



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Schlussbericht LuFo VI Vorhaben

VEREDUS - Verteilte Positionskontrolle in redundanten UAV-Funknetzen zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit, Effizienz sowie der Flugsicherheit

Teilvorhaben

Redundante UAV Kommunikationsnetze

FKZ 20Q1939E

Laufzeit des Vorhabens 01.06.2021 – 31.12.2024

MediaMobil Communication GmbH

Haferwende 14

28357 Bremen

Germany

08.09.2025

Inhalt


| | |
|--|----|
| 1. Übersicht..... | 3 |
| 1.1. Projektbeschreibung | 3 |
| 1.2. Aufgabenstellung | 3 |
| 1.3. Voraussetzungen..... | 5 |
| 1.4. Planung und Ablauf..... | 5 |
| 1.5. Vorheriger Stand..... | 8 |
| 1.5.1. Kommunikationssysteme für Drohnen..... | 9 |
| 1.5.2. Routingprotokolle für Flying Ad-Hoc Networks | 12 |
| 1.6. Zusammenarbeit mit anderen Stellen..... | 12 |
| 2. Verwendung der Zuwendung | 13 |
| 2.1. Arbeitspaket 1.3: Anforderungen an Kommunikationssysteme..... | 13 |
| 2.2. Arbeitspaket 1.4: Systemanforderungen / Schnittstellen | 15 |
| 2.3. Arbeitspaket 2.1: Netzwerkstrukturen..... | 16 |
| 2.4. Arbeitspaket 2.2: Protokollspezifikation und –entwicklung..... | 19 |
| 2.5. Arbeitspaket 2.3: Zuverlässigkeitsbewertung, analytische Modellierung | 20 |
| 2.6. Arbeitspaket 4.1: Gerätesoftware..... | 21 |
| 2.7. Arbeitspaket 4.3: Aufbau der Simulationsumgebung..... | 23 |
| 2.8. Arbeitspaket 5.1: Integration Bodenstation (Software) | 24 |
| 2.9. Arbeitspaket 5.2: Integration / Bereitstellung Modem | 24 |
| 2.10. Arbeitspaket 5.4: Aufbau Demonstratoren..... | 25 |
| 2.11. Arbeitspaket 5.5: Demonstration | 25 |
| 2.12. Arbeitspaket 5.6: Auswertung / Analyse..... | 26 |
| 3. Positionen des zahlenmäßigen Nachweises..... | 27 |
| 4. Verwertungsplan | 29 |
| 4.1. Externe Fortschritte während der Durchführung des Vorhabens | 30 |
| 5. Veröffentlichungen | 31 |
| 6. Literaturverzeichnis | 31 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Arbeitspakete VEREDUS. MediaMobil Beiträge rot umrandet..... | 4 |
| Abbildung 2: Balkendiagramm Projektablauf aus Sicht MediaMobil..... | 8 |
| Abbildung 3: Finale High-Level Softwarearchitektur der VEREDUS Kernsoftware..... | 17 |
| Abbildung 4: Beispiel eines Untermoduls (Receiver) der VEREDUS Softwarearchitektur..... | 18 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Gewichtung der Kriterien für die Auswahl der Netztechnologien | 14 |
|--|----|

| | | |
|---|---|------------------------------|
|  | VEREDUS Teilvorhaben Redundante UAV Kommunikationsnetze Abschlussbericht | 08.09.2025 Seite 3 von 31 |
|---|---|------------------------------|

1. Übersicht

1.1. Projektbeschreibung

Der gleichzeitige Einsatz von einem oder mehreren unbemannten Luftfahrzeugen (Unmanned Aerial Vehicle, UAV), auch in Gebieten mit erhöhter Verkehrsdichte, ist eine wichtige Voraussetzung für einen wirtschaftlichen und planbaren Betrieb von UAVs.

Im Verbundprojekt VEREDUS wurden Funknetze zur Vernetzung von UAVs und Bodenstationen untersucht und entwickelt. Das primäre VEREDUS Funknetz wird durch die Direktverbindungen zwischen den einzelnen Knoten (UAVs und Bodenstationen) erstellt. Einzelne Knoten können bei Bedarf auf weitere Kommunikationswege, wie unter anderem Satellitenkommunikation, zurückgreifen. Dieser Ansatz hat mehrere Vorteile. Ein solches redundantes Netz kann weitgehend unabhängig von der Bodeninfrastruktur betrieben und zur Verteilung von Daten zwischen den Netzteilnehmern verwendet werden. Im Netz verteilte Positions- und Laufzeitdaten können zur Erzeugung eines Gesamtlagebildes verwendet werden. Durch die Integration von Satellitenkommunikation ist zudem eine durchgängige Kommunikation des UAVs, auch bei Systemausfällen und in Randgebieten, gewährleistet.

Das VEREDUS Verbundprojekt hat zwei Hauptziele verfolgt.

Das erste Hauptziel war die Entwicklung von Soft- und Hardwarekomponenten, mit denen das beschriebene Funknetz realisiert wird. Zur Erfüllung dieses Hauptzieles wurden unter anderem geeignete Netzwerkarchitekturen und Funkstandards untersucht, Softwaremodule entworfen und Hardwarekomponenten entwickelt.

Das zweite Hauptziel war die Entwicklung einer realistischen Simulationsumgebung zur Verifizierung der Leistungsfähigkeit der projektierten funktechnischen Vernetzung. Zur Erfüllung dieses Hauptzieles wurden unter anderem Simulationen realistischer Verkehrsszenarien durchgeführt und Übertragungsprotokolle entwickelt.

1.2. Aufgabenstellung

MediaMobil ist in diesem Projekt für verschiedene Arbeiten, von der Auswahl möglicher Netztechnologien, bis hin zur Konzipierung und Implementierung großer Teile der Software, zuständig. Abbildung 1 zeigt alle Arbeitspakete im Verbundprojekt VEREDUS. Arbeitspakete, an denen MediaMobil beteiligt war, sind rot umrandet. Dick umrandete Arbeitspakete (2.1, 4.1 und 5.1) wurden von MediaMobil geleitet. MediaMobil hat auch die Leitung für das Hauptarbeitspaket 2 (Protokolle / Netzwerk) übernommen.

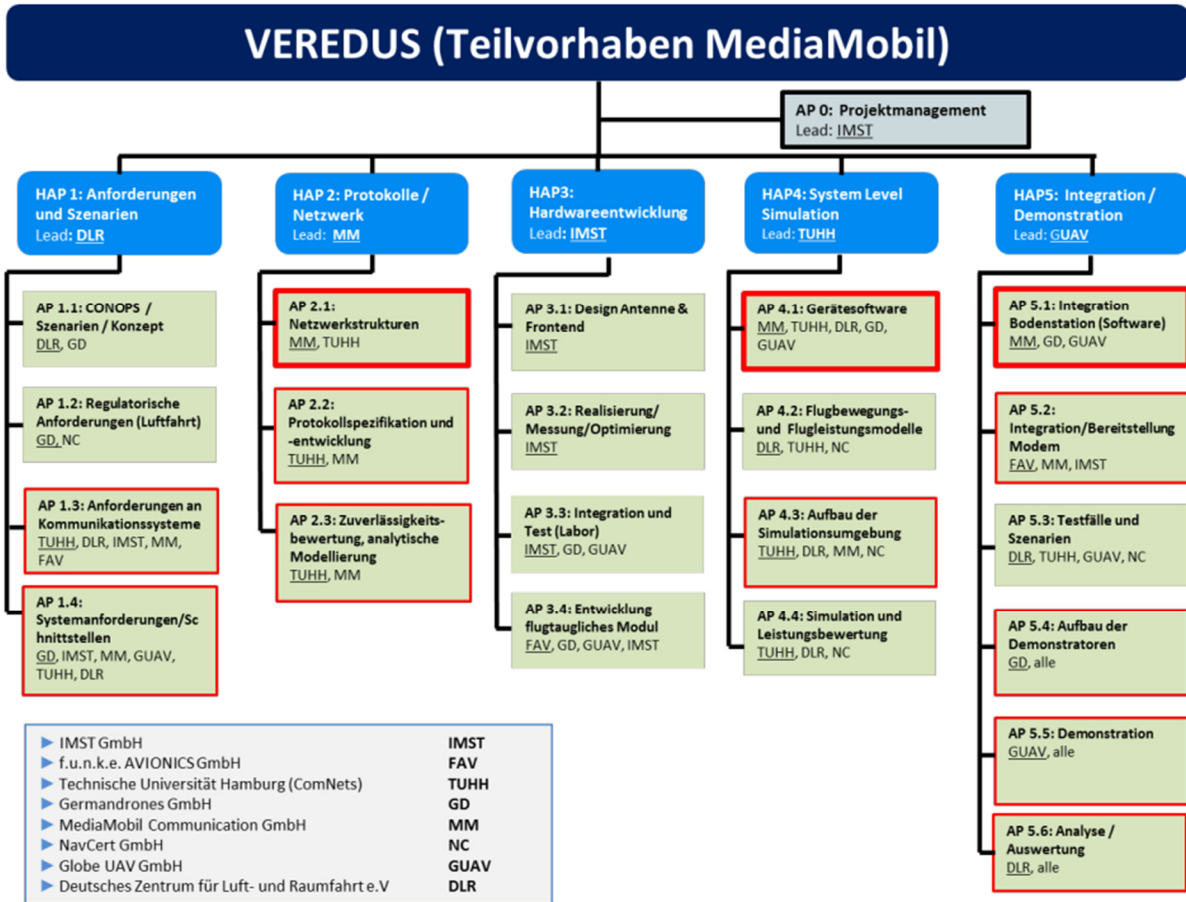



Abbildung 1: Arbeitspakete VEREDUS. MediaMobil Beiträge rot umrandet.

Im Hauptarbeitspaket 1 analysiert MediaMobil die Anforderungen an die Kommunikationssysteme, um eine Auswahl an möglichen Kommunikationstechnologien zu treffen, welche im Rahmen des Projektes verwendet werden können. Weiterhin werden Schnittstellen zu und zwischen den verwendeten Technologien festgehalten.

In Hauptarbeitspaket 2 spezifiziert MediaMobil eine sinnvolle Softwarearchitektur, welche den Projektanforderungen gerecht wird. Dabei gilt es insbesondere die zuvor ausgewählten Kommunikationstechnologien logisch so zu verbinden, dass alle Anwendungsfälle abgedeckt werden können. Weiterhin hilft MediaMobil bei der Auswahl und Entwicklung von Protokollen für Kommunikation, Routing und Sicherheit.

Im Hauptarbeitspaket 4 werden die zuvor spezifizierte Software und die zugehörigen Protokolle aus Hauptarbeitspaket 2 von MediaMobil implementiert. Es werden Zuarbeiten für den Aufbau der Simulationsumgebung geliefert, um sicherzustellen, dass die Implementation der Software und die Simulationsumgebung sich nicht auseinanderentwickeln.

| | | |
|---|---|------------------------------|
|  | VEREDUS Teilvorhaben Redundante UAV Kommunikationsnetze Abschlussbericht | 08.09.2025 Seite 5 von 31 |
|---|---|------------------------------|

In Hauptarbeitspaket 5 wird die Integration zwischen der entwickelten VEREDUS-Software und der Bodenstationssoftware der Projektpartner von MediaMobil geleitet und überwacht. Weiterhin hilft MediaMobil bei der Integration des Modems und dem Aufbau der Demonstratorumgebung sowie der Demonstration und Auswertung der Ergebnisse.

1.3. Voraussetzungen

Voraussetzung für die erfolgreiche Durchführung des Projektes waren Fähigkeiten und praktische Erfahrungen bei der Entwicklung und Umsetzung von Konzepten für die Übertragung von Daten über Satellitensysteme sowie terrestrische Funknetze. Weiterhin wurden Kompetenzen in Konzipierung und Implementierung von Softwarelösungen benötigt.

MediaMobil arbeitet sowohl mit terrestrischen Funknetzen als auch Satellitenkommunikationssystemen. Erfahrungen und Fähigkeiten im Satellitenbereich hat MediaMobil mit der Konzeptionierung und Umsetzung von Satellitenkommunikationssystemen für den maritimen Bereich und landgeschützten Systemen erlangt. Kompetenzen im Bereich der Softwareentwicklung hat MediaMobil durch Arbeiten am hauseigenen Multi-Link-Gateway (MLG) sowie durch vorherige Forschungs- und Entwicklungsprojekte, wie RekoTrans, erlangt. Bei dem MLG handelt es sich um eine Routinglösung, welche derzeit um SD-WAN-Funktionen erweitert wird. Bei RekoTrans handelt es sich um ein Forschungs- und Entwicklungsprojekt, in dem eine Lösung entwickelt wurde, um im Vorfeld eines sich abzeichnenden Absturzes eines Flugzeugs für die Unfallauswertung notwendige Flugschreiberdaten über Satellitenverbindungen zuverlässig und schnell zu übertragen.


Die gesammelten Erfahrungen wurden für das VEREDUS Vorhaben erfolgreich eingesetzt.

1.4. Planung und Ablauf

Initial angedacht wurde der Projektstart für den 01.01.2020, mit einer geplanten Laufzeit von 39 Monaten, bis zum 31.03.23. Durch projektexterne Verzögerungen bei der Genehmigung der Projektfinanzierung verschob sich der Projektstart auf den 01.06.2021, weiterhin mit einer geplanten Laufzeit von 39 Monaten, bis zum 31.08.2024.

Um die auf den Flugversuchen aufbauenden Arbeiten, wie Analyse und Auswertung der Flug- und Messergebnisse, vollumfänglich durchführen zu können, wurde zum Projektende hin eine kostenneutrale Projektverlängerung bis zum 31.12.2024 beantragt und genehmigt.

Die Planung der einzelnen Arbeitspakete deckt sich weitestgehend mit dem tatsächlichen Zeitaufwand. Im Folgenden wird die Planung der Arbeitspakete kurz detailliert. Der Inhalt der Arbeitspakete wird in Kapitel 2 (Verwendung der Zuwendung) näher beschrieben.


| | | |
|---|---|---|
|  | <p style="text-align: center;">VEREDUS Teilvorhaben Redundante UAV Kommunikationsnetze Abschlussbericht</p> | <p style="text-align: right;">08.09.2025 Seite 6 von 31</p> |
|---|---|---|

Im Hauptarbeitspaket 1 war MediaMobil an den Arbeitspaketen 1.3 (Anforderungen an Kommunikationssysteme) und 1.4 (Systemanforderungen / Schnittstellen) beteiligt. Beide Arbeitspakete sollten im Zeitraum von Monat 01 – 09 bearbeitet werden. Die Arbeiten an den Arbeitspaketen wurden innerhalb des geplanten Zeitrahmens abgeschlossen.

Im Hauptarbeitspaket 2 hat MediaMobil die Leitung für das Hauptarbeitspaket übernommen und war entsprechend an allen Arbeitspaketen beteiligt. Das Arbeitspaket 2.1 (Netzstrukturen) sollte im Zeitraum von Monat 04 – 12 bearbeitet werden, das Arbeitspaket 2.2 (Protokollspezifikation und Entwicklung) im Zeitraum von 07 – 24, und das Arbeitspaket 2.3 (Zuverlässigkeitsbewertung und Modellierung) im Zeitraum von Monat 04 – 39. Die Arbeiten an Arbeitspaketen 2.1 und 2.2 wurden innerhalb des geplanten Zeitrahmens abgeschlossen. An Arbeitspaket 2.3 war MediaMobil primär während der Fertigstellung der Gerätesoftware (4.1) beteiligt und hat Zuarbeiten geliefert, um sicherzustellen, dass die Modellierung nicht von der Implementierung abweicht. Da Teile von Arbeitspaket 2.3 (Zuverlässigkeitsbewertung) sich durch das ganze Projekt ziehen, wurde das Ende von Arbeitspaket 2.3 mit der kostenneutralen Projektverlängerung ebenfalls bis zum neuen Projektende mitverlängert.

Im Hauptarbeitspaket 3 war MediaMobil nicht beteiligt.

Im Hauptarbeitspaket 4 war MediaMobil an den Arbeitspaketen 4.1 (Gerätesoftware) und 4.3 (Aufbau der Simulationsumgebung) beteiligt. Das Arbeitspaket 4.1 sollte im Zeitraum von Monat 10 - 27 bearbeitet werden und das Arbeitspaket 4.3 im Zeitraum von Monat 13 – 36. Während die Kernarbeiten an der Gerätesoftware innerhalb des geplanten Zeitraums abgeschlossen werden konnten, sodass keine Verzögerung im kritischen Pfad des Projektes entstanden ist, wurden Arbeiten an Teilen der Gerätesoftware noch einige Monate nach dem geplanten Ende des Arbeitspakete durchgeführt. Ein Grund hierfür waren Verzögerungen durch den schwer einschätzbaren, erhöhten Arbeitsaufwand bei der Verwendung nicht kommerziell erhältlicher Technologien, wie dem C-V2X Modul, Chip und der SDK. Weiterhin gab es personelle Veränderungen bei MediaMobil, die sich negativ auf die für das Projekt verfügbaren Ressourcen ausgewirkt haben. Die höhere Dauer von Arbeitspaket 4.1 hat, durch entsprechende Priorisierung von Teilarbeiten, nicht zu Verzögerungen in Tests und Integration geführt und ließ sich daher problemlos in die ursprüngliche Projektplanung integrieren. Sie war kein primärer Grund für die kostenneutrale Projektverlängerung. Vollständig abgeschlossen wurde Arbeitspaket 4.1 im 33 Projektmonat. An Arbeitspaket 4.3 war MediaMobil primär während der Fertigstellung der Gerätesoftware beteiligt und hat Zuarbeiten geliefert, um sicherzustellen, dass die Simulationsumgebung nicht von der Implementierung abweicht. Während unserer Beteiligung verlief das Arbeitspaket wie geplant.

| | | |
|---|---|---|
|  | <p style="text-align: center;">VEREDUS Teilvorhaben Redundante UAV Kommunikationsnetze Abschlussbericht</p> | <p style="text-align: right;">08.09.2025 Seite 7 von 31</p> |
|---|---|---|

Im Hauptarbeitspaket 5 war MediaMobil an den Arbeitspaketen 5.1 (Integration Bodenstation Software), 5.2 (Integration / Bereitstellung Modem), 5.4 (Aufbau der Demonstration), 5.5 (Demonstration) und 5.6 (Analyse / Auswertung) beteiligt. Das Arbeitspaket 5.1 sollte im Zeitraum von Monat 25 – 33 bearbeitet werden, das Arbeitspaket 5.2 im Zeitraum vom Monat 25 – 30, das Arbeitspaket 5.4 im Zeitraum von Monat 28 – 33, das Arbeitspaket 5.5 im Zeitraum von Monat 34 – 39 und das Arbeitspaket 5.6 im Zeitraum von Monat 37 – 39. Die kostenneutrale Projektverlängerung wurde im April 2024 (Projektmonat 35) besprochen und angefragt. Zu diesem Zeitpunkt waren die wesentlichen technischen Arbeitspakete abgeschlossen und es wurden intensiv Flugversuche zur Demonstration des Gesamtsystems vorbereitet. Während davon ausgegangen wurde, dass diese bis zur ursprünglichen Projektdauer abgeschlossen werden konnten, wurde befürchtet, dass nicht genug Zeit für die auf den Flugversuchen aufbauenden Arbeiten, wie Analyse und Auswertung, bleiben würde. Die kostenneutrale Projektverlängerung wurde für 4 Monate, bis Ende 12.24, beantragt und bewilligt.

Die Arbeiten an den Arbeitspakete 5.1, und 5.2 konnten innerhalb des geplanten Zeitrahmens abgeschlossen werden. Während Integration und anschließendem Aufbau des Demonstrator Setups fielen Probleme bei der Verwendung des C-V2X Moduls, primär bei Verwendung in den Globe-UAV Drohnen, auf. Da diese Probleme schwer nachvollziehbar waren verging zusätzliche Zeit, bis das Demonstrator Setup als wirklich für die Demonstration geeignet angesehen wurde. Der Abschluss von Arbeitspaket 5.4 hat sich daher in den Projektmonat 37 verzögert. Durch die Verschiebung gab es weiterhin Probleme einen geeigneten Termin für die Demonstration in 5.5 zu finden. Diese fand schlussendlich am 29+30.10.24 statt, womit sich das Ende von Arbeitspaket 5.5 bis in den 41 Projektmonat verzögert hat. Durch die Verzögerungen in 5.5 hat sich auch die Auswertung der Ergebnisse verzögert. Das Arbeitspaket 5.6 wurde daher bis zum neuen Projektende in Projektmonat 43 verlängert. Damit wurde allerdings schon im Rahmen der kostenneutralen Projektverlängerung gerechnet.

Bis auf die durch die oben genannten technischen Probleme entstandenen kürzeren Verzögerungen und die zusätzlich für die Auswertung der Ergebnisse benötigte Zeit verlief das Projekt weitestgehend wie geplant. Das folgende Balkendiagramm visualisiert die Dauer der einzelnen Arbeitspakete inklusive der kostenneutralen Projektverlängerung. Hauptarbeitspakete sind in hellblau markiert, Mitarbeit durch MediaMobil in blau.

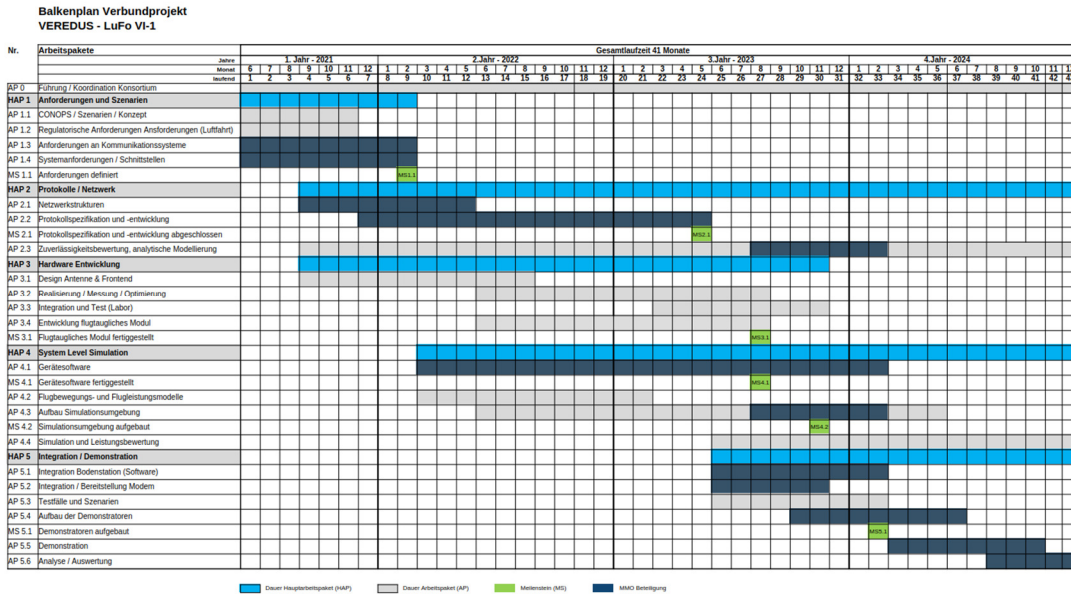



Abbildung 2: Balkendiagramm Projektablauf aus Sicht MediaMobil

1.5. Vorheriger Stand

Auf Grund der schnell wachsenden Anzahl von Drohnen für verschiedene behördliche, kommerzielle und private Anwendungen sowie des erwarteten weiteren Wachstums und diversen neuen Anwendungsmöglichkeiten wurde insbesondere in den letzten Jahren zunehmend an der Erforschung und Entwicklung von Kommunikationslösungen für Drohnen gearbeitet [1] [2] [3] [4]. Dabei war der Schwerpunkt zunächst die Verbindung einzelner Drohnen zu einer Kontrollstation am Boden für die Übertragung von Flugkontrolldaten und für den Download von Nutzdaten, z.B. Kamerabildern.

Seitdem zunehmend Betriebsszenarien mit Schwärmen von Drohnen entstehen, werden auch Kommunikationslösungen zwischen Drohnen untersucht sowie Konzepte für die Nutzung von Drohnen als Kommunikationsgateway zu Bodenstationen entwickelt. Aufgrund des Risikos gestörter oder manipulierter Positionsdaten (Stichwort GNSS Jamming und Spoofing) ist die Positionskontrolle ebenfalls von zunehmender Bedeutung. Dabei wird das Kommunikationsnetz als Flying Ad-Hoc Network (FANET) betrachtet, ein Spezialfall vom Mobile Ad-Hoc Networks (MANET), die bereits Gegenstand intensiver Forschung sind.

In den nachfolgenden Unterkapiteln ist ein kurzer Überblick über die relevanten Technologien und Forschungsthemen zu Beginn des Vorhabens gegeben.

| | | |
|---|---|---|
|  | <p style="text-align: center;">VEREDUS Teilvorhaben Redundante UAV Kommunikationsnetze Abschlussbericht</p> | <p style="text-align: right;">08.09.2025 Seite 9 von 31</p> |
|---|---|---|

1.5.1. Kommunikationssysteme für Drohnen

1.5.1.1. Funktechnologien


Die ersten kleinen Drohnen wurden über Funkfernsteuerungen in den VHF und UHF-Frequenzbändern gesteuert, die auch für Modellflugzeuge verwendet werden. Diese haben den Vorteil einer relativ großen Reichweite, aber nur geringe Bandbreiten. Um den Download von Daten und Bildern zu ermöglichen wurden häufig WLAN-Systeme verwendet. Diese haben abhängig von den verwendeten Antennen jedoch nur eine Reichweite von einigen hundert Metern, wenn die zulässigen effektiven Sendeleistungen eingehalten werden.

Für größere Drohnen und höhere Reichweiten werden auch heute noch Punkt-zu-Punkt und Punkt-zu-Mehrpunkt Funkssysteme eingesetzt. Durch die Verwendung von Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO) Antennen und Transceivern, sowie speziell für mobile Funkkanäle optimierte Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) Modulationsverfahren, werden Reichweiten von mehreren Kilometern erreicht. Unter Sichtbedingungen (Visual Line-of-Sight (VLOS)) waren zu Vorhabenbeginn mit kommerziell verfügbaren Funkeinheiten Reichweiten bis zu 30 km möglich. Heute erreichen Leistungsstarke Funklinks bis zu 50 km.

OFDM-Funkeinheiten für Drohnen sind kompakt aufgebaut und haben Gewichte von unter 500 g. Sie wurden in der Regel für die Verbindung zwischen Drohnen und Bodenkontrollstationen eingesetzt, nicht jedoch für die Kommunikation über relativ kurze Distanzen zwischen Drohnen in Schwärmen.

Mit der zunehmenden Verfügbarkeit der öffentlichen Mobilfunknetze wurden auch 4G/LTE bzw. heute 5G Verbindungen für die Steuerung und den Datendownload von Drohnen genutzt. Da die Antennen der Basisstationen jedoch bislang nicht für die Abdeckung des Luftraums vorgesehen sind, sind Verbindungen bei größerer Flughöhe nur beschränkt möglich. Die begrenzte geografische Abdeckung der Mobilfunknetze ist für ausgedehnte Einsatzgebiete und im Hinblick auf die erforderliche Zuverlässigkeit der Verbindungen ebenfalls kritisch.

Die potenziell für die Kommunikation zwischen Drohnen einsetzbaren Funktechnologien wurden in [1] untersucht. Die Autoren schlagen eine Hybridarchitektur bestehend aus Bluetooth und WiFi Verbindungen für die Kommunikation zwischen Drohnen vor. Dabei wurde eine uns relativ hoch erscheinende Reichweite von 200 m für Bluetooth 802.15.1 im Außenbereich angenommen, welche es im Rahmen des Vorhabens zu verifizieren galt. Für die Kommunikation zwischen Drohnen und zu Bodenstationen war aus unserer Sicht auch der WiMAX Standard geeignet. WiMAX Netze werden derzeit bereits für drahtlose Internetzugänge in Gebieten ohne Kabelanschluss (Last Mile), sowie auch für mobile Internetanbindungen, zum Beispiel im Offshore Bereich, verwendet.

| | | |
|---|---|-------------------------------|
|  | VEREDUS Teilvorhaben Redundante UAV Kommunikationsnetze Abschlussbericht | 08.09.2025 Seite 10 von 31 |
|---|---|-------------------------------|

MediaMobil plante in Zusammenarbeit mit Nokia bereits den Test von 5G Verbindungen für die Fernsteuerung von Schleppern im Rahmen des FernSAMS F&E Projektes. Die Ergebnisse sollten auch in das VEREDUS Vorhaben einfließen, um die Nutzung zukünftiger 5G Netze für die Drohnen Kommunikation zu untersuchen und 5G ggf. in die VEREDUS Netzarchitektur zu integrieren.

Ein weiterer Standard, der aktuell speziell für Flugsicherheitsanwendungen entwickelt wird und zukünftig auch für die Kommunikation zwischen Drohnen und Bodenstationen verwendet werden könnte, ist das L-Band Digital Aeronautical Communications System (LDACS) [5]. Es soll für die Kommunikation zwischen Bodenstationen und Flugzeugen sowie zur Datenübertragung im Bereich der zivilen Flugsicherung eingesetzt werden und basiert auf einer zellularen 3G/4G Netzarchitektur mit Datenraten bis zu etwa 1 MBit/s in Sende- und Empfangsrichtung im L-Band (960 – 1164 MHz).


1.5.1.2. Satellitensysteme

Satellitenverbindungen wurden bisher primär für größere Drohnen bei weltweiten Einsätzen, insbesondere im militärischen Bereich, eingesetzt. Die Gründe sind die relativ großen Antennen und Transceiver sowie die hohen Kosten für die Satellitenübertragung.

Im Wesentlichen standen zu Vorhabenbeginn folgende kommerzielle Satellitendienste für aeronautische Anwendungen zur Verfügung:

- Inmarsat Swift Broadband (SBB) (L-Band)
- Inmarsat Jet ConneX (Ka-Band)
- ViaSat (Ku- und Ka-Band)
- Iridium CERTUS (L-band)

Das Inmarsat SBB System arbeitet im L-Band über geostationäre (GEO) Satelliten. Es bietet im Bereich zwischen etwa 75° nördlicher und südlicher Breite globale Abdeckung über mehrere Satelliten. Auf Grund der niedrigen L-Band Frequenzen können relativ kleine und leichte Antennen verwendet werden. Hersteller bieten für die Verwendung auf kleineren Luftfahrzeugen kompakte Antennen mit nur etwa 1-2 kg Gewicht an, zum Beispiel das UAV 200 System des Herstellers Cobham. Wesentlicher Nachteil des SBB-Dienstes sind jedoch die hohen Übertragungsgebühren von deutlich über 1 USD pro Mbyte Datenvolumen und über 10 USD pro Minute für Streaming Verbindungen mit fester Bandbreite.

| | | |
|--|--|-------------------------------|
|  MediaMobil | VEREDUS Teilvorhaben Redundante UAV Kommunikationsnetze Abschlussbericht | 08.09.2025 Seite 11 von 31 |
|--|--|-------------------------------|


Das Inmarsat Jet ConneX System wird ebenfalls über GEO-Satelliten betrieben, allerdings im Ka Frequenzband. Für die Übertragung werden relativ große und teure elektronisch nachgeführte Antennen verwendet. Für kleine Drohnen sind diese ungeeignet.

Der Satellitenbetreiber ViaSat bietet auch Dienste für Flugzeuge und Drohnen über GEO-Satelliten in den Ka und Ku Frequenzbändern an. Die neue ViaSat Satellitengeneration ist relativ leistungsstark und ermöglicht damit auch die Verwendung kleinerer leichter Antennen. Grundsätzlich nachteilig bei GEO-Konstellationen ist jedoch die hohe Latenz von über 550 ms (Round Trip Time). Im realen Betrieb liegt diese meistens im Bereich von 700 bis 1000 ms, je nach Kapazitätsauslastung im Satellitennetz.

Das Iridium System besteht aus 66 Satelliten im so genannten Low Earth Orbit (LEO). Die Satelliten bewegen sich in einem Abstand von 780 km auf Polarumlaufbahnen um die Erde. Das Iridium System deckt damit die gesamte Erdoberfläche, einschließlich der Polregionen, ab. Ein weiterer wesentlicher Vorteil gegenüber GEO-Systemen ist die deutlich niedrigere Latenz von typisch weniger als 300 ms, je nach Position der Endpunkte. Der seit 2019 über die Iridium NEXT Satellitengeneration betriebene CERTUS Service unterstützt Übertragungsraten bis zu 1,4 MBit/s. Zum Start des VEREDUS Projektes befanden sich Aero Antennensysteme noch in der Entwicklung und es war nicht absehbar, wann diese für Tests verfügbar sein würden. Grundsätzlich erschien der Iridium CERTUS Service als starker Kandidat für die Satellitenkommunikation, auch für kleinere Drohnen. Da der Service aber, wie der Inmarsat SBB Service, im L-Band betrieben wird sind die Kosten relativ hoch.

Vor dem VEREDUS Projekt gab es bereits Ankündigungen einer Reihe von neuen Satellitenprojekten, die ebenfalls LEO-Konstellationen in den Orbit bringen wollen, allerdings nicht im teuren L-Band, sondern in den Ku- und Ka-Bändern. Die Zahl der Satelliten ist dabei deutlich größer als beim Iridium System. Die OneWeb Konstellation sollte 720 Satelliten umfassen, während andere Projekte, wie beispielsweise Starlink von SpaceX, sogar mit über 4000 Satelliten geplant wurden. Wir haben damit gerechnet, dass von den etwa 10 LEO-Projekten, die bereits erste Testsatelliten im Orbit hatten, 3-4 tatsächlich realisiert werden würden.

Auf Grund des dadurch entstehenden Wettbewerbs und der höheren zur Verfügung stehenden Übertragungskapazitäten in den Ku- und Ka-Frequenzbereichen haben wir deutlich niedrigere Nutzungskosten im Vergleich zum Iridium L-Band System erwartet. Verschiedene Hersteller haben bereits vor dem VEREDUS Projekt an der Entwicklung von Flachantennen für LEO-Systeme gearbeitet, die auch für kleinere Drohnen geeignet sein könnten. Insgesamt waren die zu diesem

| | | |
|---|---|--|
|  | <p style="text-align: center;">VEREDUS Teilvorhaben Redundante UAV Kommunikationsnetze Abschlussbericht</p> | <p style="text-align: right;">08.09.2025 Seite 12 von 31</p> |
|---|---|--|

Zeitpunkt neu geplanten LEO-Systeme sowohl aus technischer als auch wirtschaftlicher Sicht eine interessante Alternative zur Nutzung des Iridium CERTUS Systems. Wir haben erwartet, dass im Laufe des Vorhabens erste LEO-Systeme für Tests verfügbar werden. MediaMobil arbeitete bereits mit zwei der möglichen Betreiber zusammen (Telesat und Eutelsat OneWeb). Es wurde geplant, die Eignung dieser Systeme für die UAV Kommunikation im Rahmen des Vorhabens zu erproben.

1.5.2. Routingprotokolle für Flying Ad-Hoc Networks

Die Kommunikationsverbindungen zwischen Drohnen und von Drohnen zu Bodenstationen können als fliegendes Ad-Hoc Netzwerk modelliert werden (FANET). Das FANET kann dabei als Sonderfall eines mobilen Ad-Hoc Netzwerk (MANET) mit mobilen Kommunikationsknoten und Gateways am Boden angesehen werden.

Bei mobilen Ad-Hoc Netzen ändern sich die Verbindungen zwischen den Netzknoten dynamisch abhängig von der Bewegung und relativen Position der Knoten zueinander sowie den Übertragungsbedingungen zwischen den Knoten. Das Routing der Daten zwischen den Endpunkten, gegebenenfalls über mehrere Knoten, erfordert daher dynamische Routing Protokolle, bei denen die Routing Tabellen jedes Netzknotens dynamisch angepasst und Strategien für ein optimales Routing definiert werden.

Für MANET Anwendungen wurden in der Vergangenheit verschiedene Routing Strategien und Protokolle entwickelt. Diese lassen sich auf ein UAV FANET bestehend aus Schwärmen von Drohnen übertragen [6] [7]. Dabei werden statische, proaktive, reaktive und hybride Routing Protokolle unterschieden.

Für Drohnenanwendungen erscheinen reaktive und hybride Protokolltypen grundsätzlich geeignet. In [6] und [7] sind verschiedene reaktive und hybride Protokolle beschrieben und analysiert. MediaMobil hat im Rahmen von Kundenprojekten auch eigene dynamische Routing Protokolle für Multi-Hop Punkt-zu-Punkt Funkverbindungen zwischen Fahrzeugen entwickelt und implementiert. Im Rahmen des Vorhabens sollte die Eignung der verschiedenen Protokolle auf Basis der VEREDUS Anforderungen untersucht und ein geeignetes Protokoll ausgewählt und implementiert werden.

1.6. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die primäre Drohne-zu-Drohne Kommunikation im Projekt VEREDUS wurde letztendlich mit der C-V2X Funktechnologie umgesetzt. Dafür wurde das Funkmodul Type1YL der Firma Murata mit einem SECTON Chip der Firma Autotalks verwendet. Das für die Kommunikation verwendete Softwareentwicklungspaket (SDK) wurde von der Firma Autotalks bereitgestellt und konnte nach der Unterzeichnung eines Geheimhaltungsvertrags (NDA) verwendet werden. Bei Modul, Chip und SDK

handelte es sich nicht um bereits kommerziell erhältliche Produkte, sodass die Arbeit damit nicht immer reibungslos verlief. Initiale Kommunikationstests mit der C-V2X Technologie sowie die Einarbeitung in die bereitgestellte SDK führten häufig zu Problemen, welche Klärungsbedarf mit den Firmen Autotalks und Murata nach sich zogen. Bei der Zusammenarbeit mit den Firmen Autotalks und Murata ging es primär um reaktiven Informationsaustausch, bei dem MediaMobil Detailfragen kommuniziert und entsprechende Antworten erhalten hat.

2. Verwendung der Zuwendung

2.1. Arbeitspaket 1.3: Anforderungen an Kommunikationssysteme


Das Arbeitspaket wurde von der TUHH geleitet.

Grundlegende Anforderungen wurden bereits in Arbeitspaket 1.1 erarbeitet. Auf diesen Ergebnissen aufbauend waren die Ziele von MediaMobil in diesem Arbeitspaket:

- Bewertung der Priorität der ausgewählten Kriterien für die Auswahl von Kommunikationstechnologien und die Abstimmung mit den Projektpartnern
- Vergleich potentieller Kommunikationstechnologien bzgl. der Kriterien
- Auswahl der Kommunikationstechnologien für das VEREDUS Projekt

Die folgende Tabelle (1) beschreibt, wie viel Bedeutung die Projektpartnern den einzelnen Kriterien für die Auswahl der Kommunikationstechnologien zugewiesen haben. Die verwendete Skala reicht von 1 bis 5, wobei eine höhere Zahl einer höheren Priorität entspricht. Die Gewichte wurden über die Projektpartner gemittelt.

| Kriterien für die Auswahl von Kommunikationstechnologien | Gewichtung |
|--|------------|
| Ad-Hoc Verbindungsaufbau (IP-Layer) | 5 |
| UTM-Konformität | 5 |
| Typische Re-Connect Dauer nach Unterbrechung | 4 |
| Leistungsaufnahme Router / Modem | 4 |
| Latenz | 4 |
| Gewicht Router / Modem | 4 |
| Größe Router / Modem / Antenne | 4 |
| Reichweite | 4 |
| Wetterempfindlichkeit | 4 |
| Frequenzband | 3 |
| Lizenziert / Unlizenziert | 2 |

| | | |
|---|---|-------------------------------|
|  | VEREDUS Teilvorhaben Redundante UAV Kommunikationsnetze Abschlussbericht | 08.09.2025 Seite 14 von 31 |
|---|---|-------------------------------|

| | |
|-------------------------------|---|
| Datenrate (Downlink / Uplink) | 1 |
|-------------------------------|---|


Tabelle 1: Gewichtung der Kriterien für die Auswahl der Netztechnologien

Geeigneten Kommunikationstechnologien wurden im Hinblick auf die Priorität der Kriterien verglichen. Als wichtigste Kriterien wurden ein Ad-Hoc Verbindungsausbau (Luft-zu-Luft und Luft-zu-Boden) sowie UTM-Konformität identifiziert. Größe und Gewicht des Routers sollten, wie nicht anders zu erwarten, so gering wie möglich gehalten werden. Eine geringere Größe macht den Einsatz des Moduls flexibler, während ein geringeres Gewicht für den ökonomischen Einsatz relevant ist, da jede Drohne eine maximale Traglast hat und ein höheres Gewicht auch einen erhöhten Energieverbrauch mit sich zieht.

Die Zeit für die Wiederherstellung der Verbindung nach Verbindungsverlust sollte so gering wie möglich gehalten werden. Für die Auswahl der Kommunikationstechnologien wurden weiterhin explizit Faktoren wie Reichweite, Frequenzband und Datenrate berücksichtigt. Hier haben insbesondere die 802.x.x-Standards, abgesehen von WiMAX, den Nachteil, dass sie nicht in lizenzierten (ISM-) Frequenzbändern liegen. Sie weisen besonders in städtischen Umgebungen starke Interferenzen auf, welche die Reichweite weiter verringern können. LoRa hingegen hat zwar eine hohe Reichweite, ist für das eigentliche VEREDUS Netz aber nicht geeignet, da es einen geringen Durchsatz und eine hohe Verzögerung aufweist. Die meisten IoT – Technologien scheiden aufgrund der hohen Latenzzeit aus. Globalstar hat diesbezüglich zwar den Vorteil einer stabileren Latenzzeit (da es sich um eine „circuit switched“ Verbindung handelt), aber die Gebühren dieser Dienste sind für VEREDUS nicht wirtschaftlich.

Reichweite, Latenz und Datenrate von C-V2X Systemen schienen den Ansprüchen von VEREDUS hingegen gerecht zu werden. Funkmodems im 868 MHz Band ermöglichen gegenüber C-V2X eine höhere Reichweite und gleichzeitig deutlich reduzierte Datenraten, erlauben aber insbesondere bei einer geringeren UAV-Dichte noch eine direkte Kommunikation zwischen den Drohnen. Ein zusätzliches 5G Modem ermöglicht die Nutzung öffentlicher Mobilfunknetze. Wo kein Mobilfunk verfügbar ist, muss die Kommunikation per Satellit garantiert werden. Hier wurde ein Iridium CERTUS 100 Modem gewählt, welches aufgrund des global verfügbaren Iridium Dienstes (LEO Satellitennetz) einen Betrieb ermöglicht, wenn keine anderen UAVs oder terrestrischen Kommunikationsdienste erreichbar sind.

Auf Grundlage der betrachteten Kommunikationstechnologien, Entscheidungskriterien und Prioritäten wurden daher die folgenden Kommunikationstechnologien für das Projekt ausgewählt:

| | | |
|---|---|--|
|  | <p style="text-align: center;">VEREDUS Teilvorhaben Redundante UAV Kommunikationsnetze Abschlussbericht</p> | <p style="text-align: right;">08.09.2025 Seite 15 von 31</p> |
|---|---|--|

- Die primäre Drohne-zu-Drohne Verbindung des VEREDUS Netzes, inklusive Weiterleitung von VEREDUS-Daten sollte mit C-V2X umgesetzt werden.
- Es sollten FANET+-Funkmodems integriert werden, welche im 868 MHz ISM-Band arbeiten. Vorteil ist hier, trotz geringer Datenrate, die Reichweite von bis zu 30 km.
- Eine 5G-Lösung sollte für Drohne-zu-Boden Verbindungen und potentielle Anwendungsfälle im Bereich Drohne-zu-Drohne zum Einsatz kommen.
- Als Backup über Satellit sollte ein Iridium CERTUS 100 System eingesetzt werden

Die initial von MediaMobil formulierten Ziele für dieses Arbeitspaket konnten damit vollständig erfüllt werden.

2.2. Arbeitspaket 1.4: Systemanforderungen / Schnittstellen

Das Arbeitspaket wurde von Germandrones geleitet.


Die Ziele von MediaMobil in diesem Arbeitspaket waren:

- Spezifikation der Übertragungsschnittstellen
- Definition der Anforderungen zur Integration der ausgewählten Übertragungstechnologien in das VEREDUS Netz

Nach der in Arbeitspaket 1.3 erfolgten Auswahl der zu verwendenden Kommunikationstechnologien wurden die konkreten, für die Implementierung zu nutzenden Funk- und Satellitenmodems ausgewählt und die Hard- und Softwareschnittstellen für diese identifiziert.

Für die C-V2X Funktechnologie kommt ein Funkmodul Type1YL der Firma Murata mit einem SECTON Chip der Firma Autotalks zum Einsatz. Zur Anbindung an den Hostcomputer wurden ein SPI-Bus sowie eine USB-Anbindung verwendet. Ein Softwareentwicklungspaket für die Module wurde von der Firma Autotalks zur Verfügung gestellt und konnte, nach Unterzeichnung einer Geheimhaltungsvereinbarung (NDA), im Projekt verwendet werden. Als 5G Funkmodul kommt ein HAT-Board für den Raspberry Pi zum Einsatz (SIM8200-EA-M2 5G HAT per USB angebunden). Als Satellitendienst wird Iridium CERTUS 100 verwendet. Hierfür wird das Gerät Skylink 7100 der Firma Blue Sky Network integriert, welches Schnittstellen für Ethernet, USB und RS232 bietet.

Die Funkmodule müssen zur Integration in die Drohnen der Projektteilnehmer auf einer gemeinsamen Hardwareplattform untergebracht werden. Diese Hardwareplattform galt es im Rahmen des Arbeitspaketes ebenfalls auszuwählen. Hierbei ist erneut wichtig, dass das Gesamtsystem innerhalb der in Arbeitspaket 1.3 spezifizierten Kriterien bleibt. Weiterhin muss die Hardwareplattform flexibel und leistungsfähig genug sein, um die zu implementierenden Funktionen

| | | |
|---|--|-------------------------------|
|  | VEREDUS Teilvorhaben Redundante UAV Kommunikationsnetze Abschlussbericht | 08.09.2025 Seite 16 von 31 |
|---|--|-------------------------------|

der VEREDUS Gerätesoftware zu verarbeiten. Trotz erwarteter Lieferschwierigkeiten fiel die Auswahl hierfür auf die Verwendung von Raspberry Pi Boards ab Version 3. Dabei handelt es sich um einen Einplatinencomputer, welcher alle relevanten Hardwareschnittstellen für die gewählten Funkmodule bietet und durch einen soliden Linux-Unterbau eine gute Grundlage zur Integration der Funkmodultreiber, sowie der Entwicklung der VEREDUS Gerätesoftware, bietet.

Die initial von MediaMobil formulierten Ziele für dieses Arbeitspaket konnten damit vollständig erfüllt werden.

2.3. Arbeitspaket 2.1: Netzwerkstrukturen

Das Arbeitspaket wurde von MediaMobil geleitet.

Die Ziele von MediaMobil in diesem Arbeitspaket waren:

- Definition der Architektur des VEREDUS Netzes und Spezifikation der Netzwerkelemente
- Entwicklung der Softwarearchitektur für die Implementierung der Netzwerkprotokolle
- Erstellung der Schnittstellenspezifikation

Im Rahmen des Arbeitspaketes wurde ein umfangreicher Architekturvorschlag für die allgemeine Softwarearchitektur erarbeitet. Dafür wurden bestehende Projektanforderungen analysiert und daraus hervorgehend neue Anforderungen für die Architektur der VEREDUS Software ermittelt und erörtert. Im Projekt wurde intern beispielsweise die Allgemeine Anforderung ALL-02 definiert, welche besagt, dass das VEREDUS Netz dezentral zu konzipieren ist. Dies bedeutet, dass keine zentrale Serverstruktur verwendet werden kann, was für die Konzipierung der Software weitere Anforderungen impliziert; namentlich, dass jeder Knoten andere Knoten in das Netz aufnehmen können muss und, dass jeder Knoten mit jedem beliebigen Zielknoten kommunizieren können muss. Auf diese Weise wurden aus insgesamt 52 für die Software als relevant befundenen Projektanforderungen weitere 17 softwarespezifische Anforderungen erarbeitet.

Es wurde eine Softwarearchitektur vorgeschlagen, welche die als relevant befundenen und zusätzlich aufgestellten Anforderungen erfüllt. Diese wurde mit den Projektpartnern diskutiert. Die Softwarearchitektur beschreibt innerhalb des VEREDUS-Softwaremoduls weitere Softwaremodule, deren Aufgaben und Schnittstellen zueinander. Die finale Softwarearchitektur, zum Stand des Projektendes, kann in Abbildung 3 gesehen werden. Die Abbildung zeigt eine High-Level Ansicht der Softwarearchitektur, die lediglich eine Übersicht zu den verschiedenen Modulen, nicht jedoch deren innere Funktionen zeigt.

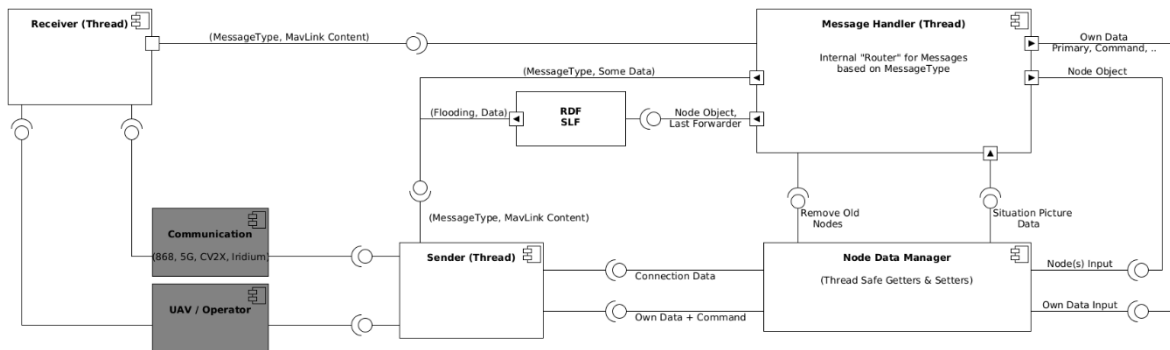


Abbildung 3: Finale High-Level Softwarearchitektur der VEREDUS Kernsoftware

Jedes Softwaremodul wurde weiter detailliert und dessen Funktionalität beschrieben. Die Architektur legt einen Fokus auf die Modularität und Flexibilität bei der Handhabung der diversen Kommunikationskanäle und der dort eintreffenden Nachrichtenpakete. In Arbeitspaket 2.2 wurde beschlossen, für VEREDUS paketbasierte Nachrichten mit dem MAVLink Kommunikationsprotokoll zu verwenden. Gleiche MAVLink Nachrichten (IDs), welche über unterschiedliche Kanäle eintreffen, können jedoch eine völlig unterschiedliche Bedeutung haben. Daher wurde die Entscheidung getroffen, eingehende Nachrichten basierend auf ihrem Kanal und ihrer MAVLink ID zu klassifizieren und die Verteilung und Weiterverarbeitung der Nachrichten innerhalb der Software basierend auf dieser Klassifizierung durchzuführen. Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass die Architektur unabhängig von der Art oder Menge der verwendeten Kommunikationstechnologien bleibt und diese damit in Zukunft leicht austauschbar (oder erweiterbar) bleiben. Abbildung 4 zeigt einen tieferen Einblick in das Receive Modul der VEREDUS Kernsoftware, welches die verschiedenen Kommunikationstechnologien bündelt und die empfangenen Nachrichten klassifiziert, sodass folgende Softwaremodule vollständig agnostisch gegenüber des ursprünglichen Empfangskanals arbeiten können.

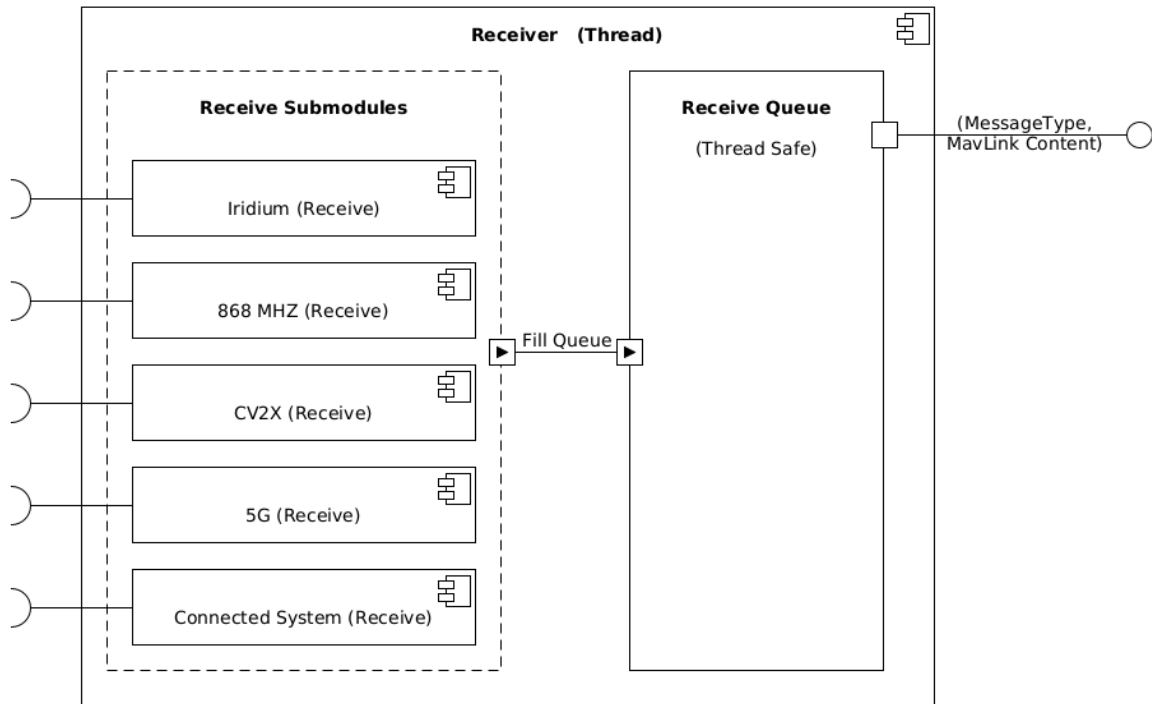



Abbildung 4: Beispiel eines Untermoduls (Receiver) der VEREDUS Softwarearchitektur

Es wurde erläutert, wie die Softwarearchitektur die als relevant befundenen Anforderungen erfüllt oder deren Erfüllung bei der Implementierung ermöglicht. Weiterhin wurden die Software- und (sofern relevant) Hardwareschnittstellen für die Kommunikation zwischen verschiedenen VEREDUS Knoten zum „Verbundenen System“ (Drohne oder Bodenstation) und anderen Systemkomponenten (C-V2X Proxy, 868 MHz Proxy, 5G, Iridium, ...) festgehalten. Das verbundene System kann dabei sowohl über eine serielle als auch eine UDP-basierte Netzwerkschnittstelle angebunden werden, während die lokale Kommunikation mit anderen Programmen über UDP stattfindet.

Potentielle Probleme und näher zu betrachtende Aspekte wurden für die Berücksichtigung in den zugehörigen Arbeitspaketen dokumentiert. Dabei sind spezifisch Fragen rund um die Verschlüsselung aufgetreten. Sollte beispielsweise das ganze Netz global verschlüsselt werden müssen, wäre dies in einem vollständig dezentralen Netz ein nicht triviales Problem, insbesondere im Hinblick auf die „Kollision und Verschmelzung“ zweier separat geformter VEREDUS Netze. In einer Diskussion mit den Projektpartnern wurde beschlossen, dass das VEREDUS Netz nicht global verschlüsselt werden muss. Schlüsselpaare wurden in jedem Fall als notwendig angesehen, damit Kommunikationspartner, beispielsweise durch digitale Signaturen, korrekt identifiziert werden können. Ohne ein solches Feature wäre es nicht möglich zu bestätigen, dass ein Kommando

| | | |
|---|---|-------------------------------|
|  | VEREDUS Teilvorhaben Redundante UAV Kommunikationsnetze Abschlussbericht | 08.09.2025 Seite 19 von 31 |
|---|---|-------------------------------|

tatsächlich vom eigenen Operator versandt wurde, da die Nachricht potentiell über verschiedene (möglicherweise bösartige) VEREDUS Knoten weitergeleitet werden muss. Diese Notwendigkeit zog allerdings die Frage mit sich, wie die Schlüsselpaare in einem vollständig dezentralen Netz zu verteilen sind. Das Problem wurde zu einem späteren Zeitpunkt unter Zuhilfenahme des in Arbeitspaket 2.2 entwickelten Routingalgorithmus konzeptionell durch das Vorstellen eines Ansatzes zur Verteilung von Zertifikaten im dezentralen VEREDUS Netz gelöst.

Die schlussendlich vorgestellte Architektur erfüllt alle gefundenen Anforderungen und stellt die Grundlage für die Entwicklung der Gerätesoftware in Arbeitspaket 4.1 dar.

Die initial von MediaMobil formulierten Ziele für dieses Arbeitspaket wurden vollständig erfüllt.


2.4. Arbeitspaket 2.2: Protokollspezifikation und –entwicklung

Arbeitspaket 2.2 wurde von der TUHH geleitet. MediaMobil hat folgende Ziele verfolgt:

- Unterstützung bei der Entwicklung eines Übertragungsprotokolls und Datenformaten mit minimalem Overhead und höchstmöglicher Bandbreiteneffizienz
- Ermöglichen von Signalisierung und Datenaustausch zwischen Drohnen und Bodenstationen mit minimaler Anzahl von Rückübertragungen (Minimierung der Latenz)
- Integration von Sicherheitsverfahren (Authentisierung, Verschlüsselung, Zugriffs- und Integritätssicherung) unter Anwendung der relevanten Technischen Richtlinien des BSI
- Identifizierung der Daten verschiedener Anwendungsklassen und Priorisierung der Daten aufgrund vordefinierter Prioritäten

Während für redundante Steuerverbindungen eine zuverlässige Punkt-zu-Punkt Kommunikationsverbindung erforderlich ist, ist es für ein umfassendes Lagebild insbesondere wichtig, die Daten der UAVs im Netz an die anderen Netzknoten zu verteilen. Diese Anforderung macht eine Verwendung von sowohl Routing- als auch Flooding Protokollen notwendig. Die TUHH hat im Rahmen dieses Arbeitspaketes neue Routingalgorithmen entwickelt, welche auch als wissenschaftliche Veröffentlichung publiziert wurden. Zum Flooding im VEREDUS Projekt wird der Rate Decay Flooding (RDF) Algorithmus verwendet, während die zielgerichtete Kommunikation mit einer Variation dieses umgesetzt wird, dem sog. Spotlight Flooding (SLF). Die Verwendbarkeit und Implementierbarkeit der vorgestellten Algorithmen wurde von MediaMobil im Rahmen des VEREDUS Projektes überprüft und bestätigt.

Nach Absprache mit den Projektpartnern wurde entschieden, dass für VEREDUS das MAVLink Kommunikationsprotokoll verwendet werden soll, da dies sich in den relevanten Branchen bereits

| | | |
|--|--|-------------------------------|
|  MediaMobil | VEREDUS Teilvorhaben Redundante UAV Kommunikationsnetze Abschlussbericht | 08.09.2025 Seite 20 von 31 |
|--|--|-------------------------------|

bewährt hat und bekannt ist. Ein weiterer Vorteil von MAVLink ist, dass die Nachrichtenmenge leicht erweiterbar ist. Um die zusätzlich von den RDF / SLF Algorithmen benötigten Daten mitzuschicken, hat MediaMobil einen VEREDUS-spezifischen MAVLink Dialekt entwickelt. Dabei gibt es verschiedene Nachrichtendefinitionen, um das Übertragen von Steuerdaten, Telemetriedaten und anderen Flooding Inhalten zu ermöglichen. Während die Pakete selbst unverschlüsselt übertragen werden (sollen), sind die primären Nachrichten um eine Signatur des Absenders zu erweitern. Dies ermöglicht es einem Empfänger sicherzustellen, dass die Nachricht von einem gültigen VEREDUS Knoten verschickt und nicht manipuliert wurde. Authentizität und Integrität der Nachrichten sind damit sichergestellt. Jeder VEREDUS Knoten verwendet, wie für asynchrone Verschlüsselung üblich, Public / Secret Schlüsselpaare. Da der SLF-Algorithmus die Punkt-zu-Punkt Kommunikation ebenfalls als Broadcast handhabt, werden zielgerichtete Informationen, wie Kommandos oder Telemetriedaten, als Payload normaler Flooding Pakete mitgeschickt.


Das MAVLink Protokoll wird auf allen Ebenen, sowohl zwischen den einzelnen VEREDUS Knoten, als auch für die Kommunikation mit dem verbundenen System verwendet. Der VEREDUS-spezifische MAVLink Dialekt soll dabei lediglich für Kommunikation innerhalb des VEREDUS Netz verwendet werden. Schnittstellen nach außen sollen ausschließlich Standard-MAVLink Nachrichten verwenden, um VEREDUS als Technologie möglichst zugänglich zu halten. Ein Nachteil dabei ist, dass es nicht immer eine passende MAVLink Nachricht für jeden Anwendungsfall gibt, sodass in einigen Anwendungsfällen Teilinhalte von Nachrichten weggelassen oder durch unkonventionelle Daten ersetzt werden müssen, was ebenfalls von dem MAVLink Standard abweicht und klar kommuniziert werden muss.

Eine Identifizierung der Anwendungsklassen ist bereits durch die zuvor in Kapitel 1.3 erwähnte Klassifizierung eingehender (und selbsterzeugter) Nachrichten gegeben. Die vorgeschlagene Softwarearchitektur beinhaltet eine PriorityQueue für den Empfang und Versand von Nachrichten, sodass die Abarbeitung dieser über die Anwendungsfälle priorisiert werden kann, indem der dem Anwendungsfall zugehörigen Klassifizierung bei der Implementierung die entsprechende Priorität zugewiesen wird.

Die initial von MediaMobil formulierten Ziele für dieses Arbeitspaket wurden vollständig erfüllt.

2.5. Arbeitspaket 2.3: Zuverlässigkeitsbewertung, analytische Modellierung

Arbeitspaket 2.3 wurde von der TUHH geleitet. Ziel der Mitarbeit von MediaMobil in diesem Arbeitspaket ist die Unterstützung der TUHH.

| | | |
|---|---|-------------------------------|
|  | VEREDUS Teilvorhaben Redundante UAV Kommunikationsnetze Abschlussbericht | 08.09.2025 Seite 21 von 31 |
|---|---|-------------------------------|

MediaMobil hat die TUHH bei Rückfragen und Klärungsbedarf unterstützt. Es wurde sichergestellt, dass die Modellierung nicht von der tatsächlichen Implementierung abweicht. Hierzu wurden insbesondere die RDF und SLF Algorithmen diskutiert und testweise implementiert.

2.6. Arbeitspaket 4.1: Gerätesoftware

Das Arbeitspaket wurde von MediaMobil geleitet.


Die Ziele von MediaMobil in diesem Arbeitspaket waren:

- Entwicklung und Programmierung der VEREDUS Software für die Bodenstation und das Fluggerät
- Erstellung der Software-Dokumentation

Nachdem in Arbeitspaket 1.3 die Funktechnologien festgelegt und in Arbeitspaket 2.1 die Protokolle und allgemeine Softwarearchitektur spezifiziert wurden, konnte mit der Integration der Funkmodule auf dem Raspberry Pi begonnen werden.

Für die 5G Kommunikation kommt ein HAT-Board für den Raspberry Pi zum Einsatz (SIM8200-EA-M2 5G HAT). Notwendige Treiber und Einstellungen zum Betrieb wurden vorgenommen. Auch wurden Arbeiten an der Integration des Skylink 7100 Gerätes, für die Iridium CERTUS 100 Backup Verbindung, durchgeführt. Dafür musste das Gerät in seine Baugruppen zerlegt werden, wonach es nicht mehr korrekt funktioniert hat und vom Hersteller repariert werden musste. Das Gerät war auf Grund von Verzögerungen auf Seiten des Herstellers nicht rechtzeitig für die Demonstrator Tests in Arbeitspaket 5.5 wieder verfügbar, weshalb die Iridium Backup Verbindung über einen VPN Tunnel hinsichtlich Datendurchsatz und Latenz simuliert wurde. Da die Integration des Skylink 7100 Moduls in- bzw. auf den Drohnen praktisch schwierig gewesen wäre, wurde auf die spätere reale Demonstration mit der Iridium-Anlage verzichtet.

Ein großer Fokus dieses Arbeitspaketes lag zunächst auf der sauberen Inbetriebnahme der C-V2X Funktechnologie, da es sich um ein Vorserienprodukt handelte. Das C-V2X Modul (Type1YL) der Firma Murata, der SECTON Chip der Firma Autotalks und die bereitgestellte SDK wurden zunächst unter Verwendung von Evaluierungsboards der Firma Murata im Labor-Testaufbau erfolgreich in Betrieb genommen. Ein erstes Firmware-Image wurde vom Projektpartner Funke bereitgestellt, da diese das C-V2X Board hergestellt haben. Nach den internen Tests der Hardware bei Funke wurden die Boards an Stelle der zuvor verwendeten Evaluierungsboards erfolgreich in das Demonstrator Testsetup integriert. Zur Synchronisation der Kommunikation wurde das Zeitsignal eines ebenfalls auf dem Funke-Board integrierten GNSS-Empfängers verwendet.


| | | |
|---|--|-------------------------------|
|  | VEREDUS Teilvorhaben Redundante UAV Kommunikationsnetze Abschlussbericht | 08.09.2025 Seite 22 von 31 |
|---|--|-------------------------------|

Basierend auf dem, von Autotalks bereitgestellten, Testprogramm wurde eine Erweiterung entwickelt, die als Proxy zwischen der eigentlichen C-V2X Kommunikation und der VEREDUS Kernsoftware dient. Der Proxy nimmt auf einem Port über UDP-Daten an, versendet diese über C-V2X und gibt auf einem anderen Port die über C-V2X empfangenen Daten wieder aus. Es wurden umfangreiche Tests durchgeführt sowie Kontakt mit Murata und Autotalks aufgenommen, um einige Eigenheiten bzgl. Startschwierigkeiten, Paketverlust und Datenrate zu beheben. Labortests auf zwei der Testsystemen haben gezeigt, dass der Proxy wie spezifiziert funktioniert.

Ein ähnlicher Proxy wurde für die 868 MHz Kommunikation entwickelt. Dabei wurde die LoRaRF Python Bibliothek verwendet, um den SX127x Transceiver der VEREDUS Systeme zu steuern. Auch hier wird die Kommunikation mit der VEREDUS Kernsoftware über eine lokale UDP-Schnittstelle gehandhabt. Der eigentliche Code für die 868 MHz Verbindung erforderte unerwartet viel Aufwand, da manuell Start of Message und End of Message Bytes eingebaut, Paketechos verworfen, und die eigentlichen Pakete aus den empfangenen Bytes wieder zu einem korrekten MAVLink Paket zusammengebaut werden mussten. Labortests auf zwei der Testsystem haben auch hier gezeigt, dass der Proxy gut funktioniert.

Die VEREDUS Kernsoftware wurde implementiert. Neben der Kommunikation mit den bereits erwähnten Schnittstellen zu den C-V2X und SX127x Proxys handhabt die Kernsoftware auch die Kommunikation mit dem Verbundenen System (Drohne oder Bodenstation), sowie über eine IP-Schnittstelle mit dem Iridium Certus 100 und 5G Modul. Für die Kommunikation werden auf allen VEREDUS-internen Kanälen MAVLink Nachrichten verwendet, die entsprechend des in Arbeitspaket 2.2 spezifizierten VEREDUS-spezifischen MAVLink Dialekts implementiert wurden. Eintreffende Nachrichten auf einem beliebigen Kanal werden basierend auf ihrer MAVLink ID und dem Kanal klassifiziert, weiterverarbeitet und potentiell an die korrekte (interne oder externe) Stelle weitergeleitet. Ein entsprechender Mechanismus wurde, unter Absprache mit den Projektpartnern, für alle in der Anwendungsübersicht (Arbeitspaket 1.1) festgehaltenen VEREDUS-Funktionen / Anwendungsfälle implementiert. Dabei wurden diverse Detailfragen für die Implementierung geklärt, was teilweise zu einer näheren Erklärung oder Überarbeitung der zugehörigen Anforderungen geführt hat. Die von der TUHH spezifizierten Algorithmen (RDF & SLF) wurden final implementiert, in die Software integriert und getestet.

Da aus Sicht des VEREDUS-Netzes alle Knoten grundsätzlich das Gleiche können müssen (aber nicht zwangsläufig die gleichen Berechtigungen haben), wurde entschieden eine Kernsoftware zu entwickeln, welche unterschiedlich konfiguriert sowohl für die Bodenstation als auch das Fluggerät verwendet werden kann. Die Bodenstation kann über UDP auch Remote mit dem zugehörigen VEREDUS Knoten verbunden werden, womit die VEREDUS Kernsoftware auch als Proof-of-

| | | |
|---|---|--|
|  | <p style="text-align: center;">VEREDUS Teilvorhaben Redundante UAV Kommunikationsnetze Abschlussbericht</p> | <p style="text-align: right;">08.09.2025 Seite 23 von 31</p> |
|---|---|--|

Concept für 1:1 Gateways angesehen werden kann. Es wurde beschlossen, dass im Rahmen des Demonstrators keine 1: N Gateway Funktionalität getestet wird, weshalb auch keine entsprechende Funktionalität implementiert wurde.

Die von MediaMobil entwickelten Programme wurden im Code dokumentiert und können beim Start über die Konsole (mit --help) eine ausführliche Beschreibung aller verfügbaren Launch Argumente ausgeben.

Da diverse Programme (Proxys, Kernsoftware, Statusdienste, ...) gleichzeitig laufen und teilweise zum korrekten Betrieb benötigt werden, wurde ein erhöhter Aufwand betrieben, um sicherzustellen, dass die verschiedenen Programme zum benötigten Zeitpunkt aktiv sind, mitstarten, oder automatisch neustarten. Hierzu wurden über SystemD Services konfiguriert. Die Launch Argumente der eigentlichen Programme werden in einem Shell Skript angegeben, welches über den SystemD Service gestartet wird. Um die Gerätesoftware in ihrer Standardkonfiguration zu verwenden, sind daher keine weiteren Kenntnisse notwendig.

Es wurde ein automatisches Installationskript entwickelt, welches die vollständige Einrichtung von Grund auf automatisiert. Die Projektpartner mussten für die Verwendung der Software (neben der Implementierung ihrer Seite der Schnittstelle) daher lediglich eine VEREDUS ID bei der Installation angeben und ihre gewünschte IP für die Kommunikationsschnittstelle in eine Konfigurationsdatei eintragen.


Zusätzlich zur vorhandenen Schnittstellenbeschreibung wurden eine Installationsanleitung und ein VEREDUS Software Handbuch an die Projektpartner übergeben.

Die initial von MediaMobil formulierten Ziele für dieses Arbeitspaket konnten damit vollständig erfüllt werden. Die ursprünglich geplante Dauer und der Personaleinsatz wurden auf Grund des erhöhten Implementierungsumfangs und -aufwands überschritten. Durch die parallele Bearbeitung des folgenden Arbeitspaketes konnte eine Auswirkung auf die Gesamtplanung des Vorhabens und die Arbeiten der anderen Partner vermieden werden.

2.7. Arbeitspaket 4.3: Aufbau der Simulationsumgebung

Arbeitspaket 4.3 wurde von der TUHH geleitet. Ziel der Mitarbeit von MediaMobil in diesem Arbeitspaket war die Unterstützung der TUHH.

MediaMobil hat die TUHH bei Rückfragen und Klärungsbedarf unterstützt. Es wurde sichergestellt, dass die Simulationsumgebung und die tatsächliche Implementierung der Gerätesoftware sich nicht wesentlich unterscheiden. Zu diesem Zweck wurden primär Diskussionen zum Abgleich der Implementierungen der RDF und SLF-Algorithmen geführt. Die korrekte Funktionsweise der

| | | |
|---|---|--|
|  | <p style="text-align: center;">VEREDUS Teilvorhaben Redundante UAV Kommunikationsnetze Abschlussbericht</p> | <p style="text-align: right;">08.09.2025 Seite 24 von 31</p> |
|---|---|--|

Implementierungen konnte zunächst in lokalen Tests und später durch Logging in echten Flugtests bestätigt werden, bevor die realen Flugversuche und Demonstrationen durchgeführt wurden.

Das initial von MediaMobil formulierte Ziel für dieses Arbeitspaket wurde vollständig erfüllt.

2.8. Arbeitspaket 5.1: Integration Bodenstation (Software)

Das Arbeitspaket wurde von MediaMobil geleitet.

Ziel von MediaMobil in diesem Arbeitspaket war die Integration der Gerätesoftware (aus Arbeitspaket 4.1) und der Bodenstationssoftware.

Die Architektur von MediaMobil sieht vor, das „Verbundene System“ (hier Bodenstation) entweder über eine serielle Schnittstelle oder eine UDP basierte Netzwerkschnittstelle anzubinden. Beide Vorhabenpartner haben sich für ihre jeweilige Bodenstationssoftware für die UDP basierte Netzwerkschnittstelle entschieden. Die entsprechende Schnittstelle wurde sowohl von Germandrones als auch von Globe-UAV in ihre Bodenstationssoftware integriert. Fehlerquellen bei der Übertragung von Daten wurden gemeinsam identifiziert und behoben. Grundsätzlich verlief die Integration der Gerätesoftware und der Bodenstationssoftware softwareseitig problemlos, sodass die Kommunikation zwischen der VEREDUS Kernsoftware und Bodenstation nach der Implementierung der jeweiligen Schnittstelle schnell erfolgreich umgesetzt werden konnte.


Die VEREDUS Kernarchitektur sieht vor, dass das Verbundene System regelmäßig von der Kernsoftware ausgesandte Message Requests beantwortet. Diese Daten werden für die Repräsentation des eigenen VEREDUS Knotens im Netz benötigt und sind fundamental für den korrekten Betrieb notwendig. Es wurde mit Germandrones und Globe-UAV kommuniziert, welche MAVLink Pakete für die jeweiligen Anwendungsfälle bereitgestellt werden müssen. Der Datenaustausch verlief weitestgehend problemlos.

Das initial von MediaMobil formulierte Ziel für dieses Arbeitspaket wurde vollständig erfüllt

2.9. Arbeitspaket 5.2: Integration / Bereitstellung Modem

Das Arbeitspaket wurde von Funke geleitet. Ziel von MediaMobil in diesem Arbeitspaket war die Integration von Gerätesoftware (aus Arbeitspaket 4.1) und Fluggerätssoftware.

Die Architektur von MediaMobil sieht vor, das „Verbundene System“ (hier Fluggerät) entweder über eine serielle Schnittstelle oder eine UDP basierte Netzwerkschnittstelle anzubinden. Beide Drohnenhersteller im Vorhaben haben sich für das Fluggerät für die serielle Schnittstelle entschieden. Die entsprechende Schnittstelle wurde sowohl von Germandrones als auch von Globe-UAV in ihre Drohnencontroller integriert. Es gab vereinzelt Probleme bei der Übertragung, welche

| | | |
|---|---|--|
|  | <p style="text-align: center;">VEREDUS Teilvorhaben Redundante UAV Kommunikationsnetze Abschlussbericht</p> | <p style="text-align: right;">08.09.2025 Seite 25 von 31</p> |
|---|---|--|

primär auf die serielle Verbindung zurückzuführen und schnell behoben waren. Der Autopilot der Germandrones Fluggeräte hat allerdings nicht wie erwartet auf die Message Requests der Gerätesoftware reagiert, was initial zu Problemen führte, da unerwartete Pakete empfangen wurden. Dies ließ sich durch Filtern der eingehenden Pakete beheben. Grundsätzlich verlief die Integration der Gerätesoftware und der Fluggeräte ohne größere unerwartete Probleme.

Das initial von MediaMobil formulierte Ziel für dieses Arbeitspaket wurde vollständig erfüllt.

2.10. Arbeitspaket 5.4: Aufbau Demonstratoren

Das Arbeitspaket wurde von Germandrones geleitet. Ziel von MediaMobil in diesem Arbeitspaket war die Unterstützung beim Aufbau der Demonstratoren.


Beim Aufbau der Demonstratoren kam es zu Schwierigkeiten bei der Integration der Hardware, spezifisch dem C-V2X Modul, in die zur Demonstration zu verwendenden UAVs. Da es sich hierbei um ein Problem mit der Hardware handelte, hat MediaMobil die Projektpartner lediglich, wo möglich, bei der Suche und Behebung des Problems unterstützt. Schlussendlich wurde ein Workaround gefunden, der für die Demonstration genutzt werden konnte.

Das initial von MediaMobil formulierte Ziel für dieses Arbeitspaket wurde vollständig erfüllt.

2.11. Arbeitspaket 5.5: Demonstration

Das Arbeitspaket wurde von Globe-UAV geleitet. Ziel von MediaMobil in diesem Arbeitspakets war die technische Unterstützung der Systemdemonstrationen.

Während der Demonstrationen wurde von MediaMobil sichergestellt, dass alle benötigten Services korrekt gestartet und das Logging der Flug- und Kommunikationsdaten für die Auswertung korrekt ausgeführt wurde. Es gab während der Demonstrationen keine nennenswerten Probleme mit der Software. Wie bereits erläutert, konnte die Iridium Komponente nicht rechtzeitig für die Demonstration repariert werden. Bedingt durch die Größe und das Gewicht hätte eine Hardwareintegration in das Demonstrator-Setup jedoch einen erhöhten Integrationsaufwand bedeutet. Auf Tests mit der Iridium Satellitenverbindung im Zuge der Demonstrator Flüge wurde deshalb verzichtet. Aus Sicht des Systems handelt es sich dabei um eine transparente TCP-Verbindung, weshalb hier primär Antennendaten zur Empfangsstärke und die Datenrate bei der Integration in die jeweiligen Drohnen interessant gewesen wären. Im Nachgang der Demonstrator Flugversuche wurden mit der Iridium-Komponente Referenzmessungen am Boden durchgeführt und die Leistungsfähigkeit der, von IMST entwickelten, Iridium-Antenne, des Iridium CERTUS 100 Dienstes sowie der Funktion der Iridium-Komponente im Kontext des VEREDUS Netzes und der Anforderungen an die Satellitenverbindung erfolgreich bestätigt.

| | | |
|---|---|-------------------------------|
|  | VEREDUS Teilvorhaben Redundante UAV Kommunikationsnetze Abschlussbericht | 08.09.2025 Seite 26 von 31 |
|---|---|-------------------------------|

Das initial von MediaMobil formulierte Ziel für dieses Arbeitspaket wurde vollständig erfüllt.

2.12. Arbeitspaket 5.6: Auswertung / Analyse

Das Arbeitspaket wurde vom DLR geleitet. Ziel der Mitarbeit von MediaMobil in diesem Arbeitspaket war die Verifikation der Funktion und Güte des UAV-Kommunikationssystems gemäß der Systemanforderungen.

Die primäre Auswertung der Daten wurde von der TUHH mit verschiedenen Auswertungsskripten vorgenommen. Um dies zu ermöglichen, hat MediaMobil alle gewünschten Daten geloggt. Das Logging konnten semi-automatisch entweder durch Neustart der Kernsoftware per SSH oder durch Senden eines Armed-Flags (durch die Drohnen-Projektpartner) gestartet und gestoppt werden. Die Logs beinhalten alle Daten, von VEREDUS IDs, Timestamps und RDF / SLF (Algorithmen) spezifischen Daten, bis hin zu den Flugdaten der Drohnen. Dies ermöglichte es die Flugbewegungen und Kommunikation der verschiedenen Knoten zueinander im Nachhinein genau zu reproduzieren und auszuwerten.

Die von MediaMobil bereitgestellte Software, von den Proxys bis hin zur Kernsoftware, hat dabei ihre Aufgaben zuverlässig erfüllt. Unter anderem konnten Multi-Hop Kommunikation (und damit einhergehende Weiterleitung von Nachrichten) und das korrekte Akzeptieren von Kommandos (nur des eigenen Operators beobachtet werden.

Auch die Reichweite und Verbindungsgüte der C-V2X Technologie haben die Spezifikation deutlich übertroffen. Es konnten Distanzen von über 2 km bei den Flugtests erreicht werden.

Die unter Laborbedingungen beobachtete Zuverlässigkeit der 868 MHz Kommunikation konnte in den Flugtests nicht reproduziert werden. Der Grund war u.a. Interferenzen mit anderen 868 MHz Kommunikationstechnologien einschließlich der Primärsteuerung oder Telemetriedatenverbindung der Projektpartner. Da die 868 MHz Kommunikation lediglich für Long-Distance Broadcasts der eigenen Position verwendet werden sollte, hatte sie für den erfolgreichen Abschluss der Tests keine hohe Relevanz.

Da die Skylink 7100 Anlage, welche für die Iridium CERTUS 100 Backupverbindung verwendet werden sollte, zum Zeitpunkt der Tests und Demonstrationen immer noch in Reparatur war, liegen keine Ergebnisse zu realen Flugtests der Satellitenverbindung vor. Da es sich hier aus Sicht des VEREDUS Systems allerdings um eine transparente TCP-Verbindung handelt, welche im Rahmen der Tests über eine VPN-Verbindung simuliert werden konnte, hatte dies keine negativen Auswirkungen auf die Ergebnisse der Demonstrationen.

Das initial von MediaMobil formulierte Ziel für dieses Arbeitspaket wurde vollständig erfüllt.


3. Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

In der Gesamtvorkalkulation wurde ausschließlich von Personal- und Reisekosten ausgegangen. Im Rahmen des Vorhabens sind Kosten auch für die Nutzung des Iridium Satellitendienstes entstanden, die im zahlenmäßigen Nachweis unter „Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten“ aufgeführt sind.

Die entsprechenden Positionen im zahlenmäßigen Nachweis bzw. die Abweichungen von der Vorkalkulation sind in folgender Tabelle erläutert.

| | Gesamtvorkalkulation | Gesamtnachkalkulation | Erläuterung |
|----------------|----------------------|-----------------------|---|
| Personalkosten | 454.300,00 € | 457.328,00 € | <p>Die Vorkalkulation basierte auf einem Personaleinsatz von insgesamt 5.680 Stunden.</p> <p>Es wurden ausschließlich Stunden in der Kategorie Akademiker mit einem Stundensatz von 80,00 € in der Vorkalkulation angesetzt (keine pauschalierte Abrechnung).</p> <p>Der reale durchschnittliche Stundensatz im Zeitraum des Vorhabens 2021 – 2024 betrug 92,57 € (51,43 € direkte Personalkosten zzgl. 41,14 € Gemeinkosten).</p> <p>Der tatsächliche Personaleinsatz war insgesamt 4.946 Stunden entsprechend tatsächlichen Personalkosten i.H.v. 457.851,22 €.</p> <p>Die über die Vorkalkulation hinausgehenden Personalkosten wurden bis zur Höhe des nicht für Reise- und sonstige Kosten</p> |

| | | | |
|--------------------------------------|--------------|--------------|--|
| | | | verbrauchten Kostenrahmens in der Nachkalkulation angesetzt. |
| Reisekosten | 7.100,00 € | 2.347,74 € | Projekttreffen wurden soweit wie möglich online durchgeführt. Reisen beschränkten sich auf die Jahrestreffen sowie die Vor-Ort Systemintegration und Tests. Die Reisekosten sind daher deutlich niedriger als geplant. |
| Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten | 0,00 € | 1.724,26 € | Für die Tests der Datenübertragung über das Iridium Satellitensystem sind Verbindungsgebühren angefallen. Diese Gebühren wurden als sonstige Kosten berücksichtigt (die Iridium Hardware wurde für das Vorhaben beschafft, die Kosten dafür sind aber in der Nachkalkulation nicht enthalten). |
| Selbstkosten gesamt | 461.400,00 € | 461.400,00 € | Die Selbstkosten wurden gemäß Vorkalkulation abgerechnet. |

| | | |
|---|--|-------------------------------|
|  | VEREDUS Teilvorhaben Redundante UAV Kommunikationsnetze Abschlussbericht | 08.09.2025 Seite 29 von 31 |
|---|--|-------------------------------|

4. Verwertungsplan


Die technische Realisierung kommerzieller Kommunikationssysteme und Dienste für Drohnen wird in Zusammenarbeit mit Drohnen Herstellern angestrebt. Für die Ermittlung der Anforderungen an die Integration in neue Drohnen Modelle und die Anpassung des Funktionsumfangs für spezielle Anwendungen wurden bereits Vereinbarungen getroffen. Erste Proof-of-Concept Tests sind mit dem Bremer Drohnen- und Sensor-Hersteller OptoPrecision und dem U-Space Service Provider b.r.m. zum Zeitpunkt der Verfassung dieses Berichts in Planung und werden voraussichtlich im Oktober 2025 durchgeführt.

Zusätzlich zur Steuerung und Positionskontrolle erfordern Einsätze für Umwelt Überwachung und den Schutz kritischer Infrastrukturen die Übertragung größerer Datenmengen über große Entfernungen. Die Erweiterung der VEREDUS Kommunikationslösung auf Nutzdatenübertragung würde das Verwertungspotenzial signifikant erhöhen.

In schlecht versorgten Gebieten ist die Nutzdatenübertragung nur über breitbandige (statt der in VEREDUS genutzten schmalbandigen) Satellitenverbindungen möglich. Diese können mittels der neuen Low Earth Orbit (LEO) Konstellationen realisiert werden. Starlink und OneWeb sind die derzeit bereits verfügbaren Satellitensysteme. Für die oben genannten Anwendungen ist aus Sicherheits- und Zuverlässigkeitsgründen OneWeb nutzer- bzw. kundenseitig bevorzugt.

MediaMobil hat nach Abschluss des Vorhabens bereits Tests mit OneWeb Flachantennen durchgeführt, die auch für den Betrieb auf Drohnen mittlerer Größe geeignet sind (Nutzlast ab ca. 20 kg). Bei erfolgreicher Integration in Drohnen wäre damit eine leistungsfähige Satellitenkomponente für die Übertragung der VEREDUS Daten vorhanden, die auch zum Senden von Nutzdaten, wie z.B. Video Streams, hochauflösenden Bildern und anderen Sensordaten, während des Flugs genutzt werden könnte. Dies würde das Anwendungspotenzial der VEREDUS Entwicklungen wesentlich vergrößern.

Um die Marktakzeptanz und Verwertungsmöglichkeiten weiter zu erhöhen, sollten die neuen 5G Mobilfunkstandards, insbesondere für sog. Vehicle-to-Everything (V2X) Anwendungen, auch für die Drohnenkommunikation über Satellitenverbindungen angewendet werden.

| | | |
|--|--|-------------------------------|
|  MediaMobil | VEREDUS Teilvorhaben Redundante UAV Kommunikationsnetze Abschlussbericht | 08.09.2025 Seite 30 von 31 |
|--|--|-------------------------------|

Daraus ergeben sich folgende Schritte für die erfolgreiche Umsetzung der Ergebnisse:

- Use Cases für Direct-to-Satellite V2X Services für Drohnen identifizieren, User- und System Anforderungen ermitteln.
- Realisierbarkeit sog. Non-Terrestrial Network (NTN) V2X Services auf Basis der 3GPP 5G Terrestrial Network Standards (TN) für Drohnen prüfen.
- Systemkonzept für integrierte, unterbrechungsfreie 5G TN/NTN V2X Services für Drohnen entwickeln.
- Services für U-Space Service Provider (USSP) definieren und entwickeln.
- Demonstrator aufbauen, Performance demonstrieren und validieren (durch Simulation/Emulation und über reale LEO Satelliten).


Erste Arbeiten werden derzeit bereits von MediaMobil gemeinsam mit Drohnenherstellern und einem USSP durchgeführt. Parallel dazu ist die Durchführung eines entsprechenden Folgevorhabens gemeinsam mit den VEREDUS Partnern geplant.

Seitens MediaMobil ist das strategische Ziel, die Ergebnisse zur Entwicklung eines neuen Geschäftsfelds Kommunikationslösungen und Dienste für Drohnen zu verwerten.

Wir gehen derzeit davon aus, dass erste kommerzielle Dienste in der ersten Jahreshälfte 2026 realisiert sein können.

4.1. Externe Fortschritte während der Durchführung des Vorhabens

Für die im Rahmen des Teilvorhabens durchgeführten Arbeiten, insbesondere die direkte Drohne-zu-Drohne Datenübertragung über C-V2X Verbindungen sowie die Implementierung optimierter Übertragungsprotokolle für die Nutzung redundanter Funk- und Satellitenverbindungen, sind MediaMobil keine Ergebnisse Dritter bekannt.

| | | |
|---|---|--|
|  | <p style="text-align: center;">VEREDUS Teilvorhaben Redundante UAV Kommunikationsnetze Abschlussbericht</p> | <p style="text-align: right;">08.09.2025 Seite 31 von 31</p> |
|---|---|--|

5. Veröffentlichungen

Im Rahmen des Verbundprojektes VEREDUS sind mehrere wissenschaftliche Veröffentlichungen verfasst worden. MediaMobil war an zwei der Veröffentlichungen beteiligt, da diese in Teilen die durch MediaMobil erarbeiteten Konzepte, Architekturen und Ergebnissen zum Inhalt hatten.

Zu folgenden Veröffentlichungen hat MediaMobil Beiträge geliefert:

- „Distributed Position Control in UAS-Networks: Challenges and Requirements“ von Marks et al.
- „Design and Implementation of a Multi-Link Modem for Future UAS Networks“ von Fuger et al.

6. Literaturverzeichnis

[1] Muhammad Asghar Khan, Ijaz Mansoor Qureshi, Fahimullah Khanzada: A Hybrid Communication Scheme for Efficient and Low-Cost Deployment of Future Flying Ad-Hoc Network (FANET), Drones 2019, 3, 16; doi:10.3390/drones3010016, Feb 2019

[2] Antonio Guillen-Perez, Maria-Dolores Cano: Flying Ad Hoc Networks: A New Domain for Network Communications, Sensors 2018, 18, 3571; doi:10.3390/s18103571, Oct 2018

[3] Riham Altawy, Amr M. Youssef: Security, Privacy, and Safety Aspects of Civilian Drones: A Survey, ACM Transactions on Cyber-Physical Systems, Vol. 1, No. 2, Article 7, Nov 2016

[4] Imad Jawhar, Nader Mohamed, Jameela Al-Jaroodi, Dharma P. Agrawal, Sheng Zhang: Communication and networking of UAV-based systems: Classification and associated architectures, Journal of Network and Computer Applications 84, 93–108, 2017

[5] Niharika Agrawal: New Reconfigurable L-Band Digital Aeronautical Communication System, arXiv:1809.06033v2 [eess.SP] Dec 2018

[6] Adnan Nadeem, Turki Alghamdi, Ali Yawar, Amir Mehmood, Muhammad Shoaib Siddiqui: A Review and Classification of Flying Ad-Hoc Network (FANET) Routing Strategies, Journal of Basic and Applied Scientific Research, 8(3)1-8, 2018

[7] Miguel Itallo B. Azevedo, Carlos Coutinho, Eylon Martins Toda, Tassio Costa Carvalho and José Jailton: Wireless Communications Challenges to Flying Ad Hoc Networks (FANET), DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.86544>