Deutsches Zentrum
DLR für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Teilvorhaben des DLR im Verbundprojekt VEREDUS

Schlussbericht

Förderkennzeichen: 20Q1939H
Projektlaufzeit: 01.06.2021 - 31.12.2024

Dr.-Ing. MDes Tobias Marks
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Luftverkehr, Blohmstraße 20, 21079 Hamburg
Dr. Klaus Scho
Germandrones GmbH, Alt-Moabit 55, 10555 Berlin

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

I. Kurzdarstellung 5

1. Aufgabenstellung 5
1.1. Gesamtziel . . . 5

2. Voraussetzungen 6
2.1. Verbundpartner . . . 6
2.2. Beiträge des DLR . . . 6
2.3. Beiträge der Germandrones GmbH (im Unterauftrag des DLR) . . . 7

3. Planung und Ablauf 7
3.1. Projektstruktur . . . 7
3.2. Zeitplanung . . . 9
3.3. Arbeitsplanung . . . 9
3.3.1. HAP1 „Anforderungen und Szenarien“ . . . 9
3.3.2. HAP3 „Hardwareentwicklung“ . . . 10
3.3.3. HAP4 „System Level Simulation“ . . . 10
3.3.4. HAP5 „Integration / Demonstration“ . . . 11

4. Technisch-wissenschaftlicher Stand zu Projektstart 11

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen 12

6. Zusammenfassung der Ergebnisse 12

II. Detaillierte Darstellung der Projektergebnisse 14

7. Arbeitspakete 14
7.1. AP1.1: CONOPS/Szenarien/Konzept . . . 14
7.1.1. VEREDUS Primärfunktionen . . . 14
7.1.2. VEREDUS Sekundärfunktionen . . . 15
7.1.3. UAS Anwendungen . . . 15
7.2. AP1.2: Regulatorische Anforderungen (Luftfahrt) . . . 16
7.3. AP1.3: Anforderungen an Kommunikationssysteme . . . 17
7.4. AP1.4: Systemanforderungen / Schnittstellen . . . 19
7.5. AP3.3: Integration und Test (Labor) . . . 19
7.6. AP3.4: Entwicklung flugtaugliches Modul . . . 20
7.7. AP4.1: Gerätesoftware . . . 20
7.7.1. Grundlegende Funktionsweise . . . 20
7.7.2. Datenmodell . . . 21
7.7.3. Algorithmus . . . 21
7.7.4. Simulative Bewertung . . . 21
7.8. AP4.2: Flugbewegungs- und Flugleistungsmodelle . . . 22
7.8.1. Grundlegender Ablauf . . . 23
7.8.2. Flugbewegungsmodell . . . 23
7.8.3. Stadtgenerierung . . . 23

7.9. AP4.3: Aufbau der Simulationsumgebung 26
7.10. AP4.4: Simulation und Leistungsbewertung 27
7.10.1. Metriken 27
7.10.2. FANET Metriken 29
7.10.3. Variationsstudien 30
7.11. AP5.1: Integration Bodenstation (Software) 32
7.12. AP5.3: Testfälle und Szenarien 32
7.13. AP5.4: Aufbau der Demonstratoren 33
7.14. AP5.5: Demonstration 33
7.15. AP5.6: Analyse / Auswertung 33

8. Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises **34**

9. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit **34**

10. Verwertbarkeit der Ergebnisse **34**

Literatur **36**

Nomenklatur

ADS-B	Automatic Dependent Surveillance – Broadcast
AP	Arbeitspaket
AS	Airborne Station
ATM	Air Traffic Management
BVLOS	Beyond Visual Line Of Sight
CAD	Computer Aided Design
CONOPS	Concept of Operations
CPR	Completed Position Report
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DME	Distance Measurement Equipment
FANET	Flying ad-hoc network
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HAP	Hauptarbeitspaket
HTOL	Horizontal Take-off and Landing
ILT	Institut für Lufttransportsysteme
IPR	Initial Position Report
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
MS	Meilenstein
PDR	Packet Delivery Ratio
PSP	Projektstrukturplan
SORA	Specific Operations Risk Assessment
TCAS	Traffic Collision Avoidance System
TUHH	Technische Universität Hamburg
UAM	Urban Air Mobility
UAS	Unamnned Aerial System
UAS	Unmanned Aerial System
UAV	Unamnned Aerial Vehicle
VLL	Low Level Airspace
VTOL	Vertical Take-off and Landing

Teil I.
Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung

Im Verbundprojekt VEREDUS (Verteilte Positionskontrolle in redundanten UAV-Funknetzen zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit, Effizienz sowie der Flugsicherheit) sollen Funknetze zur Vernetzung von unbemannten Luftfahrzeugen (UAVs) und Bodenstationen unter anderem im urbanen Raum untersucht und entwickelt werden. Die Funknetze sollen dabei zum einen durch Direktverbindungen zwischen den einzelnen Knoten (flying ad-hoc network; FANET) zum anderen über Satellitenkonstellationen aufgebaut werden. Hierdurch ergeben sich mehrere Vorteile. Zum einen wird ein redundantes Netz aufgebaut, welches weitgehend unabhängig von Bodeninfrastruktur betrieben und zur Verteilung von Daten zwischen den Netzteilnehmern verwendet werden kann. Zum anderen ermöglicht die Direktverbindung der UAVs eine gegenseitige verteilte Prüfung der GPS-Positionen durch Laufzeitbestimmung der Funksignale zu den jeweiligen Netznachbarn. Die im Netz verteilen GPS-Positions- und Laufzeitdaten können von allen Teilnehmern daher zur Erstellung eines Gesamtlagebildes verwendet werden, welches eine Prüfung der Vertrauenswürdigkeit der GPS-Positionsdaten durch Triangulation der Laufzeiten ermöglicht. Hierdurch können Störszenarien wie z.B. GPS-Spoofing, -Meaconing oder Jamming aber auch fehlerhafte Sensoren und Systeme erkannt werden. Durch die nahtlose Integration der Satellitenkommunikation ist zudem eine durchgängige Kommunikation der UAVs auch bei Systemausfällen und in Randgebieten gewährleistet. Die Leistungsfähigkeit eines solchen Systems kann jedoch nur anhand realistischer Simulationen verifiziert werden.

1.1. Gesamtziel

Im Teilvorhaben „Anwendungen und Simulation“ des Verbundprojektes VEREDUS werden durch das DLR zwei Hauptziele angestrebt.

1. Das erste Ziel besteht darin, aktuelle und zukünftige Anwendungen und Betriebskonzepte für UAVs zu erarbeiten und die Vorteile bzw. Auswirkungen des im Projekt zu entwickelnden Funknetzes auf diese Anwendungen zu bewerten. Gleichzeitig werden neue Anwendungsmöglichkeiten der Vernetzung aufgezeigt und analysiert. Die relevanten Anwendungen werden im Verbundprojekt VEREDUS dann ihrerseits zur Ableitung der Anforderungen an das Funknetz herangezogen und dienen somit als Grundlage für die weiteren Arbeiten des DLR und der Projektpartner bei der Konzeption der Hard- und Software.

2. Aufbauend auf den oben beschriebenen Arbeiten besteht das zweite Hauptziel des DLR darin, die ermittelten Anwendungen im Rahmen einer Verkehrssimulation zu simulieren und die Anwendbarkeit der redundanten Positionskontrolle mit Hilfe der Simulation zu prüfen. Hierzu werden Zukunftsszenarien für verschiedene Zeithorizonte entwickelt, welche die zu erwartenden Flugbewegungen mithilfe von Angebots- und Nachfragemodellen zeitlich und räumlich abschätzen. Zur Erzeugung realistischer Flugbewegungsmuster, welche für die Netzwerksimulation notwendig sind, werden Flugbewegungs- und Flugleistungsmodelle der ausgewählten UAVs für die jeweiligen ausgewählten Anwendungen erarbeitet. Die Verkehrssimulation dient in engem Verbund mit den Projektpartnern zur Leistungsbewertung des projektierten Funknetzes in realitätsnahen Szenarien.

2. Voraussetzungen

2.1. Verbundpartner

Im Verbundprojekt VEREDUS sind nachfolgende Partner beteiligt. Die IMST GmbH übernimmt die Verbundführerschaft. Die Germandrones GmbH (GD) und Globe UAV GmbH werden vom DLR bzw. der TUHH unterbeauftragt. Die im Folgenden verwendete Abkürzung für den jeweiligen Verbundpartner ist in Klammern dahinter dargestellt.

- IMST GmbH (IMST) / Verbundführer
- Globe UAV GmbH (GUAV) / Unterauftrag von TUHH
- Germandrones GmbH (GD) / Unterauftrag von DLR
- f.u.n.k.e. Avionics GmbH (FAV)
- NavCert GmbH (NC)
- MediaMobil Communication GmbH (MM)
- Technische Universität Hamburg, ComNets (TUHH)
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Luftverkehr (DLR)

2.2. Beiträge des DLR

Das Institut für Luftverkehr des DLR beschäftigt sich mit Fragestellungen, die sich aus einer ganzheitlichen Betrachtung des Lufttransportsystems ergeben. Zentrale Arbeitsfelder sind die Prognose von Transportbedarf auf Basis von Angebots- und Nachfragemodellen, die Ableitung von Luftverkehrsbewegungen, die Modellierung der einzelnen Flüge sowie die Analyse und Optimierung des Zusammenspiels der Luftfahrzeuge und der Auswirkungen z.B. auf die Luftraumkapazität oder die Umwelt. Dabei spielt auch die Betrachtung von unbemannten Luftfahrzeugen eine wesentliche Rolle. Eine weitere Kernkompetenz des Instituts ist durch die Implementierung und Bewertung neuer Methoden und Verfahren im Gesamtsystem gegeben. Insbesondere zeichnet sich das Institut durch die Fähigkeit aus, unterschiedliche Aspekte des Lufttransportsystems softwaretechnisch zu modellieren und durch eine integrierte Modellumgebung zu verknüpfen, so dass eine ganzheitliche Bewertung von Luftverkehrsszenarien ermöglicht wird. Im VEREDUS wird daher auf die langjährigen Erfahrungen in den oben genannten Bereichen zurückgegriffen, welche u.a. durch die Durchführung von Projekten, Dissertationen und studentischen Arbeiten erlangt wurden.
Durch das Verbundprojekt VEREDUS wird eine redundante funktechnische Vernetzung der UAVs geschaffen, welche neben der Erstellung eines aktuellen Lagebildes auch die Kontrolle der Positionen der Netzteilnehmer durch gegenseitige Prüfung ermöglichen soll. Die Anwendbarkeit dieses Konzeptes wird im Verbundprojekt VEREDUS geprüft. Das Institut für Luftverkehr des DLR beteiligt sich daran durch die Erstellung realistischer Verkehrsszenarien, die Entwicklung von Flugbewegungs- und Flugleistungsmodellen sowie durch die Erarbeitung von Algorithmen zur Erstellung des Lagebildes und zur gegenseitigen Prüfung der Positionsdaten. In Kombination mit der Simulation des Funknetzwerkes und Störszenarien durch die Projektpartner kann so eine Leistungsbewertung des Systems erfolgen, welche in der abschließenden Demonstration validiert wird. Zur Durchführung der geplanten Arbeiten kann das Institut auf langjährige Erfahrungen in der Prognose von Transportbedarf, der Ableitung von Luftverkehrsbewegungen, der Trajektorienmodellierung sowie der Analyse und Optimierung des Zusammenspiels der Luftfahrzeuge aufbauen. Die in diesem Rahmen gesammelten Erfahrungen und Softwaretools können gut auf die Fragestellungen im Verbundprojekt VEREDUS übertragen werden.

2.3. Beiträge der Germandrones GmbH (im Unterauftrag des DLR)

Die Germandrones GmbH besitzt viel Erfahrung beim Betrieb von Drohnen und in der Umsetzung zukünftiger UAS-Anwendungen und -Szenarien, weshalb GD bei der Erstellung der Szenarien und Konzepte im Projekt mitwirkt sowie maßgeblich an der Identifikation relevanter gesetzlicher Vorgaben aus bemannter und unbemannter Luftfahrt beteiligt ist. Insbesondere die Kombination aus VTOL (Vertical Take-Off and Landing) und Flächenflugzeug der Fluggeräte von GD (wie z.B. der Songbird 100 und 150) sind zudem für das Projekt essentiell notwendig, um Fluggeschwindigkeiten und Reichweiten in der Praxis abzubilden. Die Fluggeräte von GD besitzen zudem eine schnell und einfach zu tauschende große Nutzlastbox, die werkzeuglos in weniger als einer Minute gewechselt werden kann und eine Stromversorgung sowie direkte Kommunikation zum Autopiloten aufweist. Die vorhandene Nutzlastkapazität der Drohnen (bis zu 4,5kg) bei einer gleichzeitigen Flugdauer von bis zu 2h des GD Systems bieten zudem die Grundlage zur Durchführung der geplanten Flugexperimente. Dies liegt darin begründet, dass ein schneller Austausch und große Nutzlasten im Rahmen des Projektes VEREDUS erforderlich sind, da angenommen werden kann, dass die experimentelle Hardware in mehreren Ausführungen vorliegen und dass auf Grund des experimentellen Charakters der Hardware keine Optimierung hinsichtlich des Gewichts und des Volumens stattfinden wird. Daher ist zudem der große Bauraum in der Glasfaser Nase des Songbird 100 und 150 von GD für die Unterbringung der experimentellen Hardware ideal geeignet, was deren Entwicklung sowie die Integration in den Demonstrator deutlich vereinfacht. Mehrere flugfertige UAS von GD sind zudem sofort verfügbar und zugelassen für den Betrieb außerhalb der Sichtweite des Bedieners (Beyond Visual Line of Sight; BVLOS). Ein weiteres wichtiges Merkmal des GD Systems ist die selbst entwickelte Bodenstations-Software mit Plugin-System. Diese soll im Rahmen des Projektes angepasst werden. Zudem steht seitens GD eine komplette „Software in the Loop“ Simulation der Drohne zur Verfügung, welche für das Projekt und deren Partner zur Vorbereitung und Planung der Flugexperimente zur Verfügung steht

3. Planung und Ablauf

Im folgenden Kapitel wird der Arbeitsplan detailliert beschrieben. Hierzu erfolgt zunächst die Darstellung der Projektstruktur gefolgt von der Zeitplanung. Im Anschluss daran finden sich die Detailbeschreibungen der einzelnen Arbeitspakete sowie die Kostenplanung und Ressourcenübersicht.

3.1. Projektstruktur

Abbildung 1 zeigt den Projektstrukturplan des Verbundprojektes VEREDUS. Die Arbeitspakete an denen das DLR beteiligt ist sind blau, die von GD orange eingefärbt. Arbeitspakete, an denen beide Partner beteiligt sind, sind grün dargestellt. Das Verbundvorhaben VEREDUS ist in 5 Hauptarbeitspakete (HAPs) unterteilt, welche sich inhaltlich gegeneinander abgrenzen.
Das DLR ist an den Hauptarbeitspaketen HAP1, HAP4 und HAP5 beteiligt, wobei die Leitung von HAP1 vom DLR wahrgenommen wird. Das DLR wird in folgenden Arbeitspaketen aktiv sein:

- AP1.1: CONOPS/Szenarien/Konzept / **Lead**
- AP1.3: Anforderungen an Kommunikationssysteme
- AP4.1: Gerätesoftware
- AP4.2: Flugbewegungs- und Flugleistungsmodelle / **Lead**
- AP4.3: Aufbau der Simulationsumgebung

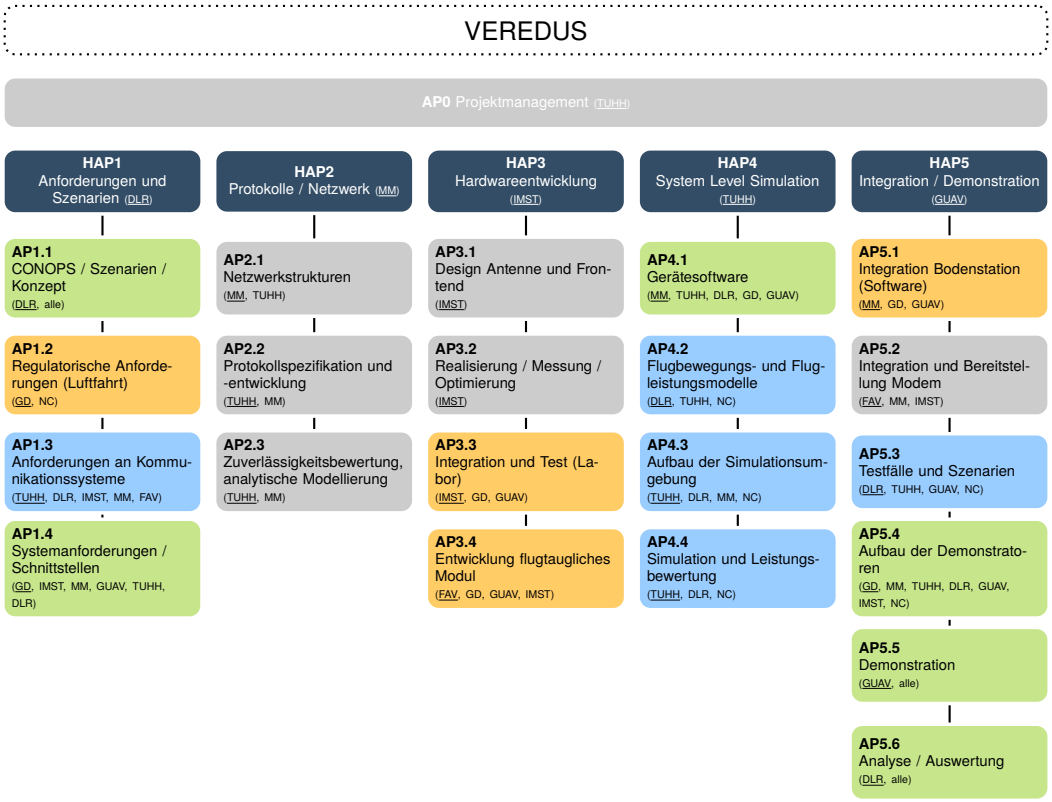


Abbildung 1 – Projektstrukturplan des Verbundprojektes VEREDUS (AP-Leitung unterstrichen). Blau: nur DLR; Orange: nur GD; Grün: DLR und GD.

- AP4.4: Simulation und Leistungsbewertung
- AP5.3: Testfälle und Szenarien / **Lead**
- AP5.4: Aufbau der Demonstratoren
- AP5.5: Demonstration
- AP5.6: Analyse / Auswertung / **Lead**

Germandrones ist an den Hauptarbeitspaketen HAP1, HAP3, HAP4 und HAP5 beteiligt. Dabei wird Germandrones in folgenden Arbeitspaketen aktiv sein:

- AP1.1: CONOPS/Szenarien/Konzept
- AP1.2: Regulatorische Anforderungen (Luftfahrt) / **Lead**
- AP1.4: Systemanforderungen/ Schnittstellen / **Lead**
- AP3.3: Integration und Test (Labor)
- AP3.4: Entwicklung flugtaugliches Modul
- AP4.1: Gerätesoftware
- AP5.1: Integration Bodenstation (Software)
- AP5.4: Aufbau der Demonstratoren / **Lead**
- AP5.5: Demonstration
- AP5.6: Analyse / Auswertung

3.2. Zeitplanung

Abbildung 2 zeigt die ursprüngliche Zeitplanung des Verbundprojektes VEREDUS. Die einzelnen APs bauen inhaltlich, logisch und chronologisch aufeinander auf. Die Projektlaufzeit war vom 01.06.2021 - 31.08.2024 angesetzt und wurde kostenneutral bis zum 31.12.2024 verlängert.

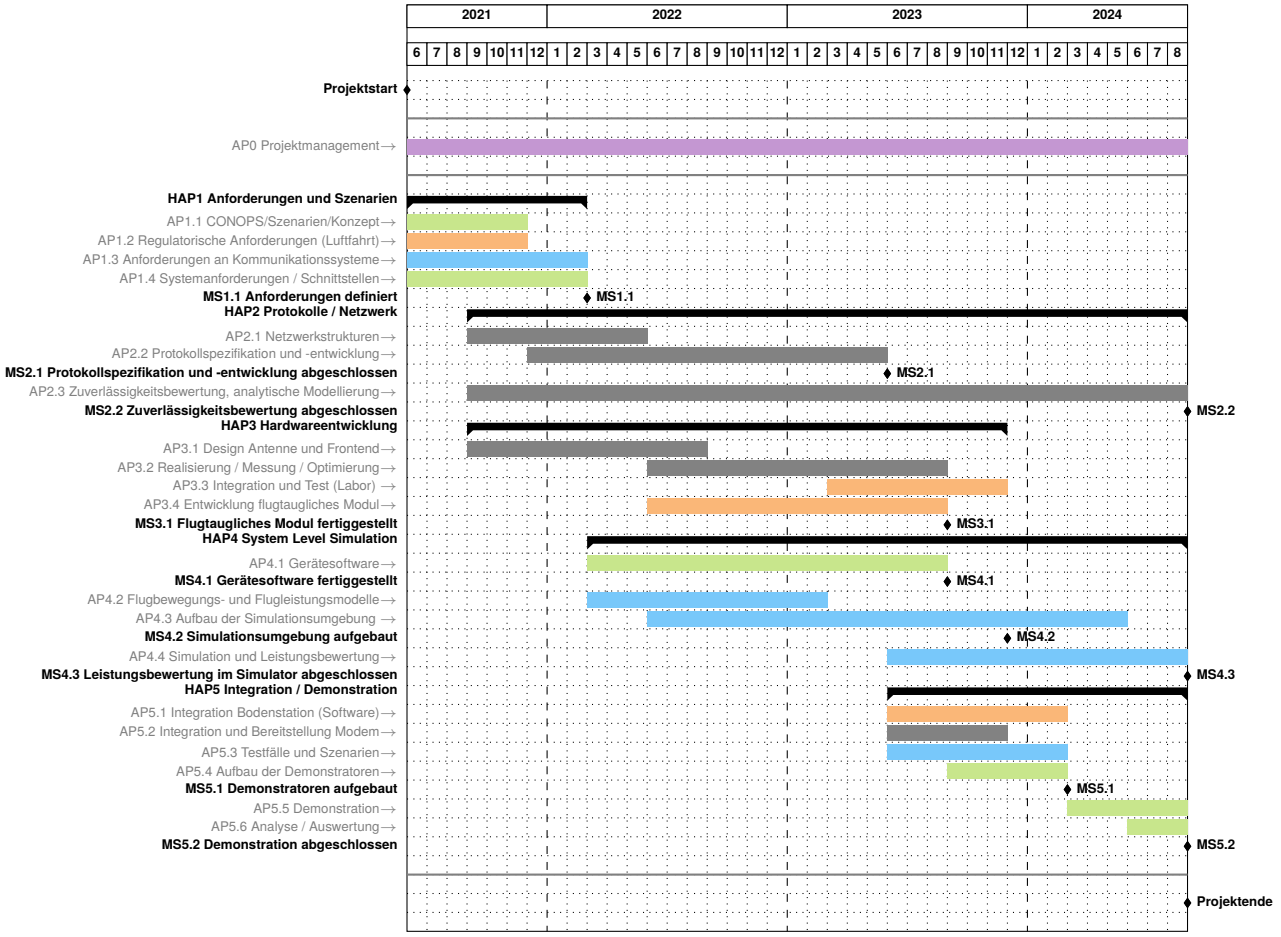


Abbildung 2 – Ursprüngliche Zeitplanung (Gantt-Chart) des Verbundprojektes VEREDUS. Blau: nur DLR; Orange: nur GD; Grün: DLR und GD.

Insgesamt sind im Verbundprojekt 9 Meilensteine definiert. Das DLR ist an der Erreichung der Meilensteine MS1.1, MS4.1, MS4.2, MS4.3, MS5.1 und MS5.2 direkt beteiligt. Die Meilensteine können Abbildung 2 entnommen werden.

3.3. Arbeitsplanung

Im Folgenden wird eine Übersicht über die vom DLR im Projekt VEREDUS geplanten Arbeiten gegeben. Arbeiten von Germandrones im Unterauftrag werden in jedem Kapitel gesondert dargestellt.

3.3.1. HAP1 „Anforderungen und Szenarien“

DLR

In HAP1 werden vom DLR in AP1.1 zunächst aktuelle und zukünftige UAV-Anwendungen und Betriebskonzepte (Concepts of Operation; CONOPS) erarbeitet und hinsichtlich der Vorteile und Auswirkungen durch das neue

Funknetz bewertet. Neue Anwendungsmöglichkeiten, die sich erst durch die Vernetzung ergeben, werden aufgezeigt und erarbeitet. Zudem werden die im Projekt zu betrachtenden Anwendungen und UAVs ausgewählt, welche bei den weiteren Betrachtungen im Projekt VEREDUS zugrunde gelegt werden. Auf Basis dieser Arbeiten werden Zukunftsszenarien für verschiedene Zeithorizonte entwickelt, welche die zu erwartenden Flugbewegungen mithilfe von Angebots- und Nachfragemodellen zeitlich und räumlich abschätzen. Hierzu werden die am Institut vorhandenen Modellketten angepasst und erweitert. Aufbauend auf diesen Arbeiten wird das Vernetzungs- und Kontrollkonzept durch die Projektpartner in AP1.2 ausgearbeitet und definiert. Die Ergebnisse dienen im nächsten Schritt als Grundlage zur Ableitung der Anforderungen an die Kommunikationssysteme in AP1.3 sowie zur Definition der Systemanforderungen bzw. Schnittstellen in AP1.4 an denen das DLR mitwirkt. Das DLR übernimmt zudem die Leitung von HAP1.

Germandrones
In HAP 1 leistet Germandrones Zuarbeit bei der Definition der Betriebskonzepte (CONOPS) und Szenarien in AP1.1. Zudem leitet es das AP1.2 in dem relevante gesetzliche Vorgaben aus bemannter und unbemannter Luftfahrt identifiziert werden. Auch AP1.4 in dem Schnittstellen zwischen Funksystem, UAV Autopilot und UAV Bodenstation der Projektpartner spezifiziert werden, wird von Germandrones geleitet.

3.3.2. HAP3 „Hardwareentwicklung“

Germandrones
In HAP 3 wird die Hardware zur Demonstration des VEREDUS Netzwerkes definiert und entwickelt. Hierzu zählt zum einen das Modem und zum anderen die Antennen. Hier wirkt Germandrones in AP 3.3 und AP 3.4 mit, indem es den Projektpartnern Teile der von Germandrones für die Demonstrationsflüge bereitgestellten UAVs (Songbird) zur Verfügung stellt, die notwendig für die Labortests (z.B. Vermessung der Antennen) und Integration sind.

3.3.3. HAP4 „System Level Simulation“

DLR
In HAP4 wird eine Gesamtsimulation zur Prüfung des Konzeptes aufgebaut. Hier wirkt das DLR in AP4.1 bei der Entwicklung der Software zur der Erstellung der Lagebildes und der verteilten Positionskontrolle mit, welche für jedes UAV in der Simulation benötigt wird. Zudem werden Ansätze zur Anpassung des Flugweges auf Basis der erzeugten Lagebilder aufgezeigt und erarbeitet. In AP4.2, welches vom DLR geleitet wird, werden Flugleistungs- und Flugbewegungsmodelle auf Basis der Ergebnisse von HAP1 entwickelt. Hierbei werden unterschiedliche UAVs insbesondere auch solche der beteiligten Projektpartner berücksichtigt. Zur Erzeugung der Flugbewegungen werden dann auf Basis der CONOPS aus AP1.1 realistische Missionsprofile entwickelt und gemäß der Zukunftsszenarien aus AP1.1 modelliert, so dass am Schluss detaillierte Trajektorien der einzelnen UAVs vorliegen. Schnittstellen zur Datenübergabe zwischen den unterschiedlichen Softwaretools des DLR und der TUHH werden erstellt. Mithilfe dieser Modellierungen wird dann in AP4.3 die Simulationsumgebung aufgebaut. Hierbei unterstützt das DLR die TUHH durch die Integration der Flugleistungs- und Flugbewegungsmodelle, Übergabe von Standortdaten der Bodenstationen sowie der Software aus AP4.1, so dass für ein zukünftiges Verkehrsszenario die Flugtrajektorien detailliert abgebildet, in die Simulationsumgebung übergeben und bewertet werden können. Methoden zur Datenaufbereitung und Auswertealgorithmen zur Auswertung der Simulationsergebnisse werden in diesem AP ebenfalls erarbeitet. In AP4.4 werden nach Fertigstellung der Simulationsumgebung die unterschiedlichen Verkehrsszenarien mit unterschiedlichen Zeithorizonten aus AP1.1 sowie die Testfälle und Szenarien aus AP5.3 zu Vergleichszwecken simuliert und bewertet.

Germandrones
In HAP 4 leistet Germandrones in AP4.1 Zuarbeit zur Anpassung der Gerätesoftware an die bereitgestellten Versuchsträger.

3.3.4. HAP5 „Integration / Demonstration“

DLR
In HAP5 erfolgt die Integration und Demonstration der Systeme durch Flugversuche. Das DLR leitet AP5.3, in dem die Definition der Testfälle und Szenarien erfolgt, welche in der Demonstration und in der Simulation geprüft werden sollen. Beim Aufbau der Demonstratoren in AP5.4 sowie bei der Demonstration in AP5.5 ist es unter anderem die Aufgabe des DLR, sicherzustellen, dass die in AP5.3 entwickelten Testfälle korrekt reproduziert werden. In AP5.6 findet abschließend die Analyse und Auswertung der Demonstration und Simulation statt, wobei das DLR die Leitung übernimmt.

Germandrones
In HAP5 wirkt Germandrones in AP5.1 bei der Integration der Soft- und Hardwarekomponenten in die UAV Demonstratoren und die UAV Bodenstationen mit. Zudem werden Versuchsträger (z.B. Songbird 100, Songbird 150) für die Flugversuche bereitgestellt. In AP5.4 ist Germandrones maßgeblich am Aufbau der Demonstratoren beteiligt und übernimmt zudem die Leitung dieses APs. In AP5.5 erfolgt die Durchführung der Demonstrations- und Vermessungsflüge. Hier betreut Germandrones die bereitgestellten Vehikel und führt zusammen mit den Projektpartnern die Flüge durch. In AP5.6 trägt Germandrones zur Gesamtbewertung bei.

4. Technisch-wissenschaftlicher Stand zu Projektstart

Vor dem Hintergrund der aktuell stark anwachsenden Verbreitung von UAVs und der steigenden Anzahl verschiedener UAV Anwendungen [1] ist das Thema der Integration der Vielzahl zu erwartender Vehikel in den Luftraum eine wichtige und zentrale Fragestellung. Hier wurde durch die neue Drohnenverordnung [2, 3] der Grundstein für die Standardisierung der Prozesse und Zertifizierung etc. in Europa gelegt. Auch das U-Space Konzept wie es in SESAR entwickelt wird [4], sieht eine Reihe von Diensten und Prozeduren vor, welche die einfache Abwicklung von UAV Missionen und die sichere Integration der UAVs in den Luftraum erlauben. Hierbei muss die technologische Entwicklung jedoch erst die entsprechenden Grundlagen liefern, die Dienste hinsichtlich Automatisierung und Digitalisierung zu ermöglichen, weshalb eine schrittweise Umsetzung geplant ist [4]. Insbesondere kommen Flügen außerhalb der Sichtweite des Bedieners (beyond visual line of sight; BVLOS) eine Schlüsselrolle bei der Realisierung neuer UAV-Anwendungen zu [1]. Für einen sicheren Betrieb der UAVs im Luftraum ist daher die Entwicklung von Technologien wie z.B. Kollisionswarn- und Ausweichsystemen (detect and avoid) [5], Datenlinks und Geofencing essentiell. Ein standardisiertes System hierfür existiert bislang jedoch nicht. Die Detektion und Kommunikation mit UAVs insbesondere außerhalb der Sichtweite des Bedieners ist aktuell jedoch noch keine gängige Praxis und erfordert eine aufwändige Zertifizierung und Zulassung der Systeme. Dabei kommt bei BVLOS–Flügen dem Situationsbewusstsein (situational awareness) eine zentrale Rolle zu [5]. Die Erkennung von Drohnen untereinander steht jedoch noch am Anfang. Während in der kommerziellen Luftfahrt ab eines bestimmten Luftfahrzeuggröße ein Kollisionswarnsystem (Traffic Collision Avoidance System; TCAS) Vorschrift ist, könnte sich für UAVs allenfalls das in der allgemeinen Luftfahrt stark unter Segelfliegern verbreitete FLARM[1] System oder sog. OGN-Tracker[2] eignen. Die Mitführung eines solchen Systems ist jedoch freiwillig und zudem auf Grund von Lizensierungsgründen aktuell sehr teuer in der Anschaffung. Des

[1] FLARM Technology Ltd., URL: www.flarm.com
[2] Open Glider Network OGN-Tracker, URL: http://wiki.glidernet.org/ogn-tracker

Weiteren bietet FLARM nur eine passive Positionskontrolle ähnlich ADS-B also keine direkte Kommunikationsmöglichkeit mit den Vehikeln oder der Vehikel untereinander.
Das im Verbundprojekt VEREDUS vorgeschlagene Funknetz vereint mehrere Vorteile gegenüber aktuellen Lösungen. Die Vernetzung ermöglicht einen Betrieb der Drohnen unabhängig von der Bodeninfrastruktur indem die Kommunikation zwischen Bediener und UAV auch im Falle von BVLOS sichergestellt ist und erlaubt gleichzeitig die Erfassung der Positionen der anderen Verkehrsteilnehmer, welche sich im Funknetz befinden und bietet so die Möglichkeit der Kollisionsvermeidung. Durch Laufzeitbestimmung der Signale zwischen benachbarten Netzknoten kann zudem eine Abstandsmessung erfolgen (wie z.B. auch bei LDACS demonstriert [14], oder bei DME) welche im Verbund des gesamten Netzes eine Triangulation der Positionen ermöglicht. Hieraus ergibt sich insbesondere die Möglichkeit GNSS-Positionen unabhängig zu prüfen und so Fehler und Abweichungen zu erkennen. Auch ermöglicht das VEREDUS-System die direkte Kommunikation zwischen UAVs und ermöglicht so beispielsweise Verfahren zur automatischen Flugweganpassung. Auch bezüglich der Erfassung von Drohnen gibt es derzeit noch keinen einheitlichen Standard. Bodengestützte Systeme nutzen die Erkennung von Steuersignalen zwischen Bediener und Vehikel [15], Radar, optische oder akustische Systeme [16]. Auch hier kann das VEREDUS-System einen wichtigen Beitrag leisten, indem im Funknetz registrierte UAVs durch Erfassungssysteme automatisch erkannt werden können

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das DLR arbeitet in allen Arbeitspaketen in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern insbesondere mit Germandrones zusammen. Tabelle 1 zeigt die Zusammenarbeit der Verbundpartner in den einzelnen Arbeitspaketen, an denen das DLR und GD beteiligt sind. Der jeweilige AP-Lead ist mit „●“ eine AP-Beteiligung mit „○“ gekennzeichnet.

AP	DLR	TUHH	GD	FAV	GUAV	IMST	MM	NC
AP1.1	●	○	○	○	○	○	○	○
AP1.2			●					○
AP1.3	○	●		○		○	○	
AP1.4	○	○	●	○	○	○	○	
AP3.3			○		○	●		
AP3.4			○	●	○	○		
AP4.1	○		○		○		●	
AP4.2	●	○						○
AP4.3	○	●					○	○
AP4.4	○	●						○
AP5.1			○		○		●	
AP5.3	●	○			○			○
AP5.4	○	○	●		○	○	○	○
AP5.5	○	○	○	○	●	○	○	○
AP5.6	●	○	○	○	○	○	○	○

Tabelle 1 – Zusammenarbeit der Projektpartner in den Arbeitspaketen, an denen das DLR und Germandrones beteiligt sind. AP-Lead = ●, AP-Beteiligung = ○.

6. Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Hauptergebnisse des Teilprojektes „Anwendung und Simulation“ im Verbundprojekt VEREDUS aufgelistet:

- Erstellung eines Anforderungskataloges zum Aufbau eines ad-hoc Funknetz zwischen UAS
- Erstellung eines agentenbasieren Flugbewegungsmodells zur Simulation von UAS Bewegungen und Umsetzung in Programmcode
- Erarbeitung eines generischen Stadtmodells und Umsetzung in Programmcode
- Erarbeitung eines Algorithmus zur gegenseitigen Positionskontrolle und Umsetzung in Programmcode
- Erarbeitung eines Testplans für Demonstrations- und Testflüge
- Integration der Modems und Antennen in Songbird-Vehikel von Germandrones
- Anbindung der Modems an Fluggeräte- und Bodenstationssoftware von Germandrones
- Erfolgreiche Durchführung von Demonstrationsflügen

Teil II.
Detaillierte Darstellung der Projektergebnisse

7. Arbeitspakete

7.1. AP1.1: CONOPS/Szenarien/Konzept

In AP1.1 „CONOPS/Szenarien/Konzept“ wurde federführend durch das DLR das Concept of Operations für die jeweiligen UAS- und FANET-Anwendungen erarbeitet. Dabei wurden zusammen mit den Projektpartnern Primärfunktionen und Sekundärfunktionen definiert, welche im Folgenden detailliert erläutert werden.

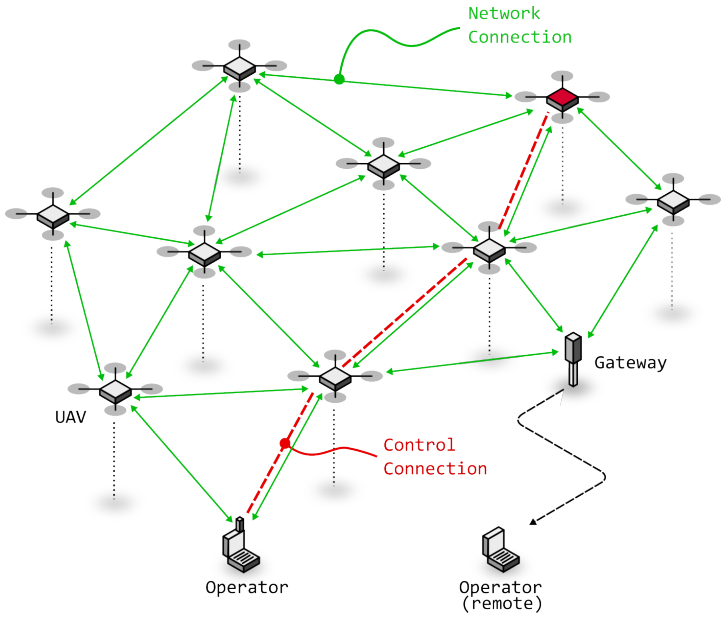


Abbildung 3 – Schematische Darstellung des VEREDUS Netzwerkes. Grün: Vernetzung der Teilnehmer zum Austausch von Daten z.B. für das Lagebild. Rot: Kontrollverbindung zwischen Bodenstation und UAS im Falle eines Verbindungsverlustes des Primärkanals.

7.1.1. VEREDUS Primärfunktionen

Lagebild

Eine der Hauptfunktionen des VEREDUS-Netzes besteht darin, die Erstellung und Prüfung eines Lagebildes zu ermöglichen. Das geprüfte Lagebild wird durch den Abgleich der im Netz verteilten GNSS Positionsdaten mit den bei den einzelnen Funkübertragungen ermittelten Signallaufzeiten gewonnen. Abbildung 3 zeigt schematisch die Vernetzung der einzelnen Teilnehmer in einem typischen VEREDUS-Netz. Zur Erstellung des Lagebildes werden die GNSS Positionsdaten verwendet, welche zwischen allen Teilnehmern (grün) ausgetauscht werden. Der Austausch selber liefert Informationen über die Signallaufzeiten zwischen den Teilnehmern. Diese dienen dazu, die GNSS Positionen der Teilnehmer durch Vergleich mit den Laufzeitdaten der einzelnen

Verbindungen hinsichtlich ihrer Plausibilität zu überprüfen (vgl. Kapitel 7.7). Grundsätzlich wird in VEREDUS zwischen der Erstellung eines lokalen und eines globalen Lagebildes unterschieden.

Lokales Lagebild
UAS können auf Basis der im Netz verteilten Daten ein eigenes lokales Lagebild (z.B. zum Zwecke der Kollisionsvermeidung oder zum Bilden von Flugformationen) erstellen. Dabei werden nur die Daten für das jeweilige UAV relevanten Positionsmeldungen der benachbarten Vehikel aus dem Datenstrom herausgefiltert. Übrige Daten werden unbearbeitet weitergeleitet.

Globales Lagebild
Alle Teilnehmer des Netzes (UAVs und Bodenstationen) können auf Basis der im Netz verteilten Daten ein globales Lagebild (z.B. zum Zwecke der Luftraumüberwachung und Kontrolle durch Behörden) erstellen. Zudem kann das von den Bodenstationen erzeugte Lagebild in bodengebundene Netze eingespeist werden (z.B. flightradar24, U-Space etc.). Ein UAS-Operator fungiert als Bodenstation und somit als Konten im VEREDUS-Netz und kann somit ebenfalls für sich ein Lagebild erstellen, um so z.B. die Position des eigenen UAS zu überprüfen. Das globale Lagebild wird weiterhin dazu verwendet, den Abgleich der GNSS Positionen mit den Signallaufzeiten durchzuführen.

Redundante Datenverbindung
Dieser Anwendungsfall umfasst die Bereitstellung einer sekundären Datenverbindung im Falle des Ausfalls der primären Datenverbindung. Diese soll eine Steuerung des UAS bis zum Missionsende/-abbruch ermöglichen. In Abbildung 3 ist die redundante Datenverbindung schematisch dargestellt (rot). Das Steuersignal wird dabei über mehrere Zwischenschritte (Hops) an das betroffenen Vehikel weitergeleitet.

7.1.2. VEREDUS Sekundärfunktionen

Neben den Hauptfunktionen wurden im Projekt VEREDUS eine Reihe von Sekundärfunktionen identifiziert, welche jedoch im Laufe des Projektes nicht weiter betrachtet wurden. Diese werden im folgenden zu Zwecken der Vollständigkeit aufgelistet:

- Ground Based Augmentation
- An- und Abflugshilfe bei Droneports
- Remote Identification
- Notfall-Funktion
- Weiterleiten von FLARM/ADS-B Daten

Detaillierte Ergebnisse wurden im Liefergegenstand „E1.1-DLR-1 Anwendungsübersicht“ dokumentiert.

7.1.3. UAS Anwendungen

Ebenfalls wurde durch das DLR zusammen mit den Projektpartnern bereits bestehende sowie zukünftige Anwendungen für UAS erarbeitet und hinsichtlich der Relevanz für das VEREDUS Netzwerk bewertet. Dies ist insbesondere daher essentiell, da die Leistungsfähigkeit des Ad-Hoc Netzwerkes von der Anzahl der im Netzwerk verfügbaren Knoten abhängt. In folgender Übersicht werden die im Projekt betrachteten UAS Anwendungen kurz aufgelistet.

Bau und Unterhalt
Hierzu zählen unter anderem die Erstellung von Geländemodellen, Inspektion von Infrastruktur, Baufortschritts-Monitoring, Perimeterinspektion und Patrouillenflüge.

Behördlicher Einsatz
Hierzu zählen unter anderem die Suche von Personen, Inspektion nach Unfällen, Messung von Schadstoffen, Erstellung eines Lagebildes, Ausbringung von Wirkmitteln, Ausbringung von Löschmitteln, Immobilisierung von Personen, Perimeterinspektion, Patrouillenflüge.

Humanitäre Operationen
Hierzu zählen unter anderem die Erstellung von Karten, Notversorgung mit Gütern, Notversorgung mit Kommunikation.

Landwirtschaft
Hierzu zählen unter anderem die Tierrettung, Zustandsbestimmung Feld/Wald, Ausbringung von Chemikalien.

Medien und Unterhaltung
Hierzu zählen unter anderem die Erstellung von Filmaufnahmen, Erstellung von Fotoaufnahmen, Touristische Zwecke, Drohnenshows.

Transportwesen/Logistik
Hierzu zählen unter anderem der Transport von AED Geräten, Transport von Proben, Transport von Paketen, Kurierdienste, Lieferung von Nahrungsmitteln, Personentransport.

Vermessung und Überwachung
Hierzu zählen unter anderem die Personenüberwachung ,Überwachung bei Großanlässen, Überwachung der Landesgrenze, Inspektion von Infrastruktur, Inspektion von Anlagen, Verkehrsüberwachung, Baustellenüberwachung, Wildtiermonitoring, Mapping (Erstellung von Karten).

Im Kontext eines FANET sind vor allem die Anzahl und Position der Vehikel sowie die Reichweite der Funkverbindung r_c die entscheidenden Parameter, welche die Leistungsfähigkeit bestimmen. Je nach Anwendung kann eine hohe Vehikeldichte beispielsweise zu einer Überlastung des Funknetzes führen, eine geringe Anzahl an Knoten kann wiederum dazu führen, dass sich nicht alle Teilnehmer miteinander vernetzen können und sich isolierte Cluster bilden.
Um die Auswirkung der Vehikeldichte und Position auf die Leistungsfähigkeit des Funknetzes in VEREDUS zu analysieren, wurde die UAS Anwendung der Paket- und Essenslieferung für die weitere Betrachtung ausgewählt, da hier insbesondere in urbanen Räumen hohe Vehikeldichten erwartet werden können [6, 7]. Eine Variation der Anzahl ausgelieferter Pakete erlaubt dann die Variation der Vehikeldichte und somit die Bewertung der Leistungsfähigkeit des FANET.

7.2. AP1.2: Regulatorische Anforderungen (Luftfahrt)

In diesem Arbeitspaket wurden zusammen mit NavCert relevante gesetzliche Vorgaben aus bemannter und unbemannter Luftfahrt identifiziert und mit den Projektpartnern diskutiert. Die Ergebnisse wurden mit den anderen Projektpartnern geteilt und im Liefergegenstand „D1.2 Regulatorische Anforderungen" dokumentiert.

7.3. AP1.3: Anforderungen an Kommunikationssysteme

In AP1.3 „Anforderungen an Kommunikationssysteme“ wurde auf Basis der Arbeiten von AP1.1 Anforderungen an die Kommunikationssysteme abgeleitet. Die Anforderungen wurden dabei in verschiedene Kategorien eingeteilt. Im Folgenden werden die wichtigsten Anforderungen dargestellt. Detaillierte Ergebnisse können dem Liefergegenstand „E1.1-DLR-1 Anwendungsübersicht“ entnommen werden.

Allgemein

- Im VEREDUS Netz werden sowohl stationäre als auch mobile Knoten betrieben
- Das VEREDUS Netz ist als dezentrales Netz zu konzipieren
- Alle Knoten im Netz werden im Bezug auf die Primärfunktionen gleichwertig behandelt
- Sekundärfunktionen werden bei Bedarf nur von bestimmten Netzknoten wahrgenommen
- Gateways stellen eine Schnittstelle zwischen Operator und VEREDUS-Netz zur Verfügung

Netzwerk

- Das VEREDUS Netz muss dynamisch auf verschiedene Ereignisse (Hinzukommen/Abmelden/Ausfall von Knoten, hohen Relativbewegungen, Wettereinflüssen etc.) reagieren und sich entsprechend anpassen können
- Lokale Funktionalität muss auch bei großen Netzwerken gewährleistet sein
- Das VEREDUS-Netz muss in der Lage sein, sich von Störungen zu erholen
- Das VEREDUS-Netz muss abhängig vom Anwendungsfall eine entsprechende Verfügbarkeit und zeitnahe Weiterleitung der Nachrichten gewährleisten

Hardware

- Die benötigte Hardware muss in bestehende UAS der im Projekt betrachteten Gewichtsklassen integriert werden können
- Die VEREDUS Flight-Hardware muss über geeignete Soft- und Hardwareschnittstellen verfügen, um an die UAS-Steuerelektronik angeschlossen werden zu können
- Die VEREDUS Ground-Hardware muss über geeignete Soft- und Hardwareschnittstellen verfügen, um an Gateways und Operator-Stationen angeschlossen werden zu können

Anwendungen

- Betrachtet werden sowohl städtische als auch ländliche Räume, wobei der Fokus auf den urbanen Raum gelegt wird
- Der Fokus des Projekts liegt auf der UAS-Kategorie SPECIFIC
- Betrachtet werden UAS-Typen VTOL, HTOL und Hybrid
- Fokus des Projekts liegt auf UAS mit einer Gewichtsklasse von bis zu 25kg
- Der Fokus des Projekts liegt auf dem Very Low Level Airspace (VLL) bis zu einer Flughöhe von 150m
- Das VEREDUS-Netz soll für zukünftig zu erwartende Luftverkehrsdichten ausgelegt werden

Funktionen

- Die Bereitstellung der Daten zur Erstellung eines geprüften Lagebildes stellt eine Primärfunktion dar
- Die Bereitstellung einer redundanten Datenverbindung stellt eine Primärfunktion dar
- Das VEREDUS-Netz soll in Ausnahmesituationen (z.B. Katastrophenfall) zur primären Steuerung von UAS verwendet werden können
- Das Lagebild wird auf dem jeweiligen UAS aus den im Netz verfügbaren Daten erzeugt
- Das Lagebild wird auf den im VEREDUS-Netz vorhandenen Bodenstationen erzeugt
- Das System soll eine Updaterate des globalen Lagebildes von < 5 Sekunden ermöglichen
- Das System soll eine Sendefrequenz der Positionsmeldungen von 2 Hz ermöglichen
- Ein globales Lagebild kann im Regelfall durch alle Netzknoten unabhängig erstellt werden
- Das VEREDUS-Netz muss Zeitsynchronisation ermöglichen
- Die red. Datenverbindung wird nicht zur dauerhaften Steuerung eines UAS verwendet
- Die red. Datenverbindung muss innerhalb von 30sec Sekunden nach Verlust der Primärverbindung aufgebaut sein

Daten

- Das VEREDUS-Netz überträgt keine Payload-Nutzdaten (z.B. Videofeeds)
- Das VEREDUS-Netz überträgt Identifikations-, Positions- und Geschwindigkeitsdaten
- Das VEREDUS-Netz überträgt Daten der Laufzeitmessungen
- Das VEREDUS-Netz überträgt Steuer- und Telemetriedaten zur Bereitstellung einer red. Datenverbindung zwischen Operator und UAS
- Die Daten für die Lagebild Positionsdaten basieren auf dem MAVLINK[3] Datenpaket GPS-RAW-INT (#24)
- Die Laufzeitdaten werden durch Time-Of-Flight Berechnungen bestimmt
- Die Laufzeit wir durch Anhängen der aufgezeichneten Zeitstempel von Senden und Empfangen der Positionsmeldung an die jeweilige Positionsmeldung angehängt
- Die Daten für den Downlink der Datenverbindung basieren auf dem MAVLINK Datenpaket COMMAND-LONG (#76)
- Die Daten für den Uplink der Datenverbindung basieren auf dem MAVLINK Datenpaket HIGH-LATENCY2 (#235)
- Eindeutige Identifikationsdaten des Vehikels sind im VEREDUS Funkmodul hinterlegt

[3] https://mavlink.io/en/

7.4. AP1.4: Systemanforderungen / Schnittstellen

In diesem Arbeitspaket wurden von Germandrones die Schnittstellen zwischen der Vehikel-Hardware (Songbird 150, siehe Abbildung 4), der Flugelektronik (vgl. Abbildung 4) und der Bodenstationssoftware definiert. Die Ergebnisse wurden im Liefergegenstand „D1.4 Systemanforderungen / Schnittstellen“ dokumentiert und den Projektpartnern zur Anpassung von Soft- und Hardware Schnittstellen zur Verfügung gestellt. Im Zuge der Arbeiten fand ein Test der Schnittstelle zwischen Autopilot und Funkmodul in Vorbereitung auf AP3.3 und AP3.4 statt. Hierzu wurden Testflüge mit einem Networked Remote Id System (Open Glider Network) sowie mit einem 5G Modem durchgeführt.

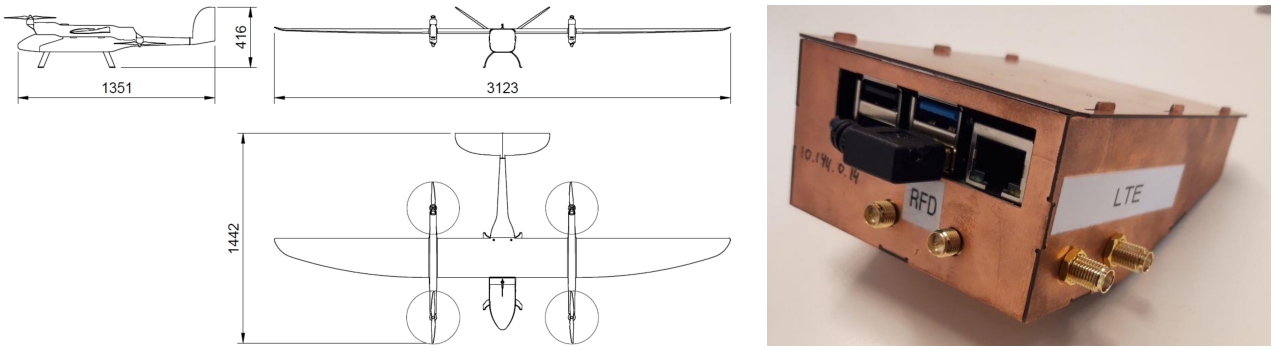


Abbildung 4 – Links: Grundabmessungen der Songbird 150 Drohne; Rechts:Telemetriebox der Songbird 150 Drohne

7.5. AP3.3: Integration und Test (Labor)

Für die Labortests zur Integration der Hardware in die Vehikel und die Vermessung der Antennen durch IMST wurden von Germandrones in diesem AP Bauteile des Songbird 150 sowie CAD-Modelle der Nase des Songbird 150 Rumpfes IMST zur Verfügung gestellt. Dies beinhaltete die Produktion und den Versand einer Songbird Nase (N3132) sowie eines Songbird 150 Rumpfes inklusive einer Nutzlastbox. IMST wurde während der Integrations- und Vermessungsarbeiten durch Germandrones unterstützt. Abbildung 5 (links) zeigt die prototypenhafte Installation der Antennen in die Songbird Nase bei IMST.

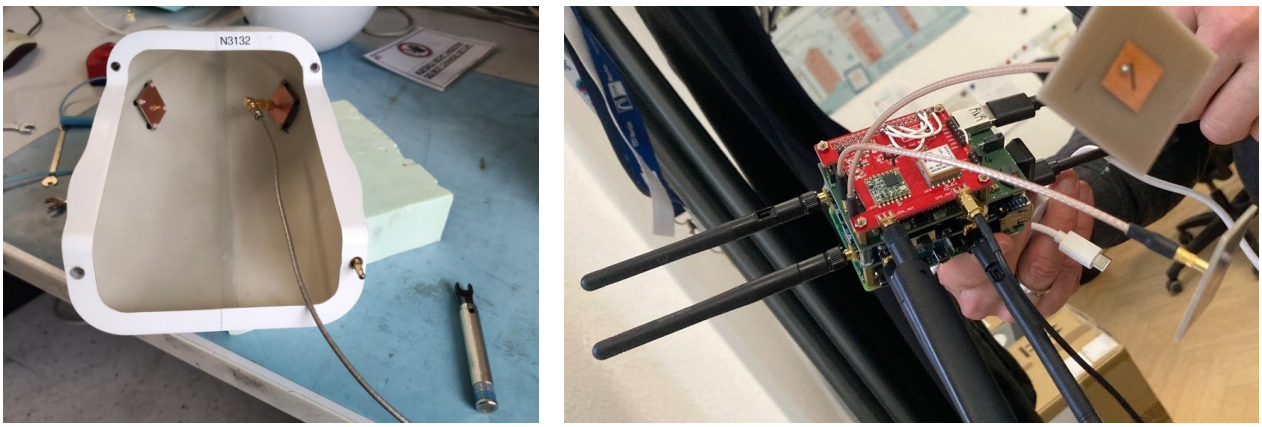


Abbildung 5 – Links: Testweiser Einbau der Antennen in die Songbird-Nase; Rechts: Prototypenhafter Aufbau des Funkmodems während des Integrations-Workshops bei Germandrones in Berlin.

Während eines Integrations-Workshops bei Germandrones in Berlin wurden Prototypen der Module testweise in die Nutzlastbox installiert sowie die softwareseitige Anbindung getestet. Abbildung 5 (rechts) zeigt einen prototypenhaft aufgebautes VEREDUS-Modem während des Integrations-Workshops.

7.6. AP3.4: Entwicklung flugtaugliches Modul

In diesem Arbeitspaket wirkte Germandrones bei der Definition von 5,9GHz Antennenposition und Kabellängen für den Einbau in die Songbird Drohne mit. Auch die Anbringung der Iridium Antenne an der Songbird Drohne wurde in diesem Arbeitspaket mit den Projektpartnern abgestimmt.

7.7. AP4.1: Gerätesoftware

Eine der zentralen Funktionen des VEREDUS Netzwerkes besteht darin, mit Hilfe der im Netz verteilten Laufzeitinformationen zwischen den Netzknoten das durch GNSS erzeugte Lagebild zu überprüfen. Hierzu wurde in AP4.1 „Gerätesoftware“ durch das DLR in Zusammenarbeit mit der TUHH ein Algorithmus entwickelt. Dieser wurde auf der ICAS Konferenz 2024 veröffentlicht [8] und als Patent angemeldet. Die grundlegende Funktionsweise des Algorithmus wird im Folgenden kurz dargestellt.

7.7.1. Grundlegende Funktionsweise

Abbildung 6 zeigt schematisch den Ablauf des Algorithmus für eine Konstellation von 3 Knoten. Die zu Grunde liegenden Nachrichten sind in Tabelle 2 definiert. Das Verfahren basiert auf dem Austausch von Daten zwischen den einzelnen Knoten des Netzes. Dabei liegt die Annahme zu Grunde, dass die Funktechnologie eine Bestimmung der Laufzeiten des Signals zwischen zwei Netzknoten ermöglicht. Aus der Laufzeit kann so der Abstand der beiden Knoten mit Hilfe der Lichtgeschwindigkeit c ermittelt werden.

$$d = \Delta t \cdot c \tag{1}$$

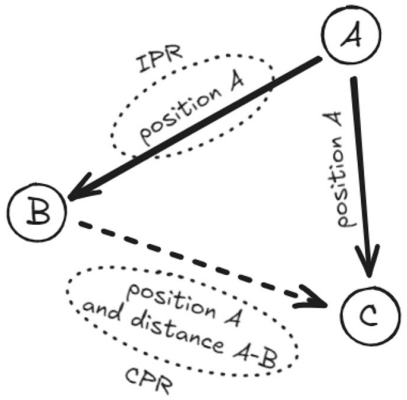


Abbildung 6 – Schematische Darstellung der Nachrichtenübertragung für die GNSS Positionskontrolle in einem FANET bestehend aud 3 Netzknoten.

Abbildung 6 zeigt schematisch den grundlegenden Ablauf im Funknetz. Knoten A sendet seine Postionsdaten an Teilnehmer B und C (Initial Position Report; IPR). Diese ergänzen die Daten um die Laufzeitinformation (Completed Position Report; CPR) und leiten sie an benachbarte Knoten weiter (hier für Knoten B dargestellt,

der die Information an Knoten C weiterleitet. Knoten C hat dadurch Kenntnis der Streckenlängen AB, BC und AC und kann so prüfen, ob diese mit den gemeldeten GNSS Positionen vereinbar sind.

7.7.2. Datenmodell

Im vorigen Abschnitt wurden zwei Nachrichtentypen (IPR und CPR) eingeführt, welche für die Positionskontrolle notwendig sind. In Tabelle 2 sind diese detailliert dargestellt.

msg.	data type	variable	description	owner	size
IPR	POS-RAW	POS_s	GNSS position of sending node	self	10 Byte
	ID	ID_s	ID of sending node	self	4 Byte
	TS	TS_s	timestamp of sending message	self	8 Byte
CPR	POS-RAW	POS_s	GNSS position of sending node	other	10 Byte
	ID	ID_s	ID of sending node	other	4 Byte
	TS	TS_s	timestamp of sending message	other	8 Byte
	TS	TS_r	timestamp of receiving message	self	8 Byte
	ID	ID_r	ID of receiving node	self	4 Byte

Tabelle 2 – Beschreibung der Nachrichten für die Positionsmeldungen aus [8].

7.7.3. Algorithmus

Der Durch das DLR entwickelte Algorithmus zur gegenseitigen Positionskontrolle wurde in [8] veröffentlicht und als Patent angemeldet. An dieser Stelle wird auf die entsprechenden Quellen verwiesen.

7.7.4. Simulative Bewertung

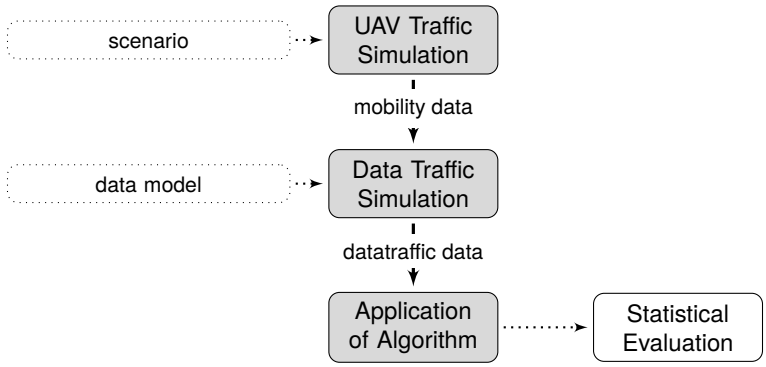


Abbildung 7 – Grundlegender Ablauf zur simulativen Prüfung des Algorithmus aus [8].

Im Rahmen des Projektes VEREDUS erfolgte eine Prüfung des Algorithmus mit Hilfe der Simulationsumgebung und der damit erzeugten Flugbewegungs- und Kommunikationsdaten. Abbildung 7 zeigt den schematischen Ablauf dieser Prüfung. Die mit Hilfe der Verkehrssimulation erzeugten Daten wurden an die TUHH zur Simulation der Datenverkehrs weitergegeben. Der an einem Netzknoten aufgezeichnete Datenverkehr wurde an das DLR zur Anwendung des Algorithmus weitergegeben.

Abbildung 8 (links) zeigt schematisch das aus der Sicht eines Vehikels (rot) aus dem Datenverkehr rekonstruierte Abbild des Netzwerkes. 8 (rechts) zeigt die Anzahl der aus Sicht des jeweils betrachteten Vehikel bekannte

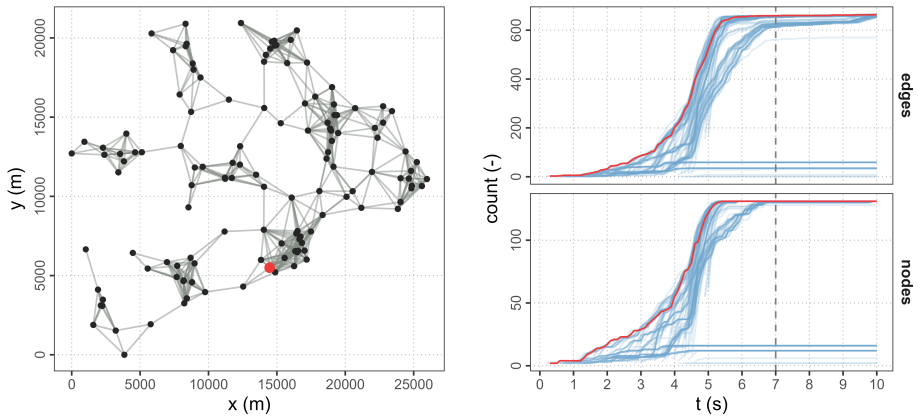


Abbildung 8 – Rekonstruiertes Netzwerk aus Sicht eines spezifischen Netzknotens (links). Anzahl der der bekannten Knoten aus Sicht eines Netzknotens (rechts) aus [8]. Daten für ausgewählten Knoten sind rot dargestellt.

Netzwerkknoten. Der Beispielkonten ist auch hier rot dargestellt. Man erkennt, dass nach einer Anlaufphase den meisten Knoten im Netzwerk die restliche Knoten bekannt sind. Weitere Ergebnisse der simulativen Prüfung können [8] entnommen werden.

7.8. AP4.2: Flugbewegungs- und Flugleistungsmodelle

In diesem Arbeitspaket hat das DLR eine Methodik und ein Softwaretool zur Erstellung und Simulation von UAS Verkehrszenarien entwickelt. Um die Bindung an ein konkretes Szenario (z.B. Stadt oder Region) zu vermeiden, wurde dabei ein Städtegenerator implementiert, der auf Basis gegebener Randbedingungen ein räumliches Szenario erstellt und auf diesem gemäß vorgegebener Rahmenbedingungen einen Bedarf für Flugbewegungen durch UAS erzeugt.

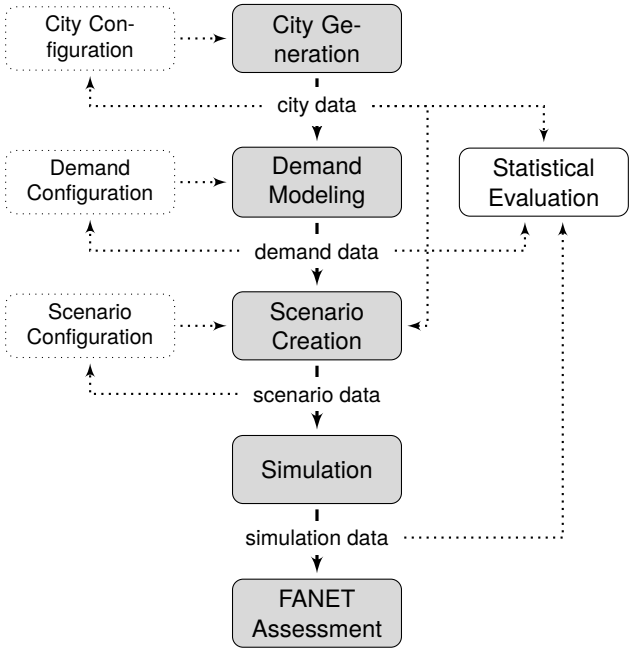


Abbildung 9 – Grundlegender Ablaufplan der Modellkette aus [9] bestehend aus Stadtgenerierung, Verkehrssimulation und Bewertung des FANET.

7.8.1. Grundlegender Ablauf

Abbildung 9 zeigt den grundlegenden Ablauf der im Rahmen von VEREDUS zusammen mit den Projektpartnern erarbeiteten Modellkette zur Durchführung der Simulation. Dabei wird zunächst ein Stadtmodell erzeugt. Dieses Modell kann in Anlehnung an die zu betrachtende Stadt hinsichtlich Population und Fläche angepasst werden. Für die im Stadtmodell erzeugte Populationsverteilung wird ein Bedarf an Flugbewegungen aus dem Anwendungsfall der Paketlieferung (siehe AP1.1) generiert. Aus diesem Bedarf werden im darauffolgenden Schritt konkrete Flugmissionen abgeleitet, welche anschließend durch eine Schnellzeitsimulation simuliert werden. Die dadurch erzeugten Mobilitätsdaten bilden die Grundlage für die Leistungsbewertung des Funknetzwerkes seitens des DLR und der TUHH in AP4.4. Zudem werden die von der TUHH erzeugten Netzwerkdaten zur Validierung des Algorithmus in AP4.1 verwendet.

7.8.2. Flugbewegungsmodell

Zur Erzeugung und Simulation der Flugbewegungen wurde ein grundlegendes Missionsmodell erstellt (siehe Abbildung 10). Dieses bildet eine typische Liefermission ab und beinhaltet zusätzliche Phasen, in denen sich das Vehikel am VEREDUS-Netzwerk an- und abmelden kann. Die Länge dieser Zeiten sowie auch für die Ablieferung des Paketes am Lieferort werden dabei innerhalb festgelegter Grenzen zufällig gewählt. Für jede im Stadtszenario erstellte Flugbewegung wird eine entsprechende Mission generiert, die dann in der Simulation abgeflogen wird. Hierbei kommt ein einfaches Punktmassemodell zum Einsatz, welches die Missionen mit konstanten Geschwindigkeiten abfliegt.

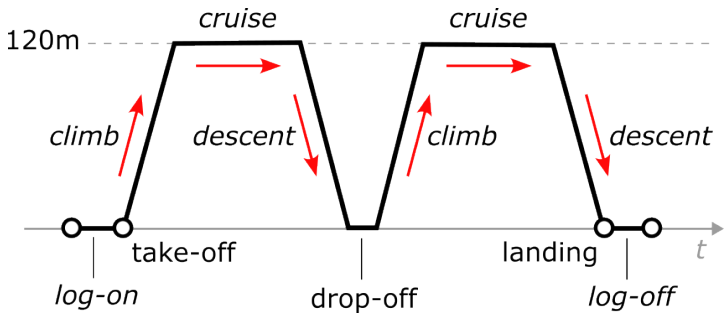


Abbildung 10 – Schematische Darstellung eines typischen Missionsprofils aus [9]. An- und Abmeldezeiten am Funknetz (log-on, log-off) und Zwischenlandung zur Ablieferung des Pakets (drop-off) werden zufällig innerhalb eines definierter Bereiche gewählt.

Im Rahmen von VEREDUS wurde durch das DLR zudem ein erweitertes Flugbewegungsmodell entwickelt, welches die Flugbewegung durch den Einsatz von Reglern realitätsnaher abbildet. Dieses Modell wurde aus Zeitgründen für die Netzwerksimulation jedoch nicht verwendet. Abbildung 17 (rechts) zeigt einen Screenshot der graphischen Benutzeroberfläche des durch das DLR erstellten Softwaretools zur Simulation von Einzelflügen mit dem einfachen und dem erweiterten Flugbewegungsmodell.

7.8.3. Stadtgenerierung

Der grundlegende Ablauf bei der Stadtgenerierung ist in Abbildung 11 dargestellt. Hierbei werden zunächst Populationsblöcke auf Basis einer vorgegebenen Punkteverteilung und Ableitung eines Voronoi-Diagramms erzeugt. Abbildung 12 (links) zeigt ein beispielhaftes generisches Stadtmodell mit der zu Grunde liegenden Bevölkerungsdichte δ_p. Dabei kann die erzeugte Stadt hinsichtlich Bevölkerung, Fläche und auch Außenkontur an eine bestehende Stadt angepasst werden.

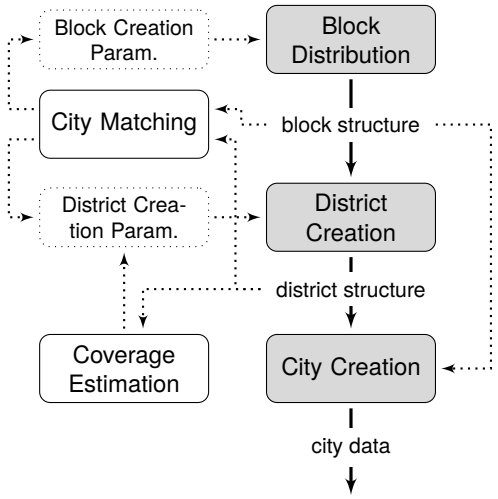


Abbildung 11 – Grundlegender Ablaufplan der Stadtgenerierung aus [9].

Die Blöcke werden anschließend durch einen vom DLR in VEREDUS entwickelten Algorithmus zu Lieferbezirken zusammengefasst. Abbildung 12 (rechts) zeigt die Zuteilung der einzelnen Blöcke (blocks; B) zu den Lieferbezirken (districts; D)

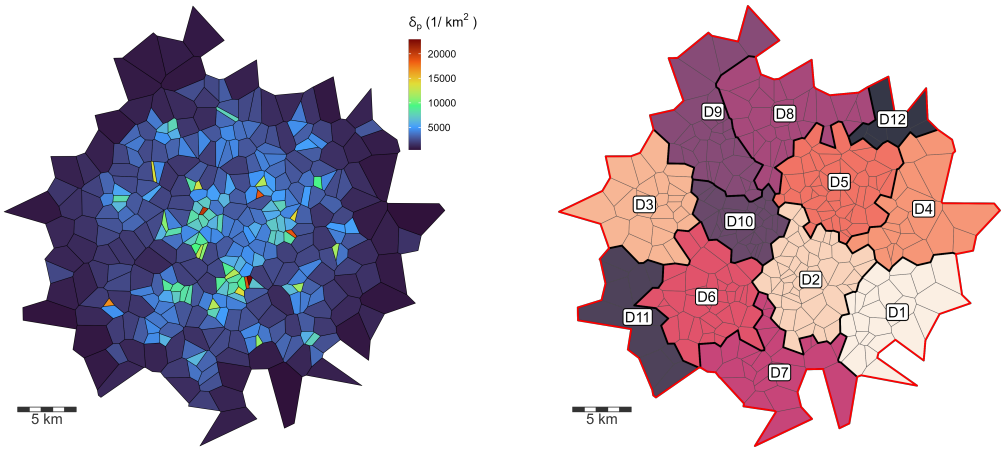


Abbildung 12 – Darstellung eines mit Hilfe der in VEREDUS entwickelten Methode erstellen Stadtmodells aus [9]. Links: Populationsblöcke anhand einer zufälligen räumlichen Verteilung von Punkten (hier multivariate Gauss-Verteilung). Rechts: Zusammenfassung der Blöcke zu Bezirken.

Abbildung 13 (links) zeigt die Positionen der Lieferzentren für die einzelnen Bezirke. Man erkennt, dass der durch das DLR entwickelte Algorithmus die Flächen eines entsprechenden Voronoi-Diagramms gut abbildet. Die Lieferzentren der Bezirke können anschließend wahlweise im geometrischen Flächenschwerpunkt C_a oder im populationsgewichteten Flächenschwerpunkt C_p positioniert werden.
Für die so generierte Stadt kann unter Zuhilfenahme der maximalen Flugreichweite der Vehikel und der Lieferzentren die Abdeckung durch Drohnenlieferungen ς bestimmt werden (vgl. Abbildung 13 rechts). Wird die gewünschte Abdeckung erreicht, wird die Stadt ausgewählt, final erstellt und dient als Grundlage für die weiteren Berechnungen.

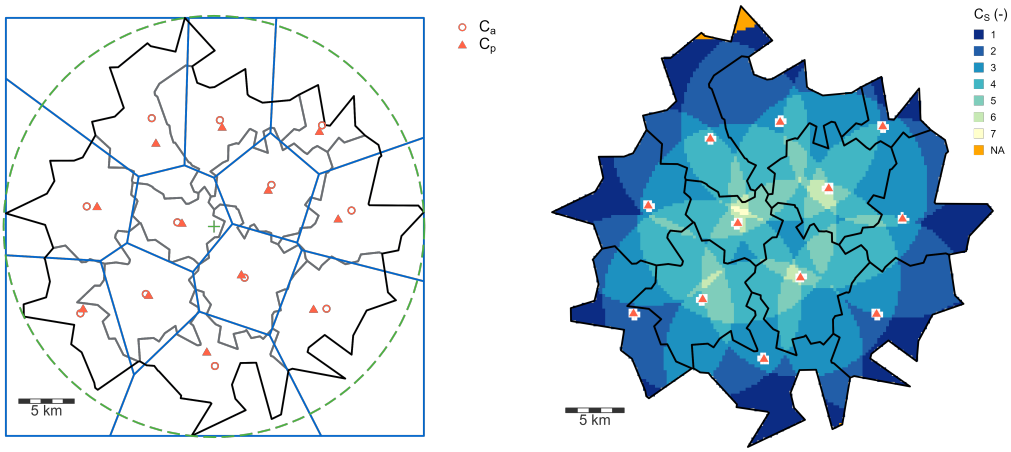


Abbildung 13 – Schematische Darstellung eines mit Hilfe der in VEREDUS entwickelten Methode erstellen Stadtmodells aus [9]. Links: Liferbezirke im Vergleich zu Voronoi-Diagramm und Lieferzentren. Rechts: Abdeckung der Stadtfläche durch Drohnenlieferungen.

Eine Variation der maximalen Bezirksgröße A^D_{max} und der Lieferreichweite der Drohnenflüge r^u_{pd} für Paketlieferungen ist in Abbildung 14 dargestellt. Hier wurde bei einer Lieferreichweite von 8.5km ein Stadtmodel mit einer maximalen Bezirksgröße von 70km^2 ausgewählt welches eine Abdeckung von über 95% aufweist.

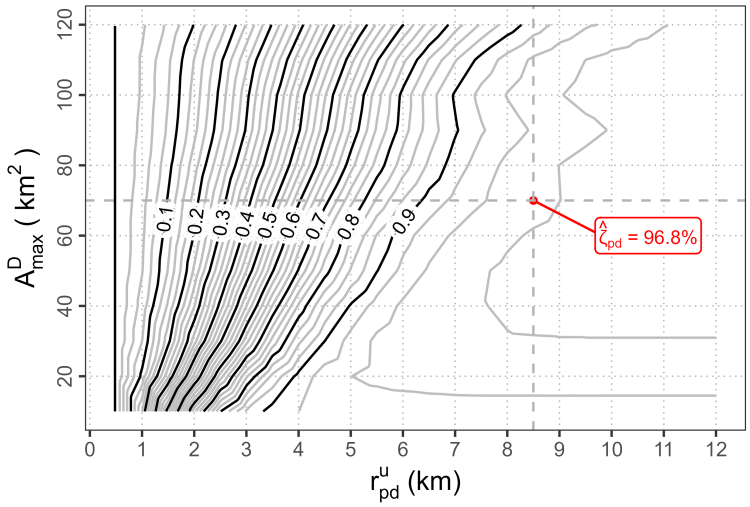


Abbildung 14 – Mittlere Abdeckung der einer beispielhaften Stadt unter Variation der maximalen Bezirksgröße A^D_{max} und der Lieferreichweite der Drohnenflüge r^u_{pd} aus [9]. Mittelwert basierend auf 10 Stichproben.

Auf Basis der so erzeugten Stadtgeometrie werden für die einzelnen Lieferbezirke Flugbewegungen generiert. Hierbei werden die in Tabelle 3 definierten Vehikel zu Grunde gelegt.
Die Flüge beginnen jeweils im Lieferzentrum eines Bezirks und enden an einem zufälligen Punkt im Lieferbezirk, wobei die Verteilung der Population der Blöcke entsprechend gewichtet wird. In einem festgelegten Radius um die Lieferstation (Laufreichweite) finden zudem keine Auslieferungen statt.
Abbildung 15 zeigt beispielhaft die erzeugten Verbindungen (links) und die räumliche Verteilung der Lieferortdichte (rechts). Es ist zu erkennen, dass sich diese gut mit der Bevölkerungsverteilung in Abbildung 13 (links) deckt.

param.vehicle	A	B
type	multicopter	hybrid
lat. speed	10 m/s	29 m/s
clb./desc. speed	3 m/s	3 m/s
max rnd. trip dist.	20 km	20 km
max del. range (r^u_{pd})	8.5 km	8.5 km

Tabelle 3 – Übersicht über die in der Simulation verwendeten Vehikel aus [9].

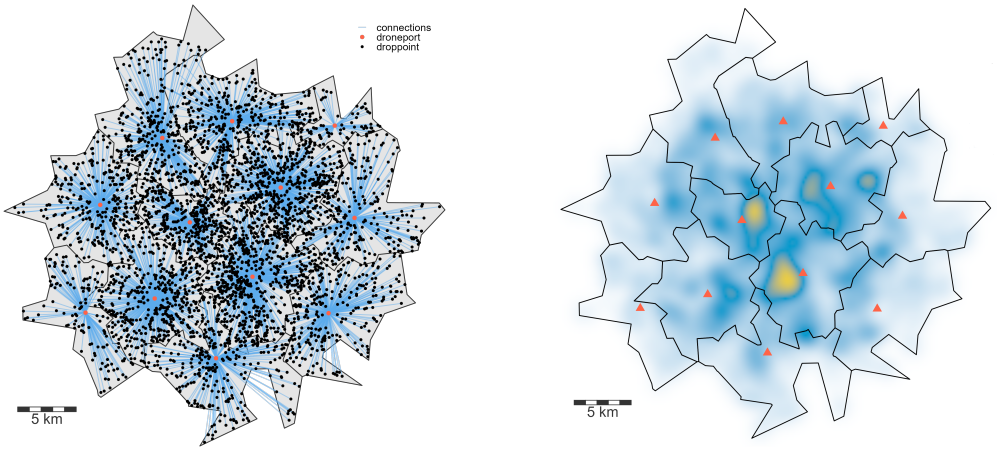


Abbildung 15 – Schematische Darstellung eines mit Hilfe der in VEREDUS entwickelten Methode erstellen Stadtmodells aus [9]. Links: Einzelne Flugverbindungen ausgehend vom jeweiligen Lieferzentrum des Bezirks. Rechts: Dichteverteilung der Lieferorte.

Die Zuordnung zu Flügen zu den Flugverbindungen erfolgt auf Basis einer zeitlichen Verteilung der Gesamtnachfrage. Diese lässt sich unter Verwendung des Demand-Faktors f_{pd} aus der Bevölkerungsanzahl des Lieferbezirks P^D bestimmen.

$$n^D_{pd} = \lceil f_{pd} \cdot P^D \rceil \tag{2}$$

Die Flüge werden dann mittels unterschiedlicher Verteilungsfunktionen wie in Abbildung 16 dargestellt zeitlich verteilt. Für jede Nachfrage wird dann eine der vorher erzeugten Verbindungen zufällig ausgewählt.
In VEREDUS wurden dazu eine Gauss-Verteilung und eine gleichförmige Verteilung der Nachfrage über der Zeit angenommen. Zudem wurden Auslieferungen auf den Zeitraum 8:00 bis 20:00 Uhr beschränkt. Um sicherzustellen, dass nach diesem Zeitraum keine Vehikel mehr in der Luft sind, wird die Nachfrage schon einige Minuten vorher reduziert (demand gap, vgl. Abbildung 16).

7.9. AP4.3: Aufbau der Simulationsumgebung

Zusammen mit der TUHH erfolgte in diesem Arbeitspaket der Aufbau der Simulationsumgebung. Abbildung 17 (links) zeigt einen Screenshot der graphischen Benutzeroberfläche des durch das DLR erstellten Softwaretools „UrbanAgent“. Dieses wurde an die Netzwerksimulation der TUHH angebunden. (siehe Abbildung 9). Die durch die Netzwerksimulation erzeugten Daten wurden wiederum in den vom DLR entwickelten Algorithmus

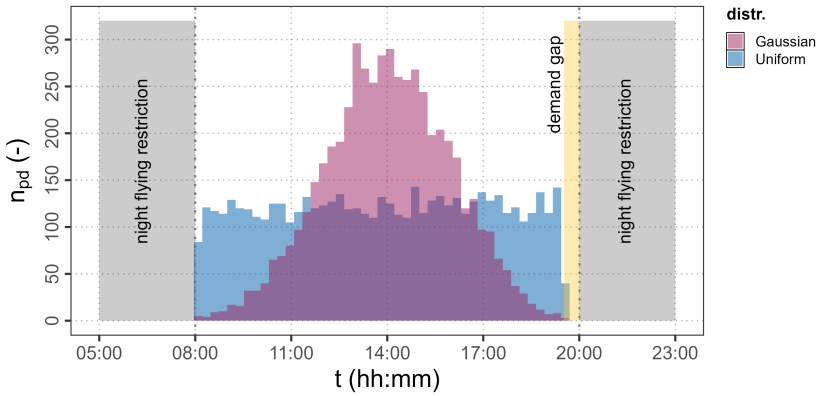


Abbildung 16 – Verteilung der Gesamtnachfrage nach Drohnenlieferungen n_{pd} über die Zeit t aus [9]. Gauss-Verteilung (lila) und gleichförmige Verteilung (blau).

zur Positionskontrolle eingespeist. Die Arbeiten erfolgten in enger Abstimmung mit den Arbeitspaketen AP4.1 und AP4.4.

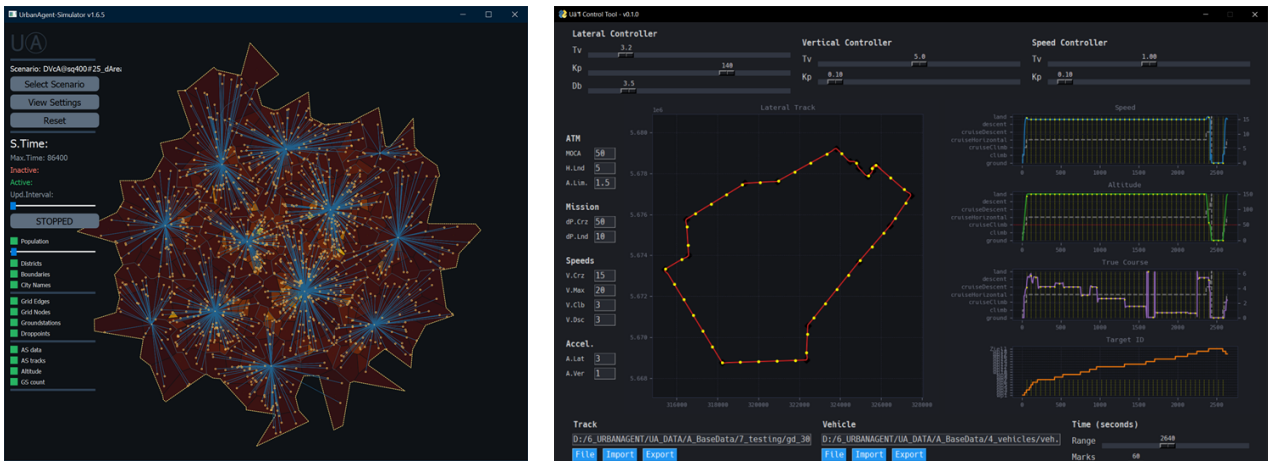


Abbildung 17 – Screenshot der im Rahmen von VEREDUS durch das DLR entwickelten Simulationssoftware „UrbanAgent“ (links) und des Simulationstools für Einzelmissionen mit dem erweiterten Flugbewegungsmodells (rechts).

7.10. AP4.4: Simulation und Leistungsbewertung

In diesem Arbeitspaket erfolgte die Anwendung der Simulation und die Durchführung von Parameterstudien. In diesem Abschnitt werden ausgewählte Ergebnisse dargestellt. Weitere Ergebnisse können [9] entnommen werden.

7.10.1. Metriken

Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Funknetzes wurden unterschiedliche Metriken zum einen für das Szenario, zum anderen für das Funknetz entwickelt.

Anzahl aktiver UAS
Die Anzahl aktiver UAS zu einem spezifischen Zeitpunkt $\varphi(t)$ ist gegeben durch die Kardinalität der Menge aktiver UAS $S(t)$. Die Anzahl in der Luft befindlicher UAS wird mit $\varphi(t)'$ bezeichnet.

$$\varphi(t) = |S(t)| \tag{3}$$

Aggregierte Anzahl aktiver UAS
Die aggregierte Anzahl aktiver UAS $\bar{\Phi}$ für ein ganzes Szenario kann durch Aufsummieren von $\varphi(t)$ über alle Zeitschritte n_{ts} des jeweiligen Szenarios und anschließender Division durch die Anzahl der Zeitschritte gebildet werden. Die aggregierte Anzahl in der Luft befindlicher UAS wird mit $\bar{\Phi}'$ bezeichnet.

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{n_{ts}} \sum_{n_{ts}} \varphi(t) \tag{4}$$

Maximale Anzahl aktiver UAS
Die maximale Anzahl aktiver UAS die innerhalb eines Szenarios auftritt wird mit Φ_{max} bezeichnet. Die maximale Anzahl in der Luft befindlicher UAS wird entsprechend durch Φ'_{max} dargestellt.

$$\Phi_{max} = max(\varphi(t)) \tag{5}$$

UAS Dichte
Es gibt verschiedene Möglichkeiten die UAS Dichte zu definieren. Dahle et al. [10] schlagen vor, die simultanen Flüge pro km^2 als Dichtemetrik zu verwenden. Da die Anzahl der UAS jedoch stark über den Tagesverlauf variiert, wurde in VEREDUS zusätzlich zwischen der lokalen geographischen Dichte $\delta(x, y, t)$, der durchschnittlichen Dichte $\bar{\delta}(t)$ und der aggregierten Dichte $\bar{\Delta}$ unterschieden. Dichten für das ganze Szenario, Bezirke oder Blöcke können entsprechend abgeleitet werden.

Lokale geographische UAS Dichte
Eine Möglichkeit die lokale geographische UAS Dichte $\delta_g(x, y, t)$ zu ermitteln, besteht darin, eine Kernfunkton am geographischen Ort (x, y) jedes UAS zum Zeitpunkt t aufzubringen und diese über das Simulationsgebiet zu integrieren. Die lokale geographische UAS Dichte kann nur korrekt abgeschätzt werden wenn die zugrundeliegenden 4D-Trajektorien der einzelnen Flüge vorliegen.

Durchschnittliche UAS Dichte
Durchschnittliche UAS Dichte $\bar{\delta}(t)$ ist die Anzahl der aktiven UAS $\varphi(t)$ an einem spezifischen Zeitpunkt t bezogen auf die Fläche A^S woraus sich die geographische durchschnittliche UAS Dichte $\bar{\delta}(t)_g$ ergibt. Eine Division durch die Bevölkerungszahl P^S ergibt entsprechend die populationsbezogene durchschnittliche UAS Dichte $\bar{\delta}(t)_p$.

$$\bar{\delta}(t)^S_g = \frac{\varphi(t)}{A^S} \qquad \bar{\delta}(t)^S_p = \frac{\varphi(t)}{P^S} \tag{6}$$

Aggregierte UAS Dichte
Die aggregierte UAS Dichte $\bar{\Delta}$ erhält man, wenn man die aggregierte Anzahl aktiver UAS $\bar{\Phi}$ durch einen Referenzwert teilt. Wie schon bei der durchschnittlichen UAS Dichte kann dieser Referenzwert die Fläche A^s sein

wodurch man die geographische aggregierte UAS Dichte $\bar{\Delta}_g$ erhält oder die Population P^s welche die populationsbezogene aggregierte UAS Dichte $\bar{\Delta}_p$ ergibt. $\bar{\Delta}_g$ beschreibt somit die Metrik, welche in [10] vorgeschlagen wird.

$$\bar{\Delta}_g^S = \frac{\bar{\Phi}}{A^S} \qquad \bar{\Delta}_p^S = \frac{\bar{\Phi}}{P^S} \tag{7}$$

7.10.2. FANET Metriken

Um ein FANET aufzubauen, müsse Kommunikationshardware und -protokolle benutzt werden, welche den Anforderungen des Netzwerkes entsprechen. In diesem Abschnitt werden Metriken definiert, die Leistungsfähigkeit eines FANET zu bewerten.

Kommunikationsreichweite / Anzahl Hops
Einer der kritischen Parameter eines FANET ist die Kommunikationsreichweite r_c des drahtlosen Datenlinks. In Abhängigkeit der räumlichen Verteilung der Knoten ist eine Mindestreichweite erforderlich, um ein verbundenes Netzwerk zu bilden. Für die Kommunikation über mehrere Zwischenschritte (hops), definiert die Kommunikationsreichweite auch wie oft, die Daten zwischen Start und Ziel weitergegeben werden müssen. Die maximale Anzahl an Hops, die benötigt wird, um eine Nachricht von AS i zum Zeitpunkt t durch das ganze Netzwerk zu schicken wird mit $h^i_{max}(t)$ bezeichnet.

$$\hat{h}_{max}(t) = max(h^i_{max})(t) \tag{8}$$

Die maximale Anzahl an Hops, die im ganzen Szenario auftritt H_{max} ist entsprechend gegeben durch:

$$H_{max} = max(\hat{h}_{max}(t)) \tag{9}$$

Erreichbarkeit
Die Erreichbarkeit E ist eine Metrik, die beschreibt, wie gut auf Basis der vorliegenden Topologie netzwerkweiter Datenaustausch durchgeführt werden kann. Die Erreichbarkeit $e^i(t)$ der airborne station (AS) i zum Zeitpunkt t ist definiert als die Anzahl Datenpakete, die die AS tatsächlich erreichen $n_{rec}(t)$ geteilt durch die Anzahl Datenpakete, die sie erreichen könnten $\phi(t) - 1$.

$$e^i(t) = \frac{n^i_{rec}(t)}{\varphi(t) - 1} \tag{10}$$

Die durchschnittliche Erreichbarkeit zum Zeitpunkt t wird mit $e(t)$ bezeichnet und ist gegeben durch:

$$e(t) = \frac{1}{\varphi(t)} \sum_i e^i(t) \tag{11}$$

Die aggregierte Erreichbarkeit eines ganzen Szenarios ist entsprechend gegeben durch:

$$E = \frac{1}{n_{ts}} \sum_t e(t) \tag{12}$$

Datenrate
Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Datenrate. Für jeden Knoten ist dies die Summe der Datenrate für die eigenen ausgehenden Pakete und der Datenrate für das Empfangen und Weiterleiten anderer Pakete durch das Netzwerk. Die Datenrate für AS i zum Zeitpunkt t wird mit $\tau^i(t)$ bezeichnet. Die maximale Datenrate zum Zeitpunkt t wird mit $\tau_{max}(t)$ bezeichnet und ist gegeben durch

$$\tau_{max}(t) = max(\tau^i)(t) \tag{13}$$

T_{max} ist die höchste Datenrate, die von einem Knoten während der gesamten Simulation benötigt wird gemäß

$$T_{max} = max(T_{max}(t)) \tag{14}$$

berechnet. Um die mittlere Datenrate $\bar{T}$ zu berechnen, wird angenommen, dass der Datenverkehr gleichmäßig über alle Knoten verteilt ist. Die mittlere Datenrate zum Zeitpunkt t ist gegeben durch:

$$\bar{\tau}(t) = \frac{1}{\varphi(t)} \sum_i \tau^i(t) \tag{15}$$

Die aggregierte Datenrate für das Gesamtszenario ist dann gegeben durch:

$$\bar{T} = \frac{1}{n_{ts}} \sum_t \bar{\tau}(t) \tag{16}$$

Delay Budget

Das Delay Budget L^H_{max} ist der maximale Delay den ein Datenpaket bei einer Weiterleitung haben kann, so dass die Daten immer noch rechtzeitig das Ziel erreichen. Dazu wird die für die jeweilige Anwendung maximal zulässige Zeit L_{E2E} durch H_{max} geteilt.

$$l_{max}(t) = \frac{L_{E2E}}{\hat{h}_{max}(t)} \tag{17}$$

$$L_{max} = \frac{L_{E2E}}{H_{max}} \tag{18}$$

7.10.3. Variationsstudien

Da die Leistungsfähigkeit des Funknetzes maßgeblich von der geographischen Vehikeldichte $\bar{\Delta}_g$ und der Reichweite r_c des Datenlinks abhängt, wurden eine Variationsstudie über diese beiden Parameter durchgeführt. Hierbei wurden die unterschiedlichen Vehikeldichten durch eine Variation des Demandfaktors f_{pd} realisiert. An dieser Stelle werden ausgewählte Ergebnisse dieser Studien dargestellt. Weitere Ergebnisse können [9] entnommen werden.

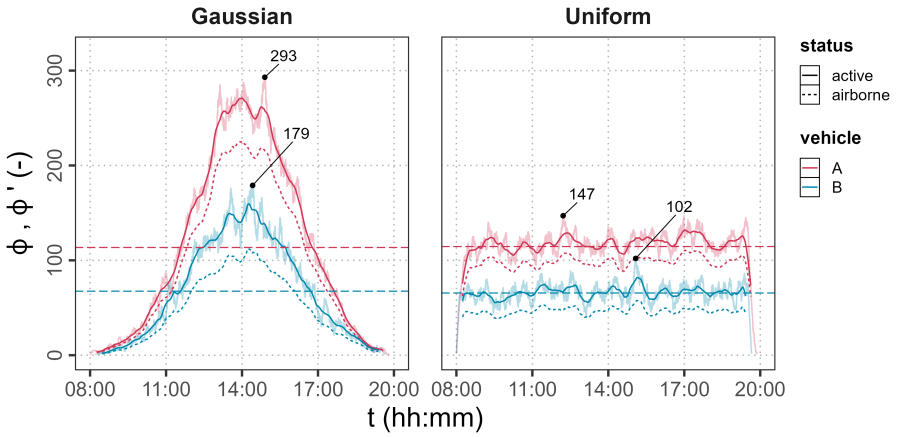


Abbildung 18 – Zeitlicher Verlauf der aktiven UAVs aus [9].

Vehikeldichte

Abbildung 18 zeigt exemplarisch die Anzahl der aktiven und in der Luft befindlichen Vehikel über den Zeitverlauf für Szenarien mit beiden in Tabelle 3 definierten Vehikeln und für die Gauss- und gleichfömige Nachfrageverteilung (vgl. Abbildung 16). Während die Nachfrageverteilung sich entsprechend auf die Vehikeldichte auswirkt, führt der Einsatz eines schnelleren Vehikelt erwartungsgemäß zu einer niedrigeren Vehikeldichte, da die Liefermissionen schneller abgeschlossen werden. Die Anzahl der in der Luft befindlichen UAS liegt erwartungsgemäß unter der Anzahl aktiver UAS.

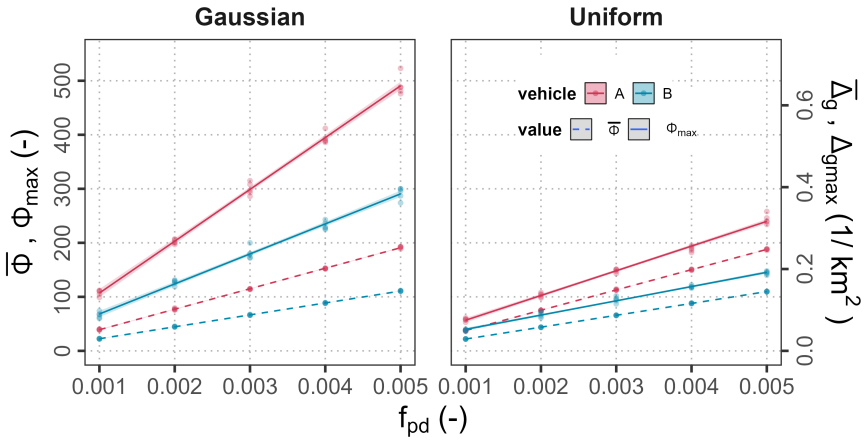


Abbildung 19 – Aggregierte Anzahl an UAS $\bar{\Phi}$ und aggregierte Vehikeldichten $\bar{\Delta}_g$ über Variation des Nachfrageparameter f_{pd} aus [9].

Aggregierte Vehikeldichte

Abbildung 19 zeigt exemplarisch die aggregierte Anzahl $\bar{\Phi}$ und Dichte $\bar{\Delta}_g$ der aktiven Vehikel über einer veränderten Nachfrage f_{pd} mit beiden in Tabelle 3 definierten Vehikeln und für die Gauss- und gleichfömige Nachfrageverteilung (vgl. Abbildung 16). Man erkennt, dass mit steigender Nachfrage die aggregierten Werte linear zunehmen. Das Maß dieser Zunahme ist abhängig von dem gewählten Vehikel. Weitere Ergebnisse können [9] entnommen werden.

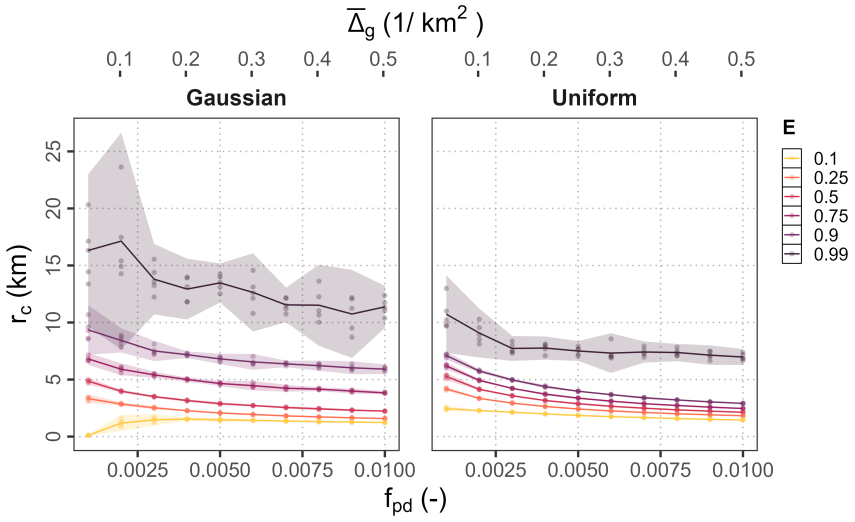


Abbildung 20 – Reichweite des Datenlinks r_c über Variation des Nachfrageparameter f_{pd} und Vehikeldichten $\bar{\Delta}_g$ für verschiedene geforderte Erreichbarkeiten E aus [9]. Mittelwert über 10 Stichproben.

FANET Metriken

An dieser Stelle werden ausgewählte Ergebnisse der Arbeiten dargestellt. Abbildung 20 zeigt die notwendige Reichweite zum Erreichen einer geforderten Erreichbarkeit E (basierend auf 10 Stichproben). Man erkennt, dass zum Realisieren einer Erreichbarkeit von 90% und bei einer Gaussverteilung der Nachfrage abhängig von der Vehikeldichte eine Reichweite von mehr als $5km$ notwendig ist. Gleichförmige Verteilungen der Nachfrage führen zu geringeren geforderten Reichweiten. Weitere Ergebnisse können [9] entnommen werden.



Abbildung 21 – Screenshot der Bodenstationssoftware von Germandrones während eines Testfluges.

7.11. AP5.1: Integration Bodenstation (Software)

In diesem Arbeitspaket erfolgte die Integration des VEREDUS Funkgeräts in die Bodenstationssoftware von Germandrones. Abbildung 21 zeigt einen Screenshot der Bodenstationssoftware während eines Testfluges. Die Positionsdaten, die während des Fluges durch das VEREDUS-Netz übermittelt werden, sind in der Übersichtskarte dargestellt.

7.12. AP5.3: Testfälle und Szenarien

In AP5.3 „Testfälle und Szenarien“ wurde durch das DLR zusammen mit den Projektpartnern auf Basis der Gegebenheiten vor Ort und den verfügbaren Vehikeln ein Prüfplan erstellt. Hierbei wurden neben der grundlegenden Funktionalität folgende Leistungsparameter als prüfrelevant erachtet:

- Reichweite der Luft-Luft Verbindung
- Reichweite der Luft-Boden Verbindung
- Richtungsabhängigkeit der Luft-Luft Verbindung
- Richtungsabhängigkeit der Luft-Boden Verbindung
- Kanalumschaltung
- Multihop-Verbindung

Zur experimentellen Erfassung der Leistungsparameter wurden verschiedene Flugmanöver (z.B. Fliegen von Achten oder Kreisen in verschiedenen Abständen) definiert, welche ja nach Prüfung durch eine oder mehrere Songbirds in Kombination mit den von GUAV bereitgestellten CEPTOR UAVs durchgeführt wurden. Als Kenngrößen dienten die Packet Delivery Ratio (PDR), Received Signal Strength (RSSI), Delay und erzielte Datenrate. Die zeitliche Abfolge der Testflüge inklusive Aufbau- und Abbauzeiten wurde abgeschätzt, entsprechende zeitliche Puffer wurden vorgesehen. Die Testfälle wurden im Liefergegenstand „E5.3-DLR-1 Testfälle und Szenarien“ dokumentiert.



Abbildung 22 – Integration des Funkmodems in die Nutzlastbox des Songbird 150 von Germandrones.

7.13. AP5.4: Aufbau der Demonstratoren

Der Aufbau der Demonstratoren erfolgte in Vorbereitung der Demonstrationsflüge bei den Drohnenherstellern GD und GUAV vor Ort. Abbildung 22 zeigt eine prototypenhafte Ausführung des Funkmodems in die Nutzlastbox eines Songbird 150. Insgesamt wurden von Germandrones 2 Songbirds mit Funkmodems ausgestattet. An den Tagen der Demonstrationsflüge wurden mit Hilfe der beiden Vehikel Testflüge durchgeführt, wobei zeitweise ein Songbird am Boden als Bodenstation fungierte.

7.14. AP5.5: Demonstration

Die Demonstrationsflüge fanden an zwei Terminen statt, an denen Hard- und Software vorbereitet und im Anschluss daran die im Prüfplan aus AP5.3 definierten Testflüge durchgeführt wurden. Alle geplanten Testflüge konnten im Rahmen der vorgesehenen Zeitplanung erfolgreich durchgeführt werden. Sowohl die Vermessung der Reichweite, Richtungsabhängigkeit und Multihop-Verbindungen lieferten gute Ergebnisse.

7.15. AP5.6: Analyse / Auswertung

Ziel des Arbeitspakets war die Analyse und Auswertung der Ergebnisse, welche in den einzelnen Arbeitspaketen erzeugt wurden. Zusammen mit den Projektpartnern wurden begleitend zu den Arbeitspaketen erzeugte Ergebnisse ausgewertet dokumentiert und veröffentlicht.

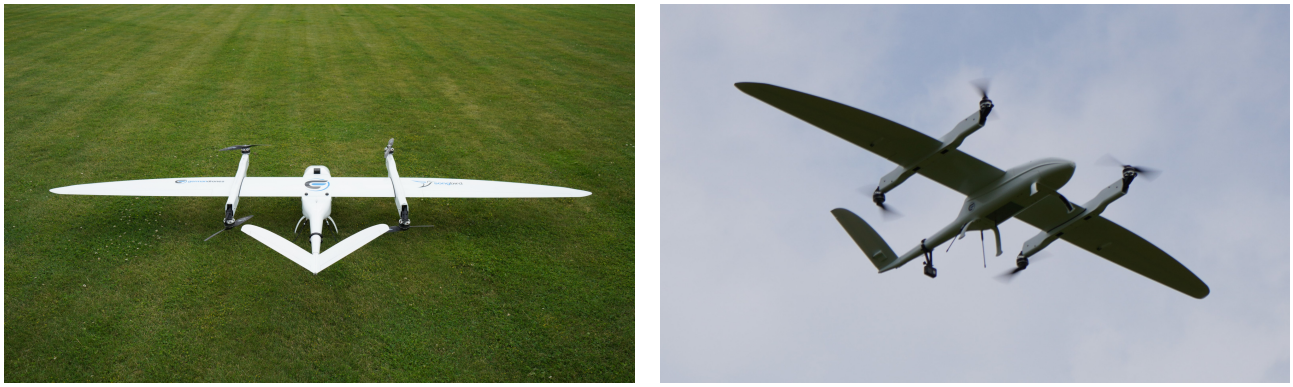


Abbildung 23 – Songbird 150 auf dem Testgelände (links) und während eines der Testflüge (rechts).

8. Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Alle im Rahmen des Teilvorhabens „Anwendung und Simulation“ im Verbundprojekt VEREDUS entstandene Kosten sind in den Zwischennachweisen detailliert nach Personal-, Sach- und Reisekosten aufgeschlüsselt.

9. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Teilvorhaben „Anwendung und Simulation“ des DLR im Verbundprojekt VEREDUS angestrebten Ziele (vgl. Kapitel 1.1) wurden erfüllt. Im Verlaufe des Projektes wurden alle Arbeitspakete vollständig bearbeitet. Dabei erfolgte die Nutzung der Ressourcen gemäß dem Projektplan.

10. Verwertbarkeit der Ergebnisse

Im Rahmen des Projektes VEREDUS sind zahlreiche Veröffentlichungen unter Leitung oder unter Beteiligung des DLR entstanden. Diese werden im Folgenden aufgelistet:

- *Analysis of Communication Requirements for Distributed UTM* / Netsys 2023
- *Using Generic Cities to assess Flying Ad-hoc Networks (FANETs) in Urban Environments* / DLRK 2023 + Council of European Aerospace Societies (CEAS) Journal [9]
- *Mutual position plausibility checking in flying ad-hoc networks using distance measurements* / International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS) 2024 [8]
- *Modeling of Communication Requirements for Distributed UTM using Stochastic Geometry* / 2024 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops and other Affiliated Events [11]
- *Simulating Situational Overview in Large-Scale UAS Networks Using Demand Driven Mobility* / PerVehicle 2025 [12]
- *Design and Implementation of a Multi-Link Modem for Future UAS Networks* / PerVehicle 2025 [13]
- *Distributed Position Control in UAS Networks: Challenges and Requirements* / DLRK 2025 (In Vorbereitung)

Für den in AP4.1 entwickelten Algorithmus zur Verifikation der GNSS-Daten wurde zudem zusammen mit der TUHH ein Patent angemeldet.

- *Verfahren zur Bestätigung von Positionsdaten einer Anzahl Fahrzeuge, Fahrzeug sowie Ensemble von Fahrzeugen* (Deutsche Patentanmeldung Nr. 102024125481.5)

Zudem findet die im Projekt entwickelte Simulationsumgebung in internen Projekten des Instituts weitere Verwendung. Die Ergebnisse des Teilvorhabens dienen zudem als Grundlage für die zukünftige Akquise von nationalen und internationalen Drittmitteln.

Literatur

[1] SESAR Joint Undertaking, “European Drones Outlook Study Unlocking the value for Europe,” Tech. rep., 09 2016. 10.2829/085259.

[2] European Commission, “COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) 2019/945 of 12 March 2019 on unmanned aircraft systems and on third-country operators of unmanned aircraft systems,” Tech. rep., 03 2019a.

[3] European Commission, “COMMISSION IMPLEMENTING REGULATION (EU) 2019/947 of 24 May 2019 on the rules and procedures for the operation of unmanned aircraft,” Tech. rep., 05 2019b.

[4] European Commission, “COMMISSION IMPLEMENTING REGULATION (EU) 2021/664 of 22 April 2021 on a regulatory framework for the U-space,” Tech. rep., 45 2021.

[5] Christen, Markus, Guillaume, Michel, Jablonowski, Maximilian, Lenhart, Peter, and Moll, Kurt, Zivile Drohnen - Herausforderungen und Perspektiven, ETH Zurich, 10.3929/ETHZ-B-000253169.

[6] Doole, M., Ellerbroek, J., and Hoekstra, J., “Drone Delivery: Urban airspace traffic density estimation,” In Proceedings of Eight SESAR Innovation Days Conference, 2018.

[7] Doole, M., Ellerbroek, J., and Hoekstra, J., “Estimation of traffic density from drone-based delivery in very low level urban airspace,” Journal of Air Transport Management, Vol. 88, 2020, p. 101862.

[8] Marks, T., and Fuger, K., “Mutual Position Plausibility Checking in Flying Ad-hoc Networks using Distance Measurements,” ICAS Proceedings 2024, The International Council of the Aeronautical Sciences, 2024.

[9] Marks, T., and Fuger, K., “Using Generic Cities to assess Flying Ad-hoc Networks (FANETs) in Urban Environments,” CEAS Aeronautical Journal, 2025.

[10] Dahle, O. H., Rydberg, J., Dullweber, M., Peinecke, N., and Bechina, A. A. A., “A proposal for a common metric for drone traffic density,” 2022 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2022, pp. 64–72. 10.1109/ICUAS54217.2022.9836143.

[11] Fuger, K., Marks, T., Kuladinithi, K., and Timm-Giel, A., “Modeling of Communication Requirements for Distributed UTM using Stochastic Geometry,” 2024 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops and other Affiliated Events (PerCom Workshops), IEEE, 2024

[12] Fuger, K., Marks, T., Kuladinithi, K., Huang, Y., and Timm-Giel, A., “Simulating Situational Overview in LargeScale UAS Networks Using Demand Driven Mobility,” 2025 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops and other Affiliated Events (PerCom Workshops), IEEE, 2025

[13] Fuger, K., Melzer, B., Hesse, F., Rossbach, A., Fuchs, M., Kuladinithi, K., Marks, T., Oikonomopoulos-Zachos, C., Stavrou, E., Nil, A., Laiacker, M., Brinkmeyer, J., and Timm-Giel, A., “Design and Implementation of a Multi-Link Modem for Future UAS Networks,” 2025 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops and other Affiliated Events (PerCom Workshops), IEEE, 2025

[14] DLR Institute of Communications and Navigation, “LDACS-NAV”, URL: https://www.dlr.de/kn/en/desktopdefault.aspx/tabid-4309/3222_read-35386/ [Aufruf: 20.09.2019]

[15] Rohde & Schwarz, “R&S®ARDRONIS Countering RC drones – every second counts”, Product Brochure / Version 05.00

[16] Fraunhofer-Verbund Verteidigungs- und Sicherheitsforschung, „Drohnenabwehr”, https://www.fraunhofer.de/de/forschung/aktuelles-aus-der-forschung/drohnenabwehrtechnologien.html [Aufruf: 23.09.2019]