluggerätes für die Bediener bewertet. Zusätzlich wurde eine Untersuchung der Mensch-Maschine-Schnittstelle (Software-Ergonomie) unternommen, um die Aussagekraft der Sensordaten für den Bediener so eindeutig wie möglich zu gestalten und geeignete Handlungsempfehlungen zu geben. Insbesondere die Problematik der echtzeitnahen Verarbeitung der visualisierten Sensordaten für einen menschlichen Bediener wurde mit den Forschungspartnern Feuerwehr Dortmund LKA sowie KHG als potentielle Endnutzer in Form eines Lastenheftes adressiert und umgesetzt.

Die darzustellenden Daten konnten synthetisiert werden zu:

1. Status der Motoren des ausgewählten Flugsystems.
2. Ladezustand der Batteriespeicher des ausgewählten Flugsystems.
3. Netzwerk Verbindungsqualität des ausgewählten Flugsystems.
4. Gemessene und über den Missionsverlauf kumulierte Strahlungsintensität am Mirion Radionuklidsensor des ausgewählten Flugsystems.
5. GPS Status des ausgewählten Flugsystems.
6. Flughöhe, Geschwindigkeit und Abstand des Flugsystems zur mobilen Bodenstation.
7. Verbleibende Flugzeit des Fluggerätes bei aktueller Belastung des Batteriespeichers.
8. Darstellung der einzelnen Komponenten innerhalb eines schematischen Modells des Flugsystems.
9. Zusätzliche globale Darstellung aller Schwarm Flugsysteme in einer einzelnen Darstellung.
10. Darstellung des Zustands der Landeplattformen auf dem mobilen Trägersystem (MTS).

Um eine schnelle Aussagekraft für den Bediener zu gewährleisten, wurde ein Ampelsystem zur Bewertung der Daten gewählt. Sofern sich die jeweiligen Daten im Normbereich befinden, werden diese grün unterlegt. Liegt eine Störung oder vor, wird das Element je nach Auswirkung der Störung auf das Fluggerät (bedingt flugfähig, Missionsabbruch eminent etc.)

gelb oder rot unterlegt. Zusätzlich wird bei Störungen eine Handlungsempfehlung für den Bediener dargestellt, die auf einer Evaluierung der möglichen Fehler /Störungen der Flugsysteme basieren.

Um nicht nur den aktuellen Zustand, sondern auch die Zustände seit Beginn der Mission anzuzeigen, wurde eine Diagrammansicht mit zuschaltbaren Parametern gestaltet.

Eine Darstellung der graphischen Mensch-Maschine Schnittstelle ist in nachfolgender Abbildung II-1 dargestellt.

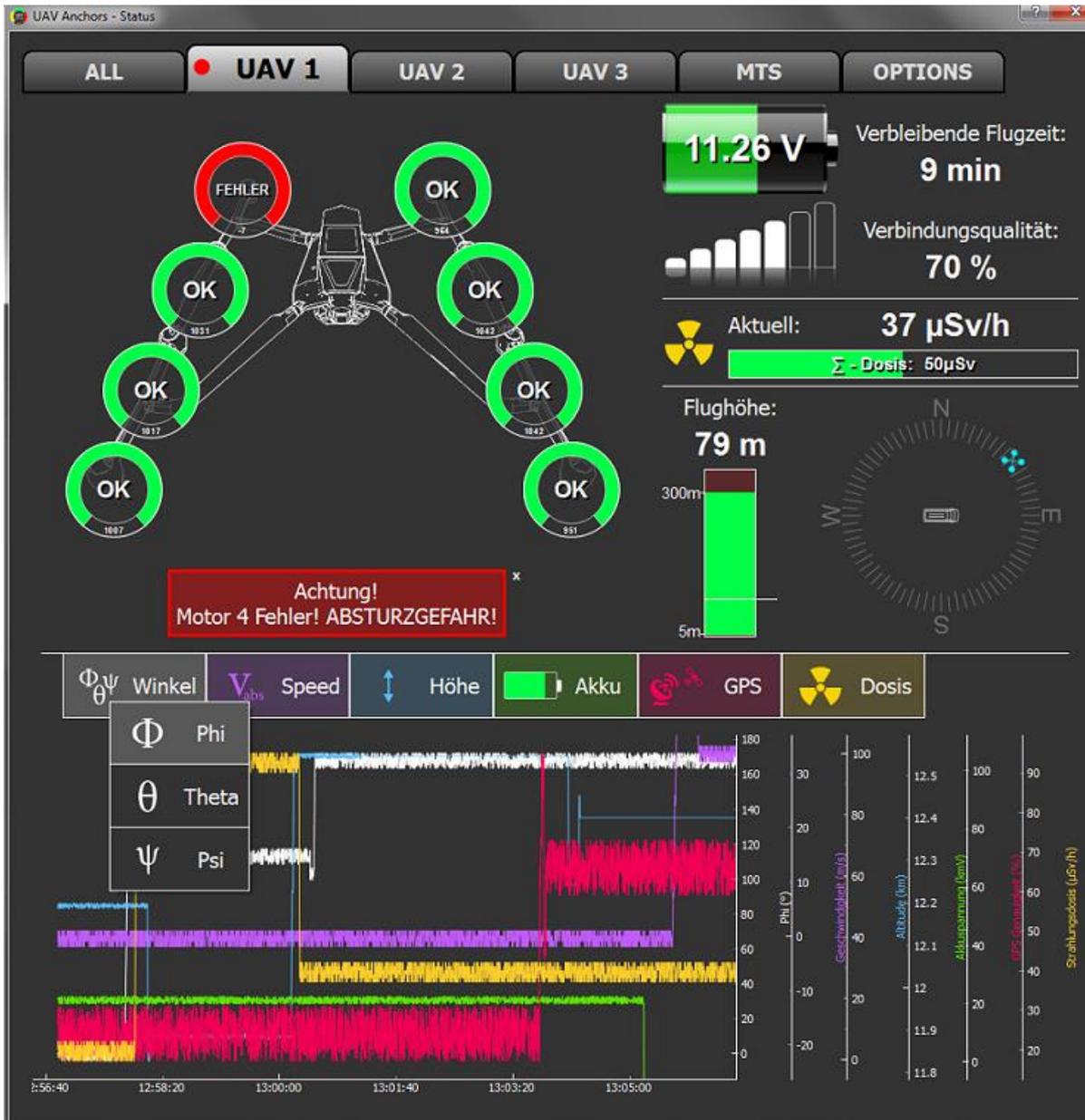


Abbildung II-1: Die GUI des entwickelten Health-Monitoring Systems.

Um eine sichere Übertragung der benötigten Sensordaten zu gewährleisten wurde in Abstimmung mit dem Forschungspartner TU Dortmund ein Datenprotokoll sowie eine Kommunikationsarchitektur zwischen den eigentlichen Schwarmcomputern der TU Dortmund und den Bediener-Arbeitsplätzen der mobilen Bodenstation konzipiert und umgesetzt.

Zusätzlich wurde neben dem eigentlichen Health-Monitoring Werkzeug ein Kartenwerkzeug auf Basis des Open Source Softwaremoduls „NASA World Wind“¹ entwickelt. Das Werkzeug dient einer Lagebeurteilung des Missionsgebietes anhand der geflogenen Trajektorien der einzelnen unbemannten Flugsysteme des Schwarmes sowie der jeweilig gemessenen Strahlungsmessung. Somit erhält der Bediener des ANCHORS Systems neben dem Gesundheitszustand des einzelnen Schwarmteilnehmers ebenfalls ein Situationsbild des Missionsareals.

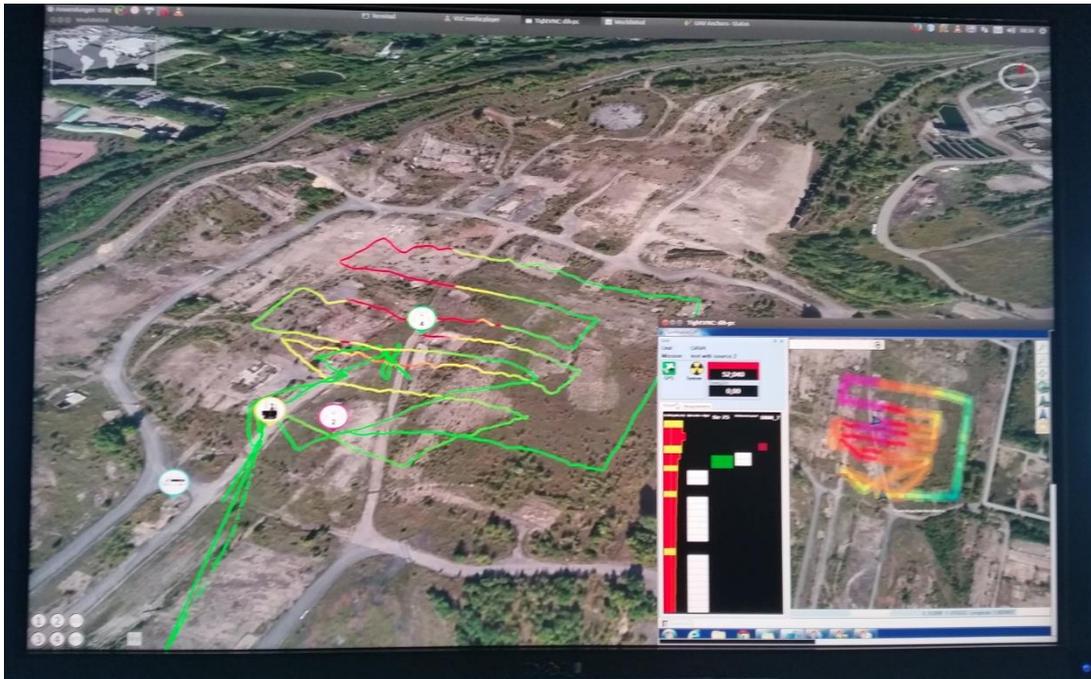


Abbildung II-2: Darstellung des Kartenwerkzeuges.

Das Health-Monitoring Werkzeug wurde im Rahmen der ANCHORS Abschlussdemonstration vorgeführt.

II.1.2 Mobile Bodenstation auf Basis eines VW Crafter [Task 5.1 & AP6]

Innerhalb des ANCHORS-Projektzeitraumes wurde am Institut für Flugsystemdynamik der RWTH eine mobile Bodenstation auf Basis eines VW Crafter aufgebaut. Das Fahrzeug wurde ohne Zusatzausstattung von der Volkswagen AG an das FSD am 15.05.2013 übergeben.

¹ NASA World Wind Seite: <http://worldwind.arc.nasa.gov/java/>



Abbildung II-3: Der von der Volkswagen AG gelieferte Crafter zum Zeitpunkt der Übergabe.

Im Zuge der Projektarbeiten wurde das Fahrzeug entsprechend der Anforderungen seitens der ANCHORS Forschungspartner umgerüstet. In der nachfolgenden Abbildung ist das vollständig umgerüstete Fahrzeug dargestellt.



Abbildung II-4: Die mobile Bodenstation während der ANCHORS Abschlussdemonstration am 15.04.2015.

Zentraler Aspekt der mobilen Bodenstation ist ein robustes und redundantes Bedienkonzept mit einer möglichst einfachen Bedienung der unbemannten ANCHORS Flugsysteme. Zusätzlich sollte die mobile Bodenstation so autark wie möglich im Feldeinsatz operieren können. Aus diesem Grunde wurde die Bodenstation mit einem GPS/ GLONASS fähigem GPS System des Typs Hemisphere Eclipse II P320 OEM mit einer Hemisphere A42 Antenne sowie einer eigenständigen Wetterstation des Typs Oregon Scientific WMR 300 ausgerüstet. Beide Systeme ermöglichen dem eingesetzten Personal eine genaue Ortsbestimmung für Redundanzzwecke sowie eine Einschätzung der Witterungsbedingungen am Einsatzort ohne Informationsbedarf von Dritten. Zusätzlich wurde die Möglichkeit geschaffen, unterschiedliche Kommunikationskanäle wie bspw. satellitengestützter Internetzugang, LTE, WLAN oder 868 MHz basierte Funkverbindungen aufzubauen.



Abbildung II-5: Aufbau des Kommunikations- und Sensordecks.

Das Bedienerkonzept beinhaltet zwei vollredundante PC-Arbeitsplätze mit jeweils vier Monitoren. Bei Ausfall eines der beiden Arbeitsplätze kann der jeweils andere noch aktiv verbleibende Bediener die Überwachung der unbemannten Boden- und Flugsysteme gewährleisten, sowie Steuerkommandos an diese senden. In nachfolgender Abbildung II-6 ist das in Zusammenarbeit mit den Forschungspartnern entwickelte Kommunikationskonzept dargestellt.

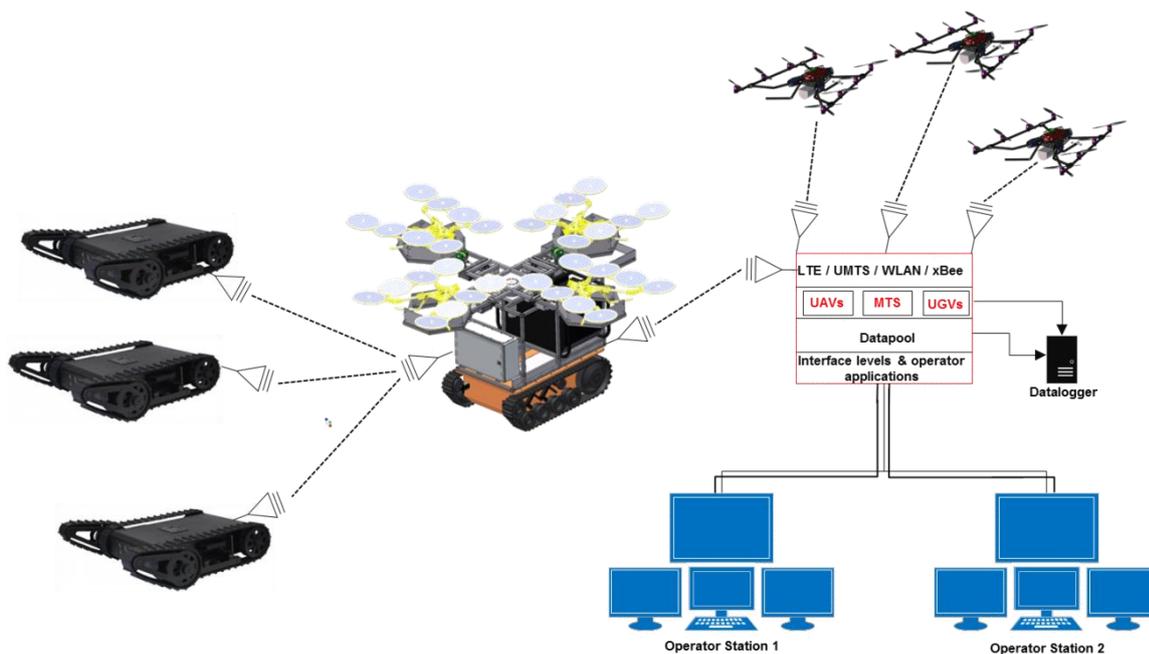


Abbildung II-6: Das ANCHORS-Kommunikationskonzept.

Das Darstellungskonzept der vier Monitore für den Betrieb der unbemannten Flugsysteme innerhalb von ANCHORS wurde wie folgt festgelegt:



Abbildung II-7: Darstellung des Bediener-Arbeitsplatzes.

Der größte Monitor auf Kopfhöhe des Bedieners zeigt eine dreidimensionale Übersichtskarte des jeweiligen Missionsareals, in welcher die Position der mobilen Bodenstation, der unbemannten Boden- und Luftsysteme sowie des MTS-Trägersystems verzeichnet sind.

Der linke untere Monitor zeigt den Live-Videostream des ausgewählten unbemannten Flugsystems. Der mittlere untere Monitor stellt die Health-Monitoring Darstellung für den Bediener bereit. Die Darstellung zeigt in der globalen Einstellung den Schwarm der unbemannten Flugsysteme inklusive ihrer jeweils wichtigsten Vitalparameter an. Zusätzlich besteht die Möglichkeit der Auswahl eines bestimmten Agenten aus dem UAV Schwarm mit detaillierteren Vitalinformationen.

Der rechte untere Bildschirm stellt die vom Forschungspartner Mirion entwickelte Sensorsoftware für den Bediener bereit.

Energiekonzept

Zusätzlich zur Bedienredundanz wurde eine redundante Energieversorgung der mobilen Bodenstation sichergestellt. Zwei mobile Stromgeneratoren des Typs Honda EU 30 IS liefern die benötigte elektrische Leistung für die Bediener-Arbeitsplätze. Ein Generator versorgt exklusiv eine unterbrechungsfreie Stromversorgungseinheit, welche wiederum die beiden

Arbeitsplätze versorgt. Durch dieses Energieversorgungskonzept wird sichergestellt, dass selbst bei einem Ausfall der Generatoren eine ausreichend hohe Überbrückungszeit von 17 Minuten für einen sicheren Missionsabbruch und/oder Austausch des Generators vorhanden ist.

Transportkonzept

Zusätzlich zum Operationskonzept vor Ort wurde innerhalb der Entwicklung der mobilen Bodenstation die Möglichkeit des Transportes von Material an den Einsatzort bedacht. Auf Basis der Fahrzeugeinrichtungskomponenten des Unternehmens Sortimo wurde ein Transport- und Verstauesystem in die mobile Bodenstation integriert, um alle benötigten Materialien und Ausrüstungsgegenstände transportieren zu können.



Abbildung II-8: Das Transport und Verstauesystem in der mobilen Bodenstation.

Zusätzlich wird durch das Transportkonzept die Durchführung von Feldreparaturen während der Flugkampagnen ermöglicht.

II.1.3 Automatische Landung auf dem Mobilem Transport System MTS [Tasks 3.1, 3.5 & AP6]

Das ANCHORS-System ist für längere Einsätze in für Menschen gefährlicher Umgebung konzipiert. Dies erfordert die Fähigkeit, ohne menschlichen Eingriff über Zeiträume von mehreren Tagen eingesetzt werden zu können. Im Vergleich zur Missionsdauer ist die mögliche Flugzeit der UAVs mit etwa 20 Minuten kurz, so dass ein regelmäßiges Aufladen der Akkus erforderlich ist. Zugleich kann es erforderlich werden, dass ein Flugsystem während einer Mission dekontaminiert werden muss, um radioaktives Material zu entfernen, welches den Strahlungssensor stören und die Elektronik des Fluggerätes beschädigen kann. Eine automatische Landung muss unter allen Einsatzbedingungen wie Wind und Dunkelheit gewähr-

leistet werden können. Dies stellt hohe Anforderungen an UAV, Trackingverfahren sowie die Soft- und Hardware der Flugregelung.

In Abbildung II-9 ist das ANCHORS Final Demonstrator UAV auf einer der vier Landeplattformen des MTS dargestellt. Diese Gestaltung des Landesystems in Abstimmung mit ASC, KHG und SGE erlaubt einen maximalen Positionsfehler von 100 mm in horizontaler Richtung bei der Landung. Nach dem Aufsetzen rutscht das UAV aufgrund der Schwerkraft wie dargestellt in seine endgültige Endposition. Anschließend kann der Ladekontakt geschlossen werden, um die Akkus aufzuladen. Zudem bietet das MTS die Möglichkeit, den Turm mit den Landeplattformen um 180° in die hintere Position zu drehen, wo mittels Duschen und Auffangbehälter eine Dekontaminierung durchgeführt werden kann. Bis auf die hintere können alle Landeplattformen für den Transport nach unten abgeklappt werden. Die UAVs werden dazu mit den Ladekontakten fixiert.



Abbildung II-9: ANCHORS Final Demonstrator UAV auf MTS

Während der Missionen navigieren die UAV mit Hilfe eines integrierten Navigationssystems, welches eine absolute Positionsgenauigkeit im Bereich mehrerer Meter bietet. Für die Präzisionslandung auf dem MTS mit maximal 100 mm Positionsfehler ist daher eine zusätzliche Tracking-Sensorik zur hochpräzisen Positionsbestimmung erforderlich.

Für die automatische Landung wird das Fluggerät in den Landemodus versetzt. In diesem Flugmodus wird das Trackingsystem in die Berechnung der Relativposition zwischen MTS und UAV einbezogen und ein dedizierter Landeregler aktiviert. Der Landeregler errechnet eine dynamisch an die lokalen Windverhältnissen angepasste Trajektorie, Algorithmen für das sichere Abfliegen der Trajektorie und das Aufsetzen auf der Landeplattform sowie eine

Landeerkennung und einen Notfallmodus. Der Notfallmodus leitet bei wiederholten erfolglosen Landeanflügen eine Notlandung in geeignetem Abstand zum MTS ein.

Die automatische Landung des UAV auf dem MTS setzt ein reibungsloses Zusammenspiel vieler Systemkomponenten voraus. Im ANCHORS – Projekt waren diese Systemkomponenten auf mehrere Partner verteilt. Aufgrund von Verzögerungen insbesondere in der Fluggeräteelieferung und im Bereich der Schnittstellen zwischen den Systemkomponenten konnten die Tests des Landereglers erst zu einem sehr späten Zeitpunkt im Projekt begonnen werden. Bei diesen Tests konnte die grundsätzliche Funktion der automatischen Landung gezeigt werden, einschließlich der adaptiven Trajektorie und der Notlandung. Es wurden jedoch auch Mängel in der Schnittstelle zwischen Fluggerätebasisregelung und Landeregelung, welche jeweils auf separaten Onboard-Rechnern liefen, deutlich. Aufgrund des späten Zeitpunktes im Projektzeitraum konnten diese Mängel nur prototypisch behoben werden, so dass das Landesystem bis zu einer Einsatzreife noch einer Überarbeitung bedarf.

Trackingsystem

Die hochgenaue Positionsbestimmung wurde mittels eines optischen Trackingverfahrens realisiert, welches für diesen Zweck angepasst und erweitert wurde. Das optische Trackingssystem, welches für das ANCHORS – System entwickelt wurde, basiert auf der Erkennung von Markern mittels einer Kamera. Mittels Bildverarbeitung wird auf dem Kamerabild ein Marker identifiziert. Anschließend wird mittels geeigneter Algorithmen die relative Pose (Position und Orientierung) zwischen Kamera und Marker bestimmt. Durch Koordinatentransformation wird daraus die Relativposition zwischen Fluggerät und Landeplattform bestimmt. Dieses Verfahren des optischen Trackings hat als Vorteile eine sehr hohe Genauigkeit und geringes Gewicht auf der UAV-Seite. Es kann jedoch der Fall eintreten, dass ein Marker nicht erkannt werden kann, beispielsweise durch Überblendung aufgrund starker Sonneneinstrahlung, durch Schattenwurf oder auch Verdeckung des Markers. Aus diesem Grund wurde das System in umfangreichen Arbeiten zu einem Multi-Marker-Array-System erweitert, in welchem mehrere, verschieden große Marker unter unterschiedlichen Winkeln angebracht werden. In einer Clusteranalyse wird die Pose aus den Posen der einzelnen Markern berechnet, wodurch eine höhere Robustheit gegen Störungen sowie eine höhere Genauigkeit erreicht werden kann.

Um die Daten aus dem optischen Tracking in einer zur Fluggeräte Regelung ausreichend hohen Frequenz von 100 Hz verfügbar zu machen, wurde zudem ein Kalman-Filter entwickelt, welcher die Multi-Marker-Pose mit den hochfrequent vorliegenden Daten aus der Inertialsensorik (IMU) des UAV fusioniert.

Im Ergebnis entstehen hochfrequente Daten für Position und Lage des UAV relativ zum MTS, welche für die automatische Landung verwendet werden können.

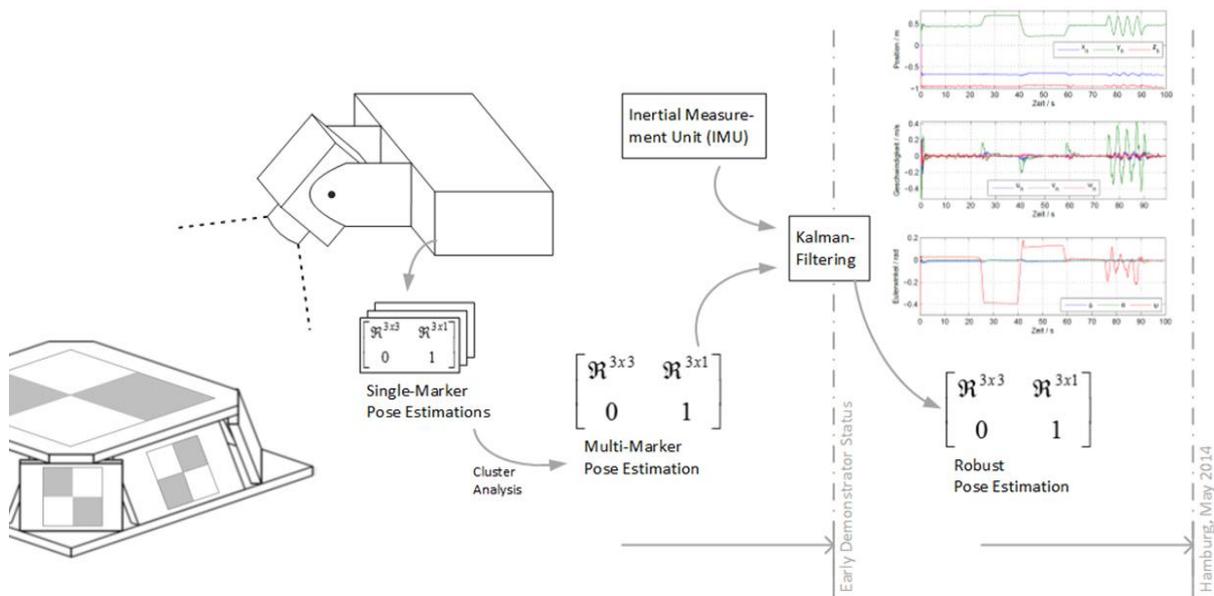


Abbildung II-10: Funktionsprinzip des optischen Trackingsystems

Landeregler

Die Anforderungen aus ANCHORS für die automatische Landung auf dem MTS wurden mit dem Landeregler adressiert. Die Form des Landemanövers wird dabei im Wesentlichen von der notwendigen Unterstützung durch das Trackingverfahren bestimmt. Dieses erfordert, dass das Markerarray im Sichtbereich der fluggeräteseitigen Kamera verbleiben muss. Abhängig vom Einbauwinkel der Kamera muss also auch der Winkel der Landetrajektorie vorgegeben werden. Für bestmögliche Ergebnisse wurden verschiedene Einbauwinkel getestet und abschließend ein Winkel von 35° als optimal identifiziert.

Weil die verwendeten Oktokopter prinzipbedingt laterale Kräfte durch Neigen des gesamten Fluggerätes erzeugen, ist das Fluggerät im Schwebeflug unter Windeinfluss stets auch geneigt. Die aus Gewichtsgründen fest montierte Kamera macht diese Bewegung mit, wodurch das Markerarray zunächst aus dem Blickfeld verschwinden würde. Diesem Umstand wurde durch dynamische Anpassung der Trajektorie an die aktuell herrschenden Windverhältnisse begegnet, wobei die vollständige Landetrajektorie zu jedem Zeitpunkt derart angepasst wird, dass die mittlere Neigung des UAV in der Berechnung der Kameranormalen berücksichtigt wird. Dieses Verfahren wurde in Flugversuchen optimiert und erprobt.

Gerät das Markerarray trotz dieser Maßnahmen während des Landeanflugs aus dem Blickfeld, so kann dies für einen kurzen Zeitraum von einigen Sekunden durch die Stützung mit den verbleibenden Sensordaten kompensiert werden. Bei Überschreiten dieses Toleranzzeitraumes mit daraus folgendem Verlust der erforderlichen Genauigkeit, wird das Anflugverfahren wiederholt. Für den Fall, dass eine automatische Landung auf dem MTS nicht möglich ist, wurde ein Notlandeverfahren entwickelt, mit welchem das UAV in der Nähe des MTS landet. Anschließend ist es möglich, das UAV mithilfe des 4-Ketten-Fahrzeuges, ferngesteuert wieder auf die Landeplattform zu heben, damit der automatische Betrieb fortgesetzt werden kann.

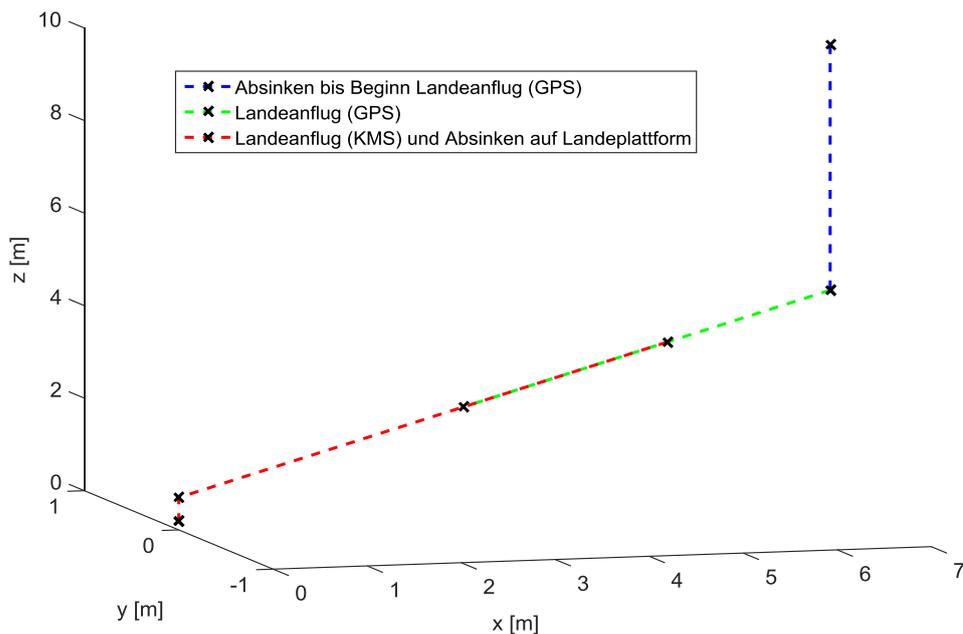


Abbildung II-11: Landetrajektorie ohne Windeinfluss

Grundsätzlich erlaubt das für ANCHORS entwickelte Verfahren der Landeregelung beliebige Trajektorien mit lokal angepassten Geschwindigkeiten und lokalen Genauigkeiten für die Positionshaltung. Für die Landung des UAV auf dem MTS wurde eine Trajektorie entwickelt, wie sie in Abbildung II-11 beispielhaft ohne Windeinfluss und mit einem Landemanöver von rechts nach links dargestellt ist. Die Trajektorie besteht im Wesentlichen aus drei Teilabschnitten. Zunächst sinkt das UAV bis auf die Position des Beginns des Landeanflugs ab. Bei veränderlichen Windbedingungen wird dieses Element entsprechend angepasst. Es folgt der Landeanflug zunächst auf Basis des integrierten Navigationssystems ohne den Einsatz des KMS. Im Verlauf des Landeanfluges erfolgt die sichere Erkennung des Markerarrays mit anschließender Umschaltung auf die Positionsbestimmung mit KMS. Über eine spezielle Algorithmik wird beim Wechsel der Navigationsquelle ein stetiger Verlauf der Positionslösung sichergestellt, so dass es zu keinen plötzlichen Bewegungen des UAV kommt. Der Bereich der Übergabe ist im Bild rot und grün eingefärbt. Bei zu großen Abweichungen der Positionsangaben von MTS und UAV kann das Markerarray nicht erkannt werden, sodass der Landeanflug wiederholt werden muss. In rot ist der abschließende Landeanflug mit KMS-Navigation und Aufsetzen auf der Landeplattform dargestellt. Insbesondere im letzten Bereich wird die geforderte Genauigkeit für eine hohe Präzision beim Aufsetzen vorgegeben.

Für das Abfliegen der Trajektorie wurde ein Regler entwickelt, welcher ein besonders kontrolliertes Flugverhalten insbesondere in der direkten Nähe zum MTS sicherstellt. Dieser berechnet in jedem Zeitschritt eine Geschwindigkeitsvorgabe für das UAV, welche über eine Schnittstelle an die Flugsteuerung übergeben wird. Latenzzeiten in der Schnittstelle führen an dieser Stelle bei Störungen (z.B. durch Windeinfluss) zu Regelabweichungen, die aufgrund der genannten Verzögerungen um Projektabschluss bis zum Projektzeitraumsende nur teilweise behoben werden konnten. Eine Einsatzreife des Systems wird an dieser Stelle noch Anpassungen erfordern.

II.2 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wesentlichen Kosten der Gegenstände über 410,-€ (0850) ergaben sich durch die Ausrüstung des Krafftfahrzeuges, der Einrichtung der mobilen Bodenstation im Krafftfahrzeug und der Anschaffung der Versuchsfluggeräte. Aufgrund der großen Verzögerungen bei der Auslieferung der Fluggeräte wurde ein vorläufiges Fluggerät (early demonstrator) mit erheblichem personellem Aufwand derart umgerüstet, dass die Entwicklungsarbeiten zur automatischen Präzisionslandung auch mit diesem Fluggerät durchgeführt werden konnten. Letztendlich konnte dadurch auf die Anschaffung des final demonstrators verzichtet werden, der personelle Aufwand hat sich allerdings entsprechend erhöht.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Arbeiten zum Health Management, zur Missionssteuerung und zur automatischen Landung des Fluggerätes entsprechen den zur Erreichung der angestrebten Ziele zu erfüllenden Aufgaben. Durch die kostenneutrale Bereitstellung des Krafftfahrzeuges durch die Volkswagen AG konnte bei der mobilen Bodenstation ein größerer Fokus auf die zur sicheren Flugdurchführung benötigte Ausrüstung des Fahrzeuges gelegt werden.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des Verwertungsplanes

Verwertung und Nutzung der im Projekt erzielten Ergebnisse geschieht am Institut für Flugsystemdynamik in Form von Aufbau von Expertise, Wissenstransfer und der Ausbildung von Studenten und Doktoranden. Teile der im Projekt erlangten Fachkompetenz, z.B. zum Themenkomplex Präzisionslandung und optische Positionssensorik, konnten bereits in nachfolgenden hoheitlichen und industriellen Projekten eingebracht werden. Weitere Projekte sind in Planung.

Im Rahmen der studentischen Ausbildung wurden im ANCHORS Projekt mehrere Projekt-Bachelor- und Masterarbeiten angefertigt. Teile der Forschungsergebnisse sind zudem Inhalt von aktuellen Dissertationen. Zwei Promotionen mit Inhalten aus dem ANCHORS Projekt sind bereits weit fortgeschritten. Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten fließen zudem in die Vorlesungsinhalte der Lehrveranstaltungen Flugdynamik, Flugregelung und Flugführung ein und ermöglichen den Studenten einen Bezug zu aktuellen Forschungsthemen.

II.5 Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Innerhalb des in ANCHORS adressierten Szenarios der Erkundung von nuklearen Großschadensfällen wurde eine ähnliche Forschungsthematik auf US-amerikanischer Seite gefördert.

Die von der DARPA ausgerichtete DARPA Robotics Challenge hatte zum Ziel, bodengestützte Rettungssysteme innerhalb von Großschadensfällen (Nuklear, Chemisch, biologisch) automatisiert einzusetzen². Innerhalb dieser Challenge wurde jedoch kein Fokus auf unbemannte Flugsysteme sowie robuste ad-hoc Kommunikationswege gelegt.

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Erfolgte Veröffentlichungen im Rahmen von Konferenzen / Journalbeiträgen:

2014:

Navigation for Vertical Precision Landing Based on Optical Tracking of a Spatial Retroreflective Marker Array – P. Hartmann, C. Ben, D. Moormann - RWTH Aachen, 29th Congress International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS), St. Petersburg, Russland, 7.-12. September 2014

2015:

Konzeption und Evaluierung einer Kommunikationsinfrastruktur für Beyond-Line-Of-Sight Flugversuche von unbemannten Fluggeräten – C. Ben, N. Voget, D. Moormann - RWTH Aachen, 64. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Rostock, Deutschland, 22.-24. September 2015

² DARPA Website: <http://theroboticschallenge.org/overview>

