



**BMBF FORSCHUNGSPROGRAMM „SOVERÄN. DIGITAL. VERNETZT.“**

**6G-ICAS4Mobility**  
**FKN: 16KISK230**

**Sachbericht zum Verwendungsnachweis**

**Teil 2: Eingehende Darstellung**

Version: V1.00

Datum: 05.04.2026

Ersteller: D. Novotny

## Ziele und Aufgabenstellung des Teilvorhabens

### Einordnung in das Gesamtprojekt 6G-ICAS4Mobility

Das Verbundprojekt 6G-ICAS4Mobility wurde im Rahmen des BMBF-Forschungsprogramms „Souverän. Digital. Vernetzt.“ gefördert und hatte eine Laufzeit von 36 Monaten (01.10.2022 – 30.09.2025, verlängert bis 31.12.2025). Es vereinte 15 Partner aus Industrie und Wissenschaft unter der Koordination der Robert Bosch GmbH und verfolgte das übergeordnete Ziel, im Zuge der Entwicklung der sechsten Mobilfunkgeneration (6G) bislang getrennt betriebene Kommunikations- und Sensierungsfunktionalitäten enger miteinander zu koppeln und zu integrieren. Dieses Konzept der Integrated Communication and Sensing (ICAS) gilt als eine Schlüsselinnovation für künftige 6G-Systeme, da es durch eine gemeinsame Nutzung von Funkspektrum, Hardware und Signalverarbeitung eine hohe Ressourceneffizienz und einen geringeren Energieverbrauch verspricht sowie vollständig neue Funktionalitäten ermöglicht, wie beispielsweise die multistatische Sensierung über mehrere verteilte Teilnehmer hinweg.

Der inhaltliche Fokus des Gesamtvorhabens lag auf mobilen Anwendungen im Kontext Automotive und Flugdrohnen sowie auf der Endgeräteseite mit einer direkten Kommunikation über den sogenannten Sidelink zwischen den beteiligten Geräten. Die Projektstruktur gliederte sich in sechs Arbeitspakete: AP1 umfasste das Projektmanagement und die externe Kommunikation der Ergebnisse; AP2 analysierte relevante Anwendungsfälle und Anforderungen; AP3 erarbeitete eine ganzheitliche Gesamtsystemarchitektur einschließlich der erforderlichen technischen Enabler; AP4 verfolgte einen kommunikationszentrierten Ansatz ausgehend vom 5G-Sidelink; AP5 verfolgte komplementär dazu einen sensierungscentrierten Ansatz ausgehend von bestehenden Radarsystemen; AP6 diente der praktischen Umsetzung und umfassenden Evaluierung wesentlicher Konzepte in Form von vier Proof-of-Concept-Demonstrationen. Die aeroDCS übernahm die Leitung von AP6 und war an allen weiteren Arbeitspaketen beteiligt.

Im Verlauf des Projekts schied der Partner Merantix Labs GmbH aus dem Konsortium aus. Die von Merantix ursprünglich vorgesehenen Aufgaben im Bereich KI-gestützter Embedded-Systems wurden angepasst und u.a. auf die TU Ilmenau und Hensoldt übertragen. Im Zusammenhang mit dieser Neuverteilung erhielt aeroDCS einen Unterauftrag der TU Ilmenau zur Entwicklung eines Softwarewerkzeugs für die Erfassung, Verarbeitung und Vernetzung von 3D-Daten aus optischen Distanzmesssystemen. Dieses Werkzeug sollte als Grundlage für die Objekterkennung im Kontext der BiRa-Messkampagnen dienen und ist nachfolgend in den Arbeiten zu AP5 beschrieben.

## **Spezifische Ziele des Teilvorhabens der aeroDCS**

Das Teilvorhaben von aeroDCS trägt den Titel „Entwicklung und Erprobung einer kooperativen Nutzung und Fusion flugbasierter Sensorik für ICAS“. Das übergeordnete Ziel, wie in der Teilvorhabenbeschreibung (TVB, Abschnitt 1.2) formuliert, ist die praktische Erprobung der ICAS-Funktionalitäten und die Erarbeitung eines konkreten Proof-of-Concepts. Das Teilvorhaben schließt sich damit nahtlos an die bereits vor Projektbeginn durch aeroDCS durchgeführten 5G-Anwendungsprojekte (SmarterWeinberg, 5G-Nationalpark) an und überführt die dort gewonnenen Erfahrungen mit praxisorientierter UAV-Anwendungsentwicklung in den 6G-Kontext.

Als zentrales Anwendungsbeispiel war laut TVB die Integration der ICAS-Technik auf Drohnen mit Fokus auf schnellfliegende VTOL-Systeme vorgesehen, mit dem Ziel, ein kombiniertes Echtzeit-Lagebild aller am Schwarmflug beteiligten UAV zu berechnen und den jeweils anderen Teilnehmern über den Sidelink zur Verfügung zu stellen. Darüber hinaus sollte aeroDCS die Sense-and-Avoid-Funktionen, die sich durch die 6G Technologie ermöglichen, erforschen.

Im Einzelnen lassen sich die Ziele des Teilvorhabens gemäß TVB den Arbeitspaketen wie folgt zuordnen:

- AP 1 – Management und Dissemination: Externe Projektkommunikation über Homepage und Social Media; Abgleich mit anderen Projekten und Normungsgremien, in denen aeroDCS aktiv ist; Koordination und administratives Projektmanagement.
- AP 2 – Anwendungsfälle: Analyse von ICAS-Anwendungsfällen speziell für UAV-Missionen. Bewertung des effizienten und sicheren kooperativen Betriebs heterogener Systeme im gemeinsam genutzten Luftraum.
- AP 3 – Systemarchitektur: Erweiterung bestehender aeroDCS-Prozesse um den kommunikationszentrierten Ansatz; Verortung der Geopositionen; Erarbeitung generischer Modelle für dynamische Aufgabenverteilungen; Konzepte für multistatisches Multiplattform-Tracking.
- AP 4 – Kommunikationszentrierter Ansatz: Zugriff auf und Bereitstellung sensorinterner Positionsdaten und Sensordateninhalte für kooperative Echtzeitmissionen unterschiedlicher Träger; Integration des HHI-Sidelink-Moduls; Parallelbetrieb von Kommunikation und bordeigenem Sensorik für Sense-and-Avoid und GPS-denied Navigation als wesentliche Sicherheitskriterien für BVLOS-Einsätze.
- AP 5 – Sensierungszentrierter Ansatz: Analyse des Doppler-Effekts zur Trajektorien-schätzung und Fremdobjekterkennung; Echtzeitmessungen und Analyse der bistatischen Radarrückstreuung typischer Zielobjekte (Drohnen, Fahrzeuge) mit Mikrodoppler-Effekten in der BiRa-Messkammer der TU Ilmenau
- AP 6 – Proof-of-Concept: Koordination aller PoCs sowie Durchführung der drohnenbezogenen Demonstrationen (PoC-3, PoC-4) mit heterogenen UAV-Schwärmen unter realen Außenbedingungen; Eignungsanalyse echtzeitfusionierter Daten; kooperativer Betrieb mit bemannten Luftfahrzeugen im Shared Airspace.

### **Bewertung der Zielerreichung:**

Die übergeordneten Ziele in AP 1 (Öffentlichkeitsarbeit, Koordination, Normierungsabgleich), AP 2 (Use-Case-Analyse und zweite Iterationsrunde mit KPI-Definition), AP 3 (Architekturverifikation) sowie AP 5 (bistatische Mikrodoppler-Messungen) wurden vollständig oder übertroffen erreicht.

### **Teilweise erreichte Ziele und Abweichungen:**

In AP 4 konnte die geplante Sense-and-Avoid-Funktionalität nicht in Echtzeit realisiert werden, da die verfügbare bordeigene Rechenleistung für eine Echtzeit-Punktwolkenfusion nicht ausreichte. Die Verarbeitung wurde in den Offline-Betrieb verlagert. Auch die GPS-denied Navigation wurde konzeptionell erarbeitet, konnte jedoch nicht als vollintegriertes Bordsystem umgesetzt werden. Zudem erwies sich die Reichweite des in AP4 entwickelten Sidelink-Moduls unter realen Flugbedingungen mit ca. 30m, sowie die Zuverlässigkeit der Verbindung als zu gering für den angestrebten autonomen BVLOS-Betrieb im Shared Airspace. Im Verlauf des Projekts trat ebenfalls die europäische U-Space-Verordnung in Kraft. Darin wurden die regulatorischen Rahmenbedingungen für Schwarmflüge und BVLOS-Betrieb im Projektverlauf konkretisiert. Dadurch wurde klargestellt, dass zertifizierungsfähige Sense-and-Avoid-Systeme als Voraussetzung für BVLOS-Genehmigungen gelten. Dies stellt eine wesentliche regulatorische und technische Hürde dar, da eine Zertifizierung im Projektrahmen in dieser Komplexität nicht eingeplant und auch zeitlich nicht möglich ist.

In AP 6 / PoC-3 war geplant, eine Drohne mit einem Antennen-Array zur erweiterten Sensierung auszustatten. Diese konnte aufgrund anhaltender EMV-Probleme nicht sicher in Betrieb genommen werden. Diese wurde zwar aufgebaut, wurde aber im Rahmen von PoC-3 aus den genannten Gründen nicht geflogen.

In AP 6 / PoC-4 war ein Schwarmflug mit 3–5 Drohnen vorgesehen. Durchgeführt wurde der PoC mit 2 Drohnen und 2 Bodenstationen, da das HHI insgesamt 4 SDR-Einheiten bereitstellte und die HHI-Sidelink-Implementierung ausschließlich als Punkt-zu-Punkt-Verbindung realisiert war, was je UAV eine eigene Bodenstation erforderte. Das Kernziel der Demonstration der Sensordatenfusion zweier UAVs über Sidelink wurde dennoch erreicht, indem die Datenfusionierung am Boden demonstriert wurde. Der in der TVB beschriebene kooperative Betrieb mit bemannten Luftfahrzeugen im Shared Airspace konnte im Rahmen des Projekts nicht erprobt werden. Dieser Aspekt ist Gegenstand zukünftiger Forschungsvorhaben.

Die Abweichungen zwischen im Projektantrag formulierten den tatsächlich erreichten Zielen sind auf technische Randbedingungen zurückzuführen, die den aktuellen Reifegrad von 6G-Sidelink-Hardware und bordeigener Rechenleistung unter realen Bedingungen widerspiegeln. Es ist zu erwarten, dass mit einer weiteren Verbreitung der 6G Technologie die Geräte deutlich leistungsfähiger und zuverlässiger werden als die im Rahmen des Projektes zur Verfügung stehenden Prototypen.

## **Wissenschaftlicher und technischer Ausgangspunkt**

Zum Projektbeginn (Oktober 2022) befand sich die Integration von Kommunikation und Radar-Sensierung (ICAS) noch weitgehend im Stadium akademischer Grundlagenforschung. Obwohl Funkkommunikation und Funksensorik gemeinsame physikalische Grundlagen teilen, wurden beide Disziplinen traditionell getrennt entwickelt. Existierende Fahrzeugradare (FMCW, 77-GHz-Systeme) waren auf analoge Realisierungen und den „Ego-Blick“ des jeweiligen Fahrzeugs ausgelegt. Eine gleichzeitige digitale Hochraten-Datenübertragung war systembedingt nicht vorgesehen. Für ICAS in Infrastrukturarchitekturen (Basisstationen als monostatisches Radar im Full-Duplex) lagen erste Konzepte vor. Für die direkte Fahrzeug-zu-Fahrzeug- bzw. UAV-zu-UAV-Kommunikation (Sidelink, PC5) fehlten hingegen sowohl Systemkonzepte als auch praktische Erfahrungen zum Projektzeitpunkt nahezu vollständig.

Im Bereich unbemannte Luftfahrzeuge war aeroDCS zum Zeitpunkt der Antragstellung bereits als professioneller Dienstleister für Luftbildvermessung, Photogrammetrie und Geodatenerhebung tätig und verfügte über umfangreiche Erfahrung im Betrieb heterogener UAV-Flotten (Multikopter, Starrflügler) im kommerziellen Bereich unter den entsprechenden regulatorischen Randbedingungen. Das verbundene Unternehmen Lange Research Aircraft entwickelt wasserstoffbetriebene, alternativ bemannte und unbemannte Flugzeuge mit 21m Spannweite, was aeroDCS eine breite Systemkenntnis über verschiedene Flugzeugklassen hinweg verschaffte. Kenntnisse im Bereich Sensorik (optisch, LiDAR, multispektral), Missionsplanung und regulatorischen Anforderungen bildeten die operative Basis.

Im Bereich 6G-Sidelink und ICAS für UAVs war der Stand der Technik bei Projektbeginn dadurch charakterisiert, dass kommerzielle 5G-Sidelink-Hardware noch nicht für den Einsatz auf Drohnen verfügbar war, und dass erste SDR-basierte (Software-Defined Radio) Forschungsprototypen gerade entwickelt wurden. Multistatische und bi-statische Radarszenarien mit kooperierenden UAVs als verteilte Sensorplattformen waren in der wissenschaftlichen Literatur bis dahin kaum untersucht. Insbesondere Mikrodoppler-Signaturen von Drohnen in bistatischer Konfiguration lagen nach aktuellem Kenntnisstand zum Projektbeginn noch nicht dokumentiert vor. Gerade diese Technik eröffnet aber im kommerziellen Betrieb interessante Optionen.

Der Neuheitswert des Teilvorhabens aeroDCS bestand somit in der Verbindung von praktischem UAV-Betrieb und Systemintegrationskompetenz mit den radiometrischen Forschungsarbeiten der akademischen Partner, um ICAS-Konzepte erstmals unter realen Außenflugbedingungen mit heterogenen Drohnenschwärmen zu erproben sowie typische Radarsignaturen verschiedener Drohnentypen für die Objekterkennung zu generieren und für andere interessierte Gruppen zur Verfügung zu stellen. Es wurde also wichtige Pionierarbeit geleistet, mit all den sich dabei ergebenden Herausforderungen.

## Durchgeführte Arbeiten je Arbeitspaket

### AP 1 – Management und Verbreitung der Projektergebnisse

#### Geplant (6 PM):

Laut TVB sollte aeroDCS in AP 1 die externe Projektkommunikation über Homepage und Social Media (LinkedIn) übernehmen, den Abgleich mit laufenden 5G-Projekten sicherstellen, administrative Beschaffungs- und Managementaufgaben übernehmen sowie, wo möglich, den Normierungsabgleich durchführen.

#### Durchgeführte Arbeiten:

Die Arbeiten in AP 1 wurden planmäßig und vollständig durchgeführt. Über die gesamte Projektlaufzeit hinweg an den Konsortiumsmeetings teilgenommen sowie Face-to-Face-Meetings vor- und nachbereitet. Nach dem Ausscheiden des Partners Merantix Momentum übernahm aeroDCS vorübergehend erweiterte Koordinationsaufgaben, um die Neuverteilung der freigewordenen Aufgaben auf verbleibende Partner zu organisieren.

Im Bereich Öffentlichkeitsarbeit wurden kontinuierlich Projektberichte auf der aeroDCS-Website sowie Beiträge auf LinkedIn und Instagram veröffentlicht. Das Projekt wurde auf folgenden Veranstaltungen öffentlichkeitswirksam präsentiert:

- Eröffnung der BiRa-Messkammer der TU Ilmenau (06/2023)
- Nacht der Technik Koblenz (10/2023 und 11/2025)
- Forst3-Konferenz Erfurt (03/2024)
- 6G-Conference Berlin (06/2024) mit Live-Präsentation einer VTOL-Drohne
- InterGeo Stuttgart (09/2024)
- Besuch der Landtagsabgeordneten Schellhammer (08/2025)

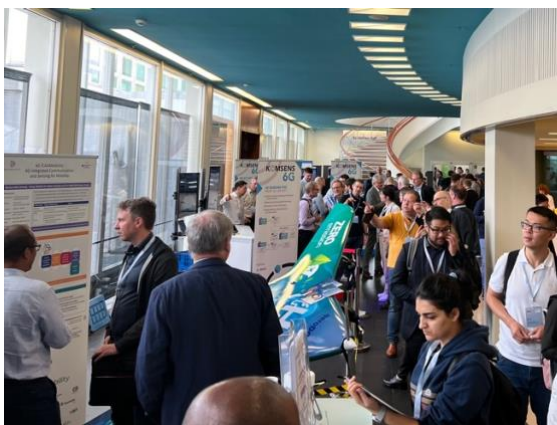


Abbildung 1: 6G Conference



Abbildung 2: 6G Conference

Der Normierungsabgleich erfolgte über die bestehende Beteiligung von aeroDCS in DKE-Gremien (Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik), die sich mit der **Normung und Standardisierung** in den Bereichen Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik beschäftigt. Zusätzlich wurden der Austausch und die Koordination mit verwandten 5G-Anwendungsprojekten (NoLa, SmarterWeinberg, 5G-Nationalpark) durchgeführt, um Konsistenz zwischen den Projekten herzustellen.

### **Abweichungen:**

Keine wesentlichen Abweichungen. Der Ressourcenaufwand von 6 PM wurde planmäßig eingesetzt.

## **AP 2 – Anwendungsfälle und Anforderungen**

### **Geplant (6 PM):**

aeroDCS sollte sich auf die Analyse von Anwendungsfällen für UAV Missionen konzentrieren, den Bedarf an kooperativem Betrieb heterogener Systeme analysieren sowie Anforderungen bzgl. Erkennung und Kommunikation erarbeiten. Die Analyse war in zwei Iterationen vorgesehen.

### **Durchgeführte Arbeiten:**

In enger Zusammenarbeit mit dem Partner CiS Rostock erarbeitete aeroDCS 7 von insgesamt 11 drohnenbezogenen Use-Cases. Grundlage hierfür bildeten intensive Abstimmungsgespräche mit Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS), darunter Feuerwehr, Polizei, Rettungsdienst, THW und Katastrophenschutz, um praxisnahe und gesellschaftlich relevante Szenarien zu entwickeln. Die Ergebnisse flossen direkt in die Diskussion mit den Projektpartnern ein und wurden in den Use-Cases berücksichtigt. Diese finden sich im Abschlussbericht des AP2.

Weiterhin wurden die erarbeiteten Use-Cases in übergeordnete Tech-Cases konsolidiert, welche die technischen Anforderungen systematisch abstrahieren. Diese Tech-Cases fanden über den regulären Projektrahmen hinaus Eingang in das Use-Case-Whitepaper der 6G-Plattform Deutschland (Arbeitsgruppe WG4), was die überregionale Relevanz der erzielten Ergebnisse unterstreicht.

In der zweiten Iteration (ab M18) wurden die Use-Cases auf Basis der zwischenzeitlich gewonnenen Projekterfahrungen aus den anderen Arbeitspaketen einer kritischen Revision unterzogen und KPIs für Quality-of-Sensing und Kommunikationsleistung auf empirischer Grundlage neu definiert.

### **Abweichungen:**

Keine wesentlichen Abweichungen. Der Ressourcenaufwand von 6 PM wurde planmäßig eingesetzt.

## **AP 3 – Gesamtarchitektur, Schnittstellen und Enabler**

### **Geplant (5 PM):**

aeroDCS sollte in AP 3 die Systemarchitektur auf UAV-spezifische Anforderungen hin verifizieren (Latenz, Datenmenge, Sensorvielfalt, dynamische Aufgabenverteilung) und eine Validierung durchführen.

### **Durchgeführte Arbeiten:**

In AP 3 wurde die Gesamtsystemarchitektur systematisch auf ihre Eignung für UAV-Anwendungen überprüft. Hierbei standen insbesondere niedrige End-to-End-Latenzanforderungen, die hohen Datenmengen bei multisensorischen Drohnenaufbauten sowie die Notwendigkeit dynamischer, kontextbezogener Aufgabenverteilung in Systemen im Vordergrund.

Dabei erfolgte die Validierung der Architektur durch aktive Zusammenarbeit mit CiS. Dieser Abgleich stellte sicher, dass die erarbeiteten Architekturen auch unter realen Bedingungen und mit vorhandener Betreiberinfrastruktur konsistent und zukunftsfähig sind.

### **Abweichungen:**

Keine wesentlichen Abweichungen. Die Arbeiten wurden im geplanten Umfang von 5 PM abgeschlossen.

## **AP 4 – Kommunikationszentrierter Ansatz**

### **Geplant (9 PM):**

Laut TVB sollte aeroDCS in AP 4 den externen Zugriff auf sensorinterne Positionsdaten untersuchen und für kooperative Echtzeitkommunikation bereitstellen. Weiterhin waren die mechanische und softwareseitige Integration des HHI-Sidelink-Moduls in verschiedene Drohnentypen, die Erprobung einer TCP/IP-basierten Infrastruktur sowie die Entwicklung von Konzepten für Sense-and-Avoid und GPS-denied Navigation vorgesehen. Die Ergebnisse sollten die Grundlage für PoC-4 in AP 6 bilden.

### **Durchgeführte Arbeiten:**

Als erste Aufgabe wurde eine geeignete Kommunikationsinfrastruktur für die Sensordatenübertragung konzipiert und bewertet. Nach Analyse verschiedener Optionen wurde eine TCP/IP-basierte Architektur als flexibelste und zugleich praktikabelste Lösung identifiziert, da sie eine Vielzahl von Sensordaten und Konfigurationen ohne aufwendige manuelle Anpassungen übertragen kann. Sensoren ohne native TCP/IP-Schnittstelle (etwa bestimmte Kamera- und LiDAR-Systeme) lassen sich mittels einfacher Einplatinenrechner (z.B. Raspberry Pi) einbinden, was die Universalität des Ansatzes unterstreicht.

Die mechanische Integration des HHI-Sidelink-Moduls in verschiedene Drohnentypen wurde per CAD-Design konzipiert und umgesetzt. Das Modul stellte aufgrund seines Gewichts von ca. 2,5 kg und einer Stromaufnahme von bis zu 9 A (Peak) erhebliche Anforderungen an die Traglast und das Energieversorgungssystem der eingesetzten

## 6G-ICAS4Mobility Sachbericht: Teil 2

---

UAVs. Für jeden Drohnentyp (u.a. Quadcopter verschiedener Hersteller) wurde eine individuell angepasste Halterung entwickelt und gefertigt.



Abbildung 3: Sidelink Implementierung an einer DJI M300 Drohne

Im Bereich Sensordatenfusion wurden initiale Labordatensätze mit verschiedenen Sensoren und die TCP/IP-basierte Übertragung evaluiert. Diese Arbeiten dienen als Vorbereitung für PoC-4 und bildeten gleichzeitig die Datenbasis für die Auswahl geeigneter Algorithmen.

### **Abweichungen:**

- Sense-and-Avoid in Echtzeit: Die geplante Echtzeit-Erkennung und Ausweichreaktion auf Basis bordeigener Punktwolkenfusion konnte nicht realisiert werden. Die verfügbare Rechenleistung der eingesetzten Bordcomputer war für die Echtzeitverarbeitung hochvolumiger 3D-Punktwolken nicht ausreichend. Die Punktwolkenfusion wurde daher in den Offline-Nachgang verlagert, was die angestrebten Forschungsziele für die Analyse und Modellierung nicht beeinträchtigte. Durch den Offline-Nachgang können die zur Bearbeitung der real aufgenommenen Daten, die erforderliche Algorithmen und die dafür notwendige Rechnerleistung deutlich präzisiert werden.

- Sidelink-Reichweite und BVLOS-Betrieb: Die Reichweite des HHI-Sidelink-Moduls erwies sich unter realen Außenflugbedingungen als nicht ausreichend für den ursprünglich angestrebten BVLOS-Betrieb. Der realistische Einsatzbereich des Moduls war auf Sichtweite (VLOS) und nahe Außenbereiche beschränkt. Weiterhin führten spontane Verbindungsabbrüche dazu, dass das Modul erst neu gestartet werden musste, bevor die Datenverbindung wieder aktiv war, was einen zuverlässigen Betrieb nicht ermöglichte. Die GPS-denied Navigation wurde konzeptionell ausgearbeitet, konnte aber aufgrund der oben genannten technischen Einschränkungen und der damit begrenzten Echtzeitfähigkeit der Sensordatenverarbeitung nicht zum vollintegrierten System ausgebaut werden. Sobald die Hardware mit der entsprechenden Leistungsfähigkeit zuverlässig zur Verfügung steht können die Konzepte rasch umgesetzt werden, da schon gute Konzepte vorliegen

Diese Abweichungen spiegeln den Forschungscharakter des Vorhabens wider: Es werden konkrete technologische Lücken und Herausforderungen deutlich, die für zukünftige 6G-ICAS-Entwicklungen adressiert werden müssen, insbesondere hinsichtlich leichtgewichtiger Hochleistungs-Onboard-Computer sowie erhöhter Sidelink-Reichweite und Zuverlässigkeit. Im Labor sind viele der aufgetretenen Probleme nicht zu erkennen.

## **AP 5 – Sensierungszentrierter Ansatz**

### **Geplant (12 PM):**

aeroDCS sollte bistatische Mikrodoppler- und Reflektivitätsmessungen verschiedener Drohnen, in Zusammenarbeit mit der TU Ilmenau, in der BiRa-Messkammer durchführen, damit auf dieser Basis KI-gestützte Algorithmen zur Objektklassifikation erproben werden können (Merantix).

### **Durchgeführte Arbeiten:**

Für die Messungen in der BiRa wurden verschiedene Drohrentypen mechanisch vorbereitet. Dabei wurde insbesondere ein System zur definierten PWM-gesteuerten Rotordrehzahlvariation entwickelt, um reproduzierbare Mikrodoppler-Signaturen für verschiedene Flugphasen (Start, Hover, Übergangflug, Reiseflug, Landung) zu erzeugen. Alle Messungen erfolgten in bistatischer Konfiguration unter Verwendung eines OFDM-basierten Kommunikationssignals, wie es typischerweise in ICAS-Szenarien vorkommt.

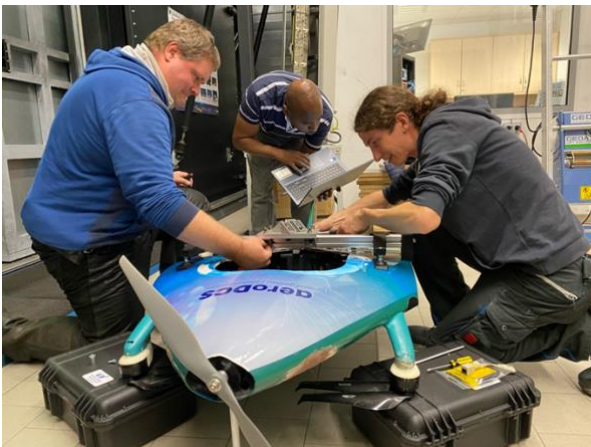


Abbildung 4: Installation des Befestigungssystems am VTOL



Abbildung 5: : Installation des Befestigungssystems am VTOL

Die Ergebnisse zeigen, dass sich unterschiedliche Flugphasen einer VTOL-Drohne anhand ihrer Mikrodoppler-Signaturen eindeutig unterscheiden lassen. Nach aktuellem Stand der Literatur wurden solche bistatischen Mikrodoppler-Signaturen von VTOL-Drohnen erstmals in diesem Projekt dokumentiert und veröffentlicht.

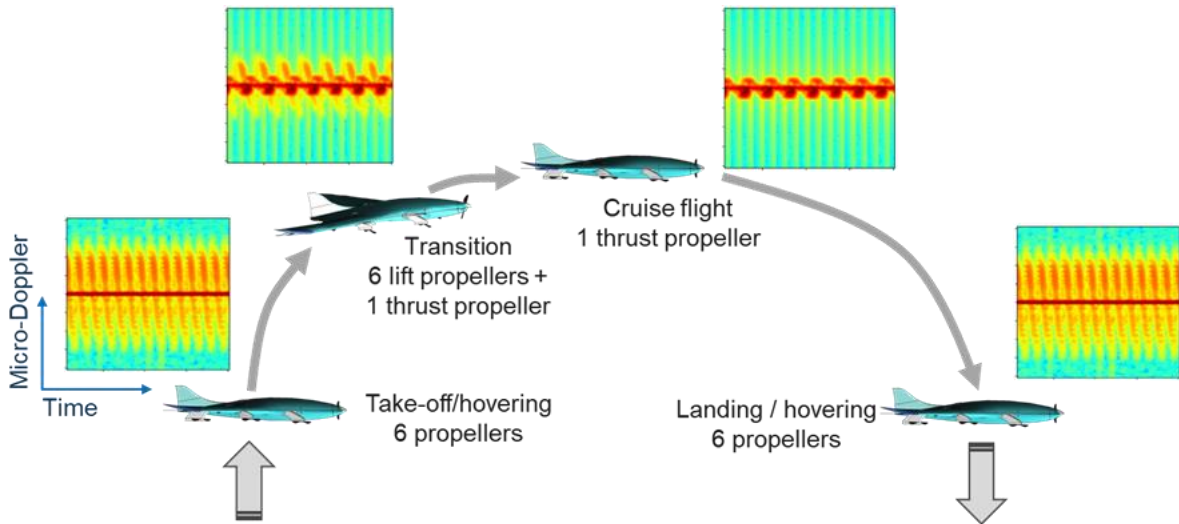


Abbildung 6: Signatur des VTOL über verschiedene Flugmodi (Bild: TU-Ilmenau)

Neben der VTOL Drohne wurden weitere Drohnen für die Messungen in der BiRa bereitgestellt und entsprechend vorbereitet.

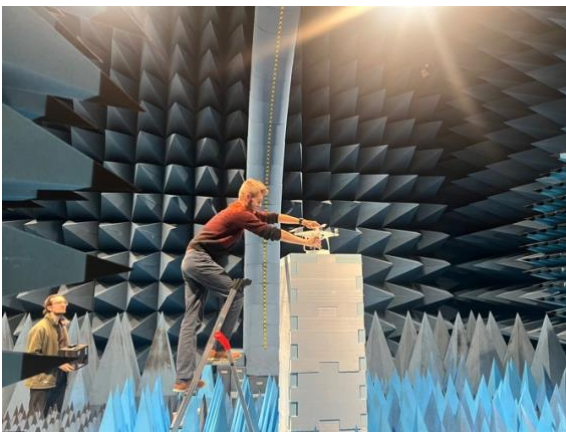


Abbildung 7: Phantom 4

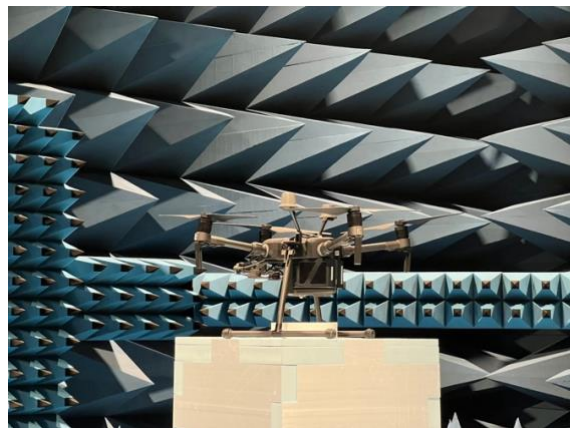


Abbildung 8: DJI M210

Über die ursprünglich geplanten Arbeiten hinaus erhielt aeroDCS infolge der Aufgabenneuverteilung nach dem Austritt von Merantix einen Unterauftrag der TU Ilmenau. Gegenstand war die Entwicklung eines Python-basierten Softwarewerkzeugs zur Erfassung, Verarbeitung und Vernetzung von 3D-Punktwolkendaten aus optischen Distanzmesssystemen, konkret der ToF-Kamera (Time of Flight Kamera, die Entfernungen auf der Basis der Laufzeiten von Licht mißt) Helios 2+, für die Integration in die Messprozesse der BiRa-Anlage. Dabei soll das Testobjekt mit seinen Strukturen genau erfasst und digital repräsentiert werden. Auf diesen digitalen Objekten sollen später Radar-Simulationen erfolgen.

Dabei wurde ebenfalls ein Programm von aeroDCS geschrieben, welches nach der Positionierung der Gantry Arme selbstständig eine Reihe von Aufnahmen mit unterschiedlichen Parametern ausführt und nach Erledigung ein Trigger an die BiRa sendet, damit die nächste Position angefahren werden kann. Somit lassen sich umfangreiche Aufnahmen, die mehrere Stunden dauern können, automatisiert durchführen.

## 6G-ICAS4Mobility Sachbericht: Teil 2

---

Die Erfassung der Punktwolkendaten des Zielobjekts erfolgt mithilfe der Time-of-Flight-Kamera Helios 2+. Dabei handelt es sich um eine 3D-ToF-Kamera, die auf dem rückseitig beleuchteten Sony DepthSense™ IMX556PLR CMOS-Sensor basiert und mit vier 850 nm VCSEL-Laserdioden arbeitet. Die Kamera liefert Tiefeninformationen mit einer Auflösung von 640 × 480 Pixeln bei einer Bildrate von 30 fps im Normalbetrieb sowie bis zu 103 fps im Hochgeschwindigkeitsmodus bei kürzeren Messdistanzen. Es können Distanzen von 0,3 m bis 8,3 m gemessen werden, wodurch die Kamera insbesondere für industrielle Anwendungen im mittleren Entfernungsbereich geeignet ist. Die Messgenauigkeit liegt im Nahbereich im Submillimeterbereich und nimmt mit zunehmender Entfernung moderat ab, bleibt jedoch im Millimeterbereich und ermöglicht somit eine präzise dreidimensionale Erfassung von Objektoberflächen.

Ein wesentlicher Bestandteil des Entwicklungsprozesses ist die Vorverarbeitung der Punktwolkendaten, da die Qualität der späteren Analyse und Rekonstruktion maßgeblich von der Datenqualität abhängt. Zunächst werden die Rohdaten, die typischerweise im PLY-Format vorliegen, importiert und auf strukturelle Integrität geprüft. Für weiterführende Verarbeitungsschritte erfolgt häufig eine Konvertierung in das LAS-Format, um spezialisierte Werkzeuge zur Rauschreduktion nutzen zu können. Die Entfernung von Ausreißern stellt dabei einen zentralen Schritt dar. Hierbei kommen sowohl radiusbasierte Filter, die isolierte Punkte anhand ihrer lokalen Nachbarschaft entfernen, als auch statistische Verfahren zum Einsatz, bei denen Punkte mit ungewöhnlich großen mittleren Abständen zu ihren Nachbarn als Ausreißer klassifiziert werden. Zusätzlich wird eine Voxel-basierte Downsampling-Methode angewendet, bei der die Punktwolke in ein dreidimensionales Raster unterteilt wird und pro Voxel nur ein repräsentativer Punkt erhalten bleibt. Dadurch wird die Datenmenge reduziert, ohne relevante geometrische Informationen zu verlieren. Abschließend erfolgt die Berechnung lokaler Oberflächennormalen, die für nachfolgende Registrierungsschritte und die Oberflächenrekonstruktion erforderlich sind.

Für eine vollständige Rekonstruktion ist häufig die Kombination mehrerer Punktwolken aus unterschiedlichen Perspektiven notwendig. Dieser Prozess, der als Registrierung oder Alignment bezeichnet wird, transformiert alle Punktwolken in ein gemeinsames Koordinatensystem. Zunächst erfolgt eine Reduktion der Datenmenge durch Downsampling und die Berechnung von Normalenvektoren. Anschließend wird ein überlappender Bereich zwischen den Punktwolken extrahiert und eine grobe Ausrichtung mithilfe merkmalsbasierter Verfahren durchgeführt. Hierzu werden Fast Point Feature Histograms (FPFH) berechnet, welche die lokale Geometrie charakterisieren. Die eigentliche Transformation wird mittels des robusten RANSAC-Algorithmus (Random Sample Consensus) bestimmt, der Rotation und Translation trotz vorhandener Ausreißer zuverlässig schätzt. Eine anschließende Feinregistrierung erfolgt mit dem Iterative Closest Point (ICP)-Algorithmus, der iterativ korrespondierende Punkte identifiziert und die Transformation schrittweise optimiert. Nach erfolgreicher Registrierung wird die berechnete Transformation auf die vollständigen Punktwolken angewendet und diese zu einer konsistenten Gesamtszene zusammengeführt.

Im letzten Schritt erfolgt die Generierung eines geschlossenen 3D-Oberflächenmodells durch Triangulation der registrierten Punktwolke. Ziel ist die Erstellung eines dreiecksbasierten Gitternetzes (Mesh), das für Visualisierung oder Simulation geeignet ist. Hierbei kommen etablierte Verfahren wie die Poisson Surface Reconstruction und der Ball Pivoting Algorithm zum Einsatz. Die Poisson-Rekonstruktion erzeugt eine glatte, kontinuierliche Oberfläche und schließt kleinere Lücken automatisch, während der Ball

## 6G-ICAS4Mobility Sachbericht: Teil 2

Pivoting Algorithm insbesondere für dichte Punktwolken geeignet ist und feine Details sowie scharfe Kanten zuverlässig rekonstruiert. Nach der Mesherstellung werden weitere Nachbearbeitungsschritte durchgeführt, wie das Schließen von Löchern, das Entfernen kleiner Fragmente und die Neuberechnung der Oberflächennormalen. Das Ergebnis ist ein präzises und konsistentes 3D-Modell der erfassten Struktur, dessen Detailgrad an spezifische Anwendungen, beispielsweise elektromagnetische oder Raytracing-Simulationen, angepasst werden kann.

Durch diese Oberflächenrekonstruktion via Dreiecksvermaschung entstehen vollständige 3D-Zielobjektmodelle, die sowohl für Objekterkennung als auch für Simulationen genutzt werden können.

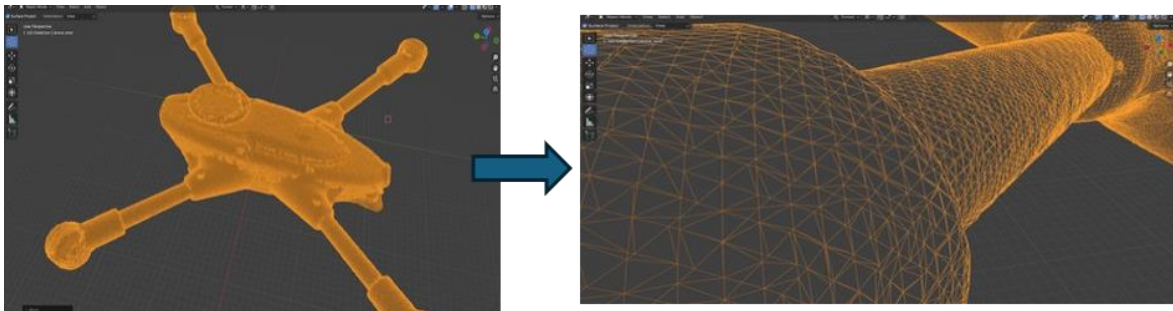


Abbildung 9: Oberflächenrekonstruktion

Veröffentlichungen, an denen mitgearbeitet wurde:

- Costa et al., Bistatic Micro-Doppler Analysis of a Vertical Takeoff and Landing (VTOL) Drone in ICAS Framework, GeMiC 2025
- Costa et al., Modelling the Micro-Doppler Signature of Multi-Propeller Drones in Distributed ICAS, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2025
- Teekha et al., Drone Detectivity, IRS 2025

### Abweichungen:

Der geplante Grundumfang der Messarbeiten wurde vollständig und planmäßig durchgeführt. Die Erweiterung durch das TORM-Werkzeug ist eine direkte Folge der Neuorganisation nach dem Merantix-Austritt und stellt einen projektspezifischen Mehrwert dar, der im ursprünglichen Arbeitsplan so nicht vorgesehen war.

## AP 6 – Praktische Untersuchungen und Proof-of-Concept Demonstration

### Geplant (25 PM):

aeroDCS übernahm laut TVB die Gesamtleitung von AP 6. Für PoC-1 und PoC-2 (fahrzeugbezogen) war eine koordinierende Rolle ohne eigenen Flugbeitrag vorgesehen. Für PoC-3 war geplant: Koordination und Durchführung eines Drohnen-Schwarmflugs mit 3–4 Drohnen mit 6G-Sidelink-Modul (TUIL) sowie optional einer weiteren Drohne mit Antennen-Array; bistatische Reflektivitätsmessungen an Fahrzeugen und Drohnen. Für PoC-4 war ein Schwarmflug mit 3–5 Drohnen über Sidelink geplant, bei dem eine echtzeitfähige Sensordatenfusion der einzelnen UAVs an einer Bodenstation demonstriert werden sollte.

**Durchgeführte Arbeiten:**

Bei den fahrzeugbezogenen PoCs übernahm aeroDCS die koordinierende Rolle gemäß Plan sowie das Einholen der Ergebnisse und das Zusammenführen in das Abschlussdokument. Ein eigenständiger Flugbeitrag war nicht vorgesehen und wurde auch nicht durchgeführt.

PoC-3 wurde im August 2024 erfolgreich durchgeführt. Insgesamt wurden 7 Drohnen verschiedener Typen eingesetzt, darunter CarryAir-Multikopter, CiS ORKA und DJI M210. Für die unterschiedlichen Drohnentypen der aeroDCS entwickelte und fertigte aeroDCS individuell angepasste Halterungen für das 6G-Sidelink-Modul der TU Ilmenau.



Abbildung 10: Integration an DJI M210



Abbildung 11: Integration in Carry Air

Im Vorfeld wurden umfangreiche Vortests im Freifeld bei Koblenz durchgeführt. Dabei traten erhebliche EMV-Probleme durch Einstreuungen des Sidelink-Moduls in die Drohnensteuerung auf. Diese wurden durch einen mehrstufigen Maßnahmenkatalog behoben: Integration von Netzfiltern in die Versorgungsspannung, vollständige HF-Abschirmung des Elektronikgehäuses sowie optimierte Antennenpositionierung außerhalb des Abschirmbereichs. Erst nach erfolgreicher Entstörung wurden die Drohnen als flugtauglich freigegeben.



Abbildung 12: Abschirmmaßnahme (Bild: TU-Ilmenau)

## 6G-ICAS4Mobility Sachbericht: Teil 2

Die Einholung aller notwendigen Genehmigungen sowie die Beachtung der regulatorischen Rahmenbedingungen stellten eine Voraussetzung und gleichzeitig eine große Herausforderung bei der Planung und Durchführung des Proof-of-Concept (PoC) dar. Dabei galt es, die rechtlichen Vorgaben der Luftfahrtbehörden zu berücksichtigen, die speziell für den Einsatz unbemannter Luftfahrzeuge gelten, einschließlich der Einholung der Aufstiegserlaubnisse, Beachtung der Luftraumbeschränkungen und Sicherheitsvorgaben. Erst die dritte Versuchsfläche konnte die rechtlichen Anforderungen erfüllen. aeroDCS übernahm die vollständige Flugplanung und die operative Regie während der Durchführung.



Abbildung 13: Schematische Darstellung des Setup

Die Drohnen operierten in Flughöhen von 25–40 m und führten definierte Schwarmmanöver aus, wobei zeitweise 6 Drohnen gleichzeitig in der Luft waren. Dabei wurden bistatische Reflektivitätsmessungen sowohl an Bodenfahrzeugen als auch an fliegenden Drohnen als Zielobjekte durchgeführt. Aus den Kanalmessungen von PoC-3 entstand ein öffentlich zugänglicher Channel-Sounding-Datensatz der TU-Ilmenau.

Scenario							Ped./Veh.	app.	meas.	desc	Total	Start Time	End Time	O1	O2	O3	O4	VTOL	M210			
	O1	O2	O3	O4	VTOL	M210																
<b>Block 1</b>											<b>27,5</b>	<b>10:00</b>	<b>10:27</b>	<b>16</b>	<b>10</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>10</b>	app = Approach time of the drones in minutes	
4.0								5,00		5	10:00	10:05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	meas. = measurement time in minutes
5.0	S							0,50	1,00	1,5		10:06		2	0	0	0	0	0	0	0	desc = Decent time in minutes
5.B	M				S			1,00	2,00	1,00	4	10:10		4	0	0	0	0	4	0	0	Total = total duration of the scene in minutes
5.A	M	S				S		1,00	3,00	1,00	5	10:15		5	5	0	0	0	0	5	0	Start Time = Start Time of this block
5.A	M	S				S		1,00	3,00	1,00	5	10:20		5	5	0	0	0	0	5	0	End Time = End Time of this block
4.B					M	M		2,00	3,00	2,00	7,00	10:27		0	0	0	0	0	7	7	0	O1 = Flight time ORKA 1 in minutes
Pause								30,00		30		10:57										
<b>Block 2</b>											<b>22</b>	<b>11:00</b>	<b>11:22</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>9</b>	<b>13</b>		
1.0	S	S	S	S				2,00	2,00	0,00	4	11:00	11:04	4	4	4	4	4	0	0	0	
1.A.1	S	S	S	S	M			1,00	3,00	1,00	5	11:09		5	5	5	5	5	5	0	0	
1.C	S	S	S	S		M		1,00	3,00	0,00	4	11:13		4	4	4	4	4	0	4	0	
1.A.2	S	S	S	S		M		1,00	3,00	1,00	5	11:18		5	5	5	5	5	0	5	0	
1.B.1	S	S	S	S	M	S		1,00	2,00	1,00	4	11:22		4	4	4	4	4	4	4	4	
Pause								90,00	0,00	90		12:52										
<b>Block 3</b>											<b>23</b>	<b>13:00</b>	<b>13:23</b>	<b>23</b>	<b>23</b>	<b>23</b>	<b>23</b>	<b>23</b>	<b>6</b>	<b>6</b>		
2.0	M	S	S	S				2,00	2,00	0,00	4	13:04		4	4	4	4	4	0	0	0	
2.C	M	S	S	S		S		2,00	4,00	1,00	7	13:11		7	7	7	7	7	0	0	0	
2.A	M	S	S	S		S		1,00	4,00	1,00	6	13:17		6	6	6	6	6	0	6	0	
2.B	M	S	S	S	S			1,00	4,00	1,00	6	13:23		6	6	6	6	6	6	0	0	
Pause								30,00		30		13:53										
<b>4</b>											<b>28</b>	<b>14:00</b>	<b>14:28</b>	<b>28</b>	<b>28</b>	<b>28</b>	<b>28</b>	<b>21</b>	<b>14</b>	<b>14</b>		
3.0	M	M	M					2,00	5,00	0,00	7	14:07		7	7	7	7	0	0	0	0	
3.A	M	M	M			S		1,00	5,00	1,00	7	14:14		7	7	7	7	7	7	7	7	
3.B	M	M	M			S		1,00	5,00	1,00	7	14:21		7	7	7	7	7	7	7	7	
4.A	M	M	M	M				1,00	5,00	1,00	7	14:28		7	7	7	7	7	7	0	0	

Abbildung 14: PoC3 Ablaufplanung der unterschiedlichen Flugmanöver

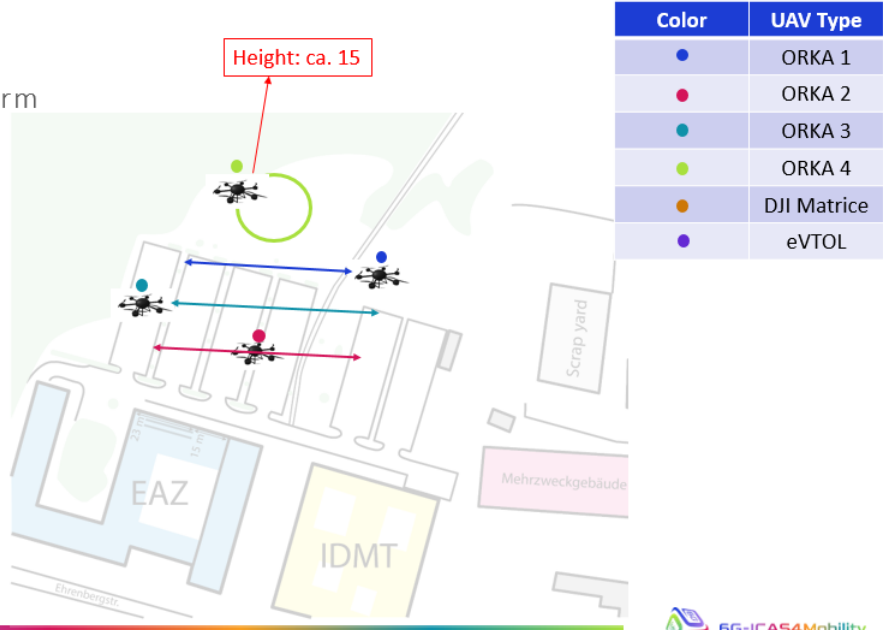
### Scenario 5

Scenario 5.3: UAV Swarm

3x Linear ORKA with different velocity  
1x circular trajectory ORKA

Approach sequence 4,3,1,2  
Approach time 120s  
Flight time 300s

Flight sequence Block 5



05.06.2024

© Robert Bosch GmbH 2023

PoC3 Scenarios

Project Internal

6G-ICAS4Mobility  
23

Abbildung 15: Beispiel der Planung eines einzelnen PoC3 Szenario

#### **Abweichung:**

Die geplante Drohne mit Antennen-Array wurde für PoC-3 mechanisch vorbereitet und auf dem Testgelände bereitgehalten. Aufgrund anhaltender EMV-Probleme, die trotz Entstörmaßnahmen beim Antennen-Array-Aufbau nicht vollständig behoben werden konnten, wurde entschieden, diese Drohne im Rahmen von PoC-3 nicht zu fliegen. Die Sicherheit der Umstehenden und der anderen Drohnen hatte Vorrang.

## 6G-ICAS4Mobility Sachbericht: Teil 2

Im PoC-4 wurde die Datenfusion optischer Sensordaten zweier UAVs über den HHI-Sidelink erprobt. Jede Drohne war mit einer Kamera ausgestattet und übermittelte ihre Sensordaten in Echtzeit via Sidelink an eine dedizierte Bodenstation. An den Bodenstationen erfolgte die Fusion der Bilddaten aus den individuellen Perspektiven beider UAVs zu einem gemeinsamen Lagebild. Die Demonstration war erfolgreich: die konzeptionelle Grundfunktionalität einer drohnengestützten, verteilten Sensordatenfusion via 6G-Sidelink wurde unter realen Bedingungen demonstriert.

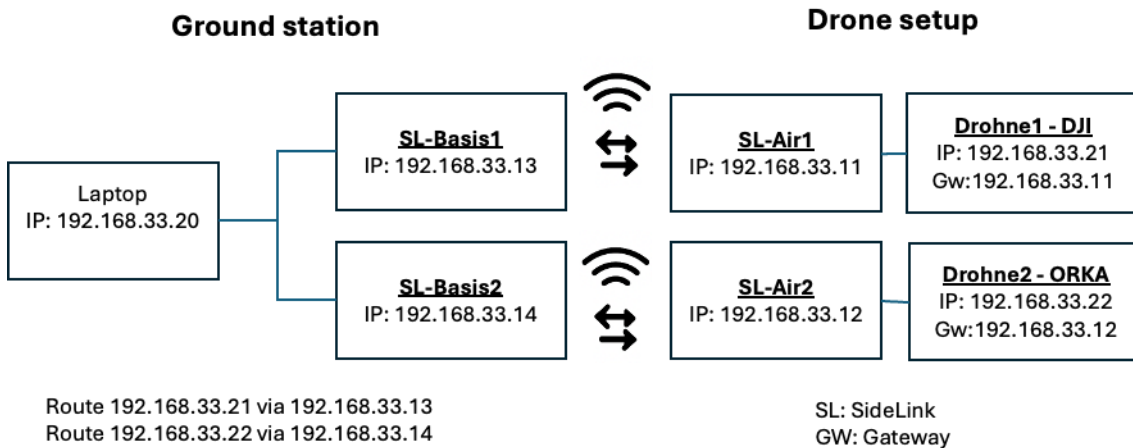


Abbildung 16: IP Setup der 4 SDR-Sidelink Implementierung des HHI im PoC4



Abbildung 17: Drohen mit HHI-Sidelink-Box beim PoC4



Abbildung 18: Aufnahme des "Target"

Aus den Daten wurde mit Structure from Motion Algorithmen (SfM) eine Punktwolke vom Sensor jeder Drohne erzeugt. Im Anschluss wurden die verschiedenen Punktwolken der Drohnen fusioniert, um ein möglichst vollständiges Bild der Umgebung zu erzeugen.

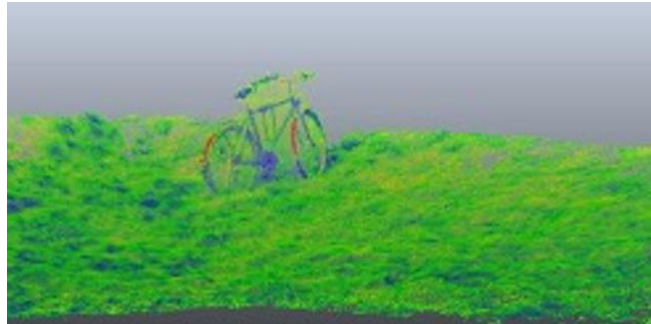


Abbildung 19: Eingefärbte Punktwolke die aus fusionierten Daten von zwei gleichzeitig operierenden Drohnen aufgenommen wurden

### **Abweichung:**

Statt der geplanten 3–5 Drohnen wurde PoC-4 mit 2 Drohnen und 2 Bodenstationen durchgeführt. Technische Ursachen bedingten den Programmwechsel: Erstens war die HHI-Sidelink-Implementierung zum Zeitpunkt von PoC-4 ausschließlich als Punkt-zu-Punkt-Verbindung (Unicast) realisiert. Ein echter Mehrpunkt-Sidelink (Broadcast/Multicast zwischen mehreren UAVs) war hardwareseitig noch nicht verfügbar, sodass jede Drohne zwingend eine eigene Bodenstation als Gegenstelle benötigte. Zweitens stellte das HHI für PoC-4 insgesamt 4 SDR-Einheiten zur Verfügung, womit maximal 2 Drohne-Bodenstation-Paare gebildet werden konnten. Weiterhin wurden eine maximale Datenrate von 14Mbit erreicht, was lediglich zu einer Übertragung eines optischen Streams ausreichend war. Ein weiteres Problem war, dass die Verbindung nicht stabil war und es zu regelmäßigen Verbindungsabbrüchen kam. In diesem Fall musste die Drohne landen und die Verbindung durch Reset neu aufgebaut werden. Daher konnten auch keine verlässlichen Daten erhoben werden, um eine Bewertung über die Präzision der aus heterogenem UAV-Schwarm, multisensoral erhobenen und fusionierten Daten durchzuführen. Trotz der reduzierten Konfiguration und der oben beschriebenen, technischen Einschränkungen, wurden die zentralen Forschungsziele, nämlich die Demonstration der UAV-basierten Sensordatenübertragung via Sidelink unter realen Bedingungen, zumindest grundlegend demonstriert. Die ist eine wichtige Motivation zur Entwicklung von entsprechend verbesserter Hardware.

## **Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Im Verlauf der Projektlaufzeit (Oktober 2022 bis Dezember 2025) haben sich relevante Entwicklungen auf dem Gebiet der Integrated Communication and Sensing (ICAS) bei anderen Stellen ergeben, die für das Teilvorhaben von aeroDCS von Bedeutung sind.

### **Standardisierung (3GPP):**

Mit dem Abschluss von 3GPP Release 18 (2024) wurden erstmals konkrete Studien zu Integrated Sensing and Communication (ISAC) in den NR-Standard aufgenommen (TR 22.837 „Feasibility Study on Integrated Sensing and Communication“). Release 19, dessen Arbeiten im Projektzeitraum begannen, sieht die weitere normative Verankerung von ISAC-Funktionalitäten vor. Für den UAV-Bereich wurden in Release 17 und 18 bereits grundlegende Architekturbausteine für Uncrewed Aerial Systems (UAS) Connectivity und Identification standardisiert (TS 23.256).

### **Europäische Forschungsförderung (6G-SNS):**

Im Rahmen des europäischen 6G-Smart Networks and Services (6G-SNS) Joint Undertaking wurden ab 2023 mehrere Projekte gestartet, die thematisch an das Vorhaben angrenzen, insbesondere im Bereich verteilter ICAS-Architekturen und V2X-Sidelink. Die Ergebnisse dieser Projekte wurden über Konferenzbeiträge und Deliverables verfolgt. Eine direkte inhaltliche Überschneidung mit dem Teilvorhaben aeroDCS besteht insofern, als auch dort die Herausforderungen der Sidelink-Reichweite, Miniaturisierung der Hardware und Latenzanforderungen für mobile ICAS-Anwendungen als offene Forschungsfragen identifiziert wurden.

### **Regulatorik für UAV (U-Space):**

Im Verlauf des Projekts trat die europäische U-Space-Verordnung (Durchführungsverordnungen EU 2021/664, 2021/665 und 2021/666) in Kraft und wurde in Deutschland durch die Luftverkehrs-Ordnung und LuftNfG-Novellen schrittweise umgesetzt. Die zunehmende Ausdifferenzierung der UAV-Kategorien (Open, Specific, Certified) und die Einführung des UAV-Betreiberregisters haben die regulatorischen Rahmenbedingungen für Schwarmflüge und BVLOS-Betrieb im Projektverlauf konkretisiert, aber auch verdeutlicht, dass zertifizierungsfähige Sense-and-Avoid-Systeme als Voraussetzung für BVLOS-Genehmigungen eine wesentliche technologische Hürde darstellen, die über den Projektzeitraum hinaus adressiert werden muss.

### **Wissenschaftliche Veröffentlichungen Dritter:**

In der wissenschaftlichen Literatur wurden im Projektzeitraum erste Ergebnisse zu bistatischen Radarmessungen von Multikopter-Drohnen publiziert. Die im Teilvorhaben in Zusammenarbeit mit der TU Ilmenau erzielten Ergebnisse zu VTOL-Drohnen in bistatischer ICAS-Konfiguration gehen dabei, nach unserem Kenntnisstand, über den publizierten Stand anderer Gruppen hinaus, da Mikrodoppler-Signaturen speziell für VTOL-Flugphasen (Start, Übergang, Reiseflug, Landung) in dieser Form bislang nicht dokumentiert vorlagen.

