

Abschlussbericht

13.04.2026

6G NeXt

6G Native extensions for XR technologies

VDI | VDE | IT

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Titel des Vorhabens: Verbundprojekt: 6G NeXt - 6G Native extensions for XR technologies;
Teilvorhaben: 6G Intelligente Drohnen

Zuwendungsempfänger: Technische Hochschule Wildau

Förderkennzeichen: 16KISK176

Fördergeber: Bundesministerium für Bildung und Forschung

Förderprogramm: Forschungsprogramm Kommunikationssysteme „Souverän. Digital. Vernetzt.“

Richtlinie: 6G-Industrieprojekte zur Erforschung von ganzheitlichen Systemen und Teiltechnologien für den Mobilfunk der 6. Generation

Projektträger: VDI/VDE Innovation + Technik GmbH

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Rütter-Kindel

Laufzeit des Vorhabens: 15.10.2022 bis 14.10.2025

Inhaltsverzeichnis

1. Projektdaten	3
2. Projektziel	4
3. Durchführung des Vorhabens - wichtigste wissenschaftlich-technische Ergebnisse und andere Ereignisse	4
4. Vergleich des Vorhabens mit der ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung	31
5. Haben sich die Aussichten für die Erreichung der Ziele des Vorhabens innerhalb des Berichtszeitraums gegenüber dem ursprünglichen Antrag geändert?	33
6. Sind inzwischen von dritter Seite FE-Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind?	34
7. Sind oder werden Änderungen an der Zielsetzung notwendig?	34
8. Jährliche Fortschreibung des Verwertungsplans.:	35
a. Erfindungen und Schutzrechtsanmeldungen	35
b. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	35
c. Wissenschaftliche / technische Erfolgsaussichten nach Projektende	36
d. Wissenschaftliche / wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	37

1. Projektdaten

Richtlinie

6G-Industrieprojekte zur Erforschung von ganzheitlichen Systemen und Teiltechnologien für den Mobilfunk der 6. Generation

Zuwendungsempfänger

Technische Hochschule Wildau (TH Wildau)

Förderkennzeichen:

16KISK176

Vorhabenbezeichnung

Verbundprojekt: 6G Native extensions for extended reality technologies

Teilvorhaben: 6G Intelligente Drohnen

Kurztitel

6G NeXt

Laufzeit des Vorhabens

15. Oktober 2022 bis 14. Oktober 2025

Projektleitung

Prof. Dr.-Ing. W. Rüther-Kindel

2. Projektziel

Im Use Case „Smart Drones“ wird die Anwendbarkeit von 6G als luftfahrttaugliche Anwendung untersucht. Der Fokus liegt hierbei auf dem Gebiet der zukünftigen Bewältigung von intelligent in den Flugverkehr eingebundenen Fluggeräten. Es soll im Rahmen des Projektes „6G NeXt“ ein System auf Basis der 6G-Technologie konzipiert, entwickelt und getestet werden, welches in der Lage ist, Kollisionen von Fluggeräten zu verhindern. Das System wird in diesem Vorhaben stellvertretend für alle Klassen von Luftfahrzeugen mithilfe von unbemannten Drohnen entwickelt. Dies stellt zugleich die technisch anspruchsvollste Gruppe dar. Die Ergebnisse und das entwickelte System sind ebenso auch auf die bemannte Luftfahrt übertragbar.

Die Idee des Use Cases verfolgt den Ansatz, mithilfe von im Flug gewonnen Daten zum Flugzustand (Höhe, Kurs, Geschwindigkeit, Lagewinkel...) eine Berechnung der zukünftigen Flugbahn in einer Schneller-als-Echtzeit-Simulation durchzuführen. Auf der Grundlage dieser vorausschauenden Trajektorienberechnung kann zukünftiges Konfliktpotenzial für Mid-Air Collisions erkannt und eine Ausweichbahn unter Berücksichtigung der Flugleistungsdaten des jeweiligen Fluggeräts errechnet werden. Für den Datenaustausch zwischen den Fluggeräten und der Berechnungsplattform wird eine schnelle und sichere Übertragung mit geringer Latenz benötigt.

Zum Demonstrieren der Funktionsweise mit unterschiedlichsten Fluggeräten sollen im Projekt langsam und schnell fliegende Drohnen gebaut und mit einer eigens entwickelten Steuerung getestet werden, die die Verfolgung von dreidimensional gekrümmten Flugbahnen ermöglicht.

3. Durchführung des Vorhabens - wichtigste wissenschaftlich-technische Ergebnisse und andere Ereignisse

Okt 2022 Im Oktober 2022 wurde der Kick Off des Gesamtprojekts durchgeführt. Es wurde mit der Einstellung des vorgesehenen Personals begonnen. Eine Einstellung zum Projektstart am 15.10.2022 wurde jedoch nicht mehr geschafft, sodass alle Verträge erst ab dem 01.11.2022 beginnen konnten.

Nov 2022 Im November 2022 wurde mit der Projekteinrichtung in den Räumlichkeiten begonnen. Es wurde eine erste interne Arbeitsplanung durchgeführt. Für das Bewerben des Projektes wurden Projektmaterialien in Form von Präsentationen angefertigt und im 3D-Druck-Verfahren Drohnenmodelle für einen gemeinsamen Messtisch erstellt.

Für die Auswahl geeigneter Komponenten für fliegende Testplattformen (Multikopter) wurde eine erste Leistungsabschätzung getroffen und geeignete Komponenten beschafft. Zu den ausgewählten Komponenten zur Fertigung zweier Testplattformen zählen eine jeweilige Bordsensorik (mit Inertial Measurement Unit, GNSS Receiver und 2,4 GHz Empfänger) sowie Fernsteuersender. Zur Fertigung von Komponenten für die Testplattformen und Drohnenmodellen wurden Faserverbundwerkstoffe beschafft. Die ausgewählten Komponenten wurden im Dezember 2022 und Januar 2023 geliefert.

Dez 2022 Im Dezember 2022 wurde ein weiterer Projektmitarbeiter eingestellt und eingearbeitet. Es wurde in Vorbereitung des Starts des AP5 ein Grundkonzept für den Aufbau des Anti-Kollisionssystems entwickelt. Das Vorhaben 6G NeXt wurde im Rahmen der Kick-Off-Veranstaltung zum Projekt „GeoVER“ der TU Berlin

vorgestellt.

Des Weiteren wurde für den Aufbau der Software-in-the-Loop-Simulation mit der Abschätzung der Leistungsbedarfe und Anforderungen an die benötigte Rechentechnik begonnen.

- Jan 2023** Im Januar 2023 wurde die Leistungsbeschreibung für die Ausschreibung der Rechentechnik der Software-in-the-Loop Simulation (SIL) angefertigt. Für die Bedienung der Simulationsumgebung wurden 6 Monitore beschafft. Des Weiteren fanden ein Workshop beim Konsortialführer T-LABS für die Entwicklung der Gesamtarchitektur sowie Abstimmung zum AP5 mit der TU Berlin statt. Die eingetroffenen Komponenten für die Testplattformen wurden zusammengesetzt und der Code des Flightcontrollers angepasst.
- Feb 2023** Im Februar 2023 wurde im Rahmen der Einstellungsarbeiten am Flightcontroller der Erstflug der ersten Testplattform durchgeführt und die Sensoriken eingestellt. Des Weiteren wurden Abstimmungen für die Integrationsplattform der Drohne durchgeführt.
- März 2023** Im März 2023 ist die ausgeschriebene Rechentechnik eingetroffen. Es wurde mit dem Aufbau der Simulationssoftware begonnen. Bei Tests der Sensorik konnten Datensätze zur Charakterisierung des Verhaltens der GNSS-Module erfolgreich in Flugversuchen (Flugdauer 2 Stunden) aufgenommen werden. Diese sind für das Nachbilden der Digitalen Zwillinge notwendig. Darüber hinaus wurde die Messe AERO in Friedrichshafen vorbereitet. Im März fand das erste Konsortialtreffen in Ilmenau statt. Auf dem Konsortialtreffen wurde das AP5 (Intelligente Drohnen / Smart Drones) gestartet. Seit dem AP5-Kick-Off finden regelmäßig alle 14 Tage Jour-Fix-Meetings mit den betreffenden Partnern für das AP5 online statt.



Abbildung 1: Testflug einer Drohne, Einstellung des Flightcontrollers, Testen der eigenen Groundstation-Software zur Überprüfung der Telemetrie-Verbindung und Anzeige sowie Aufzeichnung von Telemetriedaten

- April 2023** Im April 2023 wurde mit dem Aufbau der Simulationssoftware fortgefahren. Es wurde eine Testumgebung in der Entwicklungsumgebung LabVIEW aufgesetzt. Weiterhin wurde nach den erfolgreichen Versuchen mit der ersten Testplattform der Aufbau der zweiten Testplattform durchgeführt und erfolgreich abgeschlossen.

Somit stehen nun zwei Testplattformen für reale Flugversuche zur Verfügung. Für den Aufbau der „Digitalen Zwillinge“ dieser Plattformen sollen Flüge erfolgen, um mehr Daten für die Modellbildung zu gewinnen. Diese wurden im Frühjahr und Sommer 2023 durchgeführt.



Abbildung 2: Quadrocopter als Testplattformen



Abbildung 3: Testflüge zur Datengewinnung und Einstellung der Flightcontroller

Des Weiteren wurde die Messe AERO erfolgreich in der Zeit vom 19. – 22.04.2023 durchgeführt und das Projekt 6G NeXt zusammen mit dem Messtisch vorgestellt.



Abbildung 4: Messestand auf der AERO Friedrichshafen 2023



Abbildung 5: Messtisch zum Projekt 6G NeXt



Abbildung 6: Messtisch Use Case Holocom

Mai
2023

Im Mai 2023 wurde ein Paper für die ITG-Mobilfunktagung angefertigt und akzeptiert. Im Paper wurde der allgemeine Architekturaufbau beschrieben.

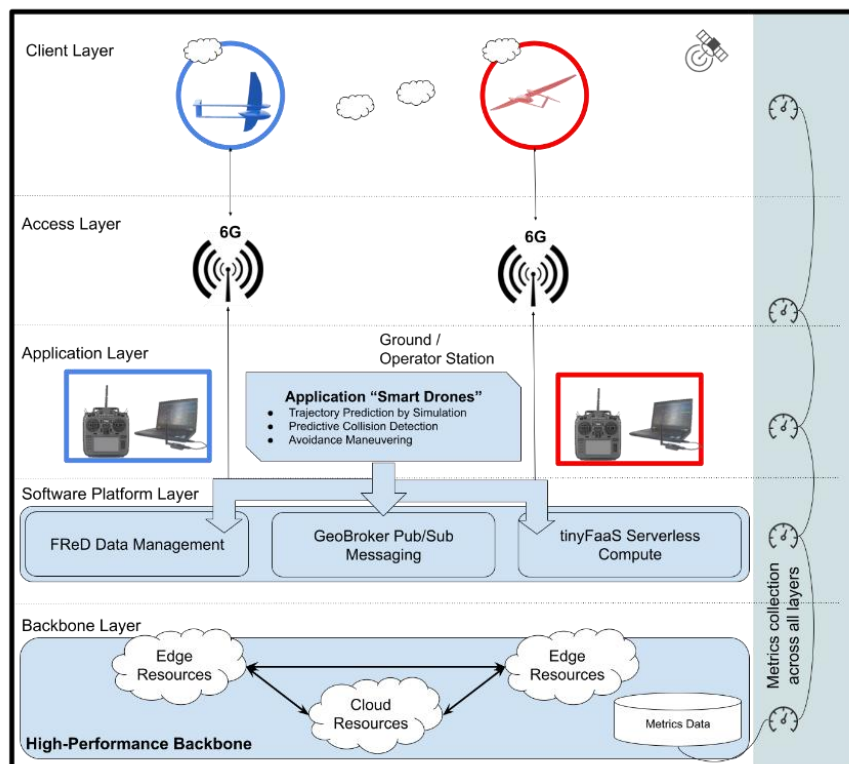


Abbildung 7: Gemeinsames Architekturbild für die Umsetzung des Use Case Smart Drones

- Juli 2023 Flugtests in Rangsdorf: Einstellflüge für Multikopter-Plattformen, erster Flug des zweiten Multikopters erfolgreich durchgeführt, Gegenseitige Projektvorstellung im Showroom der Telekom in Berlin Siemensstadt – Beginn des wissenschaftlichen Austausches mit Showroom, Idee des Drohnenflugs im 5G-Netz des Showrooms entstanden;
Anfertigung eines neuen Messemodells (Tower Flugplatz Schönhagen) für den Messtisch
- Okt 2023 Im Oktober 2023 wurde begonnen, einen Trajektorienplaner in die Simulationsumgebung einzubauen. Das Ziel ist es, mehrere Drohnen in einer gemeinsamen Testumgebung zu simulieren, da eine derartige Software bislang nicht verfügbar ist. Die Software sollte weiterhin so gestaltet sein, dass sich Clients dynamisch ein- und wieder auswählen können, um den Prozess des Wechsels zwischen Mobilfunkzellen zu simulieren. Mithilfe des Planers können nun Trajektorien- und Positionsdaten für mehrere Drohnen in der Simulationsumgebung erzeugt werden.

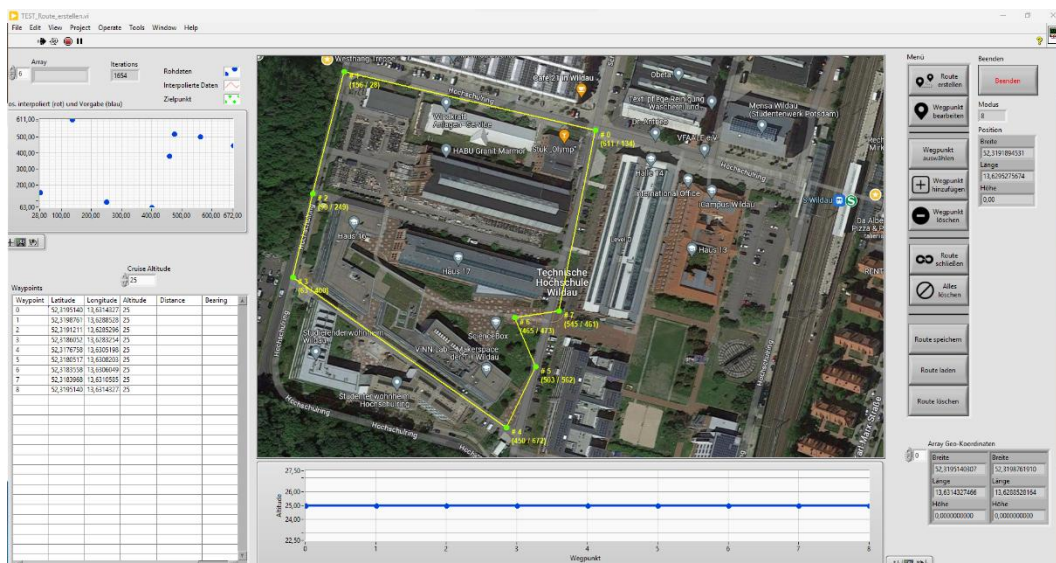


Abbildung 8: Trajektorienplaner für die Simulationsumgebung

Nov
2023

Im November wurde die Simulationsumgebung in LabVIEW erweitert. Es wurde die Möglichkeit zur Steuerung mehrerer, virtueller Drohnen auf dem Testgelände des Flugplatzes Schönhagen implementiert, die Berechnung von Trajektorien, Distanzen, relativen Peilungen umgesetzt sowie die Darstellung der Verkehrslage und Informationen zu einzelnen Drohnen ähnlich eines Radarbildschirms realisiert. Die Simulationssoftware arbeitet zu diesem Zeitpunkt noch mit rein simulierten Daten. Die Verbindung zu realen Messdaten kann über die bereits im März 2023 getestete Groundstation-Software hergestellt werden. Die erste Version der Software wurde der TU-Berlin zur Sichtung zur Verfügung gestellt und die Integration in die TU-eigenen Systeme abgeklärt. Des Weiteren wurde im November ein gemeinsames Paper für die KomMA 2023 vorbereitet. Am 30.11.2023 wurde das Projekt 6G NeXt im Rahmen der IDRF-Zukunftswerkstatt der Interessengemeinschaft der regionalen Flugplätze e.V. vorgestellt.

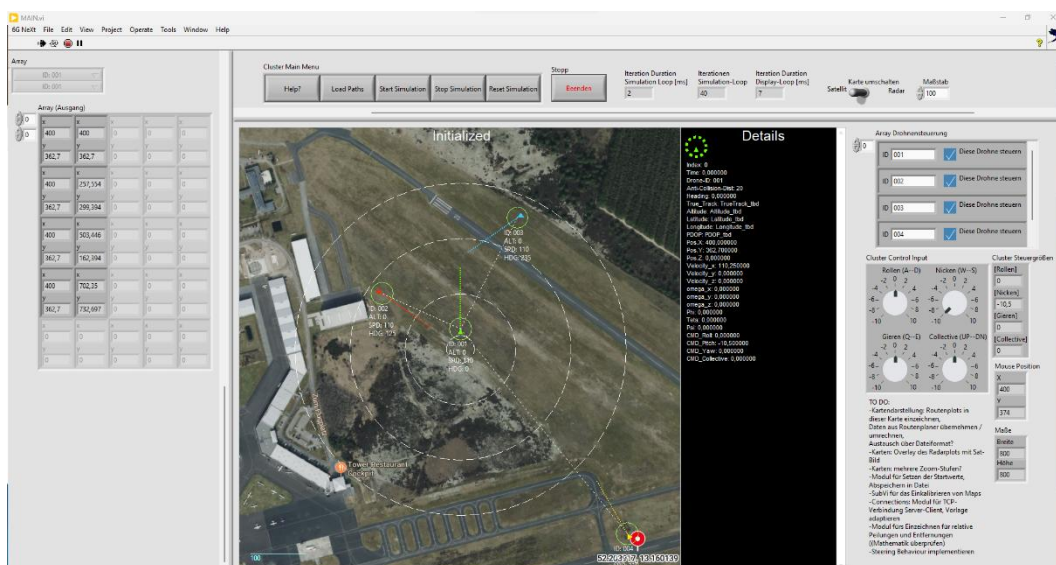


Abbildung 9: Simulationsumgebung in LabVIEW

Dez
2023

Im Dezember 2023 fand das 2. Konsortialtreffen in Dresden beim Konsortialpartner SeeReal statt. Auf dem Konsortialtreffen wurden das weitere Vorgehen sowie die

erste Testkampagne für Messungen am Flugplatz Schönhagen beschlossen. Die Testkampagne soll in der ersten April-Woche 2024 stattfinden.

Jan 2024 Im Januar 2024 wurde ein Paper in der Working Group 6G Roadmap zum Use Case Smart Drones geschrieben und eingereicht. Des Weiteren wurde der Bau der 6G-Drohne begonnen. Ursprünglich wurde im Projektplan festgelegt, dass im Projekt 6G NeXt unterschiedliche Fluggeräte mit unterschiedlichen Geschwindigkeitsprofilen eingesetzt werden sollten. Die Multikopter stellen langsam fliegende Objekte dar, schnell fliegende Drohnen fehlten bislang. Die neue 6G NeXt-Drohne soll diesen Bereich abdecken. Der Bau einer Spezialdrohne für das 6G NeXt Projekt wurde begonnen. Ziel ist es unter anderem auch, durch die Einzigartigkeit der Drohne einen Wiedererkennungswert für das Projekt zu schaffen. Die Drohne soll auf die Durchführung von Tests für den Use-Case Smart Drones ausgelegt werden. Daher sollte die Drohne in der Lage sein, verschiedenes Equipment für Messungen zu transportieren und im Gegensatz zu den bereits erprobten Quadrocoptern einen Flug mit hohen Geschwindigkeiten zu ermöglichen. Als ein weiteres Ziel wurde festgelegt, dass die Drohne senkrecht starten und landen sollte, um im Flugbetrieb mit wenig Platz auszukommen, was gerade vor dem Hintergrund von Einsätzen in der Nähe von Gebäuden, wie beispielsweise an Flugplätzen ein entscheidender Vorteil ist.

Im Januar 2024 wurde die Fertigung begonnen. Hierbei wurden bewusst unterschiedliche Fertigungsverfahren gewählt um einerseits eine Kleinserie des Nurflüglers mit individuellen Anpassungen zu ermöglichen und um andererseits dem Lehrauftrag durch eine dauerhafte Einbindung von Studenten gerecht zu werden.



Abbildung 10: Fertigung der Winglets der Nurflügel-Drohne MANTA-X

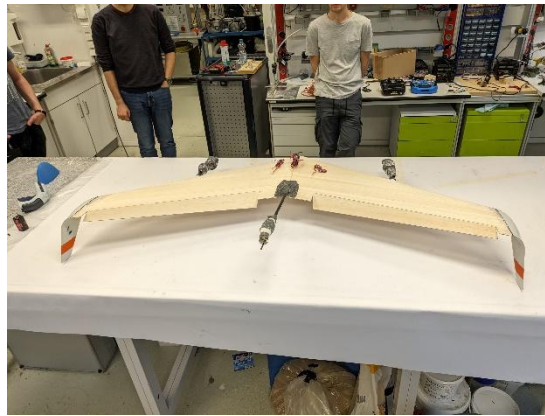


Abbildung 11: VTOL-Drohne MANTA-X im Rohbau

Insbesondere wurden auch neue Verfahren des Rapid-Prototyping angewandt. So wurden die Positivformen der Winglets mittels 3D-Drucker aus Kunststoff gedruckt und die abgeleiteten Negativformen ermöglichten eine leichte, aber dennoch stabile Fertigung aus Faserverbundwerkstoffen. Der erste Versuchsträger besteht aus einer kostengünstigen Hartschaum-Balsaholz-Konstruktion, welche zusätzlich mit eigenentwickelten Carbon-Motorträgern und einem Torsionskasten versehen ist. Die Drohne wurde mit Ziel entwickelt, ein senkrechtstartfähiges Testbed aufzubauen. Dies ermöglicht das Starten und Landen auf wenig Fläche, allerdings ist dieses Verfahren mit einem hohen Leistungsbedarf verbunden. Um das Ziel von

einer langen Flugzeit (ca. 40 Minuten) zu realisieren, wurde für das Konzept der Drohne eine Nurflügel-Konfiguration gewählt. Die beiden Hauptantriebe sind schwenkbar gelagert, der hintere Antriebsmotor wird nur im Start- / Landefall benötigt und im Horizontalflug abgeschaltet. Die Drohne wurde wegen der Ähnlichkeit zum realen Vorbild aus der Tierwelt mit dem Namen „MANTA-X“ getauft. Sie wurde im April 2024 fertiggestellt. Der MANTA-X kann die Ausrüstung für Testmessungen im Rahmen von Messkampagnen am Flugplatz Schönhagen tragen, gleichzeitig aber auch durch eine an Bord befindliche Kamera für Aufklärung aus der Luft sorgen. Hierzu wird eine Mini-Gimbal-Kamera mit Ultra-Wide-Angle-Objektiv eingerüstet, um Luftaufnahmen über das Funknetz an den Boden zu senden.



Abbildung 12: Vertical Take-Off and Landing (VTOL) Drohne MANTA-X im März 2024

Feb
2024

Im Februar 2024 wurde die Software der Simulationsumgebung einem großen Update unterzogen. Es fand ein Austausch über die Funktionen der Simulationsumgebung in LabVIEW mit der TU-Berlin statt. Das Ziel ist es, Funktionen zu identifizieren, die zur Integration in die TU-eigenen Systeme genutzt werden können. Hierzu wird das Simulationsprogramm in Sub-Routinen unterteilt und dokumentiert. Der dokumentierte Quellcode steht allen Partnern über einen Sharepoint zur Verfügung.

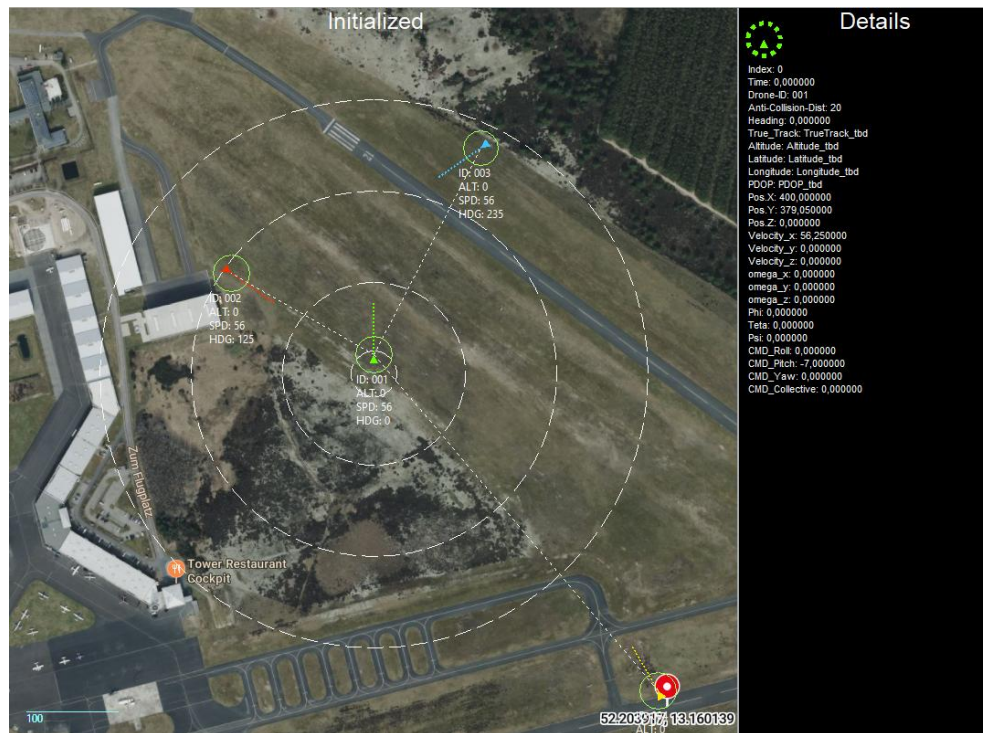


Abbildung 13: Radarplot der Simulationssoftware

Vorbereitend für die Feldversuche wurde untersucht, wie die direkte Steuerung von Drohnen über 5G realisierbar ist. Hierzu wurde gemeinsam mit der Telekom im Showroom in Berlin-Siemensstadt ein Versuchsaufbau vorbereitet, der das dortige 5G-Campusnetz zur Steuerung einer Quadrocopterdrohne nutzt. Der Test fand am 26.02.2024 als Indoor-Flug im 5G-Netz des Telekom-Showrooms statt. Die Datenübertragung der Steuersignale erfolgte dabei redundant zur 2,4 GHz-RC-Anlage über das 5G-Netz des Showrooms. Der folgende Schaltplan zeigt den Versuchsaufbau dieses Tests. Der folgende Schaltplan zeigt den Versuchsaufbau dieses Tests.

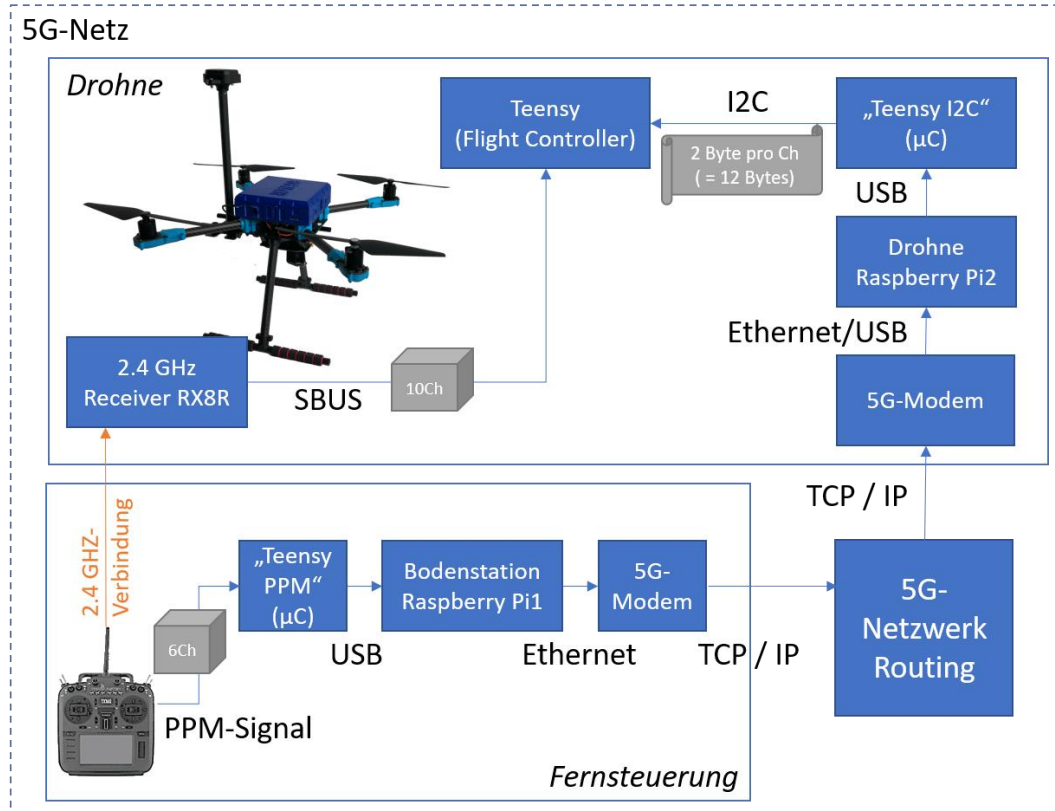


Abbildung 14: Schema der Übertragung der Steuerdaten per 5G-Verbindung



Abbildung 15: Drohnenflug im 5G-Showroom der Telekom



Abbildung 16: Programmierung der Drohne im 5G-Showroom der Telekom

März 2024 Im März 2024 fanden Vorbereitung der Messe AERO 2024 statt. Es wurden Messematerialien erstellt und gedruckt. Weiterhin wurden Vorbereitungen für die erste Testkampagne am Flugplatz Schönhagen getroffen, welche für den Zeitraum vom 02.04. bis 05.04. geplant wurde.



Abbildung 17: Fact Sheet zur VTOL Drohne MANTA-X auf der AERO

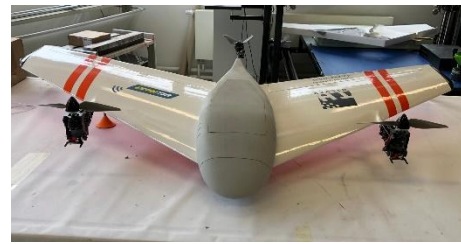


Abbildung 18: MANTA-X



Abbildung 19: Positionsbeleuchtung

April 2024

Im April wurde die erste Testkampagne am Flugplatz Schönhagen erfolgreich durchgeführt. Die Tests fanden in der Zeit vom 02. bis 05.04.2024 statt. Beteiligt an den Messungen waren vor allem die Partner vom DFKI und Fraunhofer FOKUS. Für die Testungen wurde die Mobile Bodenstation des Fachgebiets Luftfahrttechnik der TH Wildau zum Flugplatz überführt und die Funktechnik eingerichtet. Das Ziel war es, erste Tests der 6G-prototypischen Testbeds der Partner Fraunhofer FOKUS und DFKI zu realisieren und Messdaten zu Signalstärke und Datenübertragung am Boden und in der Luft zu erhalten. Hierzu fanden Versuchsflüge mit einer Quadrocopter-Drohne statt. Die Flüge wurden vollständig automatisch durchgeführt. Die programmierten Missionsflüge fanden ohne Abstürze in 20 und in 40 Meter Flughöhe über Grund statt. Für die Messung von Telemetriedaten wurde die Drohne mit einem Messhandy vom Fraunhofer-Testbed ausgestattet. Die aufgezeichneten Daten des Messhandys können nun mit den vom Flightcontroller aufgezeichneten Positionsdaten zu einer Karte fusioniert werden und ermöglichen dann als Overlay eine erste Charakterisierung der Testbeds im Feldeinsatz.



Abbildung 20: Mobile Bodenstation - DFKI-Testbed



Abbildung 21: Mobile Bodenstation als Testzentrale



Abbildung 22: Vorbereitungen für den ersten Flug mit Messhandy



Abbildung 23: Automatischer Flug der Drohne, gefilmt von einer anderen Drohne

Darüber hinaus wurde eine numerische Strömungssimulation in der Software „STAR-CCM+“ für die Drohne MANTA-X abgeschlossen, um eine Bestimmung der Flugleistungsparameter abschätzen zu können.

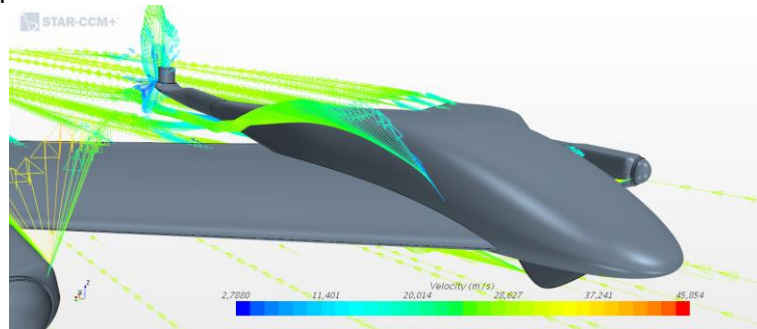


Abbildung 24: Numerische Strömungssimulation des MANTA-X in STAR-CCM+

Im Zeitraum vom 17.04. bis 20.04.2024 wurde das Projekt 6G NeXt wieder auf der Messe AERO in Friedrichshafen vorgestellt. Die Messe bietet eine sehr geeignete Bühne, da neben anderen Forschungseinrichtungen auch Flugplatzbetreiber und Behörden vor Ort vertreten sind. Es ist sogar eine eigene Halle für Drohnenbetreiber vorhanden. Auf dem Stand der TH Wildau wurde die VTOL-Nurflügel-Drohne MANTA-X ausgestellt und das Projekt beworben. Es gab viele interessante Fachgespräche zum Projekt und dem Use Case „Smart Drones“.



Abbildung 25: Messestand TH Wildau auf der AERO 2024



Abbildung 26: VTOL-Drohne "MANTA-X" auf der AERO



Abbildung 27: Blick auf den Messestand der TH Wildau auf der AERO 2024 (links: neues Forschungsflugzeug, Mitte: MANTA-X Drohne der TH Wildau)

- Mai 2024** Im Mai wurde das Konsortialtreffen in Potsdam vom 07. bis 08.05.2024 durchgeführt. Inhalte des Treffens waren die Auswertung der ersten Resultate der Flugtests in Schönhagen. Hierbei zeigte sich, dass mit dem eingesetzten Antennen-Setup eine Verbindung zu den Drohnen im gesamten Luftraum, der für die unbemannten Fluggeräte am Flugplatz Schönhagen zur Verfügung steht, möglich ist. Die Qualität der Verbindung zur Bodenstation wurde sowohl zu einem für Messaufgaben präpariertem Mobiltelefon und zu einem 5G-Modem an einem Raspberry Pi 4 an Bord der Drohne gemessen. Die Steuerung der Drohnen erfolgte zu diesem Zeitpunkt durch eine Telemetrie-Verbindung mithilfe eines 868 MHz-Transcievers.
- Des Weiteren wurde mit dem Aufbau eines UAV-Helikopters basierend auf den positiven Erfahrungen mit dem Orange-Cube / Ardupilot-Autopilotensystem begonnen. In Flugtests konnten weitere Erkenntnisse zur Flugsteuerung und Reglerabstimmung gewonnen werden. Konzeptionell wurde damit begonnen, die Steuerinformationen als MAVLink-Kommandos über einen Raspberry-Pi als Companion-PC an der Drohne zu übertragen und Steuerkommandos an die Drohne per WLAN zu senden. Dieser neue Steuerungskanal wurde aus Redundanzgründen parallel zur Telemetristrecke und der 2,4 GHz-Verbindung eingeführt. Weiterhin wurde begonnen, eine Software mit einfacher grafischer Benutzeroberfläche auf Basis der pymavlink-Bibliothek zu entwickeln, welche die Steuerung von mehreren Drohnen im Schwarm ermöglicht. Am 22.05.2024 wurde ein weiterer Indoor-Drohnenflug bei T-Systems im Werner-von-Siemens-Center erfolgreich im 5G-Netz durchgeführt und medial begleitet.
- Darüber hinaus wurde eine Abschlussarbeit (Master) begonnen, die die Untersuchung verschiedener Ausweichstrategien für Drohnen zum Inhalt hatte. Diese Untersuchung wurde in der Entwicklungsumgebung Matlab durchgeführt.
- Juni 2024** Im Juni wurde der Use-Case im Projektkontext auf dem Media Web Symposium des Projektpartners Fraunhofer FOKUS in der Zeit vom 11. bis 12.06.2024 präsentiert. Die Drohne „MANTA-X“ wurde vorgestellt und die Funktion als senkrecht startende Nurflügeldrohne in einem 3D-Hologramm demonstriert.



Abbildung 28: Präsentation auf der MWS bei Fraunhofer FOKUS



Abbildung 29: Feierliche Übergabe einer Drohne an T-Systems

Vom 18. bis 19.06. fand ein Integrationsworkshop mit dem Partner DFKI in Wildau statt. Inhalt war die Integration der Raspberry Pis und der angeschlossenen 5G-Modems in das DFKI-Testbed und das Testen der Datenübertragung, insbesondere der MAVLink-Kommandos an die Drohne.

Am 20.06.2024 wurde eine Drohne der TH Wildau an die T-Systems im Werner-von-Siemens-Center feierlich übergeben. Die Drohne wird dort für weitere Forschungszwecke eingebunden.

Darüber hinaus wurde damit begonnen, die Daten sämtlicher Drohnen am Boden über einen MQTT-Messagebroker zentral zu erfassen und die Daten für die Verwendung in angeschlossenen Systemen sowie für die Auswertung im Post-Process aufbereiten zu können.

Juli 2024 Im Juli wurde der Use-Case im Projektkontext auf der 6G Conference im Berliner Congress Center vom 02. bis 04.07.2024 präsentiert. Darüber hinaus fanden Flugtests mit der VTOL-Drohne MANTA-X, den Multikopterplattformen, dem Flächenflugzeug Timber und dem UAV-Helikopter auf dem Modellflugplatz Rangsdorf statt. Dabei wurden die Setups der Regler abgestimmt und die automatischen Flugmodi programmiert, um die Drohnen (teil-)automatisch zu steuern.

August 2024 Im August 2024 wurde der erste Test der Bodenstationssoftware mit mehreren Drohnen gleichzeitig in der Luft erfolgreich durchgeführt. Damit steht eine Softwaregrundlage für Tests zwischen verschiedenen Fluggeräten zur Verfügung.

September 2024 Im September fand die zweite Testwoche im Projekt vom 16. bis 18.09.2024 am Flugplatz Schönhagen mit allen Partnern statt. Dabei wurde die MAVLink-Kommunikation über das 5G-Testbed getestet und die Reichweiten-Tests der Testwoche im April wiederholt mit leicht geändertem Setup. Wichtigste Tests waren ebenfalls das Einbuchen der 5G-Modems in das Testbed-Netz und die Kontrolle der Netzstabilität. Für den Projektpartner TU Ilmenau wurden Fotoflüge mit einer Kameradrohne am Flugplatz Schönhagen durchgeführt, um Daten für die Erstellung eines 3D-Modells zu gewinnen, welches mithilfe von Methoden der Fotogrammetrie erstellt und für die Simulation und Repräsentation der digitalen Abbilder der Drohnen dienen soll.



Abbildung 30: Flugtests mit verschiedenen Drohnen am Flugplatz Schönhagen in der zweiten Testkampagne



Abbildung 31: 3D-Modell des Flugplatz Schönhagen aus Fotogrammetrie (Quelle: TU Ilmenau)

Am Ende der Testwoche fand am Flugplatz Schönhagen und in Wildau das Konsortialtreffen statt. Hierbei wurden die notwendigen noch zu erfassenden Parameter der Drohnen und des Funknetzes bestimmt, die neben den bisherigen Parametern ebenfalls notwendig sind, wie z.B. Art der Drohne, Qualität der Verbindung repräsentiert durch Data-Packet-Loss-Rate. Abschließend wurden die nächsten Schritte zur Verbindung von automatischer Flugsteuerung mit dem Anti-Kollisionssystem, die Einbettung in die Software-Dienste der TU Berlin und die Integration in das DFKI-Testbed und den Broker der Deutschen Telekom besprochen.

- | | |
|------------------|---|
| Oktober
2024 | Am 16.10.2024 fand die Smart Country Convention auf dem Berliner Messegelände statt, auf der das Projekt vorgestellt wurde. |
| November
2025 | Im November fanden Flugtests mit allen Drohnen und insbesondere mit dem MANTA-X statt. Dabei wurde erstmals der Übergang (Transition) vom Hovern in den Horizontalflug und wieder zurück erfolgreich am Originalmodell getestet.
Am 07.11.2024 fand ein Integrationsworkshop in der Außenstelle der TU Ilmenau am Hauptbahnhof Erfurt statt. Themen des Workshops waren die Festlegung relevanter Quality of Service Parameter und deren Einfluss auf das Anti-Kollisionssystem. Im Ergebnis wurde ein Architektur-Schema des gesamten Use-Case für die Integration in das AP4 (Broker und Backbone) erstellt (siehe Abbildung 33). Darüber hinaus wurde in der Folgewoche eine Integration in die TU-Berlin -Systeme bei einem Workshop in Wildau durchgeführt. Ziel der Integration war es, den Nachrichtenstrom zwischen Drohnen und Bodenstation zu optimieren. Im Ergebnis wurde ein Service für den Raspberry-Pi an Bord der Drohnen entwickelt, welcher die relevanten MAVLink-Messages als UDP-Stream zum Boden sendet, wo sie über Websocket für andere Prozesse zur Verfügung gestellt werden.
Im November fanden außerdem Flugtests mit mehreren Multikoptern gleichzeitig statt sowie weitere Flugtests mit MANTA-X, dem UAV Helikopter und der Flächendrohne Timber. |
| Dezember
2024 | Im Dezember wurde mit der Integration der Kamera in eine Multikopterdrohne begonnen. Dabei wurde die zuvor getestete separate Videostrecke durch eine G-Streamer-Pipeline über einen Raspberry Pi ersetzt und im Labor erfolgreich getestet. |
| Januar
2025 | Im Januar fand ein Integrationsworkshop bei den T-Labs in Berlin statt. Inhalte des Workshops waren die weitere Integration des Use-Case in den Broker der Telekom und die Bestimmung von Inhalten für eine Vorführung im Rahmen der |

Abschlusspräsentation des Projektes. Hier wurde ein vorläufiges Flugprogramm, Ort und Ablauf der Abschlussveranstaltung sowie die Form der Darstellung von Projektergebnissen diskutiert.

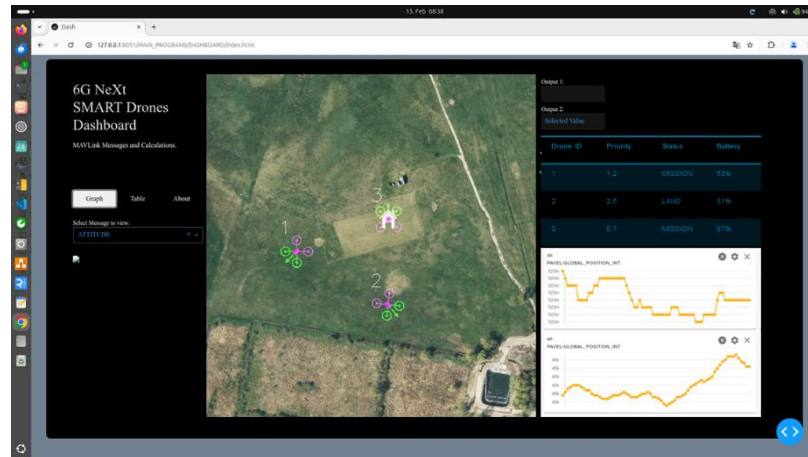


Abbildung 32: Prototyp des Dashboards zur Informationsdarstellung

Für die Darstellung des Anti-Kollisionssystems wird seitens der Telekom eine 3D-Umgebung des Flugplatz Schönhagen basierend auf Google Maps Bildern sowie dem aus Fotoflügen selbst erstellten fotogrammetrischen Modell des Flugplatzes erzeugt. 3D-Modelle der echten Drohnen werden in dieser Animation parallel zu den echten Vorbildern simuliert fliegen. Die 3D-Modelle wurden dafür bereits von allen Drohnen erzeugt. Für die Darstellung werden die Live-Daten der Drohnen benötigt, die via Websocket den Inhalt der MAVLink-Messages übertragen. Zuzüglich zu den Modellen werden auch deren geometrische Sicherheits-Sphären dargestellt, deren Größe sich in Abhängigkeit der Art der Drohne, der Positionsgenauigkeit und der Netzqualität ändert. Als Overlay werden die Netzparameter des DFKI-Testbeds zu den jeweiligen Modems in den Drohnen dargestellt, um die Qualität der Verbindung zu charakterisieren. Um unterschiedlichen Drohnen verschiedener Klassen auch einen adäquaten Datenlink bereitzustellen, wird eine Priorisierung im Netz benötigt. Beispielsweise erfordern schnelle Drohnen eine stabilere Verbindung als langsam fliegende und Kameradrohnen benötigen eine größere Bandbreite. Eine unterschiedliche Priorisierung wird netzwerkseitig durch den Broker der Deutschen Telekom ausgehandelt. Für das Zuteilen der Prioritäten werden die UE-seitige IMSI sowie die Daten aus dem MAVLink-Telemetristrom zusammengeführt. Hier gab es zahlreiche Meetings im Rahmen des 14-tägigen AP5-Jourfix sowie in den entsprechenden arbeitspaketspezifischen Meetings (AP2 und AP3). Mithilfe von Network-Slicing im DFKI-Testbed (OAI-Box) werden unterschiedliche Prioritäten, die seitens des Brokers angefordert werden, realisiert. Zu diesem Zweck wurde der Prozess des Einwählens im Netz und des Meldens beim Broker standardisiert, um auf die seitens der Telekom bereitgestellte API zugreifen zu können. Eine entsprechende Signalisierung wird durch den Raspberry Pi mit 5G-Modem der jeweiligen Drohne zu Beginn des Startprozesses ausgeführt.

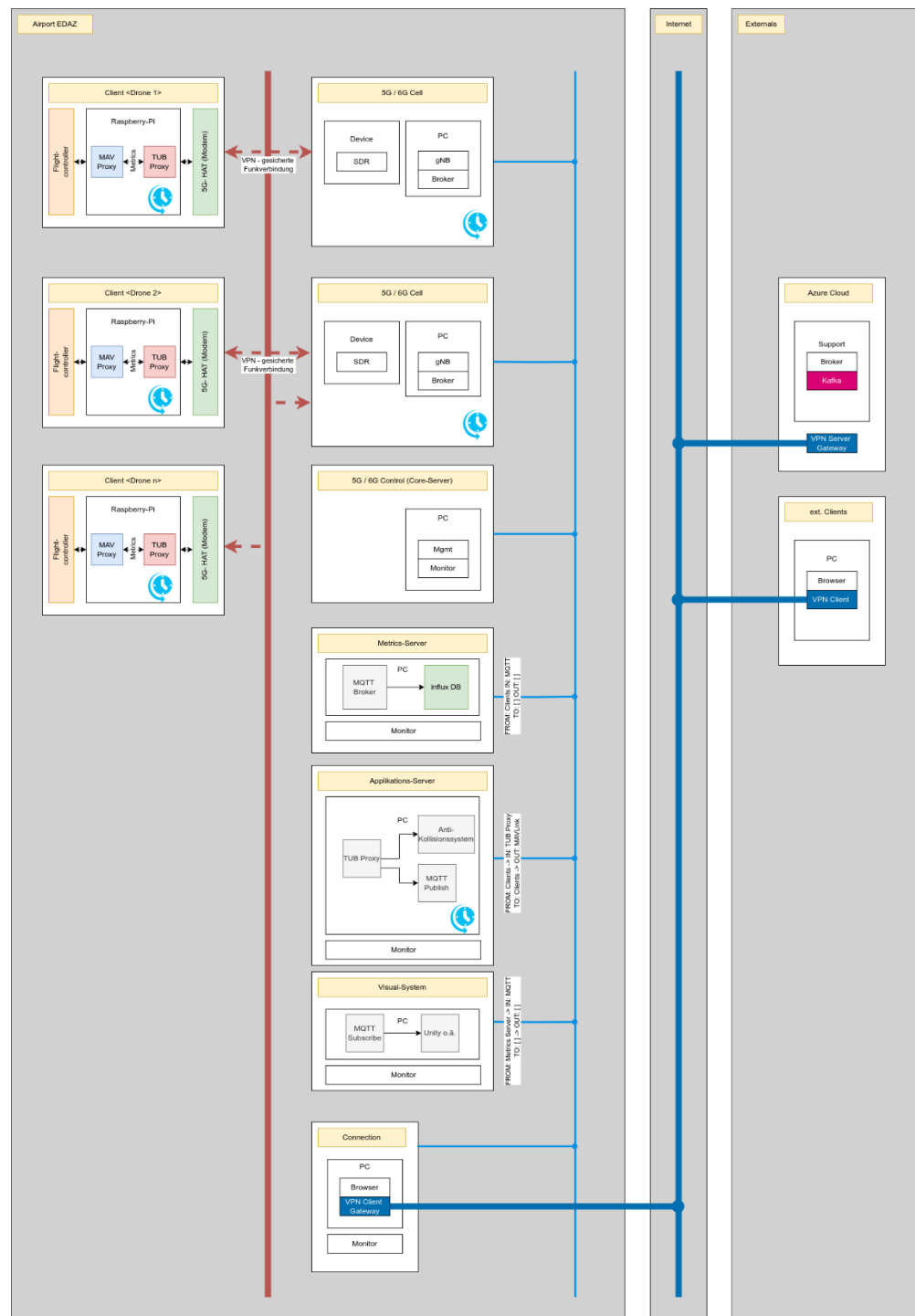


Abbildung 33: Architektur des Setups für den gesamten Use Case "Smart Drones", Stand Januar 2024



Abbildung 34: 3D-Modell der Multikopterdrohne X500 mit Kamera für die Verwendung in einer 3D-Simulation mit Live-Flugdaten



Abbildung 35: Multikopterdrohne X500 mit Kamera

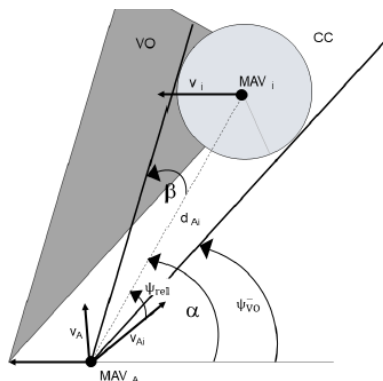


Abbildung 36: Darstellung der grundlegenden Geometrie zwischen zwei kollidierenden Drohnen nach dem Verfahren des Velocity Obstacles

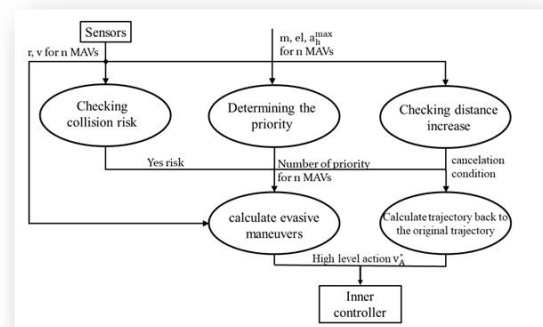


Abbildung 37: Konzept des Anti-Kollisionssystems aus der Matlab-Testumgebung

Ebenfalls im Januar wurde die Untersuchung verschiedener Ausweichstrategien im Rahmen der Master-Arbeit beendet. Im Resultat konnte durch die Arbeit die Erkenntnis gewonnen werden, welche Verteilungsstrategie am besten in Abhängigkeit der unterschiedlichen Priorisierung von Drohnen funktioniert. Betrachtet wurde hierbei auch der Einfluss von Messunsicherheiten in der Positionsbestimmung sowie der Netzzuverlässigkeit auf den notwendigen Sicherheitsabstand zu anderen Drohnen. Dazu wurden in der Arbeit mehrere Monte-Carlo-Simulationen mit Multikoptern unterschiedlicher Prioritäten durchgeführt. Der entwickelte Behaviour-Tree konnte eine hohe Vermeidungsrate von Kollisionen (99%) erzielen. Die hier entwickelten Modelle werden schrittweise aus der Matlab-Umgebung in die Realsysteme zusammen mit der TU Berlin übersetzt und in Flugtests evaluiert.

Februar
2025

Vom 17. bis 21.02.2025 wurde eine weitere kleine Messkampagne am Modellflugplatz Rangsdorf zusammen mit den Partnern DFKI und TU Berlin durchgeführt. Ziel der Tests waren die Erfassung und Aufzeichnung sämtlicher Daten der Drohnen und des Netzes. Diese wurden im Folgenden für die Bereitstellung eines Testdatensatzes für die Simulation sowie die Auswertung der Netzparameter verwendet. Flugtests wurden mit einem Multikopter absolviert, welcher über das Netz gesteuert wurde und zeitgleich einen kontinuierlichen Test der Netzwerkbandbreite, Latenz und Paketfehlerrate

(iperf3) in Abhängigkeit von der Entfernung und der Annäherungsgeschwindigkeit zur Basisstation durchführte. Die Resultate der Auswertung wurden in einem Paper zur Einreichung bei der EUCNC2025 zusammengefasst.



Abbildung 38: Im Hintergrund: Mobile Bodenstation der TH Wildau mit 5G-Testbed des DFKI

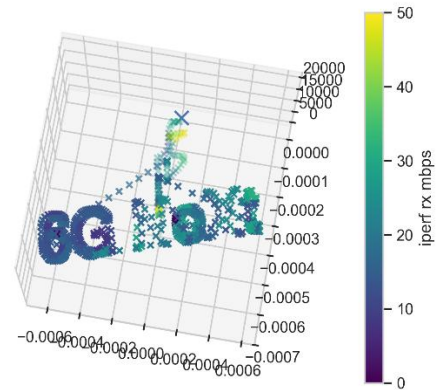


Abbildung 39: Ausgewertete Netzwerkdaten eines Drohnenflugs mit dem 6G NeXt-Logo (Quelle: TU Berlin)



Abbildung 40: Programmierung der Drohnen und Live-Monitoring



Abbildung 41: GPS-Spur des Drohnenflugs zum oben gezeigten Messflug

Darüber hinaus wurde im Februar 2025 mit dem Bau einer zweiten MANTA-X Drohne begonnen, nachdem ausreichend Erfahrungen mit dem ersten Modell gesammelt wurden.

März 2025

Im März wurde das Paper zu den Ergebnissen der Testwoche in Rangsdorf bei der EUCNC eingereicht unter dem Titel „6G NeXt - Split Computing for Smart Drones“. Am 14.03.2025 wurde zusammen mit der TU Berlin ein weiterer Flugtag am Modellflugplatz Rangsdorf durchgeführt. Dabei wurde erstmals ein Anti-Kollisionsmanöver zwischen zwei realen Multikoptern durchgeführt. Der Test verlief sehr erfolgreich.



Abbildung 42: Annäherung einer zweiten Drohne (2) an die eigene Position (Kameradrohne)

Abbildung 43: Detektieren der Gefahr einer Kollision und Beginn des Ausweichmanövers



Abbildung 44: Ausweichmanöver durchgeführt und Abstand zur anderen Drohne wieder vergrößert

Über das getestete Manöver wurde ein Abstract für ein Paper angefertigt und im April beim DGLR (Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt) Workshop "Flugphysik und Automatisierung von unbemannten Fluggeräten" eingereicht. Es wurden darüber hinaus zwei weitere Abstracts zu den Themen „Die Entwicklung des UAV MANTA-X“ und „UAV-Helikopter LOGO600SX“ eingereicht. Im März wurde das Setup des UAV-Helikopters final abgeschlossen. Neben den Einstellungen des Flugreglers wurden eine Kamera, 5G-Modem und Raspberry-Pi integriert. Damit stehen dem Projekt drei Multikopter (X500), ein Flächenflugzeug (Timber), ein Helikopter (LOGO600SX) und zwei MANTA-X Nurflügel-VTOL mit vollständiger Kommunikationsstrecke für die Darstellung verschiedener Luftraumverkehrssituationen zur Verfügung.

April 2025

Im April 2025 wurde die zweite MANTA-X Drohne erfolgreich fertiggestellt. Diese Drohne wurde auf der Messe AERO in Friedrichshafen zusammen mit einer Multikopterdrohne X500 als Stellvertreter des Use-Case „Smart Drones“ auf dem Gemeinschaftsstand Berlin-Brandenburg präsentiert. Die Messe fand vom 09. bis 12.04.2025 statt.



Abbildung 45: Zweites fertiggestelltes Nurflügel-VTOL MANTA-X



Abbildung 46: MANTA-X und Multikopter X500 auf der AERO 2025

Mai 2025 Der Manta-X wurde initial für den ersten Übergang in den Horizontalflug konfiguriert. Nach erfolgreichem Übergang wurde in den manuellen Steuerungsmodus gewechselt, um die Flugeigenschaften des Fluggeräts unter direkter Kontrolle zu evaluieren. Diese Tests konnten erfolgreich abgeschlossen werden. Der Manta-X wurde anschließend für eine Dauer von sieben Minuten im Flächenflugmodus betrieben. Das Fluggerät neigte sich nach vorn, beschleunigte auf etwa 43 m/s und leitete den Übergang mit maximalem Schub ein, woraufhin es unkontrolliert in ein angrenzendes Feld einschlug.

Als Ursache für dieses Fehlverhalten konnten eine fehlerhafte Parametrierung der PID-Regelung sowie ein kopflastiger Schwerpunkt identifiziert werden. Nach Analyse des Vorfalles wurden entsprechende Korrekturmaßnahmen vorgenommen, darunter die Rekonstruktion beschädigter Komponenten und eine Neuauslegung der Reglerparameter sowie der Schwerpunktlage



Abbildung 47: Erhebliche strukturelle Schäden infolge des Aufpralls



Abbildung 48: Die untere Seite der Manta-X

Im Rahmen eines Partnertreffens bei der Logic Way GmbH in Schwerin wurden gezielte Messflüge mit dem Multicopter X500 durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit verschiedener 5G-Kommunikationsmodule unter realen Einsatzbedingungen zu evaluieren. Der Fokus lag auf der systematischen Erfassung von Upload- und Download-Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von Flughöhe und Entfernung zur Bodenstation.

Hierzu wurden mehrere Flugprofile abgeflogen, bei denen sowohl die absolute Flughöhe (bis zu 80 Meter AGL) als auch die horizontale Distanz (bis zu 300 Meter) variiert wurden. Während der Flüge wurden kontinuierlich Datenraten gemessen und protokolliert. Mit dem Ziel, die Eignung der 5G-Module für latenzkritische Anwendungen wie Antikollisionsalgorithmen, präzise Positionsbestimmung, Echtzeit- Fernsteuerung zu bewerten.



Abbildung 49: Debriefing nach einem Messflug

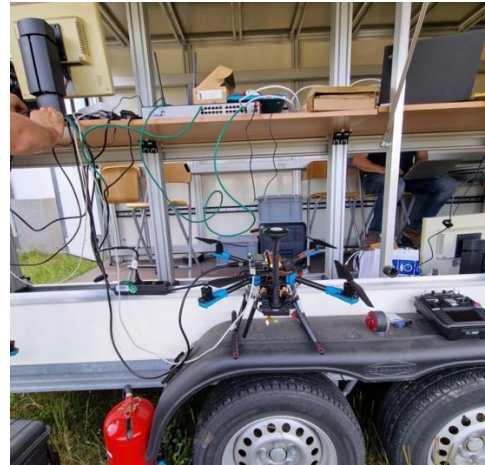


Abbildung 50: Ein X500 Multicopter wird für einen Messflug vorbereitet

Am 23. Mai wurden die im Projekt **6G NeXt** erzielten Zwischenergebnisse auf dem jährlichen Workshop der DGLR präsentiert und fanden breite Resonanz im Fachpublikum. Es wurden Abstracts zu den folgenden Themen eingereicht und vorgestellt.

- Entwicklung des UAV MANTA-X: [zum Beitrag](#)
- UAV HELIKOPTER LOGO600SX: [zum Beitrag](#)
- 6G NEXT: INTELLIGENTE DROHNEN: [zum Beitrag](#)

Juni 2025 Am 3. Juni gelang mit Manta-X ein vollständiger Flugablauf mit senkrechtem Start, Transition in den Horizontalflug, Rücktransition sowie einer anschließenden kontrollierten vertikalen Landung.

In den darauffolgenden Flügen wurde die Konfiguration des Flugcontrollers weiter optimiert. Zusätzlich wurde der Manta X mit einem Raspberry Pi 4 sowie einem 5G-Modem nachgerüstet. Über das vom Raspberry bereitgestellte WLAN-Netzwerk – zunächst im Rahmen eines Telemetrie-Vorversuchs eingesetzt – konnte während des Flugs eine Missionsdatei an das Fluggerät übertragen werden. Die Ausführung dieser Mission erfolgte erfolgreich per Befehl von der Bodenstation.



Abbildung 51: Tiefer Überflug nach erfolgreicher Reparatur



Abbildung 52: Kontrollierte Landung des Manta-X

Für die Steuerung und Überwachung der automatischen Drohnenflüge wurde eine Bodenstationssoftware benötigt, die das Verbinden mit mehreren Drohnen gleichzeitig zulässt und dem Nutzer eine einfach zu bedienende Oberfläche bietet. Die für das Einstellen der Drohnen verwendete Software Ardupilot Mission Planner erwies sich hier als problematisch für den operativen Betrieb, da sie nicht die Verbindung und Anzeige mehrerer Fluggeräte gleichzeitig zulässt. Stattdessen wurde die Open-Source-Software QGroundControl geforkt und eine angepasste Version entwickelt, die den Anforderungen der Steuerung und Monitoring der Drohnen aus der Mobilen Bodenstation heraus gerecht wurde.



Abbildung 53: Vergleich der beiden Bodenstationssoftwares QGroundControl für 6G NeXt (links) und Ardupilot Mission Planner (rechts)

So wurde beispielsweise die Anzeige eines Labels neben dem durch Anklicken auswählbaren Fluggerät angezeigt und anhand der Echtzeitdaten der Drohne der zukünftige Flugweg prognostiziert und dargestellt, wie in Abbildung 54 zu sehen ist.



Abbildung 54: Bedienoberfläche der für 6G NeXt angepassten und weiter entwickelten Open Source Bodenstationssoftware "QGroundControl", hier: Darstellung relevanter Flugparameter in einem Label, Anzeige der geplanten Trajektorie (orange) und der prognostizierten Trajektorie (magenta)

Die Bodenstationssoftware wurde außerdem um ein Modul erweitert, dass die ankommenden Live-Videostreams der Drohnen entgegen nehmen und anzeigen kann. Dafür wurde die Steuerungsoberfläche angepasst. Der Videostream der entsprechenden Drohne kann so während des Fluges verändert werden und ein Monitoring aus unterschiedlichen Positionen heraus erfolgen.



Abbildung 55: Live-Videostream von der Drohne "LOGO 600"



Abbildung 56: Durch Auswahl der entsprechenden Drohne wird der Live-Videostream gewechselt, wie hier z.B. auf die Drohne "Timber"

Juli 2025

Im Juli wurden weitere Testkampagnen am Verkehrslandeplatz EDAZ in Schönhagen durchgeführt. Ziel war es, verschiedene Anwendungsfälle miteinander zu verknüpfen und das Verhalten sowie die Qualität des 5G-Netzes auf dem Testgelände zu evaluieren. Zu diesem Zweck wurden mehrere Flüge mit dem Multikopter X500 durchgeführt. Insgesamt wurden sieben unbemannte Luftfahrtgeräte mit Autopilotensystemen aufgebaut, die für Flugtests zur Verfügung stehen. Diese Fluggeräte sind in der Abbildung 59 bis Abbildung 65 dargestellt.



Abbildung 57: Testwoche vor dem Abschlussevent in Schönhagen



Abbildung 58: Programmierung der Drohnen aus der Mobilen Bodenstation heraus

Abschluss-
event am
24.09.25



Abbildung 59: Multikopterdrohne "LOLEK"



Abbildung 61: Multikopterdrohne "PAVEL"



Abbildung 62: Multikopterdrohne "BOLEK"

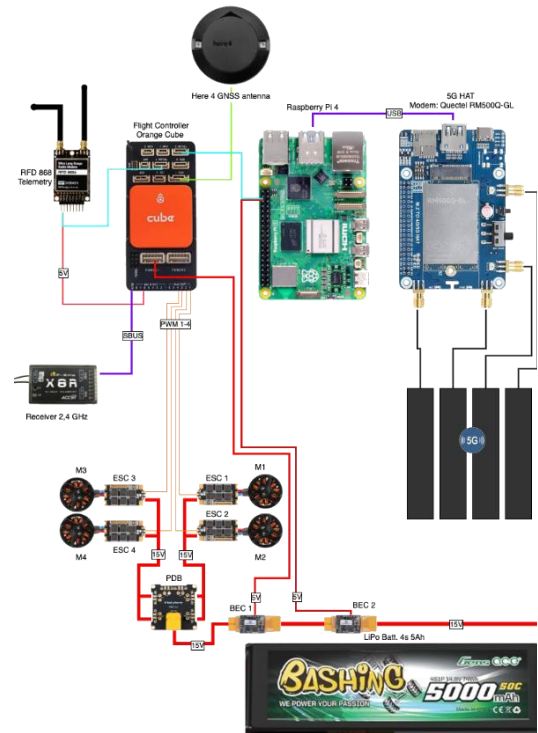


Abbildung 60: Gemeinsamer Schaltplan der Komponenten der Multikopterdrohnen, oben links: Raspberry Pi und 5G-HAT-Modul inkl. 5G-Modem

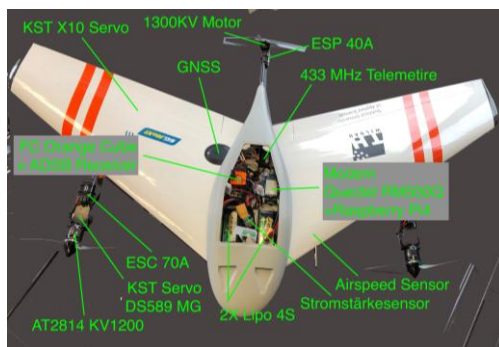


Abbildung 63: Komponenten der gebauten VTOL-Drohnen "MANTA-X"



Abbildung 64: Flächenflugzeug "TIMBER"

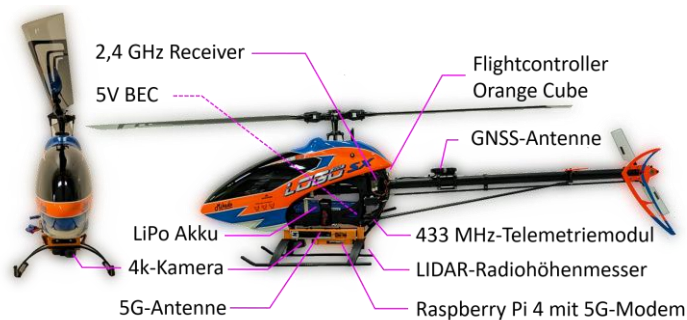


Abbildung 65: Komponenten des UAV-Helikopters "LOGO 600"



Abbildung 66: Abschlussveranstaltung im Elly-Beinhorn-Saal am Flugplatz Schönhagen



Abbildung 67: Vorträge zu den einzelnen Arbeitspaketen



Abbildung 68: Stand des Arbeitspakets 5 "Intelligente Drohnen / Smart Drones" – Visualisierung der Drohnenflüge in VR



Abbildung 69: Arbeitsbereich im Hangar für die Outdoor-Demo



Abbildung 70: Mobile Bodenstation mit 6G-Testbed und Drohnen



Abbildung 71: Monitoring-Dashboard für die 6G-Verbindung zu den Drohnen und Bodenstationssoftware zur Drohnensteuerung

REALISATION: SETUP

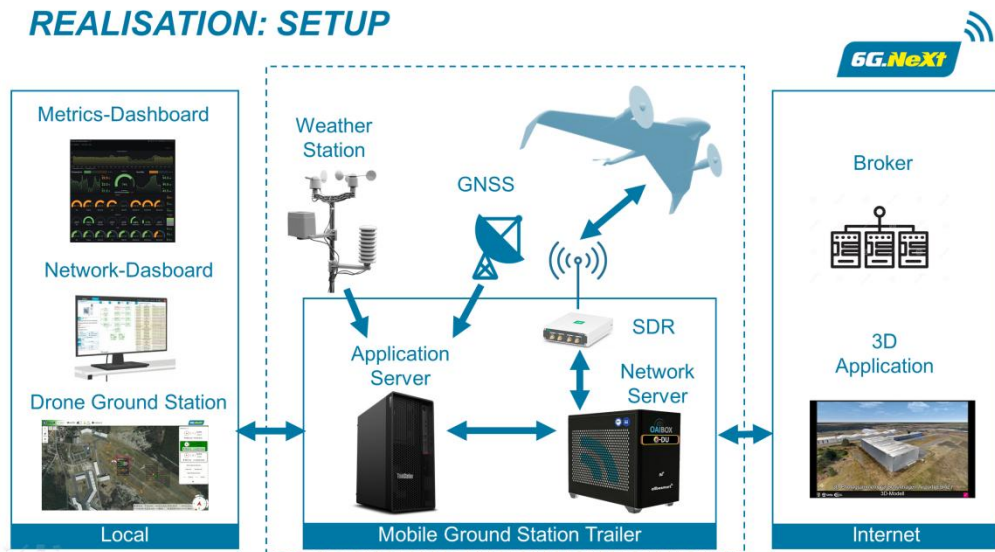


Abbildung 72: Schema des Aufbaus des AP5 "Intelligente Drohnen" für das Abschlussevent

Im Rahmen des Abschlussevents wurde die Mobile Bodenstation der TH Wildau mit dem 6G-Testbed des DFKI ausgestattet. Netzwerkserver, Software Defined Radio sowie der Application-Server wurden dort untergebracht. Wetterstation, GNSS-Antenne und 5G-Antenne wurden an einem Fahrzeugmast befestigt. Über den Application-Server wurden die Daten der Drohnen an die Bodenstationssoftware QGroundControl, an das Anti-Kollisionssystem sowie an ein Metrics-Dashboard (TU-Berlin) weitergeleitet. Für die Darstellung der virtuellen Drohnen wurde die 3D-Applikation der Deutschen Telekom ebenfalls mit aufbereiteten Daten vom Application-Server versorgt. Hierbei wurden neben den MAVLink-Daten der Autopilotensysteme der Drohnen auch Netzwerkdaten zu den Modems übertragen, um Netzwerkparameter zur Charakterisierung der Übertragungsqualität veranschaulichen zu können.

Vorhabenbezeichnung:

Laufzeit des Vorhabens:

Berichtszeitraum:

Der Zwischenbericht soll zu folgenden Punkten/Fragen kurzgefasste Angaben enthalten:

1. Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse.
2. Vergleich des Vorhabenstands mit der ursprünglichen (bzw. mit Zustimmung des ZG geänderten) Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung.
3. Haben sich die Aussichten für die Erreichung der Ziele des Vorhabens innerhalb des angegebenen Berichtszeitraums gegenüber dem ursprünglichen Antrag geändert (Begründung)?
4. Sind inzwischen von dritter Seite FE-Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind?
5. Sind oder werden Änderungen in der Zielsetzung notwendig?
6. Jährliche Fortschreibung des Verwertungsplans. Diese soll, **soweit im Einzelfall zutreffend**, Angaben zu folgenden Punkten enthalten (Geschäftsgeheimnisse des ZE brauchen nicht offenbart zu werden):
 - Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte, die vom ZE oder von am Vorhaben Beteiligten gemacht oder in Anspruch genommen wurden, sowie deren standortbezogene Verwertung (Lizenzen u. a.) und erkenn- bare weitere Verwertungsmöglichkeiten.
 - Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) - z. B. auch funktionale / wirtschaftliche Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen, Nutzen für verschiedene Anwendergruppen/-industrien am Standort Deutschland, Umsetzungs- und Transferstrategien (Angaben, soweit die Art des Vorhabens dies zulässt).
 - Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) - u. a. wie die geplanten Ergebnisse in anderer Weise (z. B. für öffentliche Aufgaben, Datenbanken, Netzwerke, Transferstellen etc.) genutzt werden können. Dabei ist auch eine etwaige Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen, Firmen, Netzwerken, Forschungsstellen u. a. einzubeziehen.
 - Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der FE-Ergebnisse.

4. Vergleich des Vorhabens mit der ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung

Antwort im Berichtszeitraum
01.01.2023 bis 31.12.2023

Arbeitsplanung: Bezüglich der Arbeitsplanung gibt es nur geringe Anpassungen. Es wurden mehrere Testbeds in Form von Multikoptern aufgebaut und eingestellt, die für Flugtests zur Verfügung stehen. Dabei wurde ein auf Open Source Software basierender Flightcontroller erfolgreich eingebunden, der es erlaubt, tiefgreifende Einstellungen am Steuerverhalten und der Funkstrecke vorzunehmen. Durch die Verwendung dieses Flightcontrollers wurde der Testflug im 5G-Netz der Telekom erst ermöglicht. Es stehen zwei Multikopter mit diesem Flightcontroller zur Verfügung. Des Weiteren wurden zwei Multikopter mit einem Ardupilot / Cube-Flightcontroller (Open-Source-Software - OSS) aufgebaut. Diese sind über eine Missionsplanung am PC konfigurierbar, um GPS-Wegpunkte abfliegen zu können. Damit kann am Gelände des Flugplatz Schönhagen die Vermessung des experimentellen 6G-Netzes in drei Dimensionen erfolgen. Darüber hinaus wurde als Testbed für Anti-Kollisionsflüge eine senkrecht-startfähige Nurflügel Drohne entwickelt, konstruiert und gebaut. Der Erstflug steht noch aus. Der Flug eines Prototyps ist bereits geglückt. Die Drohne ermöglicht es, mittlere und hohe Geschwindigkeiten zu fliegen, um die Datenübertragung per Mobilfunk bei unterschiedlichen Bedingungen testen zu können. Für das Anti-Kollisionssystem wurde eine eigene Simulationsumgebung aufgesetzt. Die Programmierung der einzelnen Funktionen ist aufwendiger als geplant. Die Integrierbarkeit der Softwarepakete in das Gesamtsystem erfolgt in Abstimmung mit den Projektpartnern. Die Modellbildung der Drohnen kann allerdings, anders als geplant, durch das angestellte Personal selbst erfolgen. Aus diesem Grund wurde eine weitere halbe Personalstelle besetzt.

Zeitplanung: Der Zeitplan kann eingehalten werden. Der Aufbau der Drohnen ging schneller voran, als geplant. Dafür erweist sich die Programmierung der Regler-Funktionen im OSS-Flightcontroller als zeitintensiver als geplant. Dies ist für die Erreichung der Projektziele jedoch kein Hinderungsgrund, da auch mit dem Ardupilot / Cube-Flightcontroller die erfolgreiche Umsetzung des Use-Cases Smart Drones möglich ist.

Kostenplanung: Es werden anders als geplant mehr kleine Bauteile benötigt, die preislich günstiger zu beschaffen sind. Die ADS-B-Transceiver werden gar nicht mehr benötigt, da diese Funktion bereits in den Carrierboards der beschafften Ardupilot-Flightcontroller integriert ist. Die Ausgaben für Personal liegen höher, da eine weitere halbe Stelle für die Modellbildung der Drohnen besetzt wurde. Die Kosten für die Unterbeauftragung zur Erstellung eines mathematischen Modells werden nicht

	mehr benötigt und sollen stattdessen für weitere Testwochen am Flugplatz Schönhagen genutzt werden. Alle anderen Positionen des Kostenplans liegen im angedachten Rahmen der Beantragung.
Antwort im Berichtszeitraum 01.01.2024 bis 31.12.2024	<u>Arbeitsplanung:</u> Hinsichtlich der Arbeitsplanung gibt es nur geringe Abweichungen zum ursprünglichen Plan. Während einer Masterarbeit wurden zahlreiche Erkenntnisse in Bezug auf das Anti-Kollisionssystem gewonnen. Dafür wurden Multikopterflüge in einer Vielzahl an Monte-Carlo-Simulationen untersucht. Im Ergebnis wurde ein Behaviour-Tree mit Ausweichstrategien entwickelt, welcher Kollisionen zu 99% vermeiden lässt. Die Arbeiten an der Theorie zum Anti-Kollisionssystem sind damit abgeschlossen. Eine Umsetzung in die Realsysteme wird schrittweise für jedes Modul durchgeführt und in der Praxis erprobt. Für die Flugtests wurden weitere Drohnen aufgebaut. Basierend auf den positiven Ergebnissen mit dem Ardupilot-Autopilotensystem wurde eine weitere Multikopterdrohne X500, eine Starrflügeldrohne (Flächenflugzeug) Timber und ein Helikopter (LOGO600SX) aufgebaut, um eine heterogene Zusammenstellung verschiedener Drohnen testen zu können. Darüber hinaus wurde nach Flugtests mit dem MANTA-X entschieden, eine weitere Nurflügeldrohne zu bauen. Somit stehen dem Projekt insgesamt sieben Drohnen zur Verfügung. <u>Zeitplanung:</u> Etwas später als geplant wurde der erste Anti-Kollisionstest mit realen Drohnen erst Anfang 2025 durchgeführt und nicht wie zuvor geplant im Jahr 2024. Die Durchführung zweier Testkampagnen in 2024 (April + September) war planmäßig und rechtzeitig angelegt, sodass eine Integration aller Projektbestandteile der Partner sichergestellt werden konnte. Die Erfahrungen aus den Tests sind wertvoll und wichtig für das weitere Vorgehen. So konnte beispielsweise die Software der automatischen Flugsteuerung basierend auf pymavlink direkt für die Integration in das Anti-Kollisionssystem genutzt werden. Ebenso konnten durch die Vor-Ort-Tests Probleme an der Software identifiziert und bereits Strategien zur Integration in die TU-Berlin-Systeme entwickelt werden. Zum Ende des Berichtszeitraums konnten die bisherigen Softwarepakete nahtlos integriert werden. Zeitlich befindet sich das Projekt im Rahmen. Ein Abschluss im Oktober 2025 ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht gefährdet. <u>Kostenplanung:</u> Für die Entwicklung und Tests der Software werden die zu Beginn des Projektes beschafften Notebooks und

	Desktop-PCs verwendet. Aufgrund des überwiegenden Einsatzes von Open-Source-Software entstehen kaum zusätzliche Kosten mehr. Für die Umsetzung des Abschluss-Szenarios wird das Anti-Kollisionssystem auf einen Applikationsserver ausgelagert, der sich am Flugplatz Schönhagen befindet. Die hier schon vorhandene Hardware wird dazu nochmals aufgerüstet, was aber insgesamt wirtschaftlicher als eine Neuanschaffung ist. Für den Bau sowie für Reparaturen an den Drohnen werden wie bereits im Vorjahresbericht beschrieben mehr kleine, günstige Komponenten sowie Verbrauchsmaterialien benötigt. Durch den Aufbau von insgesamt sieben Drohnen stehen nun genügend Testbeds zu Verfügung. Insgesamt liegt das Projekt kostenmäßig im Rahmen.
Antwort im Berichtszeitraum 01.01.2025 bis 14.10.2025	<u>Arbeitsplanung:</u> Bezüglich der Arbeitsplanung gibt es nur geringe Anpassungen. Im Berichtszeitraum wurde die Software für die Steuerung und Überwachung der Flugbewegungen der Drohnen auf Basis der Open-Source-Software „QGroundControl“ für das Projekt weiterentwickelt und angepasst. Die Logiken aus der Software-in-the-Loop-Simulation wurden in das Anti-Kollisionssystem übertragen und in realen Testflügen untersucht <u>Zeitplanung:</u> Die Programmierung der Module konnte planmäßig beendet werden. <u>Kostenplanung:</u> Die im Projekt eingesetzte Mobile Bodenstation (Zwei-Achsen-Anhänger) wurde im Laufe der Tests als zentraler Ort für das 6G-Testbed, die Steuerung und Überwachung der Drohnenflüge sowie als Werkstatt für die Drohnen genutzt. Im Rahmen dieser Tätigkeiten wurde die Mobile Bodenstation weiter ausgebaut und erhielt fest verbaute Bildschirme, Ablagefächer und ein Teleskopschienensystem, um Materialien zu verstauen. Für die Drohnen wurden nur geringfügige Ersatzbeschaffungen vorgenommen, beispielsweise für Ersatzteile wie Propeller u.ä. Kostenmäßig sind keine übermäßigen oder unerwarteten Mehrausgaben entstanden.

5. Haben sich die Aussichten für die Erreichung der Ziele des Vorhabens innerhalb des Berichtszeitraums gegenüber dem ursprünglichen Antrag geändert?

Antwort im Berichtszeitraum 01.01.2023 bis 31.12.2023	Nein, die Aussichten für die Erreichung der Ziele haben sich nicht geändert.
Antwort im Berichtszeitraum 01.01.2024 bis 31.12.2024	Nein, die Aussichten für die Erreichung der Ziele haben sich nicht geändert.

Antwort im Berichtszeitraum 01.01.2025 bis 14.10.2025	Nein, die Aussichten für die Erreichung der Ziele haben sich nicht geändert.

6. Sind inzwischen von dritter Seite FE-Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind?

Antwort im Berichtszeitraum 01.01.2023 bis 31.12.2023	Es sind in der Zwischenzeit keine anderweitigen Forschungen oder Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind. Durch die Präsentation des Projektes auf Messen sind keine vergleichbaren Ansätze bislang bekannt geworden.
Antwort im Berichtszeitraum 01.01.2024 bis 31.12.2024	Es sind in der Zwischenzeit keine anderweitigen Forschungen oder Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind. Durch die Präsentation des Projektes auf Messen sind keine vergleichbaren Ansätze bislang bekannt geworden. Gespräche auf Messen zeigen, dass es allgemein ein hohes Interesse an dem gewählten Ansatz und der Funktion einer Anti-Kollision von Drohnen untereinander, aber auch in Kombination mit der bemannten Luftfahrt gibt. Dies bekräftigt, die Forschungsarbeit auf diesem Gebiet fortzusetzen.
Antwort im Berichtszeitraum 01.01.2025 bis 14.10.2025	Es sind in der Zwischenzeit keine anderweitigen Forschungen oder Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind.

7. Sind oder werden Änderungen an der Zielsetzung notwendig?

Antwort im Berichtszeitraum 01.01.2023 bis 31.12.2023	Es sind derzeit keine Änderungen an der Zielsetzung notwendig. Die Erarbeitung der Ergebnisse mithilfe des Ardupilot / Cube Flightcontrollers ist erfolgsversprechend und wird weiterverfolgt. Die Integrierbarkeit in die Simulationsumgebung ist möglich und wird umgesetzt.
Antwort im Berichtszeitraum 01.01.2024 bis 31.12.2024	Es sind keine Änderungen an der Zielsetzung notwendig. Flugtests und zwei Testkampagnen am Flugplatz Schönhagen haben gezeigt, dass die benötigten Funktionen mit OSS-Komponenten gegeben sind. Die Flugsteuerung im Schwarm ist möglich, genauso wie die Steuerung über das 5G-Testnetz des Projektpartners DFKI. Die Architektur des Gesamtsystems erscheint sinnvoll, logisch und umsetzbar. Alle Funktionen des Anti-Kollisionssystems sind erarbeitet worden und müssen in

	Realtests überprüft werden.
Antwort im Berichtszeitraum 01.01.2025 bis 14.10.2025	An der im Vorjahr geplanten und umgesetzten Architektur sind keine Änderungen notwendig. Die Umsetzung der geplanten Softwaremodule konnte plangemäß erfolgen.

8. Jährliche Fortschreibung des Verwertungsplans.:

a. Erfindungen und Schutzrechtsanmeldungen

Antwort im Berichtszeitraum 01.01.2023 bis 31.12.2023	Es sind keine Erfindungen oder Schutzrechtsanmeldungen eingereicht worden.
Antwort im Berichtszeitraum 01.01.2024 bis 31.12.2024	Es sind keine Erfindungen oder Schutzrechtsanmeldungen eingereicht worden.
Antwort im Berichtszeitraum 01.01.2025 bis 14.10.2025	Es sind keine Erfindungen oder Schutzrechtsanmeldungen eingereicht worden.

b. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Antwort im Berichtszeitraum 01.01.2023 bis 31.12.2023	Die Entwicklung der VTOL-Drohne Manta-X kann wirtschaftlich genutzt werden. Die Drohne kann Verwendung finden bei Einsätzen von Behörden und Organisation mit Sicherheitsaufgaben (BOS), Feuerwehr und Technischem Hilfswerk, in Katastrophenfällen und bei Such- und Rettungsaktionen, aber auch als Versuchsträger für weitere Forschungsaufgaben dienen. Die Entwicklung des Antikollisionssystems kann kommerzielle Anwendung finden in Kombination von UAV in urbanen Gebieten und an Flugplätzen, die als zukünftige Verti-Port für Drohnenflüge dienen könnten. Insbesondere die Kollisionsvermeidung zwischen der bemannten und unbemannten Luftfahrzeugen ist in der allgemeinen Luftfahrt ein relevantes Thema. Die stetige Zunahme der Flugbewegungen der unbemannten Systeme birgt in Ballungsgebieten erhebliche Herausforderungen für die Sicherheit der kontrollierten und unkontrollierten Luftfahrzeugbewegungen. Die Zusammenarbeit mit dem Flugplatz Schönhagen als Forschungsflugplatz sowie der Aufbau eines 5G-Reallabors am Standort durch das Projekt 5G-Testbed-BB ermöglicht eine Verstetigung des Use-Cases zur Demonstration. Dadurch kann der Nutzen für potenzielle Kooperationspartner aufgezeigt werden und potenzielle
--	---

	Interessenten aus der Wirtschaft erreicht werden.
Antwort im Berichtszeitraum 01.01.2024 bis 31.12.2024	An den wirtschaftlichen Erfolgsaussichten hat sich nichts geändert. Wie aus Messeauftritten hervorgeht, gibt es ein großes wirtschaftliches Interesse an der senkrecht startenden und landenden Nurflügeldrohne MANTA-X. Eine Überführung in eine wirtschaftliche Nutzung ist hier direkt möglich.
Antwort im Berichtszeitraum 01.01.2025 bis 14.10.2025	Gegenüber dem Vorjahresberichtszeitraum gibt es keine Änderungen.

c. Wissenschaftliche / technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Antwort im Berichtszeitraum 01.01.2023 bis 31.12.2023	Die aus diesem Projekt gewonnene Erkenntnisse spielen eine wichtige Rolle in der Weiterentwicklung und Verbesserung des 5G Netzes hin zu einem 6G-Netz und sind unverzichtbar für die Weiterentwicklung der Drohne MANTA-X und der Simulationstechnik. Der Standort am Flugplatz Schönhagen weist hier ideale Bedingungen auf, um über das Projekt, seinen Nutzen und seine Kommerzialisierung mit Interessenspartnern in Austausch zu gelangen. Durch den Aufbau eines 5G-Reallabors durch die TH Wildau im Projekt 5G-Testbed-BB wird hier eine Plattform für den Transfer von Wissen geschaffen, über die auch zukünftige Kooperationen mit anderen Forschungseinrichtungen und Partnern aus der Wirtschaft ermöglicht werden. Eine Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen, Unternehmen und Forschungsstellen wird als Teil der Transferstrategie angesehen, um die Ergebnisse breit zugänglich und nutzbar zu machen. Durch den engen Austausch und die Verbreitung der Projekthinhalte durch Messen und den IDRF (Interessengemeinschaft der regionalen Flugplätze e.V.) werden die Ergebnisse des Projektes publiziert. Dies ist ein wesentlicher Multiplikator für die erfolgreiche Verwertung der Ergebnisse nach Projektende.
Antwort im Berichtszeitraum 01.01.2024 bis 31.12.2024	Hinsichtlich der wissenschaftlichen und technischen Erfolgsaussichten kann die Bestimmung der Flugleistungen der unterschiedlichen Drohnen angeführt werden. Diese Vermessung ist für die Erstellung der Vorhersagen zum zukünftigen Verhalten im Anti-Kollisionssystem notwendig. Dadurch wurde auch eine wissenschaftliche Untersuchung der verschiedenen Antriebs- und Flugkonzepte zwischen Flächenflugzeug, Multikopter, Helikopter und VTOL-Nurflügler (MANTA-X) erarbeitet, was eine wertvolle Datenbasis für

	Auslegungsprozesse darstellt. Weiterhin wurden mit den Drohnen fliegende „Vermessungsstationen“ entwickelt, die je nach Drohnenart unterschiedliche Tests im Bereich Telekommunikation ermöglichen.
Antwort im Berichtszeitraum 01.01.2025 bis 14.10.2025	Die aufgebauten Drohnen sind erfolgreich als Messplattformen für das 6G-Testbed eingesetzt worden. Die programmierten Algorithmen auf dem Compagnion-PC ermöglichen 3D-Netzwerktests. Mithilfe der Drohnen können unterschiedliche Core-Konfigurationen und Antennen / SDR-Kombinationen vermessen und miteinander verglichen werden. Das aufgebaute Drohnensystem in Kombination mit der angepassten Bodenstationssoftware ermöglicht das Monitoring einer Szenerie aus unterschiedlichen Blickwinkeln. Der Videostream kann bequem in der Bodenstationssoftware umgeschaltet werden.

d. Wissenschaftliche / wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Antwort im Berichtszeitraum 01.01.2023 bis 31.12.2023	Die wissenschaftliche Anschlussfähigkeit des Projektes wird zurzeit als sehr gut eingestuft. Das Thema des Use-Cases ist sehr relevant für das zukünftige Zusammenspiel zwischen bemannter und unbemannter Luftfahrt. Die stetige Zunahme an Drohnen und unbemannten Flügen wird ein derartiges System notwendig machen. Darüber hinaus wird durch den verfolgten Ansatz auch die Übertragbarkeit auf die bemannte Luftfahrt selbst nicht ausgeschlossen, wodurch sich Anschlussprojekte beispielsweise in diesem Segment offenbaren. Hier kann die TH Wildau durch ein neues Forschungsflugzeug bereits jetzt eine Grundlage für eine wissenschaftliche Anschlussfähigkeit liefern. Eine wirtschaftliche Anschlussfähigkeit ist vor allem für Flugplätze interessant. Durch den eingebundenen Flugplatz Schönhagen erfolgt hier eine unmittelbare Rückkoppelung. Dies ist sehr wertvoll und kann für die Formulierung der nächsten innovatorischen Schritte genutzt werden.
Antwort im Berichtszeitraum 01.01.2024 bis 31.12.2024	Die Programmierung der Applikation und Integration in das Netzwerk eröffnen neben dem bekannten Use Case auch neue Forschungsfelder, wie zum Beispiel die Kombination der erfassten Netzwerkdaten mit Bild- und Videoinformationen in einer Echtzeit-Auswertung. Hierbei müssen auch Indoor-Anwendungen bedacht werden, die eine ganz neue Art der räumlichen Referenzierung benötigen. Weiterhin ist die

	Anwendbarkeit von Fotogrammetrie und die KI-basierte Objekterkennung ein anschlussfähiges Forschungsgebiet, das ohne das Vorhaben nicht entdeckt worden wären.
Antwort im Berichtszeitraum 01.01.2025 bis 14.10.2025	Die im Projekt umgesetzten Applikationen von Drohnensteuerung, Anti-Kollisionssystem, Datendashboard und Live-Videostream mehrerer Drohnen in Kombination mit einer 3D-Modellerstellung aus Luftbildaufnahmen wird weitere Anwendung in Forschungsprojekten finden. Aus den Arbeiten im Projekt 6G NeXt ist ein neuer Forschungsantrag des Kernteams des AP5 unter dem Akronym „6G Skynet“ hervorgegangen.

Wildau, den 13.04.2026

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Rüther-Kindel