

Schlussbericht

EULE

Europäische UAV unterstützte Transportlösungen für medizinische Güter



Berichtszeitraum: 01.11.2021 bis 30.04.2025

Förderrichtlinie „Modernitätsfonds“

Förderkennzeichen: 01FV2010

Zuwendungsempfänger

- RWTH Aachen University, Institut für Flugsystemdynamik, Aachen, FKZ: 01FV2010A
- flyXdrive GmbH, Aachen, FKZ: 01FV2010B
- Docs in Clouds TeleCare GmbH, Aachen, FKZ: 01FV2010C
- Stadt Aachen, Aachen, FKZ: 01FV2010D
- Droniq GmbH, Frankfurt, FKZ: 01FV2010E
- Fachhochschule Aachen, Aachen, FKZ: 01FV2010F
- Uniklinik RWTH Aachen, Aachen, FKZ: 01FV2010G
- Vodafone GmbH, Düsseldorf, FKZ: 01FV2010H

Vorhabenbezeichnung

Verbundprojekt: Europäische UAV unterstützte Transportlösungen für medizinische Güter – EULE-

Laufzeit des Vorhabens:

01.11.2021 - 30.04.2025

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung	3
1.1	Aufgabenstellung	3
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	6
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	7
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand	9
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.	10
2	Eingehende Darstellung.....	10
2.1	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	10
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	82
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	84
2.4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	85
2.5	Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	87
2.6	Veröffentlichungen der Ergebnisse	88
3	Abbildungsverzeichnis	91
4	Glossar	93

1 Kurzdarstellung

In diesem Kapitel wird eingangs auf die Aufgabenstellung des Projekts eingegangen, anschließend werden die Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde, erläutert und im letzten Unterkapitel der Kurzdarstellung die Planung und der Ablauf des Vorhabens vorgestellt.

1.1 Aufgabenstellung

Medizinische Güter, wie Arzneimittel, Blut- und Gewebeproben, müssen immer wieder so schnell wie möglich zwischen pharmazeutischen Händlern, Krankenhäusern und Laboren transportiert werden. Die Nutzung neuer Mobilitätsanwendungen durch den Einsatz unbemannter Flugsysteme (UAS) bietet hierbei ein enormes Potential, da sich der Transport in der Luft durch eine größere Effizienz und Sicherheit auszeichnet. Um den Transport dieser medizinischen Güter und die Vernetzung der Krankenhäuser auch in ländlichen Regionen und bei jeder Wetterlage sicherzustellen, müssen die Fluggeräte über eine ausreichende Einsatzreichweite und eine Allwettereinsatzfähigkeit verfügen. Darüber hinaus sind eine Automatisierung der Prozesse und die vollständige Einbindung in die Logistik und Infrastruktur der Krankenhäuser notwendig, um eine Nutzung mit geringstem Aufwand bei maximalem Mehrwert zu ermöglichen. Zur Gewährleistung eines sicheren und effizienten Betriebes ist zudem eine vollständige Integration in den Luftraum notwendig. Eine ausreichende Konnektivität der Systeme ist dabei unabdingbare Voraussetzung für einen sicheren Betrieb.

Das **Institut für Flugsystemdynamik der RWTH Aachen (FSD)** übernimmt im Projekt die Rolle des Konsortialführers. Die Arbeiten des FSD konzentrieren sich im Rahmen des Projektvorhabens auf den Themenschwerpunkt „Sicherer Flugbetrieb“ mit den Teilbereichen Integration in U-Space-Services, Missionsplanung und -Steuerung, Onboard Konflikterkennung und -vermeidung. Zu den Aufgaben des FSD zählt zudem die Bereitstellung von Missionsfortschrittsinformationen sowie Positionsdaten, um die Integration in die Krankenhausprozesse und Logistik zur ermöglichen. Hier ist insbesondere die Entwicklung von Schnittstellen zur Interaktion mit der von der FH Aachen zu entwickelnden Bodenplattform von Bedeutung, um einen automatisierten Start- und Landevorgang zu ermöglichen. Außerdem wirkt das FSD bei den verschiedenen Workshops mit, um dort die luftfahrttechnischen Aspekte zu vertreten.

Bei der **flyXdrive GmbH** lag der Fokus auf der Adaption der Flugsysteme für den medizinischen Betrieb und dem Betrieb der unbemannten Flugsysteme außerhalb der Sichtweite. Ein wichtiger Aspekt war hierbei die Erarbeitung eines Konzeptes für eine zentrale Leitwarte zur Flugüberwachung inklusive gesicherter Datenübertragung. Zusätzlich wurde eine bestehende Missionssteuerungssoftware so erweitert, dass ein Einsatz dieser in der Leitwarte als Schnittstelle zwischen medizinischem Betrieb und Flugbetrieb ermöglicht wurde. Neben der Überwachung des Flugsbetriebes durch eine Leitwarte standen auch die bordeigenen Sicherheitsfunktionen für sicheren Betrieb außerhalb der Sichtweite und Einbindung in den gemeinsamen Luftraum im Fokus der Arbeiten der flyXdrive. Hierzu zählte die Einbindung von U-Space-Services und Kollisionsvermeidung.

Die **Docs in Clouds TeleCare GmbH** hat im Projekt EULE die zentrale Aufgabe eine Vernetzung des Flugsystems mit den Krankenhausprozessen zu realisieren. Zentrale Komponente ist dabei die Entwicklung einer dezentralen Kommunikationsplattform, die auf dem sicheren, föderierten Messenger-Protokoll Matrix aufbaut und alle Teilsysteme miteinander verbindet. Dabei sollte Plattform in der Lage sein, beliebige strukturierte Daten zwischen den einzelnen Teilnehmern und Anwendungen auszutauschen. Darüber findet die Bedienung des Flugsystems durch den Endanwender statt, als auch

der Austausch von behandlungsspezifischen Daten zwischen der entsendenden und der empfangenden Einrichtung der transportierten medizinischen Güter.

Eine grafische Anwendung (GUI) erlaubt den Anwendern mit dem Flugsystem zu interagieren, Flugaufträge erstellen, verwalten und den aktuellen Status abrufen zu können. Außerdem wird die Funktion des medPorts durch die Anwendung gesteuert, wobei die Nutzenden Workflow-basiert durch die Prozesse des Be- und Entladens der Flugsysteme geführt werden.

Eine interne API-Spezifikation definiert welche strukturierten Daten über das Matrixprotokoll zur Steuerung des Flugsystems ausgetauscht werden.

Um Flugaufträge auch programm-basiert in Krankenhausprozesse einbinden zu können, wurde eine Schnittstelle auf Basis des medizinischen Interoperabilitätsstandards FHIR spezifiziert.

Die **Stadt Aachen** war im Projekt EULE zuständig für die Integration kommunaler Perspektiven in das Gesamtkonzept. Im Fokus standen Anforderungen der Stadtgesellschaft an den urbanen Drohnenbetrieb, Aspekte gesellschaftlicher Akzeptanz sowie die Kommunikation zwischen Projekt, Verwaltung und Öffentlichkeit. Die Stadt übernahm außerdem die Koordination und Durchführung von Beteiligungsformaten, um Bedarfe potenzieller Anwender zu identifizieren.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der strategischen Vernetzung mit nationalen und europäischen Partnerregionen, Gremien und Förderstrukturen. Die Stadt Aachen brachte ihre Perspektive als Modellregion in die monatlichen Treffen der deutschen UIC2-Städte (Aachen, Hamburg, Berlin, Nordhessen, Ingolstadt) ein, war an europäischen Austauschformaten mit der Europäischen Kommission, EASA und EUROCONTROL beteiligt und wirkte aktiv bei internationalen Veranstaltungen wie der Amsterdam Drone Week, der polisMOBILITY sowie dem CIVITAS Forum mit.

Zudem übernahm Aachen eine aktive Rolle in der UIC2-Taskforce „Societal Embrace“, in der sie sich gezielt mit der Frage beschäftigte, wie gesellschaftliche Akzeptanz für UAM gefördert und in Planungsprozesse eingebunden werden kann. Durch diese Arbeit trug die Stadt Aachen maßgeblich dazu bei, die Rolle von Kommunen als legitime Mitgestalter neuer Mobilitätstechnologien auf europäischer Ebene zu stärken.

Die Rolle der **Droniq GmbH** im Projekt EULE konzentriert sich auf die Integration des Flugsystems in das Droniq-eigene UTM-System und auf die Bereitstellung der zugehörigen U-Space Dienste. Zu ihren Aufgaben gehören die Untersuchung des Anforderungsprofils medizinischer Dienste an Hard- und Software, sowie die Integration des Droniq-eigenen prototypischen Transponders HOD4track als Hook-In Device. Weiter wird analysiert, wie der sichere Betrieb des Flugsystems und die Integration in den Luftraum während des gesamten Fluges sichergestellt werden kann. Hierzu gehört auch eine Feststellung der Kompatibilität des Flugsystems mit den zukünftig notwendigen U-Space Diensten und der sicheren Interaktion mit dem bemannten Flugverkehr.

Die Aufgabenstellung der **FH Aachen** umfasst die Entwicklung und Umsetzung des Teilsystems medPort. Die Aufgabe besteht darin, eine Bodenplattform zu entwerfen, die als Schnittstelle zwischen den Anwender:innen und dem Fluggerät dient. Diese Bodenplattform (genannt medPort) automatisiert dabei den Start, die Landung und die Turnaround-Prozesse des Fluggeräts. Die Turnaround-Prozesse beschreiben die Menge aller notwendigen Tätigkeiten zum erneuten Einsatz des Fluggeräts. Die Interaktion der Nutzer:innen mit dem Fluggerät beschränkt sich somit auf die Be- und Entladung von

medizinischen Gütern. Der medPort bildet somit das Verbindungsglied für einen unterbrechungsfreien Regelbetrieb von EULE.

Die Arbeiten der FH Aachen im Forschungsprojekt umfassen:

- AP 1.1 und AP 1.4: Use-Case-Analyse und Systemarchitektur des medPorts.
- AP 2.1 und AP 2.3: Schnittstelle zwischen Krankenhausprozessen und Flugdurchführung für den Betrieb des medPorts, sowie die Nutzlastintegration. Letzteres beschreibt die Entwicklung des medPorts und bildet somit das Hauptarbeitspaket der FH Aachen.
- AP 4.1: Adaption des Fluggeräts, um eine sichere und zuverlässige Landung garantieren zu können.
- AP 5.2 und 5.3: Flugdurchführung und Verwertung der gesammelten Daten. Die FH Aachen betreibt dabei den medPort und führt die automatisierten Start- und Landevorgänge durch.

Notwendig dafür ist eine Anforderungsanalyse, aus der die Systemarchitektur zur weiteren Planung erstellt werden kann. Ein zentraler Bestandteil der Arbeit ist die Integration aller benötigten Komponenten, auch die der Projektpartner. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung eines Greifsystems, das bei Bedarf an das Flugsystem angepasst wird. Die wesentliche technologische Herausforderung liegt in der Software der Bodenplattform. Die Entwicklung von Sensorfiltern, Hardwaretreibern und Reglern bildet den anspruchsvollsten Aufgabenbereich des Forschungsprojekts. Zudem unterstützt die FH Aachen bei der Durchführung der Flugtests und wertet die Ergebnisse aus. Die gewonnenen Erkenntnisse werden zur iterativen Anpassung der Bodenplattform und des Greifprozesses genutzt.

Im Projekt EULE übernahm die **Uniklinik Aachen** vielfältige Aufgaben, die medizinische, logistische und wissenschaftliche Aspekte des Projekts abdeckten. Dazu zählten neben der Definition konkreter Anwendungsfälle und der Erstellung eines Use-Case-Katalogs auch die Durchführung einer detaillierten Anforderungsanalyse. Diese wurde in enger Zusammenarbeit mit klinischen Anwendern aus verschiedenen Fachrichtungen der Uniklinik Aachen durchgeführt. Auf Grundlage der Anforderungsanalyse wurden dann Demonstrationsszenarien festgelegt. Die Uniklinik Aachen hat außerdem die medizinischen Betriebsabläufe innerhalb der Klinik, sowie die logistischen Prozesse analysiert in Hinsicht auf den aktuellen Status Quo. Darauf aufbauend wurde das Potential zur Optimierung erhoben und die Anforderung für eine automatisierte Einbindung eines Drohnen-Transport-Systems in die klinischen Logistikprozesse beschrieben. Die Bereitstellung von medizinischem Input für die Integration von geeigneten Nutzlasten, war für die Weiterentwicklung und Anpassung des Drohnensystems im Projektverlaufs maßgeblich. Die Uniklinik Aachen hat darüber hinaus das Projekt wissenschaftlich begleitet, indem die Konzeption, Planung und Durchführung einer begleitenden Feldstudie erfolgt ist. Die wissenschaftliche Auswertung der Studienergebnisse, sowie die Verwertung der Projektergebnisse waren auch zentrale Projektaufgaben, die bearbeitet wurden. Zusätzlich war die Uniklinik Aachen auch an der Planung und Durchführung von Demonstrationsflügen beteiligt, sowie an der Vorbereitung eines möglichen Regelbetriebs. Dies erfolgte insbesondere durch die Durchführung von Workshops mit Stakeholdern.

Die **Vodafone GmbH** hatte in diesem Vorhaben die Aufgabe zu gewährleisten, dass eine stabile, den Anforderungen gerecht werdende Mobilfunkverbindung zur Verfügung gestellt wird. Nur so kann die Kommunikation zwischen der Drohne und allen anderen Akteuren im Gesamtkonzept gewährleistet werden. Zu diesem Zweck mussten umfassende Messflüge zur Erhebung der Qualität des

Mobilfunknetzes im Zielgebiet durchgeführt und evaluiert werden. Im Fall eines, den Anforderungen nicht genügenden Zustands, muss eine Optimierung des Mobilfunks durchgeführt werden.

Des Weiteren sollte die Vodafone GmbH eine Bewertung der Anforderungen an den Datenschutz im Rahmen der Anwendung und der Dabei erhobenen Daten durchführen und eventuelle Handlungsmaßnahmen ermitteln.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt leistet einen direkten Beitrag zum Aktionsplan „Unbemannte Luftfahrtsysteme und innovative Luftfahrtkonzepte“ der Bundesregierung. Die im Aktionsplan aufgeführten Aspekte der Integration unbemannter Luftfahrtsysteme in den Luftraum zur Gewährleistung eines sicheren und effizienten Betriebes und die Nutzung der UAS für den Transport medizinischer Güter werden, durch die im Projekt zu behandelnden Forschungsaspekte bedient.

Unbemannte Flugsysteme zeigen großes Potenzial für den Transport medizinischer Güter, wie Arzneimittel und Proben. Besonders in ländlichen Regionen, die oft über eine schwächere Infrastruktur verfügen, kann diese Technologie eine signifikante Verbesserung der medizinischen Versorgung darstellen.

Für die notwendigen Arbeiten in dem Projekt war ein Verbund aus Experten mit verschiedenen fachlichen Hintergründen erforderlich. Die Kooperationspartner brachten diese notwendige Expertise für die erforderlichen Arbeiten im Forschungsprojekt EULE erfolgreich ein.

Der Projektpartner flyXdrive GmbH stellt hierfür ein unbemanntes Fluggerät vom Typ NEO zur Verfügung, welches mit einer Reichweite von bis zu 100 km die Verknüpfung von medizinischen Einrichtungen ermöglicht.

Um eine einfache und reibungslose Interaktion zwischen dem medizinischen Personal und dem Fluggerät zu ermöglichen, soll eine automatisierte Bodenplattform entwickelt werden. Diese reduziert die notwendige Interaktion und bietet einen niederschweligen Einsatz von unbemannten Transportfluggeräten. Die Plattform verwendet als zentrales Element einen Roboterarm, welcher sowohl für den Start- und Landevorgang des Fluggeräts als auch für dessen Handhabung zur Nutzlastbereitstellung verwendet werden soll. Besonders der Landevorgang eines schwebenden Fluggeräts stellt eine technische Herausforderung dar, da dieses schwebend aus der Luft gegriffen werden soll. Um dies zu ermöglichen ist eine präzise und ausfallsichere Lokalisierung des Fluggeräts notwendig. Der dabei eingesetzte Roboterarm ist ein Industrieroboter, welcher für klassische Automatisierungsarbeiten konzipiert wurde. Um den Fangprozess durchführen zu können, ist die Entwicklung einer echtzeitfähigen und fehlertoleranten Schnittstelle erforderlich. Das Fangen des Fluggeräts selbst erfordert einen vorausschauenden und hochdynamischen Regelungsprozess, welcher zeitlich deterministisch Sollpositionen an den Roboterarm übergeben muss.

Das Projekt wurde seitens der Stadt Aachen durch das Dezernat für Wirtschaft, Wissenschaft, Digitalstadt und Europa getragen. Es bestand eine enge Anbindung an die städtische Plattform für Wissenschaftskommunikation und Innovationstransfer OecherLab, wodurch frühzeitig infrastrukturelle, kommunikative und verwaltungsbezogene Voraussetzungen geschaffen wurden. Die interne ämterübergreifende Zusammenarbeit wurde durch bestehende Strukturen für Innovationsprojekte unterstützt.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Nachfolgend wird das Projektkonsortium vorgestellt und anschließend sowohl auf die Arbeitsinhalte als auch auf den Arbeitsplan eingegangen.

Projektkonsortium:

Um die Zielsetzung des Projektvorhabens EULE zu erreichen, hat sich ein Konsortium aus acht Partnern, bestehend aus Forschungseinrichtungen, klein- und mittelständischen Unternehmen (KMU) sowie Großunternehmen gebildet. Das Projektkonsortium vereint Expertisen aus verschiedenen Bereichen und wird durch das Institut für Flugsystemdynamik der RWTH Aachen koordiniert.

Tabelle 1: Projektbeteiligte im Forschungsprojekt EULE

Projektbeteiligte		
Nr.	Kürzel	Projektbeteiligte
1	FSD	RWTH Aachen University, Institut für Flugsystemdynamik
2	FXD	flyXdrive GmbH
3	DiC	Docs in Clouds TeleCare GmbH
4	STAC	Stadt Aachen
5	Droniq	Droniq GmbH
6	FH	Fachhochschule Aachen
7	UKA	Uniklinik RWTH Aachen
8	VF	Vodafone GmbH

Arbeitsinhalte:

Das Forschungsvorhaben gliedert sich in fünf Hauptarbeitspakete. Diese sind wiederum in Teilarbeitspakete unterteilt. Der für das jeweilige Hauptarbeitspaket verantwortliche Konsortialpartner ist in der untenstehenden Tabelle fett hervorgehoben

Tabelle 2: Arbeits- und Teilarbeitspakete im Forschungsprojekt EULE

Hauptarbeitspakete	Teilarbeitspakete	Beteiligte am Arbeitspaket (Leitung des Teilarbeitspaketes fett hervorgehoben)
1 Anforderungsanalyse	1.1 Use-Case-Analyse	FXD, Stadt Aachen, DiC, FSD, FH, UKA , Vodafone
	1.2 Demonstrationsdefinition	Stadt Aachen, FXD, FSD, DiC, UKA, Vodafone
	1.3 Betriebserlaubnis	FXD, FSD, Stadt Aachen
	1.4 Systemarchitektur	FSD, DiC, FH
2 Medizinischer Betrieb	2.1 Schnittstelle zwischen Krankenhausprozessen und Flugdurchführung	FXD, DiC , FSD, FH, UKA, Vodafone
	2.2 Rechte und Rollen/Datenmanagement	DiC, UKA, Vodafone
	2.3 Nutzlastintegration	FXD, DiC, FSD, FH, UKA
3 Konnektivität	3.1 5G-Betrieb und Konnektivität	Vodafone , FXD
	3.2 Datenschutz und Rechteverwaltung	Vodafone

	3.3 Leitwarte für Flugdurchführung	FXD, DiC, Vodafone, FSD
	3.4 Missionssteuerung inkl. Flottenmanagement	FXD, FSD
4 Sicherer Flugbetrieb	4.1 Adaption des Flugsystems	FXD, FH, FSD
	4.2 Integration in U-Space-Services	Droniq, FSD
	4.3 Onboard Konflikterkennung und -bewertung	FSD
	4.4 Flugbahnplanung zur Konfliktvermeidung	FSD
5 Vorbereitung Regelbetrieb	5.1 Workshops zum Regelbetrieb	Stadt Aachen , DiC, FSD, UKA
	5.2 Flugdurchführung auf ausgewählten Routen	alle
	5.3 Validierung und Verwertung	alle

Arbeitsplanung:

Die Stadt Aachen war insbesondere in AP1.1, AP1.2, AP5.1, AP5.2 und AP5.3 aktiv beteiligt. Die Projektplanung und -koordination lagen beim Konsortialführer, dem Institut für Flugsystemdynamik (FSD) der RWTH Aachen. Die Stadt Aachen unterstützte den Projektverlauf durch gezielte Beiträge in mehreren zentralen Arbeitspaketen – insbesondere in den Bereichen Anforderungsanalyse, Demonstrationskonzeption, Regelbetriebs-Workshops und Öffentlichkeitsarbeit.

In enger Abstimmung mit dem FSD und weiteren Partnern übernahm die Stadt Aachen Aufgaben im Bereich der kommunalen Einbindung, der gesellschaftsbezogenen Begleitmaßnahmen sowie der Verbreitung der Projektergebnisse. Dabei lag ein besonderer Fokus auf der Durchführung von Formaten wie der Bürger*innenwerkstatt, dem Anwenderworkshop und dem Science Camp, durch die Rückmeldungen aus der Stadtgesellschaft und von künftigen Nutzergruppen in die technische und planerische Projektentwicklung zurückgespielt wurden.

Die Öffentlichkeitsarbeit der Stadt Aachen – inklusive Aufbau der Projektwebsite, Entwicklung eines visuellen Projektauftritts, Produktion eines Erklärfilms sowie Beiträge auf städtischen und sozialen Kanälen – unterstützte den Wissenstransfer in die Region und darüber hinaus.

Im Rahmen der europäischen und nationalen Vernetzung war die Stadt außerdem kontinuierlich im Austausch mit anderen Modellregionen und vertrat das Projekt bei mehreren öffentlichen Veranstaltungen und Fachkonferenzen.

Die flyXdrive war insbesondere an den Arbeitspaketen 3, 4 und 5 beteiligt. In Arbeitspaket 3 wurden Forschungsfragen zum gleichzeitigen Flugbetrieb mit mehreren Flugsystemen adressiert und eine dafür notwendige Leitwarte konzipiert. In Arbeitspaket 4 wurden die für das Projekt notwendigen Adaptionen am Flugsystem durchgeführt und in Arbeitspaket 5 unterstützte die flyXdrive bei der Vorbereitung eines Regelbetriebes.

Für das FSD ist AP 4 „Sicherer Flugbetrieb“ mit seinen Teilarbeitspaketen 4.1, 4.2, 4.3 und 4.4 das Hauptarbeitspaket. Hier liegt der Fokus besonders auf der sicheren Luftraumintegration von unbemannten Flugsystemen und der Konfliktvermeidung. Als Konsortialführer ist das FSD an vielen weiteren Arbeitspaketen beteiligt.

Im Rahmen des Projekts fanden regelmäßige Besprechungen statt. Das Projekt war gekennzeichnet durch sehr gute Unterstützung und gute Zusammenarbeit aller Kooperationspartner untereinander, sowie mit dem Projektträger. Viele Besprechungen erfolgten online, aber ermöglichten einen einfachen und regelmäßigen Kontakt zwischen allen Beteiligten.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Der Transport eiliger medizinischer Güter mittels unbemannter Flugsysteme ist ein hochaktuelles Thema, bei dem viele unterschiedliche Aspekte, wie die Luftraumintegration, die Akzeptanz in der Bevölkerung und die Einbindung in die Krankenhausprozesse und Logistik berücksichtigt werden muss.

Durch die Mitarbeit von Projektpartnern und Personen, die bereits im Projekt Paketkopter 3.0 an der Packstation SkyPort beteiligt waren, bestand bereits Vorwissen zur Entwicklung einer Bodenplattform und des Handlings von Fluggeräten. Im Vergleich zum SkyPort ist der im Projekt EULE entwickelte medPort signifikant kleiner im Ausmaß (medPort-Grundfläche 1,2 m x 1,8 m im Vergleich zur SkyPort-Grundfläche von ca. 5 m x 5 m) und mobil einsetzbar. Es werden keine weiteren Rahmenbedingungen an den Aufstellort gestellt, wie etwa das Betonfundament des SkyPorts. Durch die im medPort verwendete aktive Regelung ist die Bodenplattform in der Lage ein vom Sollzustand abweichend schwebendes Fluggerät zu fangen gegenüber der passiven Landefläche des SkyPorts.

Im Rahmen der Arbeitspakete AP4.2, AP5.2 und AP5.3 wurde die Integration des im Projekt genutzten Flugsystems in U-Space-Services erfolgreich realisiert und validiert. Die Durchführung und Sichtbarmachung zahlreicher Testflüge über das Hook-In-Device ermöglichten eine umfassende technische Erprobung. Dabei wurden Telemetriedaten auf Korrektheit geprüft, das System optimiert und das Hook-In-Device produktiv ins Droniq UTM-System eingebunden. Die erhobenen Flugdaten flossen direkt in die Weiterentwicklung des Hook-In-Devices ein. Dies führte zur Entwicklung der neuen Transpondergeneration HOD V3, die bereits über das Projekt hinaus Anwendung findet. Die Systemintegration, Datenvalidierung und Produktivsetzung wurden somit erfolgreich abgeschlossen und liefern einen substanziellen Beitrag zur operativen U-Space-Fähigkeit.

UAS bieten als innovative Zukunftstechnologie ein immer größeres Einsatzspektrum. Die Entwicklungen der vergangenen Jahre belegen das große Potential im Bereich der Versorgung, der Mobilität und der medizinischen Anwendungsfälle. Die Relevanz dieser Anwendung und der des beantragten Forschungsprojektes wird durch den Aktionsplan der Bundesregierung „Unbemannte Luftfahrtsysteme und innovative Luftfahrtkonzepten“ untermauert.

In abgeschlossenen und laufenden Forschungsprojekten wurde/wird gezeigt, dass der Transport durch UAS große Potentiale für eine Verbesserung der medizinischen Versorgung im urbanen und im ländlichen Raum bietet (Medifly-Hamburg, Medifly, SKBS-drone, KODRONA, MEDinTime, FlowPro). In diesen Projekten wird demonstriert, dass die fortschreitende Automatisierung und Digitalisierung für den sicheren Betrieb von UAS von entscheidender Bedeutung sind. Mit FlowPro teilt sich EULE inhaltlich die Disponierung von Transportaufgaben und das Flottenmanagement, grenzt sich aber deutlich ab bezüglich der Luftraumintegration und dem Betrieb auch über größere Strecken unter variablen und schwierigen Wetterbedingungen. EULE ergänzt Medifly2 komplementär bezüglich Flüge über größere Distanzen mit einem Kippflügelflugsystem bei größerer Variabilität der Transportaufgaben. Daher spielen in EULE komplementär zu Medifly2 die automatisierte Einbindung durch medPorts mit Vernetzung in die Krankenhausprozesse und eine zentrale Betriebsleitwarte für den Flugbetrieb eine noch größere Rolle. Mit den Medifly-Projekten gibt es mit den Partnern aus EULE

bereits jetzt einen kontinuierlichen Austausch, der im Projektverlauf insbesondere zu den überschneidenden Themen BVLOS/Luftraumintegration und U-Space weiter ausgebaut werden wird

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.

Um eine hohe Akzeptanz und Nutzbarkeit der Bodenplattform zu gewährleisten, hat die FH Aachen mit medizinischem Fachpersonal aus dem Uniklinikum Aachen zusammengearbeitet. Das Feedback wurde bereits in der Entwurfsphase eingeholt, um späten Anpassungen zuvorzukommen. Zur Einbindung und Integration in bestehende Prozesse der medizinischen Anwender:innen hat die FH Aachen den durchgeführten Anwenderworkshop unterstützt, bei dem unter anderem Vertreter der Firmen Otto Geilenkirchen und des MVZ Stein aus Mönchengladbach teilnahmen. Des Weiteren hat die FH Aachen bei Workshops zur Öffentlichkeitsarbeit in der Vorbereitung mit den Partnern zusammengearbeitet, um alle Aspekte der Bodenplattform abzubilden.

Innerhalb des Projektes wurden das Luftfahrtbundesamt (LBA) und die NRW-Landesluftfahrtbehörde der Bezirksregierung in Düsseldorf für den Flugbetrieb mit einbezogen. Insbesondere hinsichtlich der erforderlichen Genehmigungen für den Betrieb in der Nähe des Uniklinikums, für den Abwurf von Gegenständen zur Fallschirmerprobung und den Flugbetrieb außerhalb der Sichtweite fand ein konstruktiver Austausch statt. Zusätzlich unterstützten das Verkehrsministerium NRW und die Projektgruppe Unbemannte Luftfahrt (PG UmBLF) des BMVI als beratende Stellen, insbesondere innerhalb des Genehmigungsprozesses.

2 Eingehende Darstellung

In diesem Schlussbericht werden die Arbeitsanteile aller Partner des Projektkonsortiums zusammengefasst. Im Folgenden werden die einzelnen Ziele der Arbeitspakete und die tatsächlich erreichten Ergebnisse beschrieben.

2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

HAP 1	Anforderungsanalyse
Gesamtziel	Durchführung einer interdisziplinäre Anforderungsanalyse durch Beteiligung aller Partner. Aufbauend auf der Anforderungsanalyse wird eine Demonstrationsdefinition erarbeitet.
AP 1.1	Use-Case-Analyse
Ziele des Arbeitspakets	
In AP1.1 wird nach einer Szenariendefinition konkret ein Use-Case-Katalog mit 10-15 Anwendungs-Beschreibungen nach dem Cockburn-Schema erarbeitet.	

Zu Beginn des Projektes war die erste Aufgabe der Uniklinik im Rahmen des ersten Arbeitspaketes eine Use-Case Analyse durchzuführen und anhand dieser einen Use-Case Katalog zu erstellen. Dies wurde unmittelbar bearbeitet und der erarbeitete Use-Case Katalog nach dem Cockburn-Schema enthielt 16 Anwendungsbeschreibungen. Diese wurden gemeinsam mit dem gesamten Konsortium abgestimmt.

Der Use-Case Katalog besteht aus den in Tabelle 3 gezeigten Anwendungsfällen.

Tabelle 3 Use-Case Katalog

Use-Case Nummer	Use-Case
1	Transportwunsch im System hinterlegen (inkl. Rückmeldung)
2	Transportgut für den Transport herrichten
3	Bereitstellung des Flugsystems
4	Einlegen des Transportguts in des Flugsystem/ den MedPort
5	Überwachung des Transportes
6	Änderung des Transportwunsches
7	Flugdurchführung
8	Transportankündigung beim Empfänger
9	Entnahme des Transportguts in des Flugsystem/ den MedPort
10	Eingliederung in die Logistikkette die Zielortes
11	Wieder-Aufbereitung des Flugsystems für Folgetransport
12	Optionale Zwischenlagerung
13	Schulung
14	Wartung des Flugsystems
15	Backup bei Ausfall des Systems
16	Rechteverwaltung

Im Anschluss wurde eine ausführliche Anforderungsanalyse durchgeführt. Zunächst wurde demzufolge intern eruiert welche Fachbereiche innerhalb der Uniklinik Aachen (UKA) überhaupt in Bezug auf den Transport medizinischer Güter per Drohne in Frage kämen. Diese wurden als potentiell interessierte interne klinische Anwender aufgelistet. Zudem wurde herausgearbeitet welche externen Dienstleister gegebenenfalls in Frage kämen. Als drittes wurde evaluiert welche weiteren Kliniken im Umkreis in Frage kämen.

Dann erfolgte eine erste Kontaktaufnahme zu diesen ausgewählten einzelnen medizinischen Fachbereichen des Universitätsklinikums Aachen (UKA) und zu mehreren externen Krankenhäusern bzw. labor-medizinischen Zentren zwecks Planung der Analyse derer Bedürfnisse. Insgesamt wurden dabei 11 medizinischen Fachbereiche innerhalb des UKA und 5 externe Anwender kontaktiert.

Nach initialer Kontaktaufnahme zeigten zunächst nur 6 medizinische Fachbereiche innerhalb des UKA (Apotheke, Zentrales Labor, Pathologie, Hornhautbank, Notaufnahme und Transfusionsmedizin) und ein externer Anwender (labormedizinisches Zentrum MVZ Stein und Kollegen) Interesse an dem Projekt. Mit diesen wurde dann im weiteren Verlauf eine detaillierte anwenderspezifische Anforderungsanalyse in mehreren Online- und vor Ort Meetings durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Analysen führte zur Definition von spezifischen medizinischen, logistischen und gesetzlichen Anforderungen und Ausschlusskriterien für die einzelnen zu transportierenden medizinischen Güter. Nach kritischer Betrachtung und Re-Evaluation der einzelnen potenziellen Anwendungsfällen in Hinblick auf deren Anforderungen und in Relation zu unseren Möglichkeiten und Projektzielen wurde eine Auswahl der optimalen Anwendungsfällen und zu transportierenden medizinischen Güter getroffen.

Außerdem wurden nach der initialen Kontaktaufnahme mit den medizinischen Fachbereichen des Universitätsklinikums Aachen drei externe Krankenhäuser in Euskirchen, Mechernich und Erkelenz angesprochen. Ihnen wurde das Projekt vorgestellt und mögliche Anknüpfungspunkte skizziert. Zudem wurde das labor-medizinische Zentrum MVZ Stein sowie der Apotheken-Großhandel Otto Geilenkirchen (beide mit Standort Mönchengladbach) einbezogen, um mögliche Routinerouten zu konzipieren. Diese vorbereitenden Maßnahmen dienten als Basis für einen geplanten Anwenderworkshop.

AP 1.2	Demonstrationsdefinition
Ziele des Arbeitspakets	
Innerhalb des AP1.2 werden die vorzunehmenden Demonstrationsflüge entsprechend der geplanten Szenarien definiert. Durch die Einbindung aller Konsortialteilnehmer sowie der assoziierten Partner wird sichergestellt, dass die Anforderungen aller Nutzer (Krankenhäuser und Labore) berücksichtigt werden.	

Im nächsten Schritt wurden anhand der zuvor ausgewählten optimalen Anwendungsfälle sogenannte Missionsszenarien definiert, die als Grundlage für die Planung der im Projektverlauf durchzuführenden Demonstrationsflüge dienen sollten. Das UKA hat an der Sichtung und Planung der potenziellen Flugrouten und der Berücksichtigung der Anforderungen aller beteiligten Nutzer (Krankenhäuser, Labore und andere externe Dienstleister) mitgearbeitet.

Als potenzielle Anwender haben sich unterschiedliche Abteilungen der Uniklinik Aachen (UKA) herauskristallisiert. Dazu gehören das Institut für Pathologie, die Hornhautbank UK Aachen und das Medizinische Versorgungszentrum (MVZ) Dr. Stein & Kollegen Mönchengladbach. Die Anwender haben jeweils unterschiedliche Standorte zu denen Proben und medizinische Güter geliefert werden. Die Anforderungen an den Transport und somit mögliche Demonstrationsorte werden im Folgenden näher beleuchtet.

Das **Institut für Pathologie der Uniklinik Aachen** möchte verschiedenste Proben für labordiagnostische Untersuchungen transportieren. Die Proben werden zurzeit mit Fahrern an Zielorte wie das Krankenhaus in Stolberg, das Louisenhospital oder das MVZ in Aachen überführt. Als potenziellen Demonstrationsstandort für das Projekt EULE zeigt sich das Krankenhaus in Stolberg am geeignetsten. Die Proben werden 2-3x pro Tag bereitgestellt und eine Vorlaufzeit von einem Tag bis ein paar Stunden vor Transport wird gewährleistet. Je nach Art der Probe bestehen bestimmte Transportbedingungen. Bei formalin-fixierten Proben darf ein Temperaturbereich von +4°C bis +25°C nicht verlassen werden. Bei Schnellschnitten muss die Temperatur während des Transports zwischen +2°C und +8°C liegen.

Die **Hornhautbank UK Aachen** versendet die Spenderhornhautpräparate einzeln verpackt in 100 ml Flaschen, welche für den Transport zusätzlich mit Styropor und Schaumstoff geschützt sind. Die Kartons mit den Fläschchen werden zurzeit einzeln mit einem Fahrer per Auto versendet. In Ausnahmefällen erfolgt der Transport per Zug oder Flugzeug. Die Hauptabnehmer sind die Uniklinik Köln und die Uniklinik Düsseldorf, aber auch andere Hornhautbanken in ganz Nordrhein-Westfalen. Als mögliche Demonstrationsorte würden hier die Uniklinik Aachen, sowie die Unikliniken Köln und Düsseldorf in Frage kommen. Die Präparate gelten als Gewebezubereitung und damit als Arzneimittel. Sie verweilen in der Regel ca. 2 Wochen in der Hornhautbank und die Vorlaufzeit für den Transport beträgt in der Regel eine Woche. Insgesamt finden pro Woche ca. 10 – 20 Transporte statt. Wobei 1-2 Notfalltransporte durchaus möglich sind, diese haben dann eine Vorlaufzeit von ca. einem Tag. Die Präparate dürfen für den Transport einem Temperaturbereich von +10°C bis +40°C nicht verlassen und

dürfen nicht gekippt oder stark geschüttelt werden. Die Temperatur und Vibration sollte während des Fluges mit Hilfe von Sensoren erfasst werden.

Das **MVZ Stein & Kollegen** mit Sitz in Mönchengladbach stellt Laborproben bereit. Als potenzielle Zielstandorte können das Krankenhaus in Würselen und die Klinik in Maastricht betrachtet werden. Transporte finden einmal die Woche statt, Spezialanalytiken etwa 3x täglich. Die Vorlaufzeit bei den Laborproben beträgt einen Tag, es können jedoch auch ungeplante Notfalltransporte auftreten. Bedingungen an den Transport sind für die Laborproben sehr unterschiedlich, teilweise müssen Temperaturbereiche eingehalten werden.

Als Demonstrationsstandorte werden die Uniklinik Aachen, die Uniklinik Köln und die Uniklinik Düsseldorf gewählt, das sie neben anderen Hornhautbanken in Nordrhein-Westfalen zu den Hauptabnehmern gehören. Es finden ca. 10-20 Transporte pro Woche statt. Der Vorlauf für den Transport ist ca. 1 Woche und die Spenderhornhautpräparate verweilen ca. 2 Wochen vor Transport in der Hornhautbank. Notfalltransporte haben einen Tag Vorlauf und es erfolgen ca. 1-2 pro Woche.

Für die Hornhautbank wurde eine zusätzliche Analyse aller Ziele in NRW durchgeführt. Diese wurden hinsichtlich umsetzbarer und interessanter Ziele mit den Parametern Distanz und Beschaffenheit der Landezone und umgebende Populationsdichte kategorisiert.

Zusätzlich wurden gemeinsam mit den Projektpartnern fxd, UKA und FSD Gespräche mit den Krankenhäusern in Euskirchen, Mechernich, Düsseldorf und dem Labor MVZ Stein in Mönchengladbach geführt, um den Bedarf zu erodieren und potenzielle Landeorte zu bestimmen.

Durch den Anwenderworkshop konnten weitere potenzielle Routen und Anwendungen identifiziert werden.

Für die konkrete Routenanalyse wurden durch die flyXdrive die Randbedingungen durch das Flugsystem sowie des Genehmigungsprozesses betrachtet und berücksichtigt. Der Flugbetrieb und die Genehmigung werden durch verschiedene Faktoren wie den genauen Standort, die Besiedelung des Gebiets, Kontrollzonen und Flugplätze sowie weitere Faktoren beeinflusst. Es wurden Flugrouten und mögliche Transportwege evaluiert und erste Routenvorschläge in Google Earth für die einzelnen Standorte erstellt. Dabei wurden Flugrouten über möglichst unbesiedelte Gebiete gewählt und darauf geachtet Flugsperre- und Flugkontrollzonen zu vermeiden. Als Herausforderungen stellten sich erwartungsgemäß insbesondere die in Deutschland gültigen Geozonen nach §21h LuftVO heraus. Sie machen entlang der Routen Umwege erforderlich, sorgen für ineffiziente Flughöhenverläufe oder bedingen alternativ (unabhängig von der angestrebten Betriebserlaubnis in der speziellen Kategorie) einen hohen Kommunikations- und Bürokratieaufwand bei der späteren Flugdurchführung, der die Skalierbarkeit des Betriebs beeinflusst.

Es wurden zwei Szenarien identifiziert, die mit hoher Wahrscheinlichkeit umsetzbar sind und deshalb bevorzugt weiterverfolgt werden. Dies sind Flüge jeweils von Aachen aus zu den Flugzielen in Mönchengladbach und Euskirchen. Diese Szenarien wurden weiter ausgearbeitet. Hierzu wurden unterschiedliche Datenquellen zur Bestimmung der Populationsdichten untersucht sowie eine automatisierte Berechnung der Geozonen entlang der Strecke und des Bodenrisikos konzipiert. Für beide Szenarien ergab sich, dass eine Genehmigung für diese Strecken mit SAIL2 und M1 nicht möglich ist. Die Ergebnisse flossen in das Arbeitspaket 1.3 Betriebserlaubnis und 4.1 Adaption des Flugsystems mit ein.

Die Stadt Aachen hat bei der Missionsdefinition die Anforderungen der Städte, insbesondere aus Sicht der Bürger*innen, in die Diskussion miteingebracht, um so die Missionsdefinition zu unterstützen. Hierbei konnten Erfahrungen aus anderen Projekten mit eingebracht werden. Die Stadt Aachen hat das EULE-Projekt in verschiedenen Kontexten präsentiert und kommuniziert und dabei den direkten Dialog mit unterschiedlichen Akteursgruppen gesucht, um die Anforderungen an die praktische Umsetzung zu evaluieren. Beispiele hierfür sind Veranstaltungen wie die Amsterdam Drone Week oder das Science Camp, bei denen sowohl die Meinungen von Stakeholdern als auch von jungen Familien berücksichtigt werden konnten. Das Science Camp diente als Veranstaltungswoche für Familien, um die Akzeptanz des urbanen Luftverkehrs zu fördern.

Aufgrund von Verzögerungen bei der Erlangung einer Betriebsgenehmigung für längere Flüge zwischen Krankenhäusern, wurde die Demonstrationsdefinition um eine Zwischendemonstration erweitert, um die entwickelten Lösungen für die Logistikprozesskette demonstrieren zu können. Hierfür wurde im Oktober 2024 eine Zwischendemonstration am Uniklinikum Aachen abgehalten. Dort wurde gemeinsam von allen Partnern die Logistikkette mit einem kurzen Flug demonstriert. Die Inhalte der Zwischendemonstration werden näher in Abschnitt AP 5.2 beschrieben.

AP 1.3	Betriebserlaubnis
Ziele des Arbeitspakets	
In AP1.3 werden die notwendigen Schritte bzgl. einer Betriebserlaubnis ermittelt und umgesetzt	

Der Beginn der Bearbeitung des Arbeitspakets 1.3 zur Betriebserlaubnis war ursprünglich für August 2023 vorgesehen. Dieser Termin wurde jedoch auf das Jahr 2022 vorgezogen, um bereits Anfang 2023 mit Evaluationsflügen der Hornhautbank in der Umgebung von Aachen starten zu können. Zudem beträgt die Bearbeitungszeit für Neuansträge beim LBA mehrere Monate.

Die flyXdrive verfügte bereits über eine Betriebsgenehmigung in der SAIL Kategorie II, die den Betrieb über dünn besiedelten Gebieten erlaubt. Für die Evaluationsflüge mit der Hornhautbank wurde ein größeres, dünn besiedeltes Fluggebiet in der Nähe von Aachen ausgewählt. Der Luftraum über dem Hürtgenwald eignete sich hierfür besonders gut, da er ein ausgedehntes Fluggebiet mit langen Strecken bietet, in dem alle Sicherheitsfunktionen unter Realbedingungen getestet werden können.

Die Tests der Sicherheitsfunktionen wurden durch das FSD begleitet und unterstützt. Um die bestehende Betriebserlaubnis der flyXdrive auf dieses Gebiet auszudehnen und um Risiken zu analysieren und einzugrenzen, wurden umfassende Analysen hinsichtlich der Bevölkerungsdichte, touristischer Hotspots, Mobilfunknetzabdeckung und Geländehöhen durchgeführt.

Anschließend wurde die Betriebsbeschreibung angepasst und das Operational Volume festgelegt. Darüber hinaus umfasst der Antrag auf Betriebserlaubnis auch die Erstellung eines Emergency Response Plans, welcher im Rahmen dieses Prozesses entwickelt wurde. Der Antrag für BVLOS-Erprobungsflüge in der Umgebung von Aachen wurde am 10. November 2022 beim LBA eingereicht.

Der am 10. November 2022 eingereichte Antrag auf Betriebsgenehmigung im Fluggebiet Hürtgenwald erhielt am 1. März 2023 die Genehmigung durch das Luftfahrt-Bundesamt. Dies ermöglichte die Durchführung von Erprobungsflügen in diesem Gebiet.

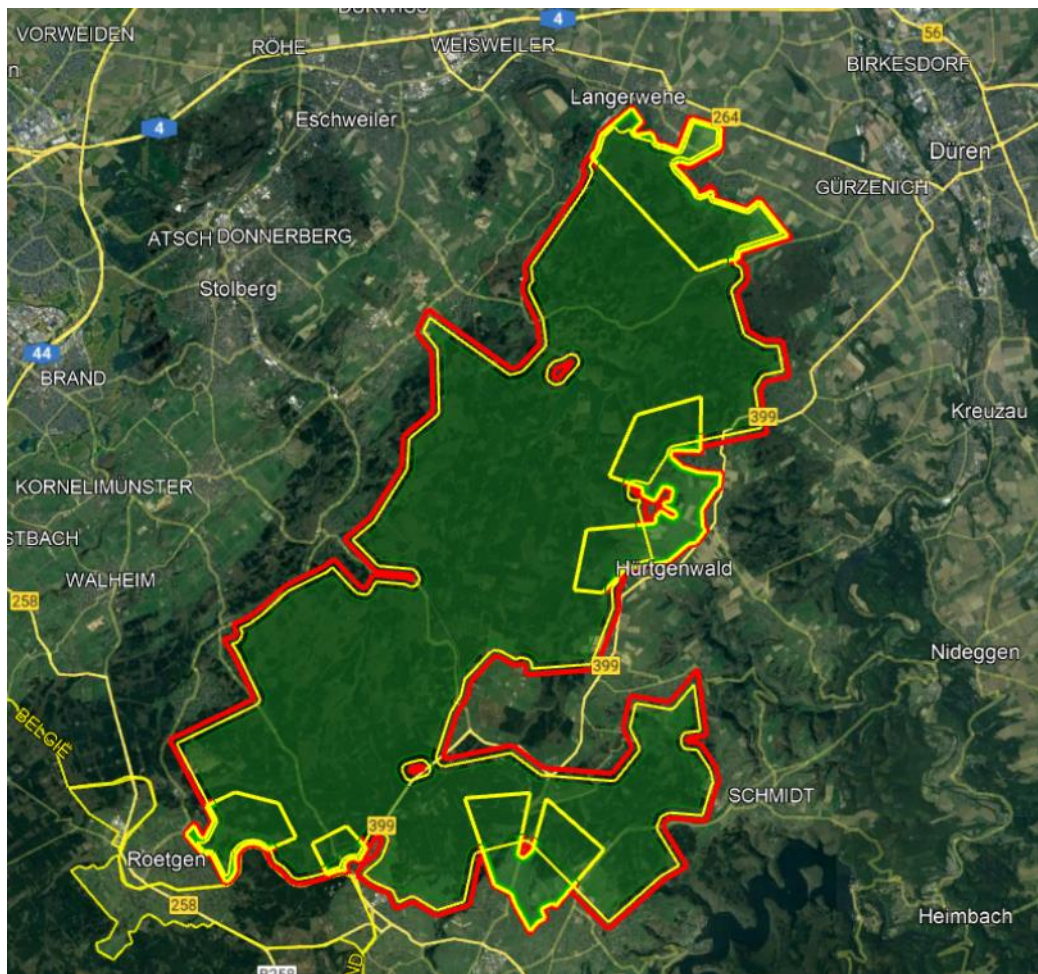


Abbildung 1 Übersicht über die Operational Volumes im Fluggebiet Hürtgenwald

Die Analysen der Flugrouten haben ergeben, dass für den finalen Demonstrationsbetrieb ein Betrieb in der SAIL Kategorie II wahrscheinlich nicht ausreichend ist. Daher wurden vorbereitende Arbeiten für den Erhalt einer Genehmigung in Kategorie SAIL III begonnen. Diese beinhalteten erhöhte Anforderungen, die Bestimmung des notwendigen Sicherheitslevels sowie die Nachweise über das Erfüllen, aller erforderlichen Kriterien für das Sicherheitslevel. Es wurde eine Fehlerbaumanalyse für das Flugsystem aufgesetzt, die verdeutlicht, dass zusätzliche Sicherheitssysteme/Mitigationen notwendig sind. Daraus ergab sich die Notwendigkeit einer Fallschirmentwicklung und eines Flight Termination Systems, siehe Arbeitspaket 4.1 Adaption des Flugsystems, sowie die Antragsänderung vom 30.05/01.06.2022.

In 2024 wurde eine bestehende Betriebsgenehmigung der flyXdrive angepasst, um die Erprobungsflüge mit dem Fallschirmsystem durchführen zu können, sowie um das Fluggebiet am Universitätsklinikum für die Zwischendemonstration mit aufzunehmen. Diese beiden Änderungen wurden vom Luftfahrtbundesamt genehmigt, so dass die Erprobungen wie geplant stattfinden konnten. Für die Abwürfe zur Erprobung des Fallschirmsystems war zusätzlich eine Ausnahmegenehmigung der Landesluftfahrtbehörde der Bezirksregierung Düsseldorf notwendig, die ebenfalls nach wenigen Monaten erteilt wurde.

Zusätzlich wurden die Fallschirmerprobungen entsprechend der EASA Means of Compliance dokumentiert und Vorgespräche mit dem Luftfahrtbundesamt für eine Erteilung einer generischen Genehmigung in SAIL 2 und einer Genehmigung in einer höheren Risikoklasse in SAIL 3 durchgeführt.

Die Erkenntnisse aus diesen Gesprächen flossen in die Erstellung der Betriebsbeschreibungen. Diese Arbeiten wurden Anfang 2025 abgeschlossen.

Am 05.03.2024 wurde von der Stadt Aachen eine Veranstaltung zur „Harmonisierung von Regularien bei grenzüberschreitenden Flügen?“ organisiert, an dem die flyXdrive teilgenommen hat. Hier wurde zum einen das Projekt EULE vorgestellt und zusätzlich hat die flyXdrive aus Ihren Erfahrungen aus dem Grenzüberschreitenden Flug zwischen Heerlen und Aachen Anfang des Projektes berichtet. Im Anschluss fand ein sehr informativer Austausch zwischen den Beteiligten statt, wie grenzüberschreitende Flüge, gerade im medizinischen Kontext in Zukunft einfacher möglich sind. Teilgenommen haben unter anderem Vertreter*innen der Stadt Heerlen, des BMDV, des MUNV und des niederländischen "Ministry of Infrastructure and Water Management".

Die Stadt Aachen unterstützte bei der Bewertung lokaler Anforderungen, insbesondere bei Szenarien mit kommunaler Relevanz.

AP 1.4	Systemarchitektur
Ziele des Arbeitspakets	
Die Ergebnisse der Use-Case-Analyse fließen in die Entwicklung einer geeigneten Systemarchitektur, bei der der Anwenderbedarf sowie die technische Umsetzbarkeit berücksichtigt werden, ein. Die Gesamtarchitektur wird fortlaufend mit den Entwicklungen der Teilsysteme abgeglichen.	

In Abbildung 2: EULE ist der Aufbau des Gesamtsystems EULE zu sehen. Dabei wurden die verschiedenen Arbeitspakete und Hauptaufgaben der Projektpartner und die Zwischenbeziehungen schematisch dargestellt. Das UKA ist Hauptverantwortlicher für die Kliniken und Anwender. Die Anbindung der Anwender wird durch die Docs in Clouds umgesetzt. Ausgehend von dieser Seite gehen auch die Transportaufträge an die zentrale Leitwarte, die von der flyXdrive GmbH betrieben wird. Auch das durch FSD entwickelte Missions- und Flottenmanagement wird in die Leitwarte eingebunden. Die Architektur und der Ablauf der Missionsplanung und des Flottenmanagements wird im Abschnitt zu AP 3.4 genauer beleuchtet. Die Dispatch-Order wird von der zentralen Leitwarte an den MedPort weitergegeben. Der MedPort wird von der FH Aachen entworfen und besteht aus einem Roboterarm, der das Flugsystem aus der Luft fangen soll und einen reibungslosen und konstanten Be- und Entladeprozess bei den unterschiedlichsten Wetterbedingungen ermöglicht. Über den MedPort wird auch der Cargo-Container ausgetauscht und das medizinische Gut an das Krankenhaus abgeliefert, bzw. vom Krankenhaus abtransportiert. Der MedPort ist ebenfalls für die Bodenabfertigung des Flugsystems verantwortlich. Im Projekt EULE wird zusätzlich das Konzept eines U-Spaces erprobt, in dem das Flugsystem integriert werden soll und über die das Flugsystem und die Leitwarte Informationen über andere Luftteilnehmer bekommt. Bei EULE handelt es sich bei dem U-Space Provider um die Droniq GmbH. Die Daten werden über Mobilfunk mit Hilfe der Vodafone übertragen. Der U-Space Provider steht im engen Kontakt mit dem Common Information Provider, der Informationen über das Wetter, verschiedenen Geozonen und auch Verkehrsdaten übermittelt. Docs in Clouds stellt die Backend- und die Anwenderschnittstelle dar.

DiC setzte die in AP 1.1 definierten Use-Cases in "Issues" (überschaubare Entwicklungsaufgaben) um, die im Rahmen des Projekts implementiert wurden. Dabei wurden die beteiligten Akteure und deren gewünschte Anwendungsfälle berücksichtigt, und konzeptionelle Änderungen wurden laufend berücksichtigt.

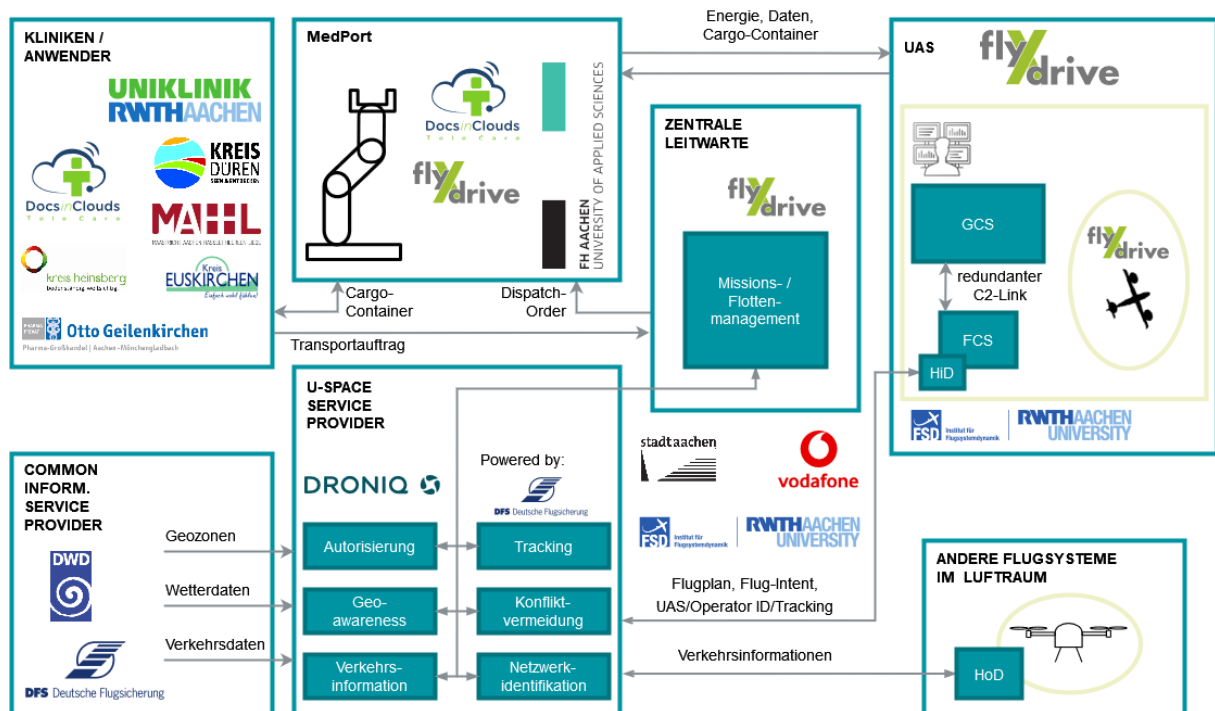


Abbildung 2 Aufbau Gesamtsystem EULE

In enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wurde ein erster Entwurf der Systemarchitektur erstellt und im weiteren Projektverlauf kontinuierlich angepasst und mit dem Projektfortschritt der Partner aktualisiert. Die letzte Version, die auch den finalen Stand reflektiert, ist in Abbildung 3 dargestellt.

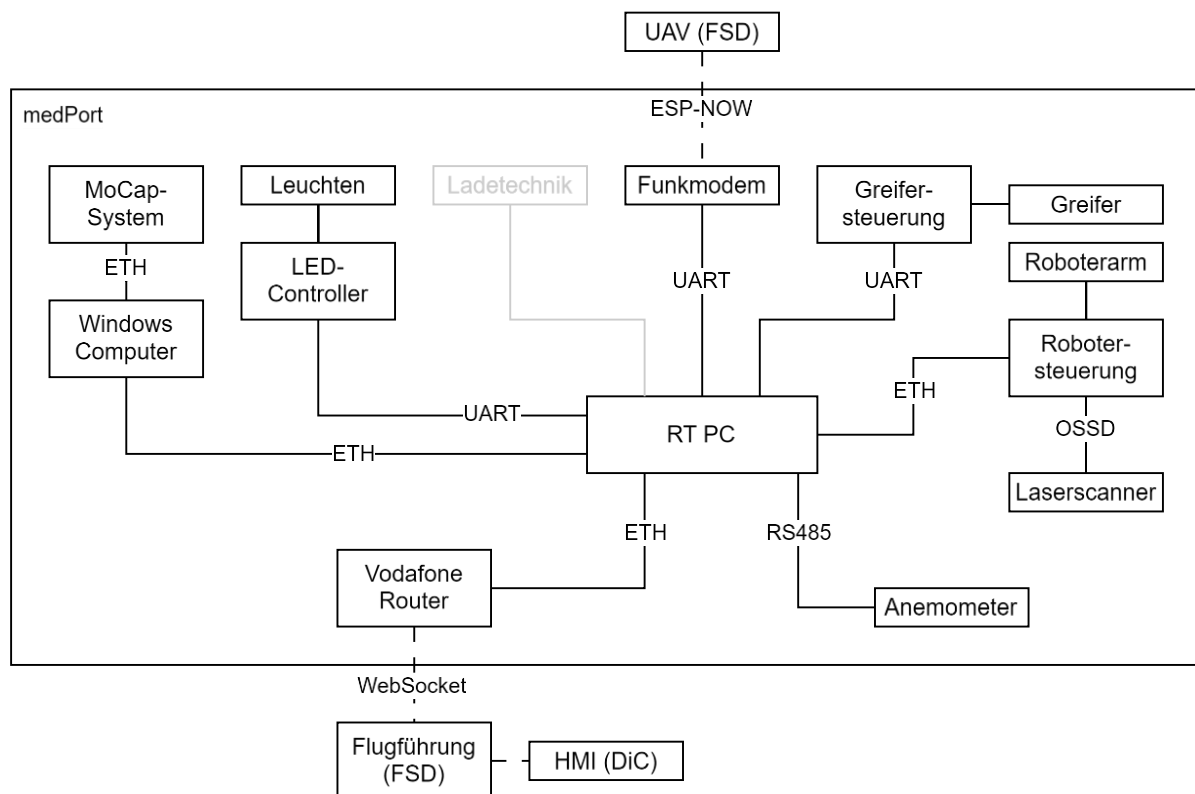


Abbildung 3 Systemarchitektur des Subsystem medPort

Der Echtzeit-Computer (engl. Real-Time Computer, kurz RT-PC) bildet die zentrale Datenverarbeitung des Systems. Zu den Hauptkomponenten gehören Roboter und Greifer, sowie das optische Tracking-System (engl. Motion Capture, kurz MoCap) und die kabellose Niedriglatenzanbindung zum Fluggerät (das Funkmodem). Alle zeitkritischen Komponenten sind über im Zeitverhalten deterministische Verbindungen an das Echtzeitsystem angeschlossen, um einen sicheren Betrieb des Roboters zu gewährleisten bei hohen Verfahrensgeschwindigkeiten und -beschleunigungen.

Die erfassten optischen Tracking-Daten werden innerhalb des Echtzeit-Computers mit den Telemetriedaten des Fluggeräts fusioniert und dienen dem Regler des Roboters als Sollwerte. Dieser modellprädiktive Regler generiert mit 250 Hz (4 ms) Achspositionen des Roboters, welche an die über Ethernet angebundene Robotersteuerung gesendet werden. Mit der Robotersteuerung sind zwei, über redundante Sicherheitsleitungen verbundene, Laserscanner angeschlossen, die den sicheren Betrieb des Roboters ermöglichen ohne eine klassische Einhausung. Zwei vertikal am medPort angebrachte LED-Streifen signalisieren den Anwender:innen sowohl den aktuellen Betriebszustand des Systems (Start, Landung und Bereit zur Nutzlastverladung) als auch eine etwaige Verletzung des Sicherheitsbereichs. Eine Annäherung an den Sicherheitsbereich wird zuerst über ein optisches Warnsignal angekündigt und führt bei weiterem Eindringen zum sofortigen Stillstand des Roboters.

Der medPort kommuniziert über eine bidirektionale Websocket-Anbindung mit der Flugführung. Diese Kommunikation wird mittels eines 5G-Mobilfunkrouters vom Projektpartner Vodafone ermöglicht. Dabei werden die verschiedenen Zustandsautomaten des medPorts, der Flugführung und der Logistik miteinander synchronisiert, um einen vollautomatisierten Transport der medizinischen Ware zu gewährleisten.

Der Austausch von Flugzustandsdaten und Maschine-zu-Maschine (engl. Machine-to-Machine, kurz M2M) Nachrichten erfolgt mit Hilfe eines ESP-NOW-Funkmodems zwischen der Bodenplattform und dem Fluggerät mit einer Latenz von kleiner 4 ms. Damit werden im Nahfeld von bis zu 200 m zum medPort zeitkritische Bewegungsdaten (Beschleunigungen und Drehraten) des Fluggeräts und Signale zum Erfolg oder Abbruch einer Landung oder eines Startversuchs ausgetauscht.

Die Greifersteuerung ist seriell mit dem Echtzeit-Computer verbunden und ermöglicht einen kraftbegrenzten Zugriff und anschließende Handhabung des Fluggeräts durch den Roboter.

Ein Windmesser ist über eine RS485-Schnittstelle angeschlossen und liefert hochaufgelöste zweidimensionale Messungen des lokalen Winds. Diese Messung wird im ersten Ansatz zur Startausrichtung des Fluggeräts verwendet.

Die Ladung der Fluggerätbatterien innerhalb der Bodenplattform ist durch Positionierung geeigneter Ladekontakte und vorsehen einer Ladeelektronik vorbereitet worden.

HAP 2	Medizinischer Betrieb
Gesamtziel	Abstimmung von Flugdurchführungsprozessen und logistischen Krankenhausprozessen sowie der dafür notwendigen Schnittstellen.
AP 2.1	Schnittstelle zwischen Krankenhausprozessen und Flugdurchführung
Ziele des Arbeitspakets	
In diesem Arbeitspaket werden die logistischen Krankenhausprozesse und die Ablaufprozesse der Flugdurchführung so aufeinander abgestimmt, dass eine integrierte Transportlogistik-Lösung entsteht.	

Im Rahmen des Arbeitspakets wurde vom UKA der medizinische Betrieb betrachtet. Es wurde eine Analyse der aktuellen Logistikprozesse und der vorliegenden klinikinternen Software-Lösungen durchgeführt. Hierzu wurde ein Konzept erarbeitet zum Aufbau von automatisierten innerklinischen Logistikketten. Innerhalb des Universitätsklinikums Aachen wurde das Thema „Transport medizinischer Güter via Drohne“ intensiv aufgearbeitet. Eine spezielle Arbeitsgruppe wurde gegründet, die sich mit der konzeptionellen Planung möglicher Routineabläufe beschäftigt. Diese Gruppe arbeitet daran, die Implementierung und Integration der Drohnentransporte in den Klinikalltag vorzubereiten.

Darüber hinaus wurden Ansprechpartner definiert, die Anfragen von extern bearbeiten. Hierzu zählen sowohl Kontakte in die Industrie als auch von Anwendenden und bezüglich potenzieller Forschungspartnerschaften.

In Zusammenarbeit mit dem Vorstand und zuvor genannten Arbeitsgruppe wurde die Planung eines designierten Drohnen-Landeplatzes initiiert. Dies ist ein wichtiger Schritt zur Vorbereitung auf eine mögliche Abschlussdemonstration des Projektes. Der Landeplatz soll sicherstellen, dass die Drohnen auch bei Betrieb des Hubschrauberlandeplatzes sicher starten und landen können, und bildet die logistische Grundlage für den zukünftigen Routinebetrieb.

Für die Integration in die logischen Krankenhausprozesse und Ablaufprozesse der Flugdurchführung übernahm DiC die Konzeptionierung und Entwicklung der Schnittstelle zwischen Transportsystem und Krankenhaus in Form eines User Interfaces, sowie durch Konzeptionierung eines Datenmodells für die interoperable Datenkommunikation. In der Abbildung 4 sind die verschiedenen Komponenten der Kommunikationsarchitektur abgebildet. Zentrales Element hierbei ist der Matrixraum, in dem alle Nachrichten von den Projektpartnern gelesen und geschrieben werden.

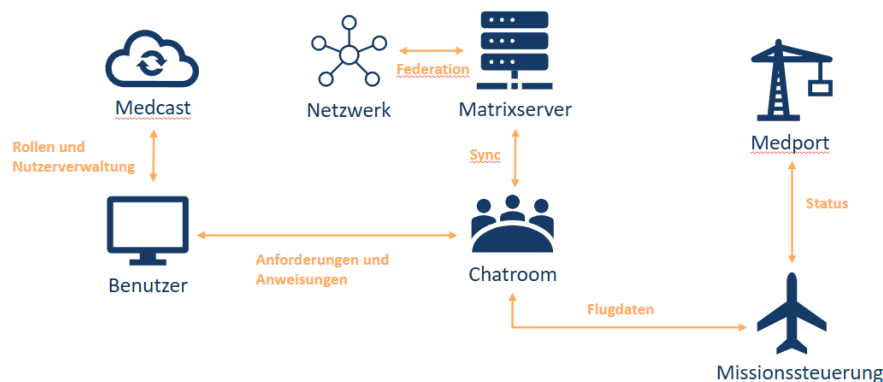


Abbildung 4 Überblick über die Komponenten der Kommunikationsarchitektur

Mit dem von DiC entwickelten User Interface ist es möglich, Transportaufträge von medizinischen Gütern anzulegen und telemetrisch zu überwachen. Dabei können Transportgut und Empfänger ausgewählt werden, sowie weitere für den Transport relevante Parameter (z.B. maximal erlaubte Vibration). Unter Berücksichtigung des Nutzerrechte-managements können Aufträge, in denen eine Einrichtung als Start oder Ziel angegeben ist, von Nutzern, die zu diesen Einrichtungen zugehörig sind, überwacht werden.

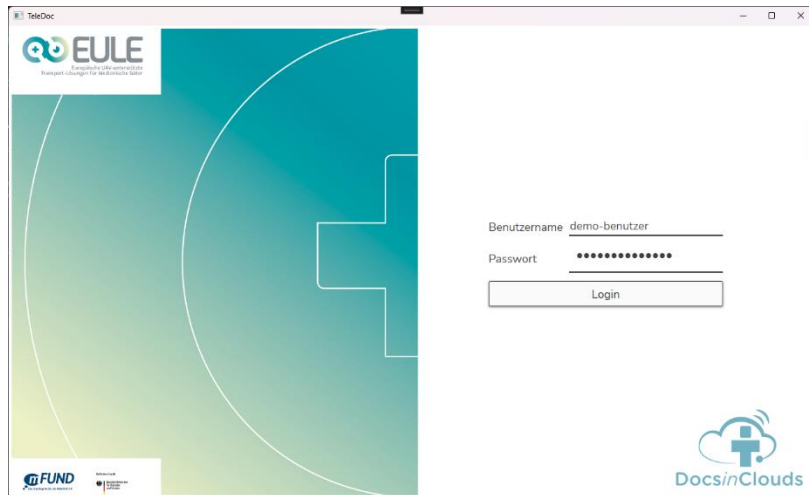


Abbildung 5 Login-Seite der EULE-Benutzeroberfläche.

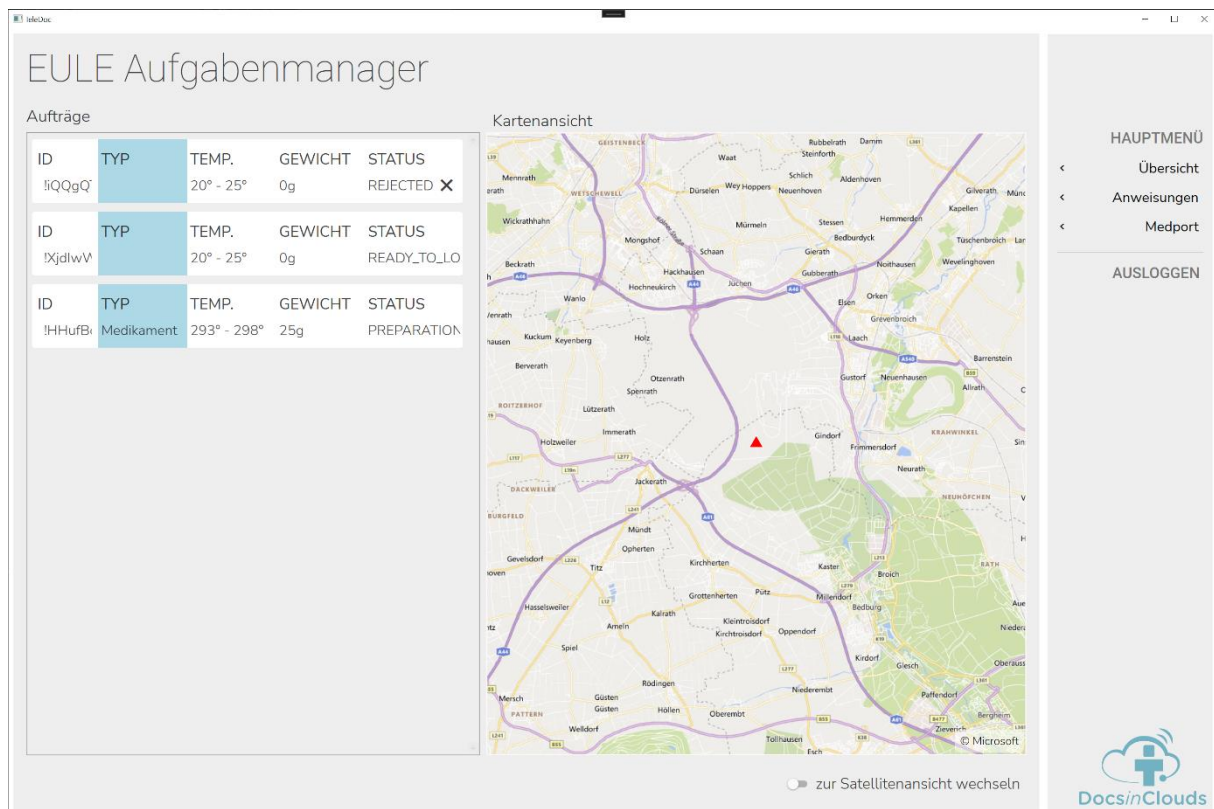
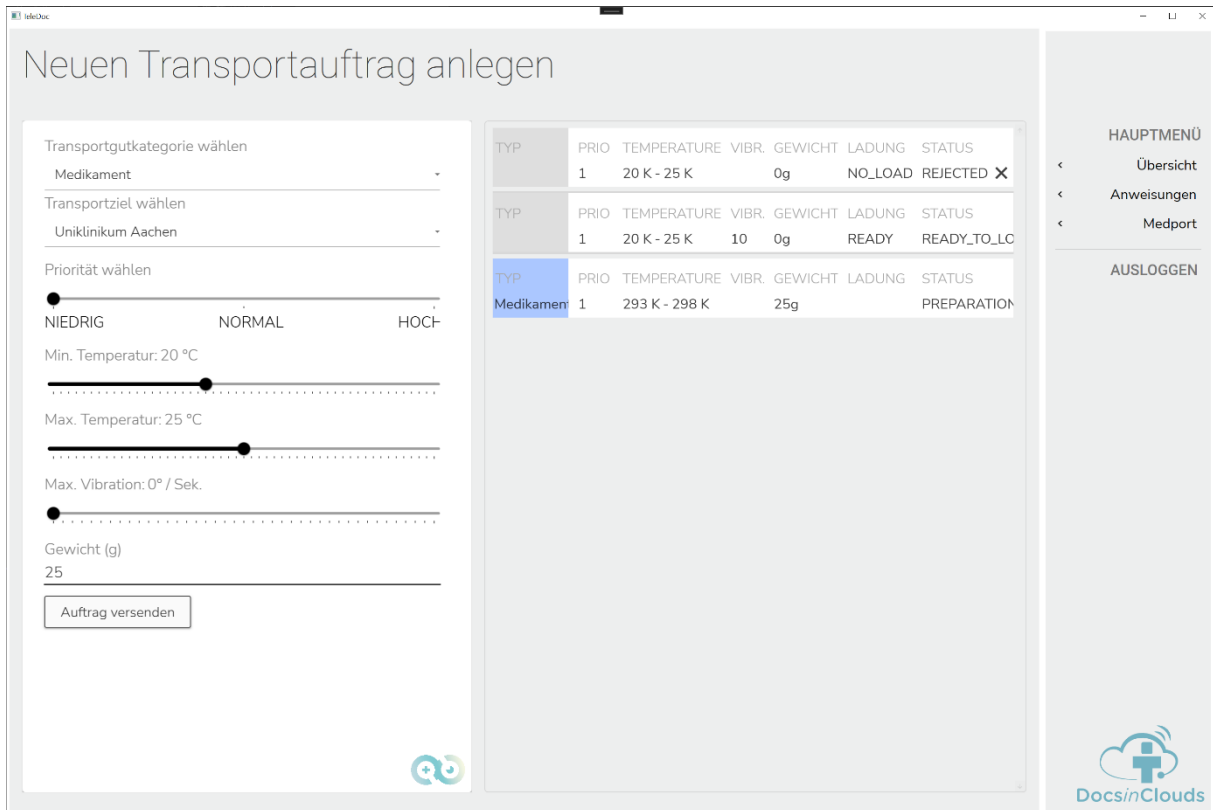


Abbildung 6 Auf der "Übersicht"-Seite werden aktive Aufträge angezeigt und auf einer Karte visualisiert



Neuen Transportauftrag anlegen

Transportgutkategorie wählen
Medikament

Transportziel wählen
Uniklinikum Aachen

Priorität wählen
NIEDRIG NORMAL HOCH

Min. Temperatur: 20 °C

Max. Temperatur: 25 °C

Max. Vibration: 0° / Sek.

Gewicht (g)
25

Auftrag versenden

TYP	PRIO	TEMPERATURE	VIBR.	GEWICHT	LADUNG	STATUS
	1	20 K - 25 K		0g	NO_LOAD	REJECTED X
	1	20 K - 25 K	10	0g	READY	READY_TO_LOAD
Medikament	1	293 K - 298 K		25g		PREPARATION

HAUPTMENÜ

- Übersicht
- Anweisungen
- Medport

AUSLOGGEN

Docs in Clouds

Abbildung 7 Oberfläche zum Anlegen eines neuen Transportauftrags

Das Interface umfasst auch eine interaktive Anleitung zum Be- und Entladen der Drohne, für welches DiC ein vereinfachtes 3D-Modell der Drohne konstruierte, das zur Darstellung verwendet wird, um die Anleitung möglichst intuitiv zu gestalten.

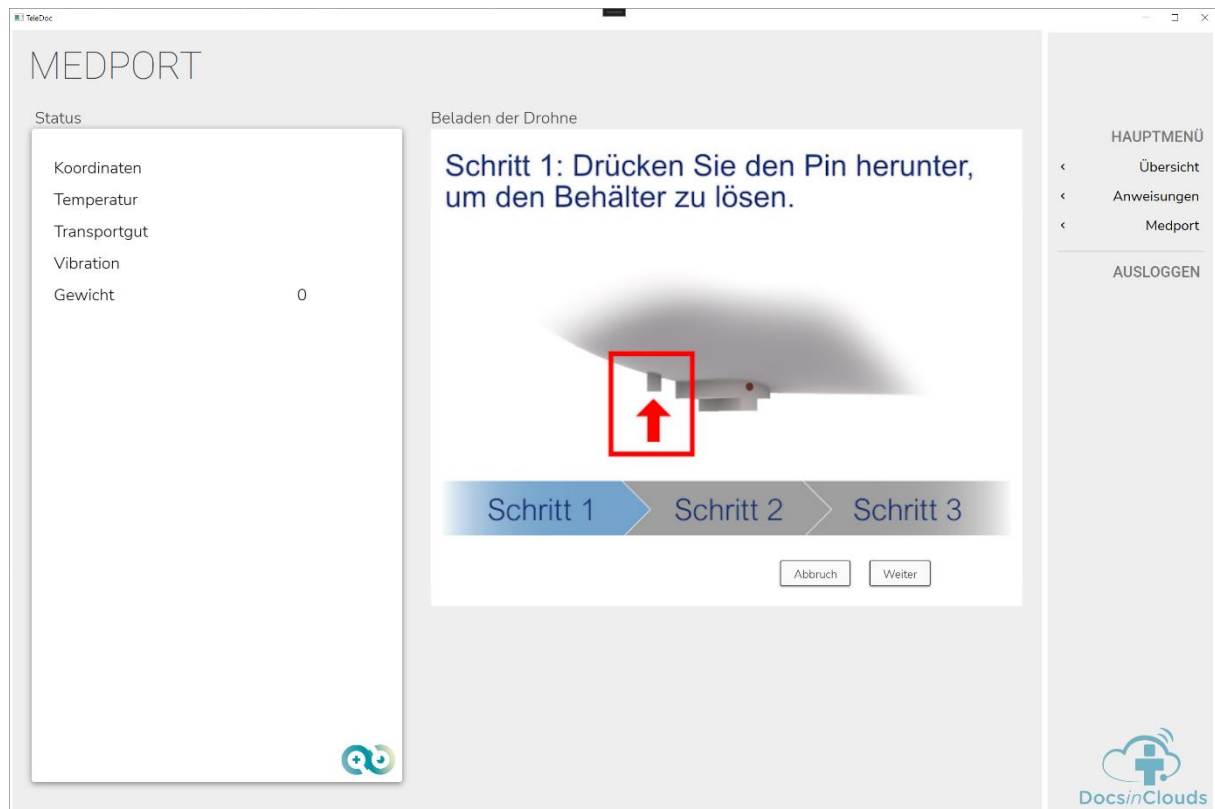


Abbildung 8 Eine interaktive Anleitung führt den Nutzer interaktiv durch den Be- und Entladeprozess

Für das Kommunikationsbackend des Demonstrators hat DiC einen Matrix-Server aufgesetzt, welcher während der gesamten Entwicklung des Demonstrators von den Projektpartnern verwendet wurde.

Um die Integration von Flugaufträgen in bestehende Krankenhausprozesse auch programmgesteuert zu ermöglichen, wurde eine Schnittstelle auf Basis des medizinischen Interoperabilitätsstandards FHIR (Fast Healthcare Interoperability Resources) spezifiziert.

Name	Flags	Card.	Type
SupplyRequest	TU		DomainResource
identifier	Σ	0..*	Identifier
status	?	Σ 0..1	code
basedOn	Σ	0..*	Reference(Any)
category	Σ	0..1	CodeableConcept
priority	Σ	0..1	code
deliverFor		0..1	Reference(Patient)
item	Σ	1..1	CodeableReference(Medication Substance Device DeviceDefinition BiologicallyDerivedProduct NutritionProduct InventoryItem) Quantity
quantity	Σ	1..1	Quantity
parameter		0..*	BackboneElement
occurrence[x]	Σ	0..1	
authoredOn	Σ	0..1	dateTime
requester	Σ	0..1	Reference(Practitioner PractitionerRole Organization Patient RelatedPerson Device CareTeam)
supplier	Σ	0..*	Reference(Organization HealthcareService)
reason		0..*	CodeableReference(Condition Observation DiagnosticReport DocumentReference)
deliverFrom		0..1	Reference(Organization Location)
deliverTo		0..1	Reference(Organization Location Patient RelatedPerson)

Name	Flags	Card.	Type
SupplyDelivery	TU		DomainResource
identifier		0..*	Identifier
basedOn	Σ	0..*	Reference(SupplyRequest)
partOf	Σ	0..*	Reference(SupplyDelivery Contract)
status	?	Σ 0..1	code
patient		0..1	Reference(Patient)
type		0..1	CodeableConcept
suppliedItem		0..*	BackboneElement
quantity		0..1	SimpleQuantity
item[x]		0..1	
occurrence[x]	Σ	0..1	
occurrenceDateTime			dateTime
occurrencePeriod			Period
occurrenceTiming			Timing
supplier		0..1	Reference(Practitioner PractitionerRole Organization)
destination		0..1	Reference(Location)
receiver		0..*	Reference(Practitioner PractitionerRole Organization)

Abbildung 9 : Integration in bestehende Informationssysteme könnte über die FHIR-Datenstrukturen SupplyRequest und SupplyDelivery erreicht werden

Dadurch kann die Drohnenlogistik nahtlos in klinische IT-Systeme eingebunden werden, was eine automatisierte und standardisierte Übermittlung relevanter Transportaufträge aus dem medizinischen Kontext erlaubt. Die Nutzung von FHIR gewährleistet dabei sowohl Interoperabilität mit bestehenden Krankenhausinfrastrukturen als auch eine zukunftssichere Erweiterbarkeit der Lösung.

Gemeinsam mit den Projektpartnern FSD und FH wurde ein Protokoll entwickelt, das den gesamten Logistikprozess abbildet. Dieses Protokoll umfasst sowohl high-level-Prozesse wie die Flugdisposition sowie die Kommunikation im Sinne der Telemetrie und den strukturierten Informationsaustausch zwischen Sender, Empfänger und der Missionssteuerung, als auch low-level-Kommunikationsprozesse zwischen der MedPort-Plattform und der Drohne.

Es gibt einen separaten Raum für jeden Transportauftrag. In diesen wird automatisiert der Matrix-User der Missionssteuerung eingeladen. Dadurch wird ein Auftrag disponiert. Der Matrixraum wird neben der Disponierung auch für die Übertragung von Telemetriedaten verwendet (Position, Temperatur, Vibration), welche im User Interface angezeigt werden.

Das Anlegen eines neuen Transportauftrags geschieht nachfolgendem Schema:

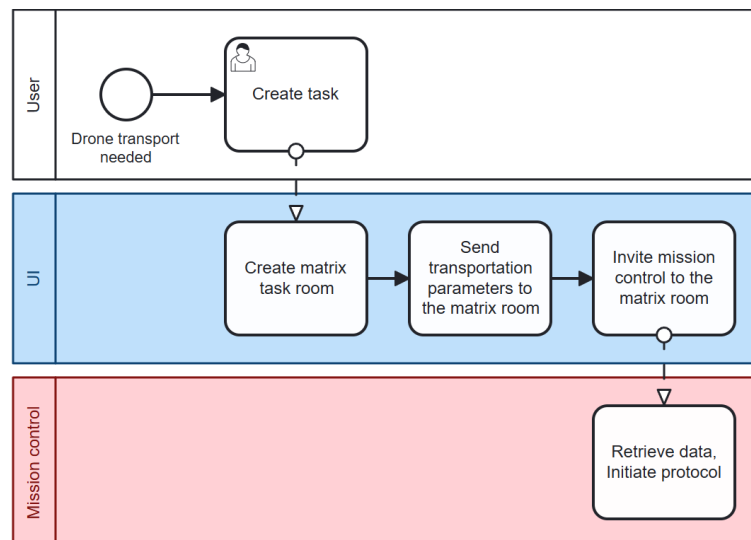


Abbildung 10 Ablauf des Erstellens eines neuen Transportauftrags

Konzeptionell sehen wir eine Erweiterung vor, in welcher der Transportauftrag und der medizinische Auftrag in separaten Matrix-Räumen verwaltet werden, um eine bessere Trennung der Daten im Sinne der Einhaltung des Datenschutzes zu erzielen.

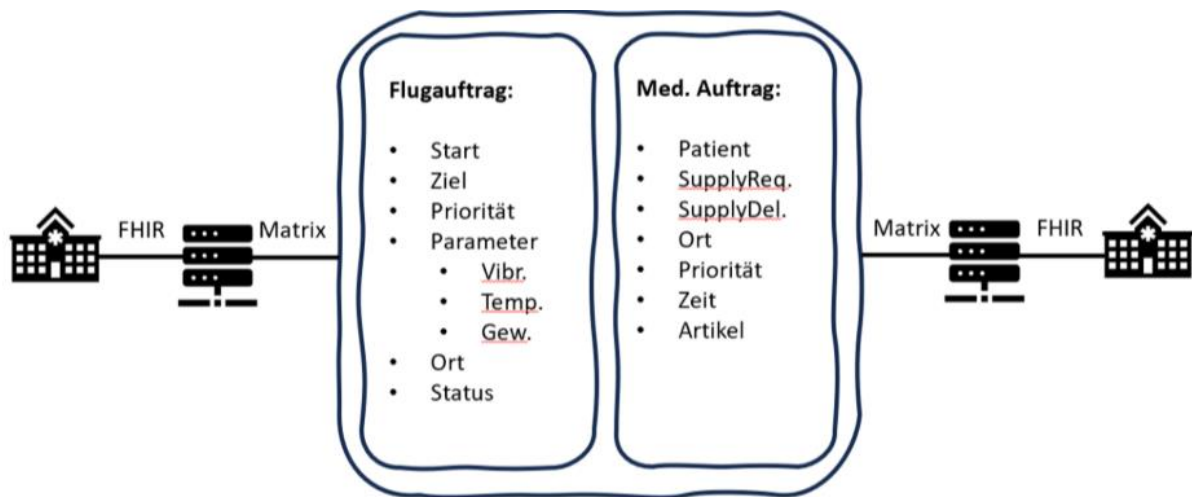


Abbildung 11 Konzept eines erweiterten Datenmodells, welches logistische Daten von medizinischen Daten trennt

In der nachfolgenden Darstellung wird der Ablauf eines Missionsablaufs mit dem Beginn der Anforderung bis zur finalen Entnahme des medizinischen Gutes aus der Drohne abgebildet.



Abbildung 12 Ablauf des gesamten Transportprozesses

Zur Darstellung des Flottenmanagements und der Missionssteuerung sowie der medPorts werden spezielle Matrixräume eingerichtet. Über diese Räume kann der aktuelle Status abgefragt werden. Im Fall des medPorts lässt sich so beispielsweise überprüfen, ob dieser bereits von einem UAV besetzt ist oder ob er für die Landung eines Fluggeräts zur Verfügung steht. Wird ein Transportauftrag über die von Docs in Clouds entwickelte Nutzeroberfläche angelegt, wird im Hintergrund ein neuer Matrixraum erstellt und die Missionssteuerung eingeladen. In diesem Raum sind sämtliche für die Planung der Mission erforderlichen Daten enthalten, einschließlich Start- und Zielort, zu transportierende medizinische Fracht, deren Gewicht sowie die notwendigen Umgebungsbedingungen (z.B. Temperatur).

Während des Fluges werden in diesem Raum die festgelegten Statusmeldungen fortlaufend aktualisiert, bis das Fluggerät sein Ziel erreicht hat. Hierzu werden auch die Telemetriedaten des Flugsystems übermittelt. Zur Testung der Schnittstelle wurde ein Bot entwickelt, der eine Transportmission simuliert. Dies ermöglicht die Überprüfung der Kompatibilität der Implementierungen zwischen den verschiedenen Schnittstellen.

Das FSD hat in Zusammenarbeit mit der FH Aachen einen Kommunikationsprototypen auf Basis von Websockets in Python entwickelt. Hierfür wurden verschiedene Nachrichten (Messages) konzipiert, um einen reibungslosen Start- und Landevorgang zu gewährleisten. Diese Nachrichten wurden mithilfe von Websockets implementiert; das FSD stellt dabei die Serverseite dar, während die FH Aachen mit dem medPort den Client repräsentiert. Die Nachrichten reichen von „Approach Announcement“ bis „Open Gripper“ und decken den gesamten Prozess ab.

Einzelne Nachrichten, die vom medPort gesendet werden – wie beispielsweise eine „Clear Safety Zone“-Nachricht zur Sperrung des Bereichs um den medPort für Personen – müssen ebenfalls in das

Matrixprotokoll integriert und somit an das Krankenhaus oder den Anwender übertragen werden. Dies erfolgt ebenfalls über das FSD: So sendet beispielsweise der medPort eine „Clear Safety Zone“-Nachricht über Websockets an den Server, welcher daraufhin den entsprechenden Status im Matrixraum auf „Restricted Requested“ setzt. Sobald dieser Status vom Anwender erfüllt ist, kann er in einer grafischen Anwendung bestätigen, dass sich keine Personen mehr im gefährdeten Bereich befinden. Der Status im Matrixraum ändert sich daraufhin auf „Restricted“, und eine „Safety Zone is cleared“-Nachricht wird an den medPort gesendet.

Die beiden Schnittstellen wurden umfassend am Boden getestet und anschließend auch im Flugbetrieb erprobt. Im Rahmen der gemeinsamen Erprobung zwischen Krankenhausprozessen und Flugdurchführung haben das FSD sowie die Partner Docs in Clouds und FH Aachen Verbesserungen vorgenommen und Probleme beim Austausch von Telemetrie- sowie Missionsstatusdaten behoben. Ein zentraler Aspekt war dabei die Funktionalität der FSD-Missionssteuerung als Relaisstation für den von FH Aachen entwickelten medPort, da dieser nicht direkt mit dem Auftragsportal von Docs in Clouds verbunden ist. Über diese Schnittstelle wird dem Anwender mitgeteilt, ob der Gefahrenbereich des Roboterarms betreten werden darf.

Der medPort dient als Schnittstelle zwischen den Krankenhausprozessen und den Fluggeräten. Die Interaktion der Anwender:innen mit dem Transportsystem erfolgen über ein durch den Projektpartner Docs in Clouds entwickeltes Interface auf einem Tablet-PC (Pokini K10B). Dieser Tablet-PC ist frontseitig am medPort angebracht und kann zur Bestätigung des Abflugs aus der Halterung herausgenommen werden. Somit wird der Sicherheitsbereich des verfahrenenden Roboters nicht verletzt, während eine Nutzereingabe erfolgt.

Die Kommunikation des medPorts erfolgt vollautomatisiert. Kommuniziert wird ausschließlich mit dem Projektpartner FSD, welcher die Flugführung und Verwaltung von Transportaufgaben übernimmt. Das FSD empfängt die für einen Transportauftrag notwendigen Daten vom Projektpartner DiC und leitet diese an den medPort weiter, falls eine Landung auf diesem erfolgen soll. Die Be- und Entladung der Nutzlast erfolgt teilautomatisiert. Das Fluggerät wird den Anwender:innen präsentiert, die Nutzlast kann anschließend eingesetzt oder entnommen werden.

In Abbildung 13 ist ein Ausschnitt der zwischen FH Aachen und FSD definierten M2M-Nachrichten dargestellt, die zwischen der Bodenplattform (medPort) und der Flugführung des FSDs ausgetauscht werden.

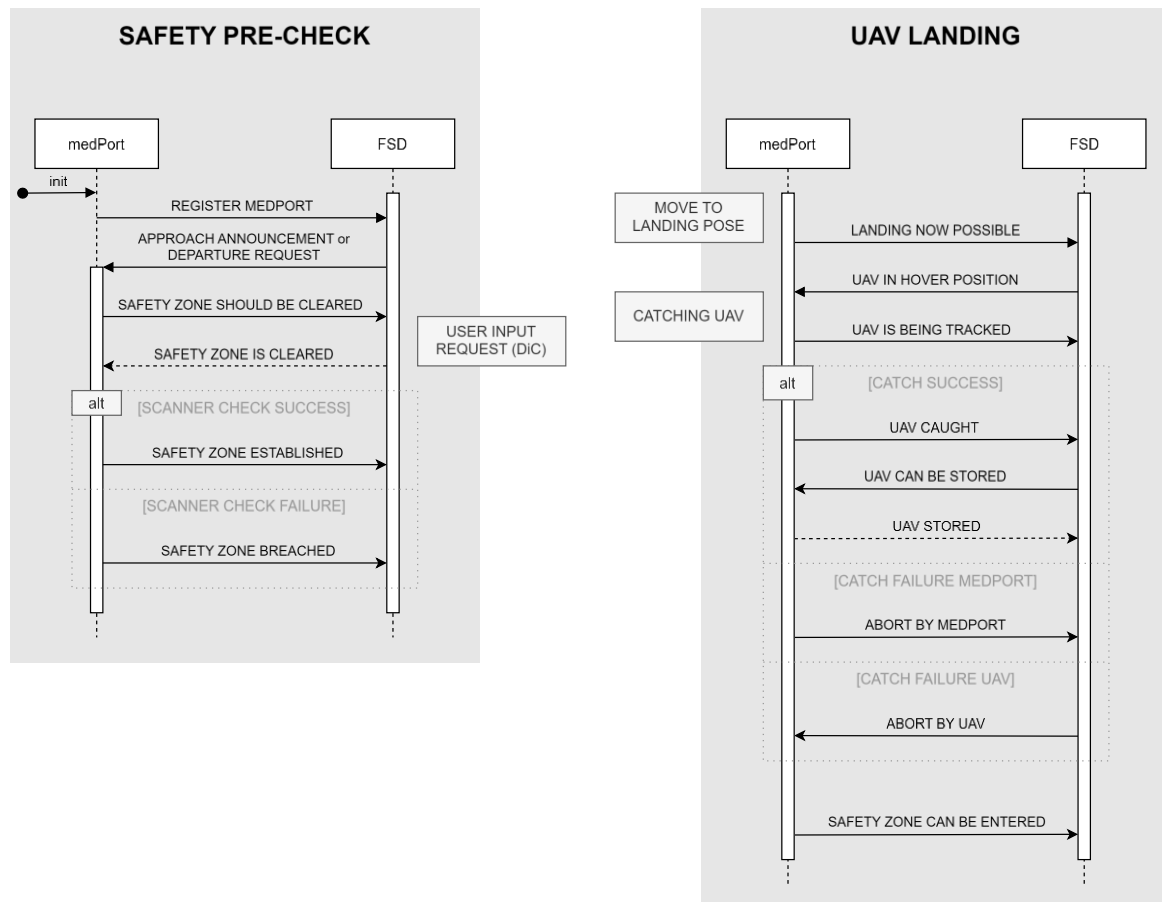


Abbildung 13: Ausschnitt aus den definierten M2M-Nachrichten zwischen FH Aachen und FSD

Die Sicherheitsüberprüfung (SAFETY PRE-CHECK) wird nach dem Hochfahren des medPorts ausgeführt. Dabei wird der medPort bei der Flugführung registriert. Nachdem die Landung oder der Abflug eines Fluggeräts angekündigt wurde, wird eine Freigabe des Sicherheitsbereichs durch die Anwender:innen angefragt und anschließend durch die Laserscanner überprüft.

Bei der Landung eines Fluggeräts (UAV LANDING) wird der Roboter zuerst in Landeposition verfahren. Dort angekommen wird auf eine Bestätigung des Schwebeflugzustands durch die Flugleitung gewartet. Nach Rückmeldung der Erfassung des Fluggeräts durch die Sensoren des medPorts wird der Fangvorgang gestartet. Der Erfolg oder ein etwaiger Abbruch des Vorgangs durch medPort oder Flugführung wird über die echtzeitfähige Funkverbindung übertragen, um in Sekundenbruchteilen reagieren zu können. Im Falle eines erfolgreichen Fangvorgangs wird das Fluggerät anschließend durch den Roboter verfahren und den Anwender:innen zur Nutzlastentnahme präsentiert. Die Aufhebung des Sicherheitsbereichs wird den Anwender:innen über den Tablet-PC signalisiert. Der Start des Fluggeräts aus dem medPort wird analog zu dem beschriebenen Landevorgang durchgeführt.

AP 2.2	Rechte und Rollen/Datenmanagement
Ziele des Arbeitspakets	
Die logistischen Prozesse innerhalb eines Krankenhauses sind mannigfaltig und mitunter komplex. Die vielfältigen Möglichkeiten der Waren, des Kontextes und der Kritikalität der Anforderung führen zu unterschiedlichen Herausforderungen bzgl. des Transportes, die im Zuge des Arbeitspaketes evaluiert werden. Dabei müssen auch verschiedene IT-Systeme berücksichtigt werden. Zusätzlich	

müssen bei dem Rechte- und Datenmanagement die notwendigen Sicherheitsaspekte betrachtet werden.

Zur sicheren und datenschutzkonformen Verarbeitung der dabei entstehenden Informationen kam unsere datenschutz-zertifizierte TeleDoc-Software zum Einsatz. In enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wurde ein Datenschutz- und Nutzerrollenkonzept erarbeitet. Dieses stellt sicher, dass sowohl die Anforderungen an eine gesetzeskonforme Datenverarbeitung als auch die differenzierten Zugriffsrechte der beteiligten Nutzergruppen adäquat abgebildet werden. Damit konnten die sicherheitsrelevanten Aspekte im Rechte- und Datenmanagement wirksam berücksichtigt und in die Systemarchitektur integriert werden.



Es wird eine **Administratorrolle** pro Einrichtung vergeben, die in der Lage ist innerhalb der eigenen Einrichtung neue Nutzer anzulegen und bestehende Nutzer zu bearbeiten oder zu entfernen.



Nutzer mit Auftragsrechten können neue Transportaufträge anlegen, Aufträge bearbeiten oder verwerfen und Informationen zu Aufträgen, **die ihre eigene Einrichtung als Start- oder Zielpunkt gewählt haben**, abrufen. Sie erhalten Updates zum Standort und Zustand der verfügbaren UAS.



Nutzer mit Beobachterrechten können Informationen zu Aufträgen, **die ihre eigene Einrichtung als Start- oder Zielpunkt gewählt haben**, abrufen. Sie erhalten Updates zum Standort und Zustand der verfügbaren UAS.



Die Missionssteuerung erhält Zugang zu **Informationen zu allen erteilten Aufträgen aller integrierten Einrichtungen**

Das Konzept wurde im Rahmen des Demonstrators eingeschränkt umgesetzt.

AP 2.3	Nutzlastintegration
Ziele des Arbeitspakets	
In diesem Arbeitspaket wird eine bodenseitige Plattform (medPort) entwickelt, die für die Turnaroundprozesse des Flugsystems und der Nutzlast am Boden zuständig ist. Zwischen der bodenseitigen Plattform und dem Flugsystem sind entsprechende Schnittstellen vorzusehen, die neben der Aufnahme des Flugsystems auch einen Latenzarmen Datenaustausch zwischen Flugsystem und medPort ermöglichen. Darüber hinaus werden notwendige Anpassungen des Flugsystems identifiziert, um es an den Bedarf der Nutzlasten anzupassen.	

Das UKA hat im Rahmen dieses Arbeitspaketes in diversen Meetings mit den designierten Anwendern (Hornhautbank, Pathologie, labordiagnostisches Zentrum MVZ Stein und Kollegen) mögliche Nutzlasten diskutiert, definiert und die Rahmenbedingungen für den Transport per Drohne festgelegt. Hierbei handelte es sich vor allem um den Einhalt von gewissen Temperaturbedingungen, als auch der notwendigen Position (aufrechter Transport) und transportbedingten Vibration. Die Abmessungen der Transportverpackungen der definierten Nutzlasten wurden überprüft, zusammengefasst und an die technischen Partner übermittelt. Gemeinsam mit den technischen Partnern, sowie den klinischen Anwendern wurde dann überlegt, inwiefern Verpackungsmaterial reduziert werden kann, um die Nutzlast zu verringern, ohne das zu transportierende medizinische Gut zu gefährden. Konkret führte dies im Falle der zu transportierenden Hornhäute dazu, dass diese in einem 50ml Fläschchen, statt der normalerweise verwendeten 100ml Flasche, transportiert wurden.

Für die Bestimmung der Nutzlastintegration wurde die Spezifikation der Nase und des Nutzlastvolumen des Flugsystems durch die flyXdrive mit den Partnern geteilt und eine Analyse durchgeführt, wo die Nutzlast sinnvoll untergebracht werden kann. Dabei unterstützte das FSD, damit alle Transportbedingungen berücksichtigt sind. Deutlich wurde, dass für den Datenaustausch, um das Transportgut entsprechend zu überwachen und das Einhalten der Transportbedingungen zu gewährleisten, eine spezielle Sensorik notwendig ist. In weiteren Gesprächen wurde unter anderem über die Schnittstelle des Flugsystems und Möglichkeiten der Batterieladung gesprochen. Die bestehende Kommunikationsschnittstelle wird weiterentwickelt, optimiert und in das 5G Netz der Vodafone integriert. Die Stromversorgung des Flugsystems kann über den mechanischen Austausch der Batterien oder durch automatisches Aufladen erfolgen.

Entsprechend der Anforderungen durch das Transportgut wurde ein geeigneter Nutzlastbehälter zur Integration in das Flugsystem entworfen, hergestellt und getestet. Der Behälter erwies sich als geeignet und wurde bei den Erprobungsflügen mit medizinischer Nutzlast im Hürtgenwald eingesetzt. Um sicherzustellen, dass der Transport innerhalb der für die Nutzlast zulässigen Grenzen hinsichtlich Temperatur und Beschleunigungen erfolgt, ist der Nutzlastbehälter mit einer elektronischen Schnittstelle ausgestattet, die zum Datenaustausch und zur Energieversorgung eines Überwachungssystems dient.

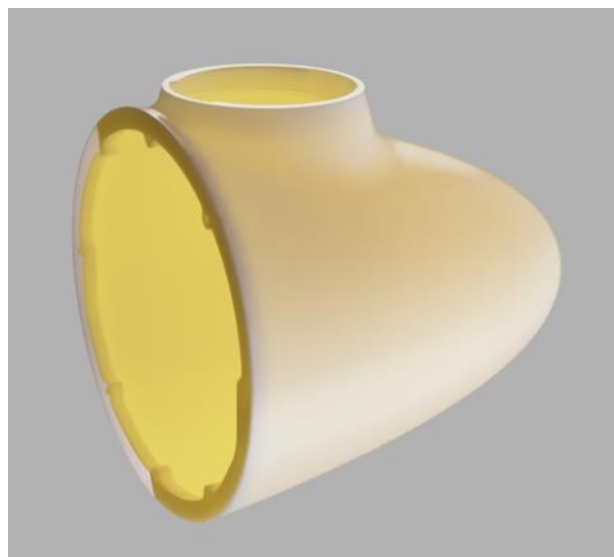


Abbildung 14 Nutzlastbehälter zum Anbringen am Flugsystem mit Öffnung zur Aufnahme eines Augenhornhaut-Transportgefäßes

Im Nachgang zu den Anwenderworkshops im Jahr 2024 wurden weitere Nutzlasttypen evaluiert und ihre Integration in das Flugsystem konzeptionell untersucht.

Der Transport der Spenderhornhäute muss mit spezieller Sensorik überwacht werden, sodass ein Temperaturbereich von +10°C bis +40°C nicht verlassen wird und auch eine Vibrationsüberwachung muss sichergestellt werden, da die Spenderhornhäute nicht geschüttelt oder gekippt werden dürfen. Dafür wurde vom FSD ein Sensorüberwachungssystem entwickelt, dass mit den Flaschen im Cargo-Compartment integriert wird. Ein Prototyp des Systems ist in Abbildung 15 dargestellt. Das System besteht aus einem Pi Pico, der an einen Beschleunigungssensor und Temperatursensor angeschlossen ist. Zusätzlich ist noch ein SD-Karten Reader integriert, um die während des Flugs aufgenommenen Daten zusätzlich zu speichern. Der Beschleunigungssensor kann die auf das Transportgut wirkenden G-Kräfte messen, die als Vibrationen interpretiert werden. Der Temperatursensor überwacht die

Temperatur innerhalb des Cargo-Compartments. Der Pi Pico synchronisiert die verschiedenen Sensoren und schickt die Daten zusätzlich zum Flugcomputer des Flugsystems, sodass sie von dort aus an die Leitwarte über Mobilfunk übertragen werden können. Somit ist eine Überwachung der Transportbedingungen auch während des Fluges möglich.

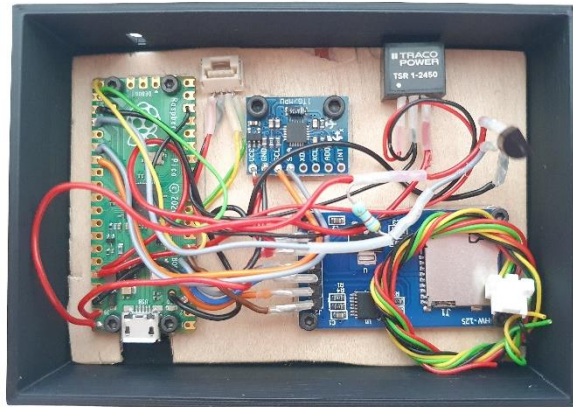


Abbildung 15 Sensorsystemprototyp zur Überwachung der Transportparameter während des Fluges

Bei der Landung auf dem Roboterarm wird zur Synchronisierung des Greifarms des medPorts und des Flugsystems eine genaue Positionsangabe des Flugsystems benötigt. Zum einen wird dies über die Erfassung durch ein Kamerasystem, das von der FH Aachen um den medPort installiert wird, realisiert zum anderen werden die Telemetriedaten des Flugsystems an den medPort gesendet.

Um die Telemetriedaten des Flugsystems möglichst in Echtzeit bereitstellen zu können, wurde eine zusätzliche Funkschnittstelle durch das FSD in das Flugsystem integriert, die es ermöglicht die Telemetriedaten direkt an den medPort zu senden. Für diesen Zweck wurde ein ESP32 Mikrocontroller in das Flugsystem eingebaut und mit Unterstützung der flyXdrive an die bestehende CAN-Infrastruktur des Flugsystems angeschlossen. Um die Telemetriedaten an das ESP-Modul per CAN weiterzuleiten wurde die Softwarekonfiguration des Flugsystems angepasst. Die Schnittstelle wurde auf Basis des ESP-NOW Protokolls umgesetzt. Das in das Flugsystem integrierte ESP-Modul ist in Abbildung 16 zu sehen.

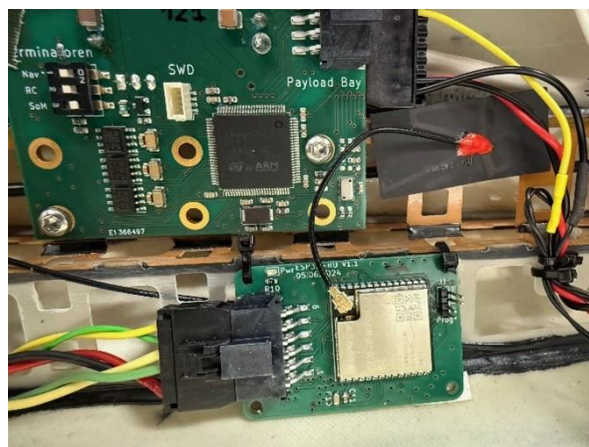


Abbildung 16 ESP-Telemetriemodul mit Antenne im TW-Neo

Die Funktionalität wurde in intensiver Zusammenarbeit mit der FH Aachen und der flyXdrive getestet. Dazu wurden zunächst in einer Laborumgebung getestet, ob die benötigten Telemetriedaten in ausreichender Signalstärke beim MedPort ankommen. Ein solcher Test ist in Abbildung 17 gezeigt.



Abbildung 17 Funkschnittstellentest

Im Anschluss daran erfolgten Flugversuche, um die Synchronisierung des Greifarms des medPorts mit dem Flugsystem zu validieren. In Abbildung 18 ist ein Flugversuch zur Synchronisierung von medPort und Flugsystem dargestellt. Im Rahmen dieser Versuche konnte die Funktionalität hinsichtlich Signalstärke und Latenz verbessert und abgesichert werden.



Abbildung 18 Synchronisierungstests

Aufbauend auf dieser Funktionalität wurden weitere Flugversuche durchgeführt, um die Start- und Landeprozesse zu automatisieren. Bei den durchgeführten Flügen hat sich gezeigt, dass die

Positionierung des Flugsystems im Greifarm wichtig ist, um je nach Schwerpunkt den Kontakt von Landegestell und Greifarm beim Anheben zu minimieren.

Anflugverfahren

Mit den bereits aus den Synchronisierungstests gewonnen Erkenntnissen wurde der Anflug auf den medPort so gestaltet, dass das Kamerasystem die am Flugsystem angebrachten Marker möglichst gut und frühzeitig erfassen kann. Dafür fliegt das Flugsystem den medPort von oben an, hierzu wird zunächst eine Position in ca. zehn Metern Höhe über dem medPort eingenommen, um anschließend langsam zu sinken, bis das Flugsystem sich in geringer Höhe über dem Greifarm befindet. Diese Position wird so lange gehalten, bis der Greifarm das Flugsystem fängt, oder der Fangprozess abgebrochen wird. Im Falle eines Abbruchs steigt das Flugsystem wieder auf eine Sicherheitshöhe und fliegt im Anschluss einen vorher festgelegten Sicherheitslandepunkt in der Nähe an. Die Flugtests wurden auch unter Windeinfluss durchgeführt.

Das AP 2.3 war das umfangreichste Arbeitspaket der FH Aachen, da es die Integration aller Komponenten zu einem Gesamtsystem – dem medPort – umfasste. Im Rahmen dessen wurden die Einzelkomponenten nach Definition der Systemarchitektur weiter präzisiert.

Zu den wesentlichen Komponenten, die im Folgenden näher beschrieben werden, gehören:

- Roboterarm für Fang- und Handling-Aufgaben
- Greifer zur sicheren Aufnahme des Fluggeräts
- Ein optisches Tracking (MoCap)-System zum Tracking des Fluggeräts
- Simulation für Roboter und Greifer
- Softwarekomponenten zur Steuerung sämtlicher Systeme

Roboter

Zur Auswahl eines geeigneten Roboterarms wurden zu Beginn die benötigten Anforderungen definiert. Das wichtigste Kriterium ist eine ausreichende Endeffektorgeschwindigkeit, um den Greifer mit den Bewegungen des Fluggeräts synchronisieren zu können, sowie zusätzliche Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsreserven für Aufsynchronisierungsvorgänge. Hierfür wird eine Endeffektorgeschwindigkeit von ca. 2 m/s benötig. Neben einer ausreichend hohen Geschwindigkeit am Endeffektor wurden folgende Kriterien definiert:

- Remote Interface und Integration mit dem Robot Operating System (kurz ROS)
- Traglast 10 kg (Gewicht Fluggerät max. 8 kg + Gewicht Greifer)
- Kollaborativer Betrieb möglich
- Betrieb im Freien möglich (min. IP54 zertifiziert)

Basierend hierauf wurden verschiedene Roboter ausgewählt und geprüft, die in Tabelle 4 dargestellt sind. Die Kriterien, die schließlich zum Ausschluss des jeweiligen Systems geführt haben, sind in rot markiert.

Tabelle 4 Mögliche Robotersysteme, Ausschlusskriterium in rot markiert

Hersteller	Modell	ROS	Traglast [kg]	Kollaborativ	IP-Zertifizierung	TCP-Geschw. [m/s]
ABB	GoFa	Unvollständig, in Entwicklung	5	Ja	IP54	k. A.
	IRB 1300		10	Nein	IP67 möglich	k. A.
FANUC	CRX-10iA/L	Experimentell	10	Ja	IP67	k. A.
KUKA	LBR iiwa 7 R800	veraltet, nicht direkt nutzbar	7	Ja	IP54	k. A.
	LBR iiwa 14 R820		14	Ja	IP54	k. A.
UR	UR10e	Ja	12,5	Ja	IP 54	1,0
YASKAWA	HC10DTP IP67	Ja	10	Ja	IP67	2,0

Für den vielversprechendsten Kandidaten, den YASKAWA HC10DTP wurde geprüft, ob eine synchrone Bewegung des Greifers mit dem Fluggerät mit den maximalen Achsgeschwindigkeiten des Roboters möglich ist. Die Berechnung der erforderlichen Endeffektorgeschwindigkeit des Roboterarms erfolgte unter Verwendung von Simulationsdaten des Fluggeräts, bereitgestellt vom Projektpartner FSD. Dabei wurden Daten mit einer mittleren Windgeschwindigkeit von 11 m/s zugrunde gelegt, um auch unter widrigen Umgebungsbedingungen einen Fangvorgang zu ermöglichen.

Abbildung 19 zeigt die Achsgeschwindigkeiten des YASKAWA HC10DTP-Roboters in Synchronisation mit dem simulierten Fluggerät. Im linken Teil der Abbildung sind die Winkelgeschwindigkeiten aller Achsen über die gesamte Simulationsdauer von 300 Sekunden dargestellt. Die gestrichelten Linien markieren die Achslimits. Der rechte Teil der Abbildung bietet eine Detailansicht eines 10-Sekunden-Zeitraums. Die Farbkennzeichnungen und Markierungen sind kohärent.

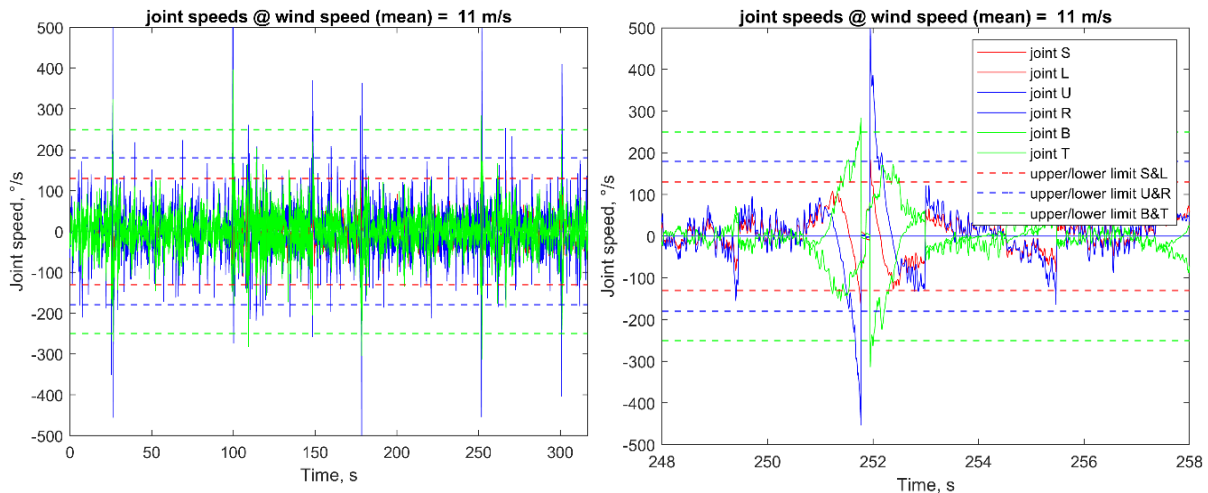


Abbildung 19 Benötigte Achsgeschwindigkeiten des Roboters bei mittleren Windgeschwindigkeiten von 11 m/s. Links: Gesamte Simulationsdauer. Rechts: Detailansicht 10 Sekunden-Abschnitt

Die Einhaltung der Achsgeschwindigkeiten ist nicht in allen Fällen möglich, jedoch bleiben sie größtenteils innerhalb des benötigten Zeitraums für einen erfolgreichen Fangvorgang. Auf Basis dieser Anforderungen wurde der entsprechende Roboterarm HC10DTP mit der Robotersteuerung YRC1000micro von YASKAWA ausgewählt.

Die Inbetriebnahme des Roboters erfolgte für erste Tests auf einer Bodenplatte, wobei Sicherheitslaserscanner zur Bereichsabsicherung eingesetzt wurden. Diese ermöglichten ein sicheres Abschalten des Roboters beim Betreten eines vorher definierten Sicherheitsbereichs. Erst nach Abschluss dieser Tests wurde der Roboter in das Gesamtsystem medPort integriert (siehe *Aufbau Gesamtsystem medPort*).

Für den sicheren und vorhersagbaren Betrieb des Roboters wurde der für den Fangvorgang relevante Arbeitsbereich (engl. task space, kurz T) bei einer festen Greiferkonfiguration (Greifer nach oben zeigend) untersucht. Dabei lag der Fokus auf der Identifizierung und Darstellung von Singularitäten. Der Begriff leitet sich aus seiner mathematischen Bedeutung ab (dem Rangabfall einer Matrix) und bezeichnet in der Robotik das Problem einer nicht eindeutig lösbaren inversen Kinematik (der Berechnung der Achsstellungen für eine definierte Endeffektor-Trajektorie). Singularitäten treten beispielsweise auf, wenn zwei Gelenke in einer Achse liegen, oder der Roboter auf sonstige Weise in seiner Bewegungsfreiheit eingeschränkt wird. Bei der Annäherung an eine Singularität kommt es zu unvorhergesehenen schnellen Bewegungen einzelner Robotergelenke. Ein wesentliches Ziel war es, Singularitäten zu vermeiden, um eine stabile und sichere Roboterbewegung innerhalb von T zu gewährleisten.

Abbildung 20 zeigt die Analyse des Roboterarbeitsraums mit Hilfe der Konditionszahl der Jacobi-Matrix. Dargestellt sind lediglich drei Ebenen, um die Ergebnisse übersichtlicher darzustellen. In der Farbskala des Diagramms gilt: Je dunkler die Farbe, desto kleiner ist die Konditionszahl. Eine hohe Konditionszahl bedeutet in diesem Fall, dass der Roboter auf kleine lineare Vorgabewerte mit hohen

Achsgeschwindigkeiten reagiert. Bereiche ohne Einfärbung deuten auf Singularitäten hin oder auf Positionen, die physisch nicht erreichbar sind (weil sie beispielsweise außerhalb des Arbeitsraums des Roboters liegen). Weitere Details und ausführliche Ergebnisse und Beschreibungen sind in der zugehörigen Veröffentlichung von Konnow et al. zu finden, welche auch in Kapitel 2.6 genannt ist.

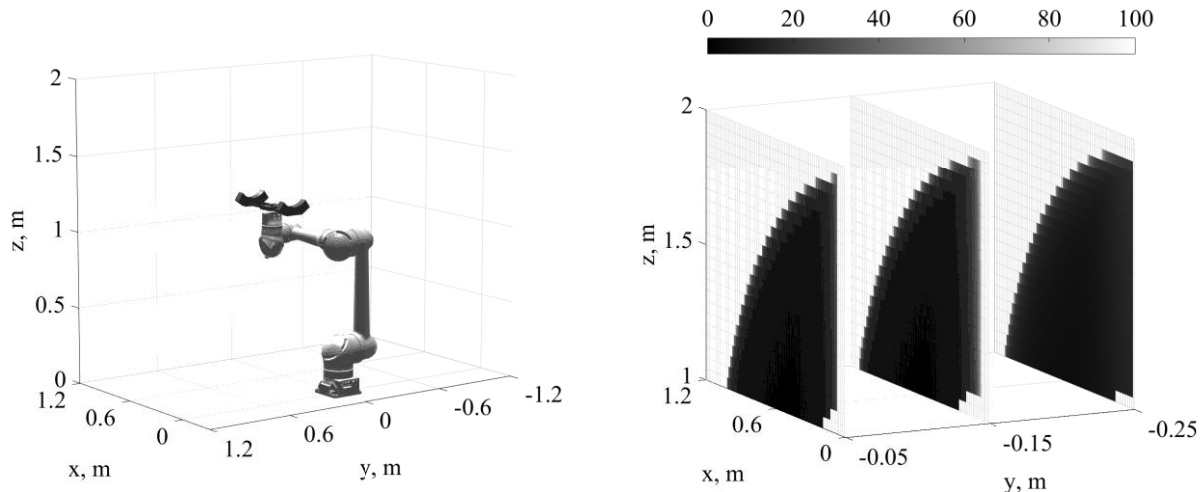


Abbildung 20: Analyse des Arbeitsraums. Links: Neutralpose des Roboters. Rechts: Darstellung der Konditionszahl des Roboterarbeitsraums

Aus der Anforderungsanalyse für den Greifer wurden folgende Kriterien definiert:

- Möglichst klein und leicht
- Sicheres und definiertes Greifen
- Zerstörungsfreies Greifen des Rumpfes des Fluggeräts
- Angepasst auf die Rumpfkontur des Fluggeräts

Der erste Entwurf sah einen Betrieb mit Druckluft vor, wurde jedoch später auf vier elektrische Antriebe umgestellt. Die Gründe hierfür sind die bessere Regelbarkeit von Geschwindigkeit, Kraft und Position, die Schwierigkeit, synchrone Bewegungen pneumatisch umzusetzen, sowie die leichtere Realisierbarkeit einer elektrischen Versorgung im Vergleich zu einem pneumatischen Anschluss. Zudem lässt sich z. B. der Endanschlag softwareseitig einfach einstellen und ggf. justieren.

Abbildung 21 zeigt den Greifer, der mittig aus zwei Aluminium-Extrusionsprofilen besteht. Der Großteil der restlichen Komponenten wurde mittels 3D-Druck gefertigt, um eine schnelle und kostengünstige Herstellung zu gewährleisten und Änderungen rasch umsetzen zu können. Jede Greiferbacke wird von einem separat ansteuerbaren Servo-Motor bewegt. Zur Sicherstellung eines festen und griffigen Halts sind die Greiferbacken mit Zellkautschuk gepolstert, der eine passende Kombination aus Stoßdämpfung und Haftreibung bietet.



Abbildung 21: Robotergreifer in finaler Iteration

Vor den Tests am Fluggerät wurde ein Flugsystem-Dummy verwendet. Dieser besteht aus einer 3D-gedruckten Rumpfkontur, die mit verstellbaren Gewichten ausgestattet ist, um die Massen und die Trägheitsmomente des echten Fluggeräts nachzubilden. Zusätzlich wurde eine IMU zur Erfassung von Drehraten und Beschleunigungen sowie ein Funkmodul zur Übertragung der Messwerte integriert, um Testdurchführung aller Komponenten zu ermöglichen. [Abbildung 22](#) zeigt den Dummy im Greifer. Die Aufhängung erfolgt an den vier Ecken mit Nylon-Schnüren.

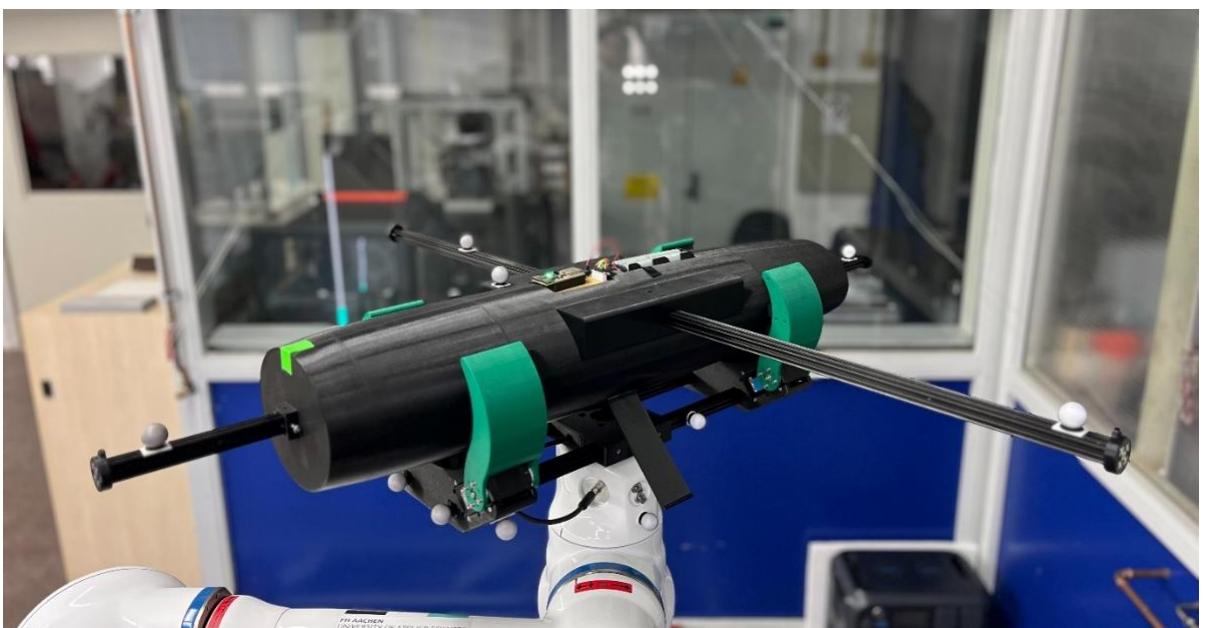


Abbildung 22: Dummy-Flugsystem im Greifer am Roboter

Optisches Tracking-System

Auch für das Tracking-System wurde eine Anforderungsanalyse durchgeführt. Neben der Bereitstellung der Positionsdaten mit einer ausreichend hohen Frequenz (> 400 Hz), sollte das System im Freien (unter Sonneneinstrahlung) funktionieren und Software-Schnittstellen zur Integration in ROS und Matlab bieten. Aufgrund dieser Anforderungen fiel die Wahl auf ein System von Qualisys. Zunächst wurde das Tracking mit einer reflektierenden Markerfolie getestet, die wegen der geringen Dicke und den damit verbundenen geringen Einflüssen auf die aerodynamischen Eigenschaften des Fluggeräts die bevorzugte Lösung gewesen wäre. Allerdings erwies sich diese als unzuverlässig, da die Sichtbarkeit nicht aus allen Winkeln gewährleistet war. Daher erfolgte ein Wechsel auf Marker-Kugeln.

In [Abbildung 23](#) ist eine Darstellung der getrackten Festkörper (engl. rigid body) von Fluggerät und Greifer zu sehen. Rechts daneben ein Foto der gleichen Szene. Bei diesem Versuch konnte die synchrone Bewegung zwischen Roboterarm und Fluggerät mittels Tracking erfolgreich getestet werden.

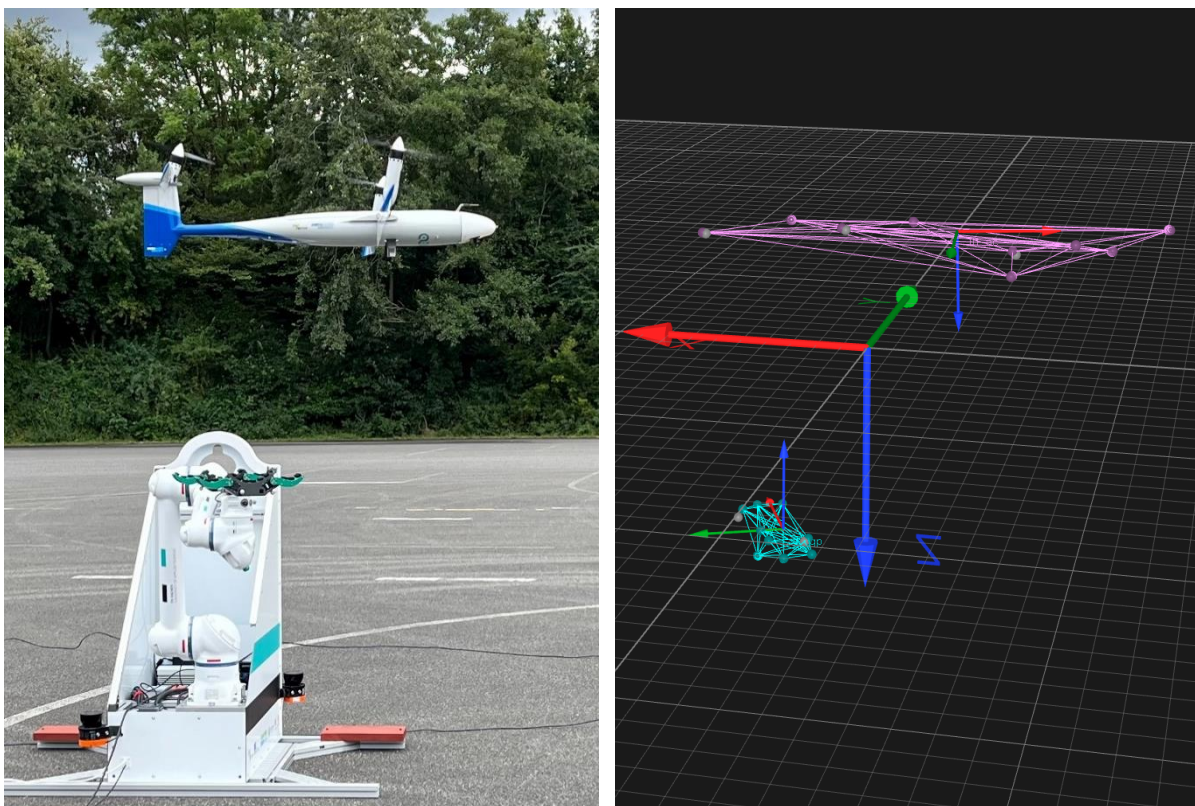


Abbildung 23: Darstellung des vom Tracking-System detektierten Fluggeräts und des Greifers (links) und Foto der Szene (rechts)

Schwierigkeiten traten anfangs durch die Lackierung des Fluggeräts auf, da Reflektionen teilweise fälschlicherweise als Marker erkannt wurden. Dies beeinflusste die Detektion des Fluggerät-Körpers im Tracking-System und sorgte für Fehlerkennungen und Detektionslücken. Durch Änderungen an der Position der Marker und eine robuste Definition des Festkörpers mit einer ausreichenden Anzahl an Markern (8-12 Stück) ist ein Tracking dennoch möglich.

Zur besseren Analyse der Tracking-Daten wurde das System um zwei Video-Kameras ergänzt, deren Video-Stream in die Tracking-Daten zur besseren Visualisierung und zu Demonstrationszwecken eingebunden werden kann. Die Bilder der Video-Kamera können virtuell mit dem Koordinatensystem der Kameras und den erkannten Festkörpern überlagert werden, siehe [Abbildung 24](#). Dadurch wird z.

B. eine Analyse möglicher Detektionsprobleme vereinfacht. Außerdem ist durch diese Darstellung auch für externe Betrachter besser zu erläutern, welche Daten vom Tracking-System geliefert werden und wie diese genutzt werden. In der Abbildung wird das Bezugssystem und die detektierten Festkörper des Greifers und des Fluggerät-Dummys in rot und grün dargestellt.

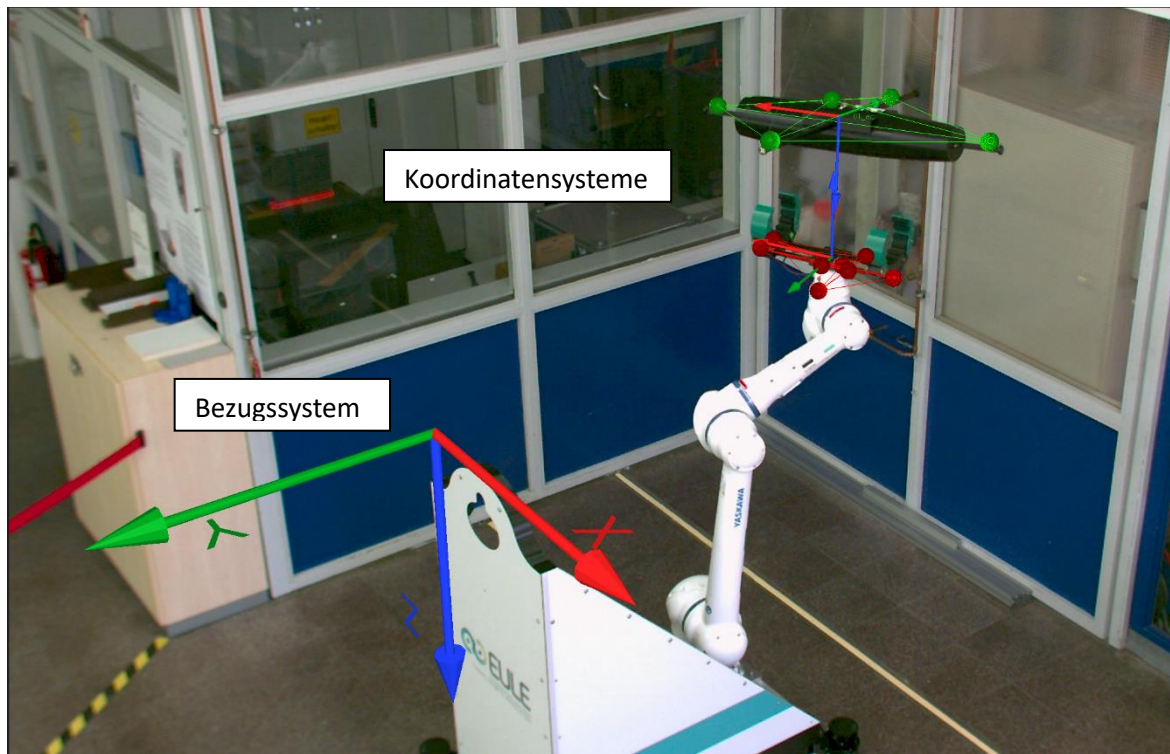


Abbildung 24: Aufbau des medPorts im Labor mit überlagerten Daten des optischen Trackingsystems

Software-Komponenten des medPorts

Robotersteuerung

Im Rahmen des Projekts wurde ein Echtzeit-Treiber¹ für die Robotersteuerung YRC1000micro des Herstellers entwickelt, der direkt in die Steuerung als Task des VxWorks Linux-Systems integriert ist. Dies war notwendig, da zu diesem Zeitpunkt im Projektverlauf noch kein ROS2-Treiber verfügbar war. Der mittlerweile vorhandene offizielle ROS2-Treiber von YASKAWA erlaubt es jedoch weiterhin nicht, einzelne Sollwerte als direkte Positionsvorgabe an die Robotersteuerung zu übermitteln, sodass die Achsen nicht direkt und verzögerungsfrei angesteuert werden können. Es wird lediglich eine Übertragung von vollständigen Trajektorien unterstützt. Dies führt dazu, dass eine schnelle und reaktive Steuerung des Roboters nicht möglich ist. Der entwickelte Treiber ist so gestaltet, dass Schäden am Roboter verhindert werden. Im Falle eines Verbindungsverlusts extrapoliert das System kurzfristig weiter und bremst den Roboter anschließend kontrolliert ab. Im Zuge der Entwicklung einer Schnittstelle wurde eine Systemidentifikation des Roboters durchgeführt. Da es sich hierbei um einen seriellkinematischen Roboter handelt, wurde für jede Achse einzeln eine Sprungantwort aufgezeichnet und ausgewertet. Jede der Achsen weist eine Totzeit mit anschließendem Verzögerungsverhalten zweiter Ordnung auf. Erst nach ca. 90 ms wird eine gesendete Achsposition erreicht. Dafür wird intern für jede der Achsen ein Positionsregler verwendet. Dieser lässt sich nach aktuellem Wissensstand nicht deaktivieren. Daher handelt es sich bei dem Roboter um ein gesteuertes System, da eine Rückführung

¹ Github Repository: https://github.com/adv4ncr/motoman_ROS2

der Achspositionen für eine externe Regelung aufgrund der Verzögerungszeit und des darunterliegenden eigenständigen Positionsreglers nicht sinnvoll erscheint.

Auf der medPort-Seite wurde eine Schnittstelle für das ROS2 Linux-Echtzeitsystem in ros2control entwickelt, die die Kommunikation mit der Robotersteuerung ermöglicht. Des Weiteren wurden eine Vielzahl von Hardware-Schnittstellen für das ROS2 Echtzeitsystem in C++ implementiert:

- Eine Anbindung für das Qualisys Motion-Capture-System
- Ein kabellosen Datenlink auf Basis von ESP-NOW für das Streaming von Telemetriedaten des Fluggeräts zum medPort. Mit diesem Datenlink besteht ein Kommunikationsmechanismus, der mithilfe des ARQ-Protokolls einen bilateralen Datenaustausch mit dem Fluggerät ermöglicht.
- Ein Treiber für das Anemometer, um die seriell übertragenen Winddaten zu verarbeiten
- Eine Ansteuerung für den Greifer, welche verschiedene Betriebsmodi ermöglicht
- Eine LED-Steuerung für die zwei angebrachten einzeln adressierbaren LED-Streifen

Externe Steuerung des Roboters

Nach der Entwicklung einer echtzeitfähigen Roboterschnittstelle erfolgt nun die Beschreibung der sensorgestützten Steuerung des Roboters. Zur Fusionierung der Eingangsdaten vom optischen Tracking-System und den Telemetriedaten wird ein Kalman-Filter eingesetzt. Der Filter erlaubt es die Eingangsdaten zu glätten und auftretende Lücken in der Detektion des Tracking-Systems mit Hilfe von Prädiktionsschritten zu schließen (siehe Abbildung 25). Zudem dient der Kalman-Filter zur Prädiktion der Flugbewegung, um die inhärente Totzeit des Roboters auszugleichen.

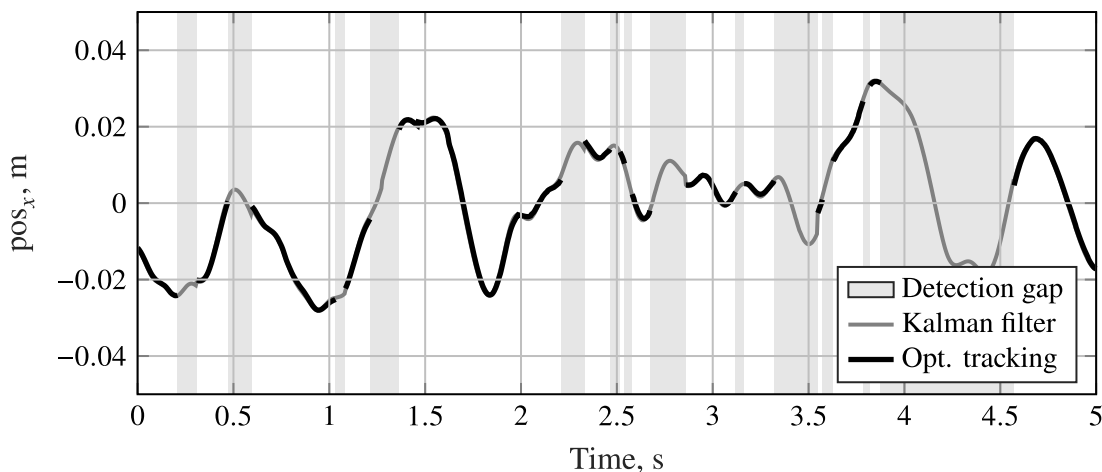


Abbildung 25: Kalman-gefilterte Daten, Ausfälle des Kamera-Systems in grau markiert

Der modellprädiktive Regelungsalgorithmus (engl. model predictive control, kurz MPC) verwendet die vom Kalman-Filter prädizierten Daten als Eingangsgröße. Die Roboter-Totzeit von ca. 90 ms wird innerhalb des Prädiktionshorizonts übersprungen und die Roboterbewegung wird für die anschließenden zehn Schritte (40 ms) geplant. Als Vorgabetrajektorie wird die prädizierte Pose des Fluggeräts verwendet, wobei ein vertikaler Offset (der Abstand des Greifers unter dem Fluggerät) beibehalten wird. Damit wird der Roboterarm mit dem Greifer erst aufsynchronisiert und anschließend synchron unter dem Fluggerät verfahren.

Die synchrone Bewegung unter dem Fluggerät wird so lange fortgeführt, bis der richtige Zeitpunkt zum Greifen erreicht wird. Dabei werden die physischen Beschränkungen des Roboters direkt im MPC-Algorithmus berücksichtigt, wie z. B. maximale Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und der mögliche Arbeitsbereich des Roboters. Zusätzlich werden weitere Fangbedingungen einbezogen, darunter die Lage des Fluggeräts relativ zum Greifer, die Position des Fluggeräts im Arbeitsbereich, die Qualität der Messdaten (abgeleitet aus der Kovarianz des Kalman-Filters) sowie die Achslimits des Roboters.

Zur Steuerung der Zielsetzung der MPC wird ein Zustandsautomat genutzt, dargestellt in Abbildung 26. Die Zustandsübergänge erfolgen basierend auf unterschiedlichen Entscheidungsmengen S . Nach der Initialisierung des Roboters wird der Greifer mit dem Fluggerät synchronisiert und mit einem Abstand von 0,3 m unter dem Fluggerät positioniert. Wenn die Bedingungen S_L erfüllt sind, wird der Abstand verringert und der Übergang zum State LOITER erfolgt. In S_L wird u. A. geprüft, ob der Greifer dem Fluggerät mit einer ausreichend geringen Abweichung folgt, ob das Fluggerät innerhalb der Roboter-Beschränkungen sicher erreichbar ist und ob die Güte der Messdaten für die robotisch assistierte Landung ausreicht. In LOITER verringert der Roboter den Abstand zum Fluggerät auf 0.1 m. Während der fortlaufenden Annäherung des Greifers an das UAV erfolgt in jedem Zeitschritt die Überprüfung, ob die Bedingung S_F (feine Synchronisations-Bedingung) erfüllt ist. Die feine Synchronisations-Bedingung beurteilt anhand der Zugriffstoleranzwerte, ob die Synchronisation für einen Zugriff ausreichend ist. Falls dies erfüllt ist, erfolgt der Übergang in den GRAB-Zustand. Andernfalls verbleibt der Roboter in LOITER oder wird aus Gründen der Sicherheit (z.B. Güte der Messdaten unzureichend) in SYNC zurückgeführt.

Mit dem Erreichen des GRAB-Zustands wird die Schließung des Greifers kommandiert, der kommandierte vertikale Abstand des Greifers zum UAV auf 0,01 m verringert und kontinuierlich die Zugriffs-Bedingung S_Z überprüft. Die Zugriffs-Bedingung bestimmt den Zeitpunkt des Greiferschließens in Abhängigkeit zum vertikalen Abstand des Greifers zum UAV. Sobald die Zugriffs-Bedingung erfüllt ist, erfolgt der Übergang in den DECELERATE-Zustand. Eine Rückkehr in vorherige Zustände ist nach Beginn der Entschleunigung aus Sicherheitsgründen nicht mehr möglich. Insbesondere soll dies verhindern, dass das gelandete UAV durch eine fehlerhafte Detektion der optischen Posenbestimmung weiterhin als Referenzgröße zur Verfolgung verwendet wird. Die fehlerhafte Detektion kann dabei aufgrund von durch den Greifer verdeckten reflektiven Markern nach dem Zugriff auftreten. Dies würde zu einem instabilen Reglerverhalten führen, da die Pose des Greifers nach erfolgreichem Zugriff mit der Pose des UAVs gekoppelt ist.

Nach abgeschlossener Entschleunigung erfolgt die Rückführung in den Neutralzustand, in dem der MPC die konstante Vorgabe des Neutralzustands übergeben wird. Die Anpassung der Geschwindigkeits- und Beschleunigungsgrenzen der MPC resultiert in einer im Vergleich zum vorherigen Fangprozess langsamen Bewegung in die Neutralpose. Die abgeschlossene Rückführung ermöglicht einen geeigneten Übergang von der Online- hin zur Offline-Trajektorienplanung. Die robotisch assistierte Landung ist abgeschlossen.

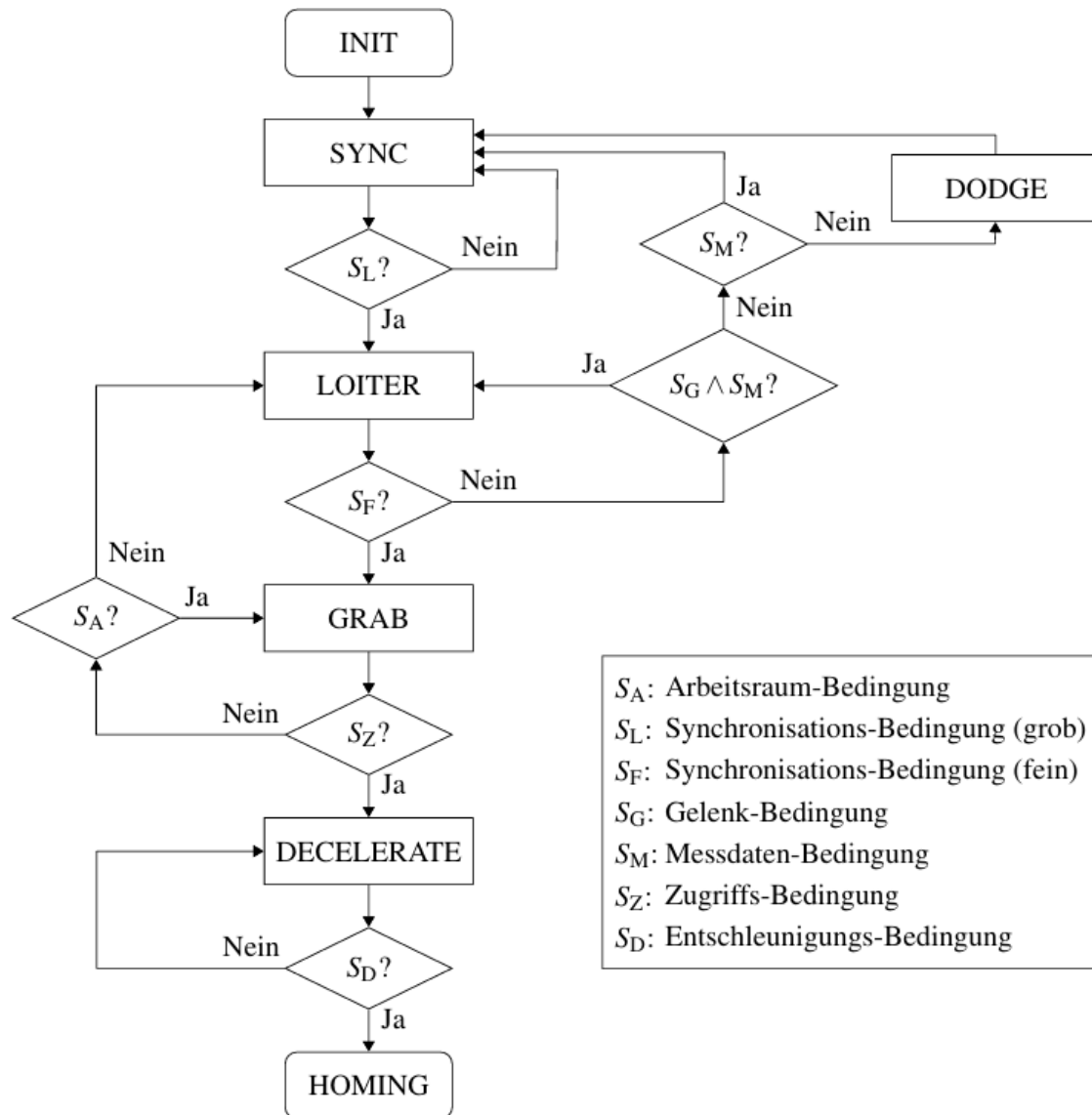


Abbildung 26: Zustandsautomat zur Steuerung des Roboters

Behaviour-Tree (BT)

Für die Ablaufsteuerung des medPorts wurde ein Behavior-Tree implementiert. Dieser ist ein flexibler, übergeordneter Zustandsautomat, der alle Vorgänge des Systems auf oberster Ebene kontrolliert und steuert. Innerhalb des Behavior-Trees wird zudem die Kommunikation mit dem Projektpartner FSD mit Hilfe von Web-Sockets umgesetzt. Zu den wesentlichen Aufgaben des Behavior-Trees gehören:

- Das Starten und Koordinieren der verschiedenen Services
- Die kontinuierliche Überprüfung und Steuerung der aktuellen Systemzustände
- Die Überwachung des Sicherheitsbereichs
- Eine Reaktion auf mögliche Fehler oder unvorhergesehene Ereignisse

In [Abbildung 27](#) ist ein Ausschnitt aus dem Behavior-Tree zu sehen. Beginnend links oben wird der Sicherheitsbereich des Roboters initialisiert. Nachdem der Sicherheitsbereich geräumt und eine Freigabe bestätigt wurde, kann z. B. mit dem Start- oder Landevorgang begonnen werden. Diese sind rechts unten im Bild als weitere, eingeklappte Bäume zu erkennen.

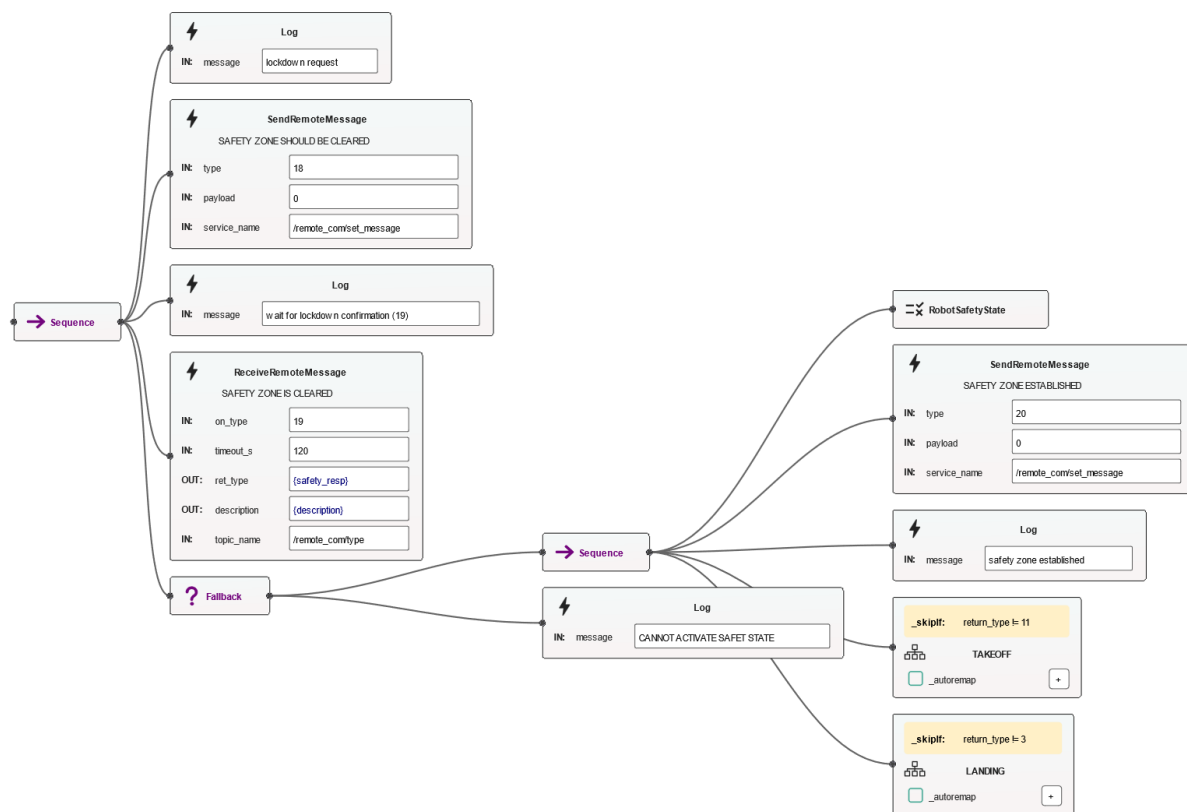


Abbildung 27: Ausschnitt aus dem genutzten Behavior-Tree

Ein Fehler, etwa die Detektion eines Objekts im Sicherheitsbereich der Laserscanner oder eine über das Zeitlimit hinaus unbeantwortete Anfrage an die Flugführung führt zu einem kontrollierten Abbruch innerhalb des Behavior-Trees.

Aufbau Gesamtsystem medPort

Alle zuvor beschriebenen Komponenten wurden zu einem Gesamtsystem – dem medPort – zusammengefügt. Für den sicheren Betrieb des Roboters wurden die Sicherheitslaserscanner an den gegenüberliegenden Ecken angebracht und stellen so eine Rundumüberwachung sicher. Insbesondere während kritischer Phasen, wie Start und Landung des Fluggeräts, ist der sichere Betrieb der Plattform somit gewährleistet. Zusätzlich wurden senkrechte LED-Streifen an den vorderen Kanten des medPorts angebracht, die als Signalleuchten den aktuellen Systemstatus verdeutlichen. Diese optischen Signale erleichtern die Überwachung des Betriebszustands und signalisieren diesen deutlich sichtbar für alle Anwender:innen. Der Tablet-PC des Projektpartners DiC dient der Steuerung von Logistikprozessen, wie dem Anlegen eines Transportauftrags und ermöglicht eine intuitive Bedienung für die Anwender:innen.

Nach der Konstruktion des Gesamtaufbaus (siehe [Abbildung 28](#), oben) und der Erstellung einer Simulation ([Abbildung 28](#), unten links) wurde das System im Labor aufgebaut ([Abbildung 28](#), unten rechts). Die Bodenplattform wurde anschließend in einer Hardware-in-the-Loop (kurz HiL) Simulation getestet. Zuerst wurden alle Einzelfunktionen validiert, etwa der verzögerungsfreie Empfang und die Filterung von Sensordaten, die Roboterschnittstelle, die Synchronisation mit dem Dummy-Fluggerät und abschließend der Fangvorgang.

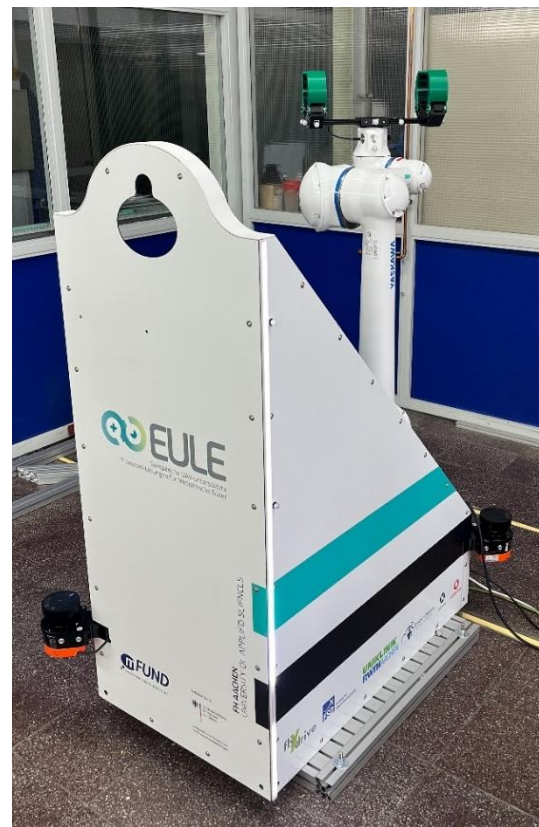
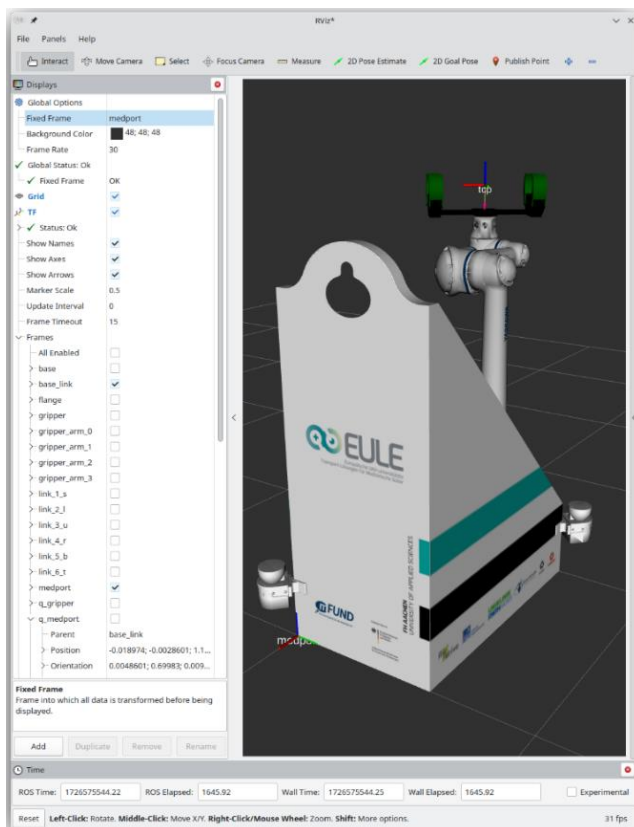


Abbildung 28: Aufbau des medPorts. Oben: Rendering der CAD-Konstruktion. Unten links: Visualisierung in RViz. Unten rechts: Realer Aufbau auf verankerter Bodenplatte im Laborbetrieb

In *Abbildung 29* sind die verschiedenen Phasen eines Fangvorgangs zu erkennen. Die Bilderreihe zeigt den medPort im Labor mit dem darüber schwebenden Fluggerät-Dummy. Dieser bildet die für den Fangvorgang relevante Rumpfkontur des Fluggeräts nach. Zudem enthält der Dummy eine inertielle Messeinheit (engl. Inertial Measurement Unit, kurz IMU) und ein eigens entwickeltes Funkmodul, welches die Beschleunigungen und Drehraten des Dummys an den medPort überträgt. Am Ende des

Roboterarms (i.e. am Endeffektor) ist der für das Fluggerät spezialisierte Greifer montiert. An der rückwertigen Wand ist eine Kamera des optischen Tracking-Systems zu erkennen.

Ein Fangvorgang verläuft wie folgt: Mit Hilfe der fusionierten Sensordaten wird die Position und Orientierung (kurz Pose) des Dummys bestimmt. Da der Roboter eine inhärente Totzeit mit anschließendem verzögertem Verhalten zweiter Ordnung aufweist, muss die Pose ca. 90 ms in die Zukunft prädiziert werden. Der Roboterarm wird mittels einer modelprädiktiven Regelung so verfahren, dass er sich zunächst mit vertikalem Abstand auf die Bewegungen des Dummys aufsynchronisiert. Durch eine Reihe von Entscheidungskriterien wird anschließend ein sicherer Zugriffszeitpunkt bestimmt. Diese setzen sich zusammen aus der Güte des Messdaten, dem verbleibenden Arbeitsraum des Roboters, der Pose des Fluggeräts relativ zum Greifer mit hinzugefügten Zugriffstoleranzen, einer Abschätzung der weiteren Bewegung des Fluggeräts etc. Während des Zugreifens, also der Verringerung des vertikalen Abstands zum Fluggerät, wird das Entscheidungskriterium der Zugriffstoleranzen weiter verringert, um einen sicheren Zugriff zu gewährleisten. Durch die inhärente Totzeit des Roboters muss die finale Entscheidung des Zugriffs vor der eigentlichen Ausführung gefällt werden. Die eigentliche Durchführung geschieht somit „blind“ auf den prädizierten Daten des Fluggeräts. In der Praxis ist die Totzeit jedoch gering genug, um dabei eine hohe Erfolgswahrscheinlichkeit zu gewährleisten. Der Greifer weist ebenfalls eine Totzeit und anschließendes verzögertes Verhalten auf. Die Schließung der Greiferbacken erfolgt daher schon erkennbar früh, damit diese zum richtigen Zeitpunkt am Rumpf des Fluggeräts anliegen.



Abbildung 29: Phasen des Fangprozesses

Der Aufbau des medPorts wurde so konzipiert, dass die Sicherheit der Nutzenden gewährleistet wird. Eine Verkleidung sorgt dafür, dass nur zugelassene Flächen zugänglich sind. Zur Steuerung des Zutritts ist perspektivisch beispielsweise eine Einhausung an der Frontseite mittels eines Zauns denkbar.

Um den Transport und die Aufstellung an möglichst diversen Orten zu ermöglichen, wurde darauf geachtet, die Abmessungen des medPort so gering wie möglich zu halten. Daher wurde das Grundgerüst des medPorts aus Aluminiumprofilen gebaut, die bei geringem Gewicht für die nötige Stabilität sorgen. Eine Bodenplatte sowie Ausleger gewährleisten einen sicheren Stand. Zur zusätzlichen Stabilisierung kann das System entweder mit Gewichten beschwert oder fest im Boden verankert werden.

Für Feldtests wurde der Aufbau mit einer externen Stromversorgung betrieben (siehe [Abbildung 30](#)). Dies ermöglichte einen autarken Betrieb des Systems über mehrere Stunden hinweg.



Abbildung 30: Betrieb des medPorts bei Feldtests

HAP 3	Konnektivität
Gesamtziel	Konnektivität des Gesamtsystems analysiert und sichergestellt
AP 3.1	5G-Betrieb und Konnektivität
Ziele des Arbeitspakets	
In diesem Arbeitspaket wird ein Konzept für die Konnektivität des Gesamtsystems, vom Flugsystem bis zur Leitwarte, erstellt und umgesetzt. Die Umsetzbarkeit der 5G-Versorgung im Luftraum wird, unter anderem durch Messflüge, analysiert	

Die Integration der UAS in den Luftraum setzt die Einbindung verschiedener Datenquellen sowie ein dediziertes 5G-vernetztes Datenmanagement voraus. Von der flyXdrive wurde das Highlevel-Board hinsichtlich Konnektivität und Missionssteuerung mit 5G-Modulen modifiziert und eine Adaption der Satellitenkommunikation als Back-Up vorgenommen. Im gemeinsamen Austausch mit der Vodafone und dem FSD wurde über die Konnektivität entlang der Flugrouten, die Abdeckung und Nutzen der Mobilfunkdaten und mögliche Testmessungen gesprochen.

Über die gesamte Projektlaufzeit fand ein Austausch zwischen flyXdrive, Vodafone und dem FSD hinsichtlich Konnektivität entlang der Flugrouten, Abdeckung und Nutzen der Mobilfunkdaten und mögliche Testmessungen statt. Im Fluggebiet für die Erprobungsflüge fand eine Auswertung der Mobilfunkverfügbarkeit während des Fluges statt. Die ermittelten Daten wurden zur weiteren Auswertung an die Vodafone weitergegeben. Zusätzlich wurde ein Prototyp eines modifizierten On-Board-Systems, das nun auch 5G-Konnektivität bietet erprobt. Darauf aufbauend wurden für 2025 Erprobungs- und Messflüge über dem Hürtgenwald geplant und vorbereitet. Die Messungen wurden anschließend am 25.2.2025 durchgeführt.

Zusätzlich wurde in mehreren Treffen mit der Vodafone die Vodafone eigene Plattform DroNet evaluiert, die neben einer Vorhersage für die Qualität des Mobilfunknetzes auch eine Analyse zum Bodenrisiko bietet. flyXdrive hat Vodafone mit ihrer Expertise zur Analyse vom Bodenrisiko und auch der Planung von komplexen Missionen und den daraus resultierenden Anforderungen an eine solche Plattform unterstützt.

Da bis zum Ende des Projektes leider keine Fluggenehmigung für die größeren geplanten Flugrouten vorhanden war, wurden Messflüge auf der Flugroute der Untersuchungen für den Transport von Hornhauttransplantaten am Hürtgenwald durchgeführt. Hierfür wurden Messflüge zwischen 70 und 110 m Höhe mit der Messsoftware NEMO von Keysight durchgeführt. Diese Lösung zeichnet sich dadurch aus, dass sie auf einem Handy verwendet werden kann und somit die Integration in eine Drohne vereinfacht. Auf schwere Messtechnik kann verzichtet werden. Besonderes Augenmerk wurde bei den Messungen auf die Physical Cell ID's (PCI), also die Mobilfunkmasten mit denen das Endgerät auf dem Flug verbunden war, auf die Latenz, die das Signal von der Drohne zur Anwendung und zurück hat, und die Reference Signal Received Power (RSRP), welche im allgemeinen zu Bewertung der Verbindungsstärke herangezogen wird, gelegt.

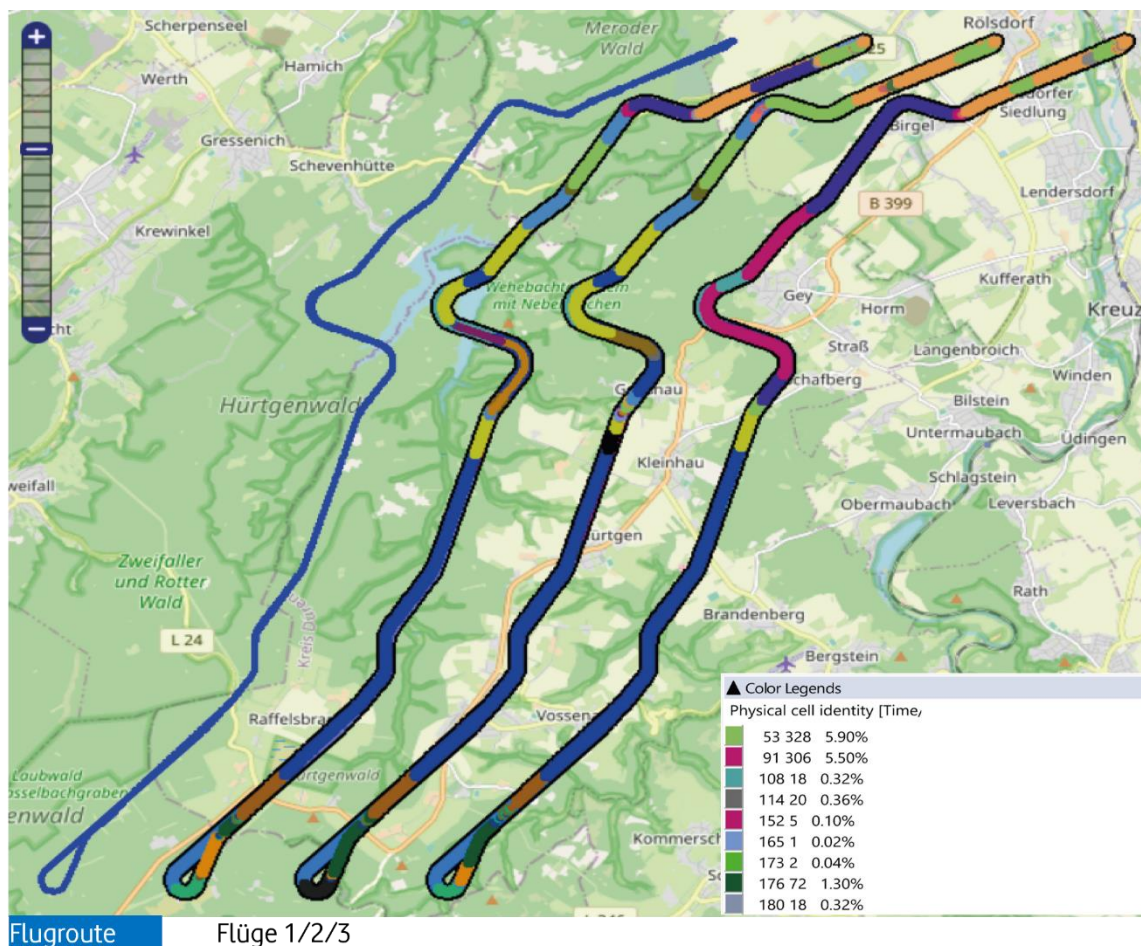


Abbildung 31 PCIs mit denen das Endgerät jeweils während drei der Messflüge verbunden war

Abbildung 31 mit welchen PCIs das Messgerät jeweils während der drei Messflüge verbunden war. Vor allem im Start- und im hinteren Bereich der Flugroute ist ein häufiger Wechsel zu beobachten. Bei allen Messflügen ist ein nahezu identischer Zellwechsel/-verlauf zu beobachten.

Die häufigen Wechsel können erheblich zu Störungen der Verbindung führen. Dies ist insbesondere der Fall, wenn der Wechsel zwischen zwei Zellen stattfindet, die keine direkte Nachbarschaftsbeziehung zueinander haben und somit keine reibungslose Übergabe, Handover genannt, stattfinden kann. Dieses Phänomen tritt in der Regel nur bei Luftfahrzeugen auf, da nur sie in der Lage sind eine Direktverbindung zu zwei Mobilfunkmasten aufzubauen, die keine direkte Nachbarschaftsbeziehung haben.

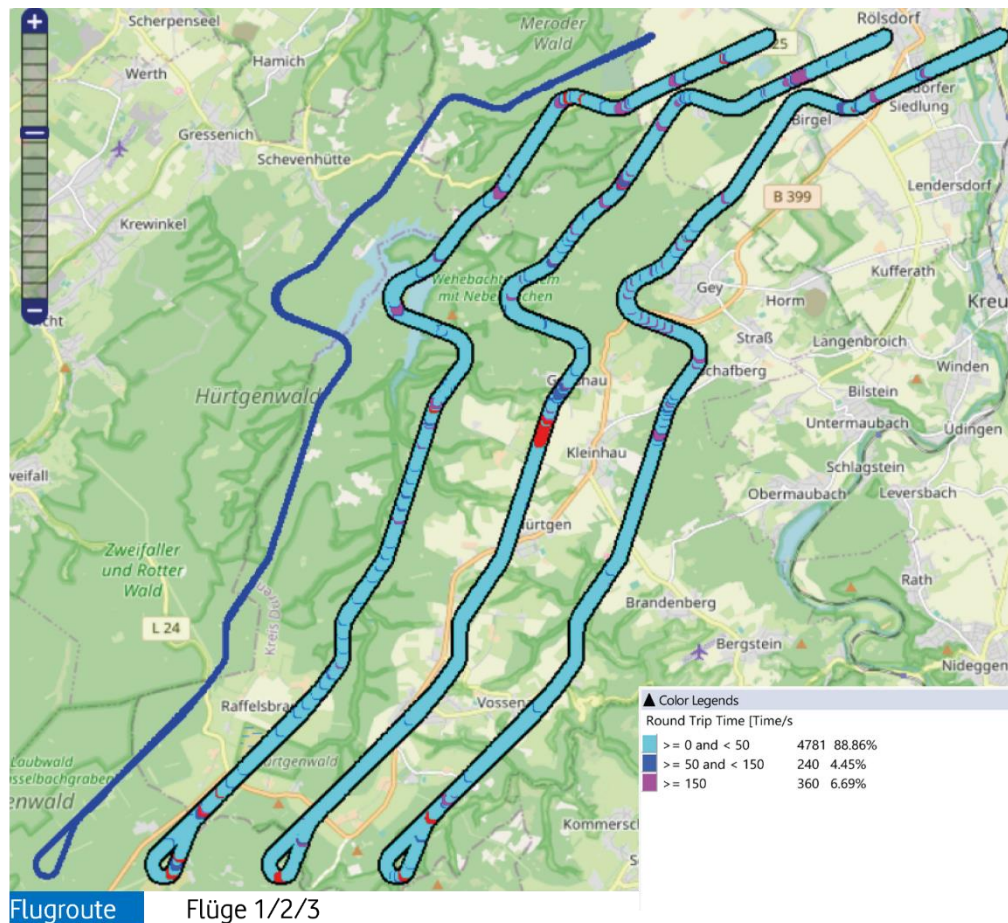


Abbildung 32 Ergebnisse der Messung während der drei durchgeführten Messflüge

Abbildung 32 zeigt die Ergebnisse für die Messung der Latenz auf der Flugstrecke am Hürtgenwald. 88% der Latenzmessungen lagen unter 50 ms. Dies gilt als sehr guter Wert für eine Mobilfunkkommunikation. Vor allem auf dem zweiten Messflugs sind deutliche Peaks zu erkennen.

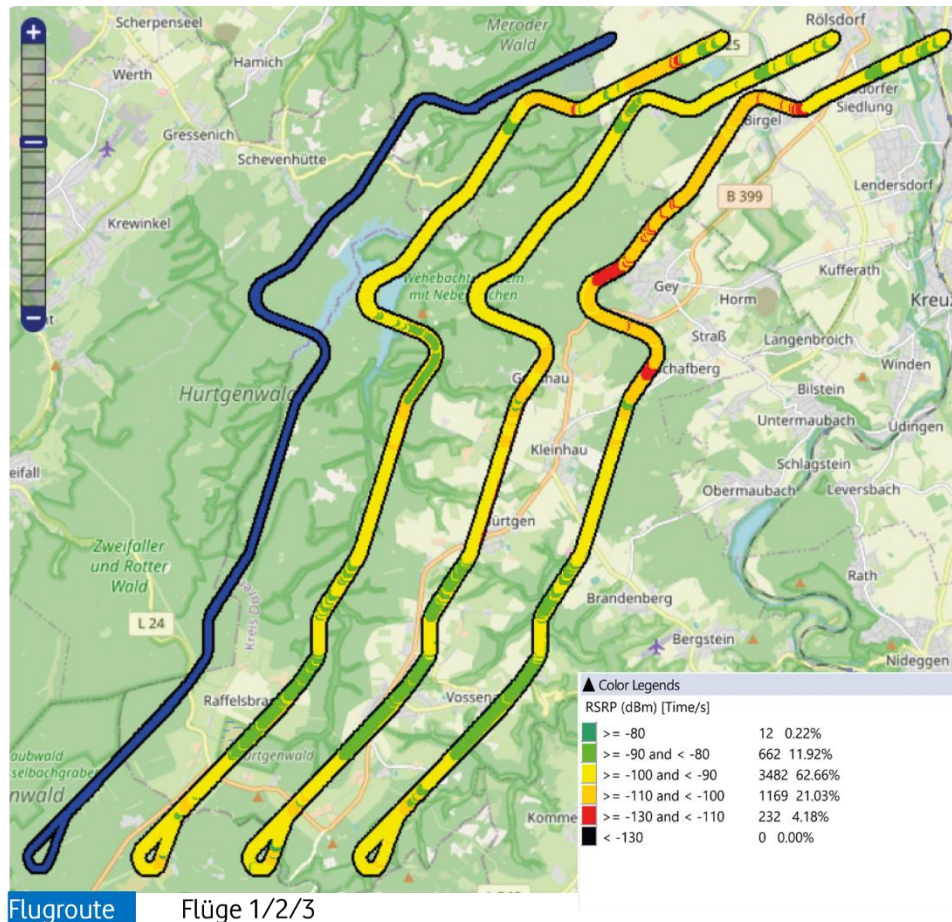


Abbildung 33 Ergebnisse der Messungen der RSRP entlang der Messflugstrecke

Abbildung 33 zeigt die Ergebnisse der Messflüge am Hürtgenwald mit Blick auf die RSRP. Mehr als 95% der Werte liegen unter dem kritischen Bereich und können somit als ausreichend stark für eine zuverlässige Kommunikation betrachtet werden.

Insbesondere die Ergebnisse für die Latenz und RSRP sprechen für eine ausreichende Mobilfunkkommunikation entlang der Flugstrecke. Dennoch kommt es immer wieder während der Flüge zu Aussetzern. Dies lässt sich durch den häufigen Zellwechsel entlang des Weges erklären. Wenn sich zwei Funkmasten nicht „kennen“ kann auch keine Optimale Übergabe von einer Zelle an die andere durchgeführt werden. Da Drohnen aus der Luft, im Gegensatz zu bodengebundenen Endgeräten, direkte Sichtverbindung zu mehreren, teilweise eben nicht in Nachbarschaftsbeziehung stehenden, Zellen haben, kann der Übergang problematisch werden und zu Abbrüchen führen. Dies erklärt auch den starken Anstieg der Latenz auf dem zweiten Flug. Genau an diesen Punkt fanden mehrere schnell aufeinander folgende Zellwechsel.

Diese Problematik kann auf zwei verschiedene Arten behoben werden. Zum einen könnten die Nachbarschaftsbeziehungen der Zellen auch auf weiter entfernte Zellen ausgeweitet werden. Zum anderen könnte das Zellwechselverhalten der Endgeräte dahingehend beeinflusst werden, dass nur dann Zellwechsel stattfinden, wenn diese auch in Nachbarschaftsbeziehung stehen. Welche dieser beiden Herangehensweisen die geeignetere ist konnte im Rahmen des Projektes aus Zeitgründen nicht genauer beleuchtet werden.

AP 3.2	Datenschutz und Rechteverwaltung
Ziele des Arbeitspakets	
In diesem Arbeitspaket wird eine Anforderungsanalyse inklusive der Definition von Rechten und der Rollenverteilung durchgeführt. Dabei werden alle relevanten Stakeholder identifiziert, sowie die jeweiligen Anforderungen analysiert und zugeordnet. Weiterhin werden die Zugriffsberechtigungen sowie Sicherheitsanforderungen spezifiziert.	

Während der Durchführung der Flüge wurde keine Kamera verwendet und somit auch kein Bildmaterial abgespeichert. Des Weiteren werden für die Flüge selbst und die Flugplanung anonymisierte/pseudonymisierte Daten verwendet. Auch das Mobilfunknetz zeichnet keine personenbezogenen oder Bewegungsdaten auf. Insofern bestehen datenschutzrechtlich keine Bedenken.

AP 3.3	Leitwarte für Flugdurchführung
Ziele des Arbeitspakets	
Um einen sicheren Flugbetrieb mit mehreren, zur gleichen Zeit agierenden Flugsystemen zu ermöglichen, wird ein Konzept für eine zentrale Leitwarte erstellt, von der aus alle Flugsysteme der Flotte überwacht und gesteuert werden können.	

In AP 3.3 wurde eine Leitwarte für Flugdurchführung konzipiert. Hierfür wurde durch die flyXdrive Hardware (Bildschirme und Rechnersysteme) beschafft und eingerichtet. Zusätzlich wurden Konzepte für Flugdurchführung, Missions- und Luftraumdarstellung erstellt, sowie Eingriffsmöglichkeiten in dem Flugbetrieb evaluiert. Wichtig war dabei, dass auch der Betrieb mehrerer Flugsysteme gleichzeitig sicher durch die Leitwarte überwacht werden kann.

Die Leitwarte wurde im Projekt auch für die Simulation der Flüge auf unterschiedlichen Routen verwendet. Im weiteren Projektverlauf diente sie auch für die Überwachung der Flüge während der Flugdurchführung.

Auch über den Flugbetrieb im Projektkontext hinaus wurde das Setup der Leitwarte im Kontext großer Flugkampagnen erprobt. Daraus ergaben sich wichtige Erkenntnisse, die die Ergonomie für das Flugplanungs- und überwachungspersonal im Sinne der Flugsicherheit weiter verbessern konnten. Dies umfasst unter anderem bessere Prozesse zur Flugvorbereitung und -freigabe, sowie insbesondere zur Luftraumüberwachung. Diese Verbesserungen wurden 2024 in das Leitwartekonzept eingearbeitet. Die Prozesskette Festlegung der Fluggebiete – Erstellung der Flugrouten und die Missionsüberwachung könnten durch die Einarbeitung der gewonnenen Erkenntnis deutlich optimiert werden.



Zur Überwachung der Flüge wird auf der Leitwarte eine Ground Control Station (GCS) verwendet, in diesem Fall eine in Python programmierte Software, die unabhängig vom Betriebssystem ausgeführt werden kann. Das Flugsystem überträgt Daten via Mobilfunk und via Satellitenkommunikation (Backup im Fall des Ausfalls der Mobilfunkverbindung) an die Bodenstation. Diese können in der GCS überwacht werden. Zu diesen Parametern zählen die Lage des Flugsystems, die Geschwindigkeit, die Position, die Akkukapazität, die Datenlinkqualität die Flughöhe und verschiedenen Reglerparameter. Die wichtigsten Parameter werden während des Flugs farblich markiert, sodass Änderungen schnell festgestellt werden können (siehe Abbildung 36).

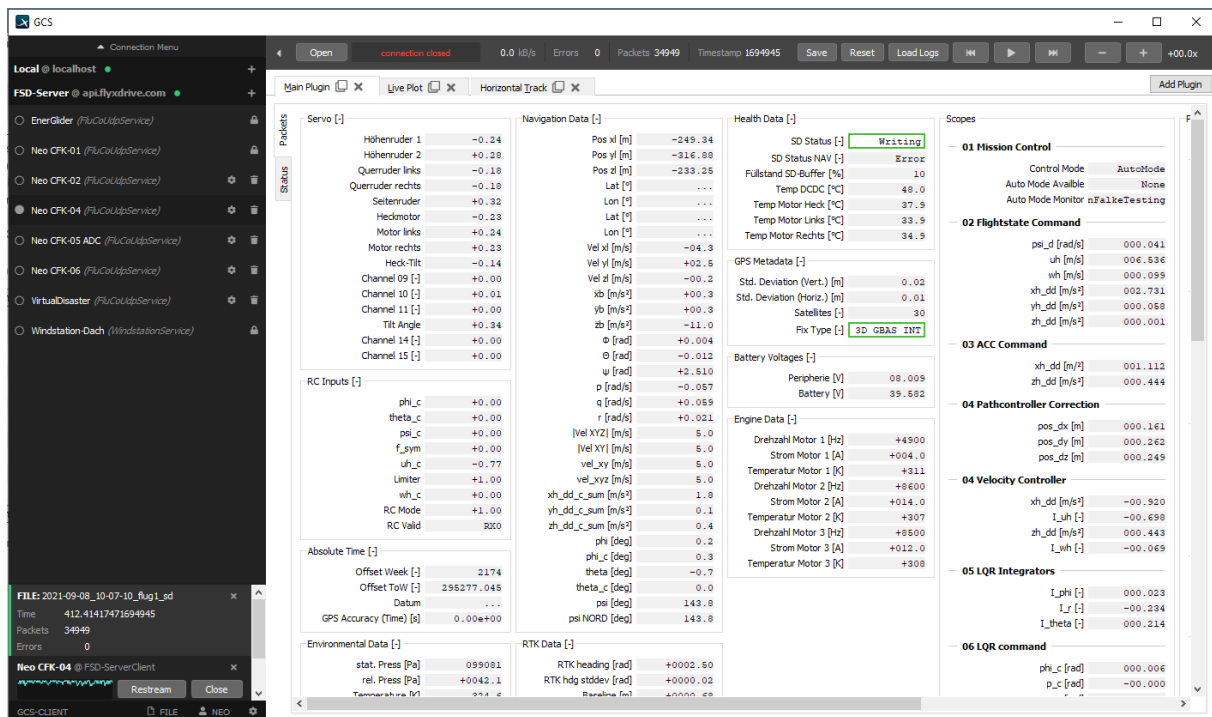


Abbildung 36 Hauptdarstellung der GCS

Um die verschiedenen Daten geordnet darzustellen, gibt es verschiedene Plugins in der GCS, beispielsweise wird die aktuelle Flugbahn auf einer Karte dargestellt oder die Lage des Flugsystems. Besonders wichtig ist auch das Neo Overview Plugin, dass die aktuellen Flugdaten, der Abweichungen von der Bahn sowie der Position des Flugsystems zusammenfasst und aufbereitet darstellt (siehe Abbildung 37 Neo Overview Plugin der GCS). Die GCS bietet durch ihr Plugin Framework die Möglichkeit einfach und schnell weitere Plugins zu erstellen und die GCS so auszubauen. Außerdem kann über die GCS eine Flugbahn an das Flugsystem geschickt werden und auch Notfallfunktionen wie das Anhalten auf der Flugbahn, das Umkehren, das Anfliegen eines Sicherheitspunktes oder das Weiterfliegen können über die GCS ausgelöst werden.

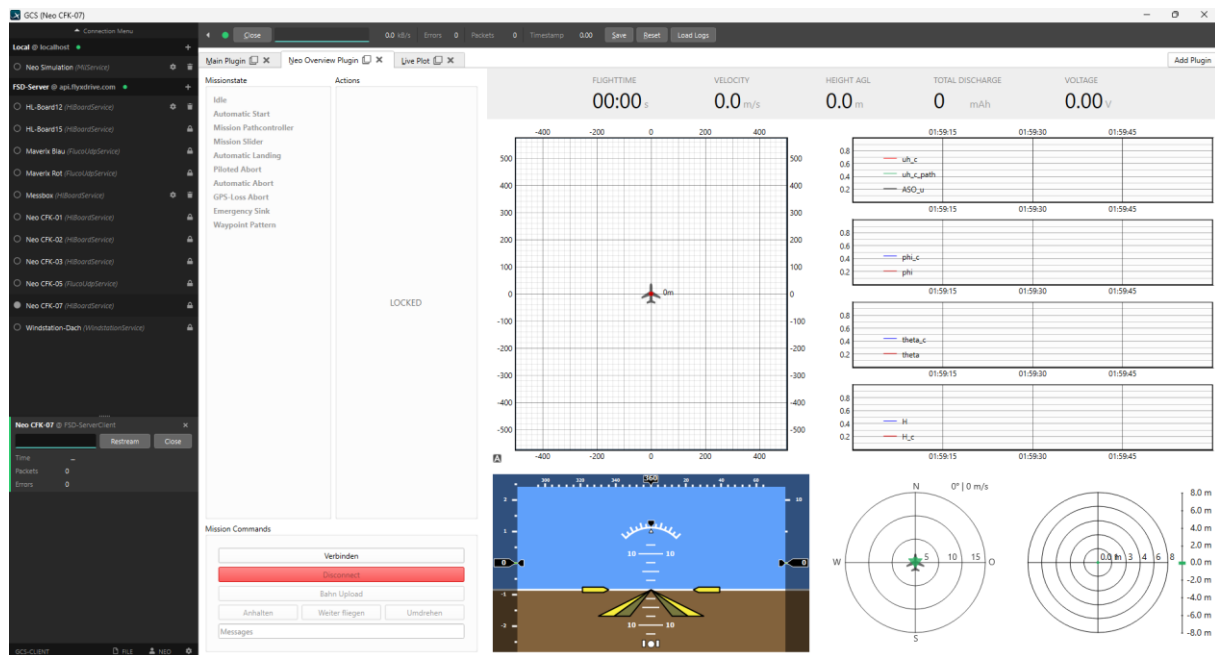


Abbildung 37 Neo Overview Plugin der GCS

AP 3.4 Missionssteuerung inkl. Flottenmanagement

Ziele des Arbeitspakets

In diesem Arbeitspaket wird die bestehende Missionssteuerungssoftware der FXD erweitert, sodass diese in der Leitwarte, als Schnittstelle zwischen medizinischem Betrieb und Flugbetrieb, eingesetzt werden kann. Hierzu wird das Frontend angepasst, um eine Flugüberwachung und Missionssteuerung durch den Operator entsprechend den definierten Anforderungen zu ermöglichen. Außerdem wird ein Flottenmanagementsystem entwickelt, durch welches die dynamische Disponierung der Flugsysteme abhängig von der möglichen Nutzlast, Reichweite und Verfügbarkeit ermöglicht wird. Hierzu gehört eine Disponierung der gewünschten Flüge auf die verfügbaren Flugsysteme.

Im Rahmen des Arbeitspaketes 3.4. wurden die Schnittstellen des Flottenmanagements und der Missionssteuerung bestimmt. Im Anschluss daran wurde durch das FSD eine Architektur erarbeitet, mit der sich der aus den in AP 1.1 bestimmten Use Cases ergebende Betrieb abbilden lässt. Das Flottenmanagement wird dabei in die drei Komponenten Missionsplanung, Disponierung und Missionssteuerung aufgeteilt. Die Architektur des Flottenmanagements ist in Abbildung 38 dargestellt.

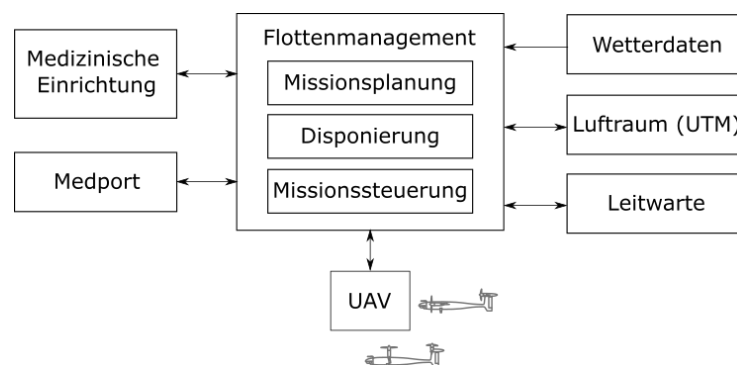


Abbildung 38 Architektur Flottenmanagement

In der Missionsplanung wird die zur Durchführung des gewünschten Transportauftrags notwendige Bahn geplant, hierzu wird zunächst der Transportauftrag mit der höchsten Dringlichkeit ausgewählt. Im nächsten Schritt wird geprüft, ob sich ein für den Transport geeignetes Fluggerät am Startort befindet. Ist dies nicht der Fall, wird im Disponierungsmodul mit Hilfe einer Kostenfunktion eine geeignete Drohne ausgewählt und eine Route vom Standort der geeigneten Drohne zum Startort der eigentlichen Transportmission geplant. Die Kombination, der für den Transport notwendigen und der eventuell anfallenden Bahn zur Disponierung des Fluggeräts werden der Missionssteuerung als Gesamtmission übergeben. Die Missionssteuerung lädt die Mission auf das ausgewählte Fluggerät hoch und informiert über die Leitwarte den überwachenden „Remote Pilot“, dass die Mission startbereit ist. Der Ablaufplan des Flottenmanagements ist in Abbildung 39 dargestellt. Die Missionsplanungs- und Disponierungsarchitektur wurde im Paper „Missionsplanung und Disponierung von unbemannten Fluggeräten für den Transport medizinischer Güter“ beschrieben und auf dem Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress 2023 in Stuttgart in einem Vortrag vorgestellt.

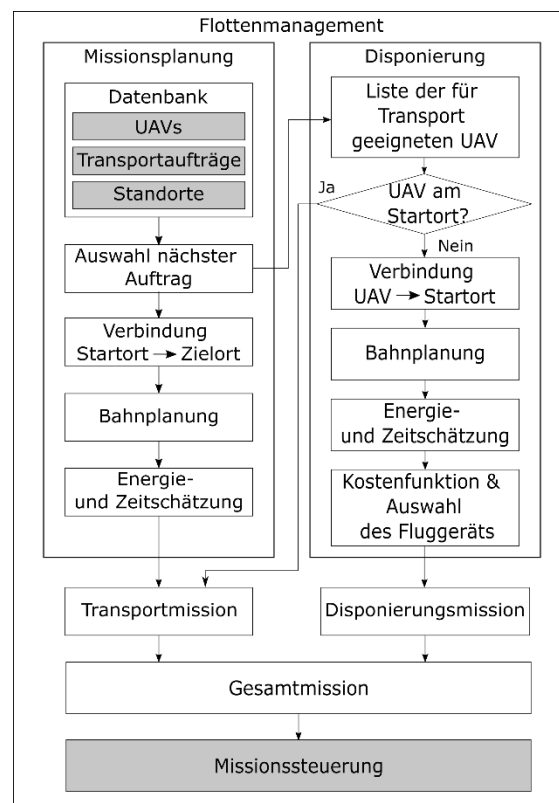


Abbildung 39 Ablaufplan des Flottenmanagements für EULE

Die Missionsplanungs- und Disponierungsarchitektur wurde als Plugin umgesetzt und in die Leitwarte (AP 3.3) integriert. In Abbildung 40 ist das Leitwarten Plugin Flottenmanagement abgebildet. In dem Plugin sind in der linken Spalte alle Aufträge, die aktuell in der Datenbank gespeichert sind sichtbar. Diese Aufträge wurden zuvor über die Schnittstelle zu den Docs in Clouds empfangen und bis zum Start der zugehörigen Mission in einem virtuellen Warteraum abgelegt. In der mittleren Spalte sind die für das Flottenmanagement sichtbaren UAVs zusammen mit Ihrem Status dargestellt. Ist ein UAV grün hinterlegt, steht es für eine Transportmission zur Verfügung. In der rechten Spalte sind die Aufträge zu Missionen aufbereitet und bereits nach Ihrer Priorität und ihrem zeitlichen Eingang sortiert. Ist eine Mission hier grün hinterlegt, kann der Auftrag mit einem einzigen Flug abgeschlossen werden, da ein

geeignetes UAV am Startort verfügbar ist. Ist die Mission gelb hinterlegt, wird zunächst ein Disponierungsflug benötigt, um ein für den Transport geeignetes UAV an den Startort zu bringen. Sollte eine Mission nicht durchgeführt werden können, so wird die Mission rot hinterlegt. Wird die nächste Mission ausgewählt erscheint ein zusätzliches Fenster, in dem die Route ausgewählt werden kann. Im Anschluss kann die Route auf das zugewiesene UAV hochgeladen und die Mission über die Leitwarte gestartet werden. Die Routen zwischen den Standorten wurden zuvor bestimmt und geprüft und sind in einer Datenbank abgelegt.

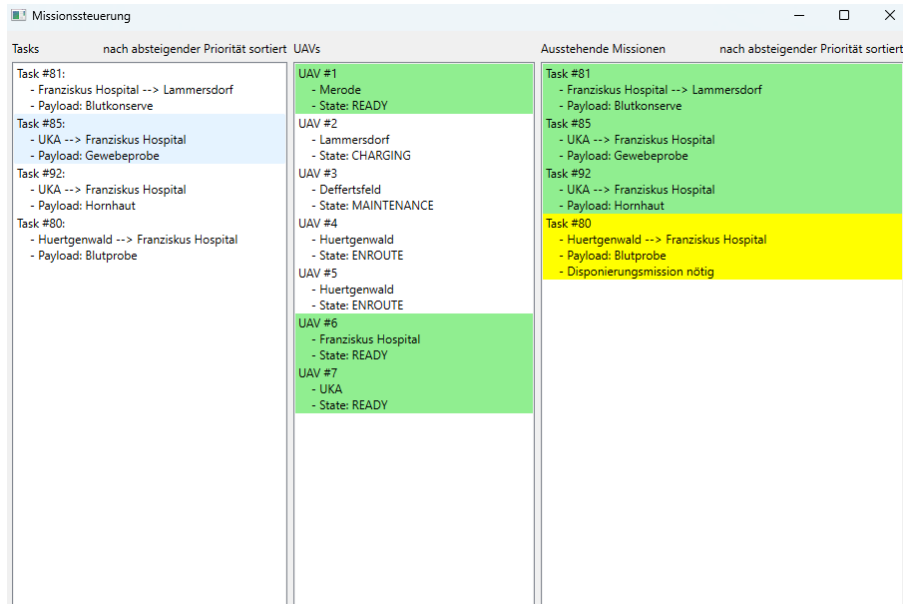


Abbildung 40 Abbildung 5 Leitwarten Plugin Flottenmanagement

Die Missionssteuerung die den weiteren Ablauf der Mission verwaltet ist als Zustandsautomat umgesetzt worden. Über diesen Zustandsautomat wird auch die Kommunikation des Missionsstatus an die Partner gesteuert. Über diesen Zustandsautomaten wird auch gelenkt, ob der MedPort für das medizinische Personal als zugänglich oder gesperrt dargestellt wird. Der Zustandsautomat der Missionssteuerung ist in Abbildung 41 dargestellt. Im Zustandsautomaten lassen sich die Pfade für den Start- und den Landeprozess gut erkennen. Der obere Teil bildet dabei den Startprozess und der untere Teil den Landeprozess ab. Im Zustandsautomaten sind auch die Abbruchfälle definiert, sollte es während der Startvorbereitung oder dem Landeanflug zu Fehlern kommen.

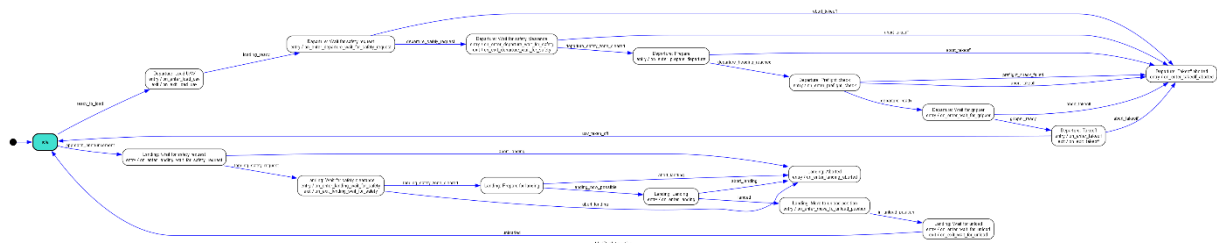


Abbildung 41 Zustandsautomat Missionssteuerung

Während der Bearbeitung des AP 3.3 Leitwarte für die Flugdurchführung wurden bereits erste Konzepte in Bezug zur Missionssteuerung inkl. Flottenmanagement durch die flyXdrive erstellt. Im nächsten Schritt wurden die Konzepte in Zusammenarbeit mit dem FSD weiterbearbeitet und ergänzt.

Die flyXdrive hat dabei vor allem den simultanen Betrieb von bis zu vier Flugsystemen getestet. Die Konzepte zur Missionssteuerung und Flottenmanagement wurden in allen weiteren Flugversuchen weiter evaluiert und es wurden noch kleine Verbesserungen durchgeführt.

HAP 4	Sicherer Flugbetrieb
Gesamtziel	Vollständig in den Luftraum integriertes, hochautomatisiertes Fluggerät mit Sensorik zur Konfliktvermeidung und notwendigen Modifikationen für die Nutzlastintegration.
AP 4.1	Adaption des Flugsystems
Ziele des Arbeitspakets	
In diesem Arbeitspaket wird das bestehende Flugsystem an die in AP1 und AP2 ermittelten Anforderungen angepasst und für einen sicheren Flugbetrieb hardware- (Integration der Nutzlast, Schnittstelle zur bodenseitigen Plattform, MedPort) und softwaretechnisch (Anbindung an Flottenmanagement) ausgerüstet. Die durchgeführten Änderungen werden in Testflügen validiert. Das Testprogramm umfasst neben des Start- und Landeprozessen auch den Be- und Entladeprozesse für das Transportgut.	

In diesem Arbeitspaket wurde das Flugsystem an die AP 1 und 2 identifizierten Anforderungen angepasst. Dazu wurden die notwendigen Hard- und Softwarekomponenten festgelegt, die für die Durchführung der Flüge notwendig sind. Hierzu zählen verschiedene Sensoren, die nötig sind, um das Transportgut zu überwachen und das Einhalten von Transportbedingungen zu gewährleisten. Diese Sensoren wurden ausgewählt und integriert. Diese Anpassungen wurden von FSD und flyXdrive gemeinsam in Testflügen überprüft.

Zur Umsetzung des in Abschnitt AP 2.3 beschriebenen Anflugverfahrens auf den MedPort wurden durch das FSD ein zusätzlicher Modus in die State Machine der Regelung des Flugsystems integriert, um den Anflug auf den MedPort automatisiert durchzuführen. Dieser Modus berücksichtigt auch die Option den Anflug über die Leitwarte abubrechen und im Anschluss einen vorab festgelegten Sicherheitslandepunkt anzufliegen. Für die direkte Kommunikation mit dem MedPort über das in Abschnitt AP 2.3 beschriebene ESP-Modul wurden in enger Absprache mit der flyXdrive Softwareanpassungen durch das FSD auf dem High Level-Board des Flugsystems vorgenommen, um die Weiterleitung von Telemetriedaten und den Austausch von Statusmeldungen zu ermöglichen. Das High Level Board übernimmt im Flugsystem die Aufgabe der lokalen Bahnplanung und die Kommunikation sowie die Verarbeitung der Navigationsdaten.

Die Be- und Entladung der Nutzlast erfolgt unterhalb der Nase des Fluggeräts. Der Greifer wurde so angepasst, dass das Greifen auch bei vorhandenem Landegestell sicher möglich ist. Das Fluggerät wird den Anwender:innen mit der Nase über die Front des medPorts präsentiert, wie in Abbildung 42 dargestellt. Die Entnahme der Nutzlast ist dann über einen Drehmechanismus in der Nase nach unten möglich.



Abbildung 42 : Die Nase des Fluggeräts zur Be- oder Entladung bereitgestellt

Zudem wurde der Datenaustausch zwischen dem Fluggerät und dem medPort als einziger Kommunikationskanal festgelegt, um eine klare Rollenverteilung und zuverlässige Verbindung zwischen den Systemen zu gewährleisten.

Die im AP 4.4 entwickelten Lösungen wurden vom FSD für die Nutzung auf der im Flugsystem verwendeten Hardware angepasst und in die High Level Architektur integriert. Zur Verknüpfung der einzelnen Softwarekomponenten auf dem High Level-Board wird ROS2 (Robot Operating System 2) eingesetzt. Diese Plattform ermöglicht es, die Softwarekomponenten unabhängig voneinander zu entwickeln und teilweise in verschiedenen Programmiersprachen auszuführen. Die einzelnen Komponenten werden in Nodes gekapselt, die über zentral definierte Messages miteinander kommunizieren, dadurch kann eine flexible und modulare Architektur geschaffen werden.

Für die Adaption des Flugsystems wurden federführend durch die flyXdrive Gespräche abgehalten, um über die notwendigen Hard- und Softwarekomponenten zu diskutieren. Dabei wurde festgelegt, welche Komponenten für die Durchführung der Flüge verwendet werden soll. Wie in Kapitel 1.5 beschrieben, werden verschiedene Sensoren nötig sein, um das Transportgut zu überwachen und das Einhalten von Transportbedingungen zu gewährleisten.

Hinsichtlich sicherheitsrelevanter Systeme, die für die entsprechende Betriebserlaubnis (SAIL III) notwendig sind, wurde durch die flyXdrive ein Fallschirm mit Flight Termination System (FTS) entwickelt. Die Konstruktion des Fallschirms wurde abgeschlossen und erste Versuche im Windkanal durchgeführt. Zunächst wurden die für das Rettungssystem geltenden Randbedingungen untersucht und festgelegt. Das Rettungssystem darf nicht durch einen pyrotechnischen Mechanismus ausgelöst werden. Es muss wetterbeständig und leicht sein und vor allem, muss es in allen Geschwindigkeitsbereichen funktionieren. Zusätzlich darf der Transport der Nutzlast und die Lage des

Schwerpunktes nicht eingeschränkt bzw. wesentlich verändert werden. Für den Fallschirm wurden zwei unterschiedliche Einbaukonzepte untersucht. Die Unterbringung des Fallschirms in der Nase bietet hinsichtlich der Flugleistungen Vorteile, allerdings erschwert dies die Unterbringung und automatisierte Entnahme der Nutzlast. Daher wird diese Variante im Projekt EULE nicht weiterverfolgt.

Die zweite Version besteht nun aus zwei Komponenten; einem Auswurfmechanismus und einem Rucksack. Der Auswurfmechanismus wird im Rumpf zwischen Holm und Rumpfspant nach oben gerichtet montiert. Der Rucksack, der den Hauptschirm enthält, wird zwischen Auswurfmechanismus und Transportnase, von außen an dem Rumpf befestigt. Diese Teilung des Rettungssystems ermöglicht, die Struktur und Form des Flugsystems beizubehalten. Im Auswurfmechanismus befindet sich ein Hilfsschirm, der unmittelbar nach der Betätigung des FTS-Systems, ausgeworfen wird. Durch die anströmende Luft öffnet sich der Hilfsschirm und zieht den Hauptschirm aus dem Rucksack. Der Hauptschirm ist so positioniert, dass er nach der vollständigen Entfaltung, das Flugsystem in eine waagerechte Position bringt und die maximale Fallgeschwindigkeit reduziert.

Für das FTS wurde ein Prototyp „Boden“ und „UAS“ fertiggestellt und erste Tests durchgeführt. Das UAS mit Fallschirm ist durch ein zusätzliches Flight Termination System (FTS) ausgestattet worden, welches durch einen Knopfdruck alle on-board- Systeme sofort und irreversibel abschalten kann. Das FTS kann manuell vom UAS-Operator am Boden ausgelöst werden. Das FTS funktioniert eigenständig und ist ganz unabhängig von der Bodenstation des Flugsystems.

Zur Erprobung des Fallschirmsystems wurden mehrere Flugversuche durchgeführt, bei denen das System aus verschiedenen Ausgangssituationen aktiviert wurde. Gemessen wurden u.a. die Zeitverzögerung und Höhenverlust zwischen Aktivierung und spürbarer Bremswirkung, die Zeit bis zum Erreichen einer konstanten Sinkgeschwindigkeit (und deren Höhe), sowie die Beschleunigung bei der Schirmöffnung. Grundsätzlich zeigte sich, dass das gewählte Fallschirmsystem ein Test-Fluggerät mit äquivalenter Gesamtmasse zum TW-Neo mit Sinkraten um 5 m/s ausreichend langsam zu Boden sinken lässt, um die Gefährdung von Personen im Notfall signifikant zu verringern. Die Mindestflughöhe für eine erfolgreiche Auslösung wurde auf ca. 30 m geschätzt. Jedoch zeigte sich, dass unter bestimmten Umständen der Öffnungsvorgang des Schirms durch den Propeller der hinteren Antriebseinheit beeinträchtigt wird.

Die Ergebnisse der Systemtests für das Fallschirmsystem bedingen daher eine Überarbeitung des Konzeptes, sodass eine Öffnung des Fallschirms in jeder Fluglage sichergestellt wird.

Anstatt einer auf dem Flugsystem angebrachten Variante wurde unter dem Flugsystem ein Rohr konzipiert, durch welches der Fallschirm hinten unter dem Seitenleitwerk ausgeworfen wird. Nach der Konstruktion und Fertigung fanden zunächst Einzelsystemtest, anschließend Abwurftests und abschließend Gesamtsystemtests mit einem echten Flugsystem statt. Bei den Gesamtsystemtests ist aufgefallen, dass mit dem neuen Fallschirmkonzept der Auslöseservo des FTS zu klein dimensioniert ist. Hierfür notwendige Modifikationen wurden 2025 abgeschlossen.

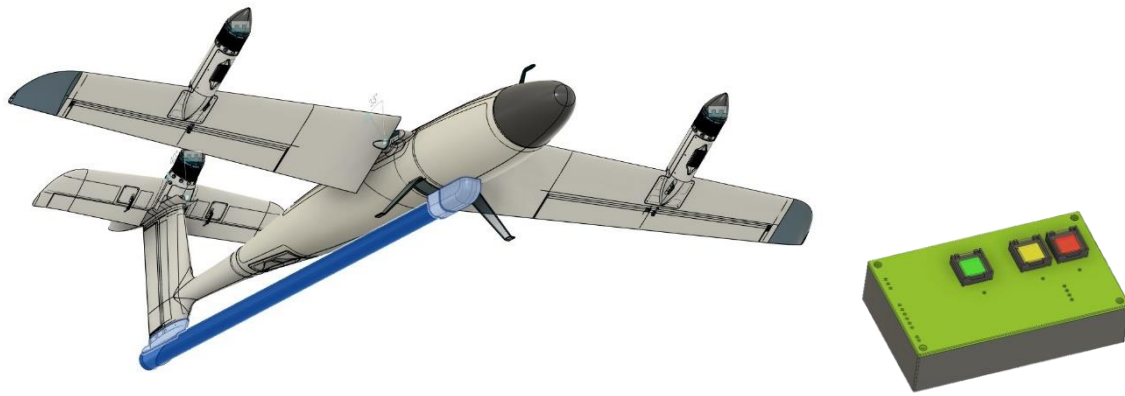


Abbildung 43 Fallschirmkonzeption und FTS



Abbildung 44 Fallschirm-Erprobungsflugversuche

Softwareseitig wurden für den Flugbetrieb mehrere Sicherheitsverfahren implementiert und erprobt. Hierzu gehört ein Landen an Sicherheitslandepunkten, eine Reduktion der aerodynamischen Geschwindigkeit entlang der Bahn, sowie das Anhalten und Umkehren entlang der Bahn.

Für die Start- und Landeversuche auf dem Roboter fanden zusätzlich noch geringfügige Modifikationen am Flugsystem statt.

AP 4.2	Integration in U-Space-Services
Ziele des Arbeitspakets	
In Zusammenarbeit zwischen der Droniq und dem FSD wird analysiert, wie die für die geplanten Operationen notwendigen U-Space-Services im Droniq UTM die Sicherheit des Gesamtsystems gewährleisten können. Im Rahmen der Umsetzung wird durch Droniq die reibungslose Wahrnehmung der U-Space-Services durch die flyXdrive im Zusammenspiel von Hard- und Software untersucht.	

Im Rahmen des Arbeitspakets AP4.2 wurde die Integration des eingesetzten Flugsystems in U-Space-Services systematisch vorbereitet, umgesetzt und evaluiert. Bereits 2022 erfolgte durch Droniq und FSD eine initiale Funktionsanalyse für die Einbindung des Flugsystems in U-Spaces. In diesem Kontext wurde das Droniq UTM-System bereitgestellt und erste Testflüge mit dem sog. Hook-In-Device (HID) für 2023 geplant, um eine zuverlässige Positionsübertragung im System zu gewährleisten. Ergänzend wurden den Projektpartnern regulatorische Anforderungen und technische Rahmenbedingungen durch Droniq vermittelt.

Im Jahr 2023 wurde das Droniq UTM-System durch einen externen Dienstleister grundlegend überarbeitet. Die daraus hervorgegangenen Dienste wurden projektspezifisch weiterentwickelt – unter anderem auf Grundlage der Anforderungen aus dem Projekt EULE. Die Partner erhielten Zugriff auf das System und konnten über Feedbackschleifen aktiv zur Verbesserung beitragen. Die erstmalige Bereitstellung von APIs zur Anbindung an U-Space-Services stellte einen Meilenstein für die technische Integration dar. Begleitend wurden mit dem HID erfolgreich erste Testflüge durchgeführt.

2024 lag der Schwerpunkt auf der Verprobung und Optimierung der UTM-Dienste in realen Anwendungsszenarien. Die Rückmeldungen der Partner flossen direkt in die Systemoptimierung ein. Die bereitgestellten APIs trugen wesentlich zur Sicherstellung der Integrität und Sicherheit im U-Space-Kontext bei. Darüber hinaus ergänzte FlyxDrive die Erprobung durch weitere Testflüge, die zusätzliche praktische Erkenntnisse lieferten.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie zum Transport von Hornhauttransplantaten wurden während der von FSD und flyXdrive durchgeführten Flüge über dem Hürtgenwald Positions- und Bahndaten mithilfe des Hook-in-Devices des Flugsystems in das UTM-System der Droniq eingespeist, um das System aktiv zu testen. Diese Integration ermöglichte es, wertvolle Erkenntnisse über die Funktionsweise und Interoperabilität von Hard- und Software zu gewinnen. Zudem wurde das System während dieser Flüge genutzt, um andere Luftraumteilnehmer wahrzunehmen und potenzielle Konfliktsituationen zu identifizieren. Die bereitgestellten Daten aus dem UTM-System der Droniq werden dafür in der Leitwarte verwendet, um ein Luftlagebild zu erstellen. Darüber hinaus fließen sie als eine Datenquelle mit in die Konflikterkennung ein, die in AP 4.4 genutzt wird.

AP 4.3	Onboard Konflikterkennung und –bewertung
Ziele des Arbeitspakets	
In diesem Arbeitspaket wird die Möglichkeit untersucht ein Onboard-Verfahren zur Konflikterkennung und –vermeidung in das Flugsystem zu integrieren, um auch Konflikte mit Luftraumteilnehmern zu erkennen, die nicht im UTM-System sichtbar sind (z.B. Heißluftballone). Hierzu wird verfügbare Sensorik zur Erkennung von Flugsystemen in der Luft hinsichtlich der Eignung zur Integration in die bestehenden Flugführungsalgorithmen evaluiert.	

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden verschiedene Verfahren zur Konflikterkennung und -vermeidung untersucht, um potenzielle Konflikte mit Luftraumteilnehmern zu vermeiden, die im UTM-System nicht erfasst sind. Zu Beginn wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt, aus der zwei Methoden als besonders geeignet hervorgingen: die Konfliktvermeidung mittels optischer Systeme sowie die Nutzung akustischer Systeme.

Für die optische Methode wurde das Konfliktpotenzial durch den Einsatz eines neuronalen Netzes in Kombination mit Object Detection detektiert und bewertet. Die Object Detection ermöglicht es, andere Luftraumteilnehmer zu identifizieren. Ein Algorithmus berechnet anschließend einen Gefahrenfaktor

basierend auf der Positionsänderung des Luftraumteilnehmers in den zuletzt analysierten Bildern. Überschreitet dieser Gefahrenfaktor einen festgelegten Schwellenwert, werden geeignete Konfliktvermeidungsstrategien aktiviert.

Erste Implementierungen eines neuronalen Netzes zur Object Detection wurden erfolgreich durchgeführt. Dazu wurden zahlreiche Bilddateien von Flugobjekten gesichtet und generiert. Die Erkennung erfolgt mithilfe des YOLO-Algorithmus; ein vortrainiertes YOLOv5-Modell wurde ausgewählt und mit den generierten Bilddaten trainiert. Die Trainingsdaten setzten sich aus synthetisch erzeugten Bildern zusammen, bei denen CAD-Modelle von Flugzeugen, Drohnen, Helikoptern und Vögeln in unterschiedlichen Größen und Positionen auf Landschaftsaufnahmen projiziert wurden. Ergänzend kamen echte Aufnahmen der entsprechenden Luftraumteilnehmer sowie Landschaftsaufnahmen ohne Objekte zum Einsatz. Ein Beispiel für ein synthetisches Trainingsbild ist Abbildung 45 dargestellt.



Abbildung 45 Synthetisches Trainingsbild

Durch verschiedene Parameterstudien konnte eine optimale Performance des neuronalen Netzes erreicht werden. Es zeigte sich insbesondere, dass das Training mit hochauflösenden Bildern signifikante Verbesserungen brachte (siehe Abbildung 46). Bei der Validierung schnitt das trainierte Netz gut ab und erkannte Luftraumteilnehmer mit hoher Zuverlässigkeit (siehe Abbildung 47).

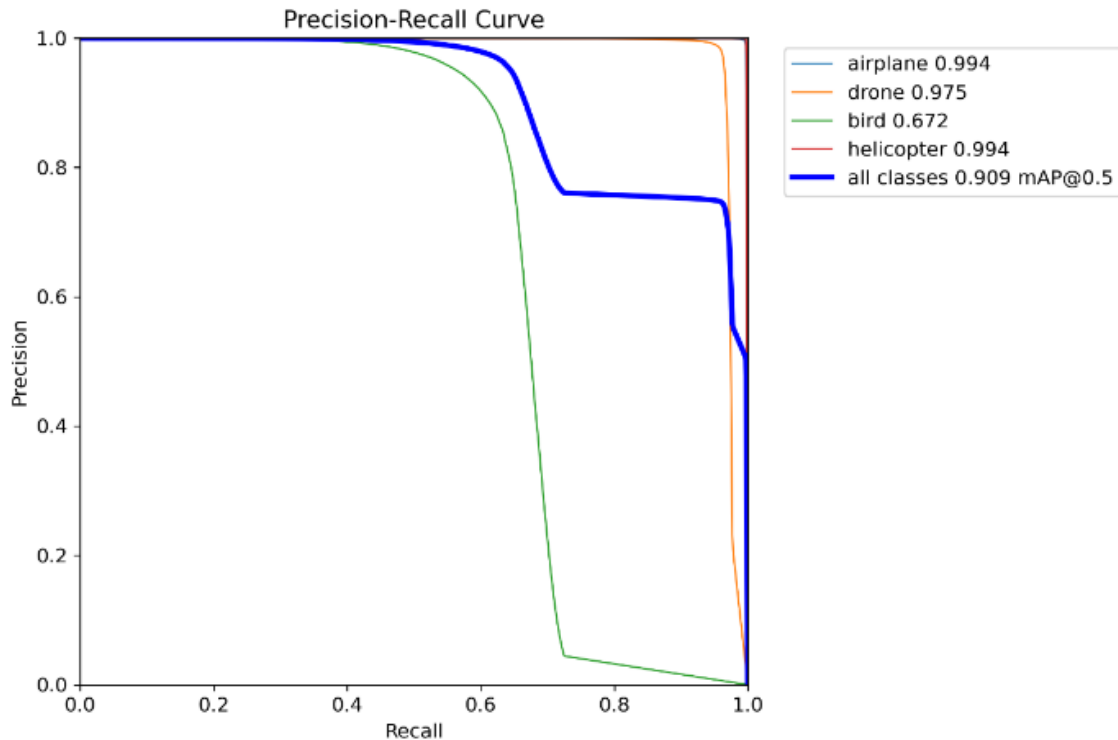


Abbildung 46 Precision-Recall Curve

Neben dem Training des neuronalen Netzes wurden auch erste Schritte zur Kollisionsvermeidung unternommen. Mithilfe von OpenCV wurde eine Kollisionswarnung implementiert, die durch Videoaufnahmen getestet wurde. Diese Warnung wird in der oberen linken Ecke des Bildes angezeigt, sobald eine Kollisionsgefahr besteht. Sie basiert auf der Flugrichtung des Systems; beispielsweise wird bei einer Vergrößerung der Bounding Box – was bedeutet, dass das Flugsystem sich einem anderen Teilnehmer nähert – eine Kollisionswarnung ausgegeben, einschließlich der Position des Intruders (unterteilt in vier Quadranten) sowie dessen Distanz.

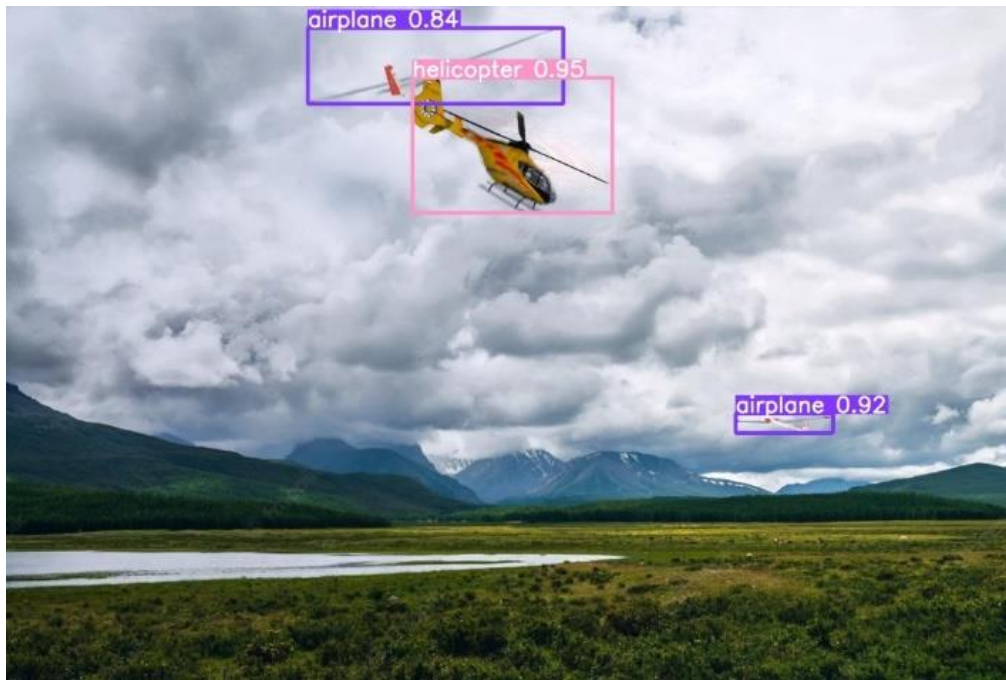


Abbildung 47 Objekterkennung vom trainierten Netz

Die Berechnungen hängen von der Brennweite der Kamera ab und basieren auf Standardgrößen verschiedener Intruder-Klassen; daher stellt die berechnete Distanz lediglich einen Näherungswert dar. Zudem werden im Bild stets Bewegungs- und Geschwindigkeitsvektoren angezeigt; dabei entspricht die x-Richtung der Bildbreite und die y-Richtung der Bildhöhe (siehe Abbildung 48).



Abbildung 48 Kollisionswarnung

Nach einer eingehenden Analyse der verfügbaren Kamerasensorik, Ausweichzeiten sowie des vorhandenen Bauraums wurde festgestellt, dass eine Integration in das Flugsystem nicht sinnvoll realisierbar ist. Der gleichzeitige Transport von Nutzlast und Kamera innerhalb des gewählten Flugsystems erweist sich als problematisch; trotz vielversprechender Ergebnisse bei den Verfahren zur

Konflikterkennung und -vermeidung würde dies zu einem übermäßigen Platzbedarf führen und die Nutzlast reduzieren.

Dank der UTM-Integration können jedoch alternative Ansätze gewählt werden, um die Sicherheit im Luftraum zu gewährleisten, ohne auf eine Kamera angewiesen zu sein.

AP 4.4	Flugbahnplanung zur Konfliktvermeidung
Ziele des Arbeitspakets	
Die bestehende Flugbahnplanung zur Konfliktvermeidung des FSD wird in diesem Arbeitspaket angepasst, um neben den flugmechanischen Randbedingungen des Fluggerätes auch Randbedingungen durch die "Standardised Rules of the Air" sowie die in der Betriebserlaubnis festgelegten Missionsgebiete zu berücksichtigen. Außerdem wird die bestehende Bahnplanung zur Konfliktvermeidung angepasst, um für eine sichere Flugdurchführung automatisiert Geo-Zonen zu berücksichtigen.	

Im Rahmen der Flugbahnplanung zur Konfliktvermeidung wurde ein umfassendes Konzept entwickelt, das bei der Berechnung einer Flugbahn vier unterschiedliche Methoden integriert. Ziel ist es, aus den erstellten vier Flugbahnen die geeignetste auszuwählen. Die erste Methode berechnet einen parallelen Ausweichpfad unter Berücksichtigung der Standardised Rules of the Air. In der zweiten Methodik werden vertikale Ausweichbahnen ermittelt, während die dritte Methode eine Variation der Geschwindigkeit des Fluggerätes vorsieht. Die vierte Methode nutzt den mCOWEX-Algorithmus zur Generierung eines Ausweichpfades.

Alle genannten Methoden sowie die dazugehörige Auswahllogik für die Bestimmung des zu nutzenden Pfades wurden implementiert. Die Ergebnisse dieser Arbeiten sind in dem Paper „Danielmeier, L., et al. „Multi Method Local Path Planning Considering Flight Dynamics Constraints for Collision Avoidance“ veröffentlicht worden, das im Rahmen der IMAV 2023 in Aachen vorgestellt wurde. Für die Generierung der Ausweichbahnen kommen zudem Prädiktionen von Hindernissen sowie Mechanismen zur Konflikterkennung zum Einsatz.

Zur Validierung des entwickelten Konfliktvermeidungskonzepts wurden umfangreiche Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt. Diese Simulationen umfassten sowohl Konfliktsituationen mit einer Komplexität, die realen Szenarien ähnelt, als auch deutlich komplexere Situationen. In realitätsnahen Simulationen erreichte das Konzept eine Erfolgsquote von 100 %, während in den sehr komplexen Szenarien eine Erfolgsquote von über 99 % erzielt wurde.

Im Zuge der fortlaufenden Entwicklung wurden die zuvor erarbeiteten Methoden zur Konfliktvermeidung weiter verfeinert und an die spezifischen Anforderungen der Ziel-Hardware- und Softwarearchitektur angepasst. Abbildung 49 illustriert ein Ausweichmanöver, gefolgt von einer Rückkehr zur ursprünglichen Flugbahn.

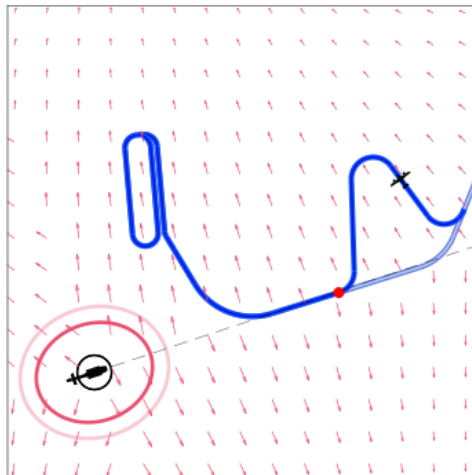


Abbildung 49 Ausweichmanöver mit anschließender Rückkehr auf Ursprungsbahn

Zur Erkennung potenzieller Konflikte wird eine Fusion der verfügbaren Daten aus FLARM- und ADS-B-Transpondern sowie Informationen aus dem UTM-System genutzt. Diese integrierte Herangehensweise ermöglicht eine präzisere Bewertung der Luftraumsituation und trägt wesentlich dazu bei, geeignete Ausweichpfade zu berechnen.

HAP 5	Vorbereitung Regelbetrieb
Gesamtziel	Sichere und zuverlässige Flugdurchführung auf ausgewählten Routen. Veröffentlichung der Ergebnisse des Projekts EULE.
AP 5.1	Workshops zum Regelbetrieb
Ziele des Arbeitspakets	
In mehreren Workshops wird die Flugdurchführungen geplant. Neben den für die Flugdurchführung verantwortlichen Projektpartnern sollen auch die assoziierten Partner (vor allem assoziierte Partner der involvierten Krankenhäuser) teilnehmen. Ziel der Workshops ist es, die Akzeptanz für das Projekt EULE bei der Bevölkerung zu steigern und den Nutzen für die Endanwender sicherzustellen.	

In AP 5.1 wurden mehrere Workshops durchgeführt, um die Akzeptanz sowohl bei den Anwendern als auch bei den Bürgern zu steigern. Bei den Anwendern wurde zusätzlich Wert darauf gelegt mögliche Einsatzszenarien zu identifizieren, um die Nutzbarkeit abbilden zu können.

Um die Sicht der Bürger*innen konkreter abzubilden wurde eine Bürger*innenwerkstatt zur UAM allgemein und EULE im Spezifischen beauftragt, konzipiert und durchgeführt:

Eröffnet wurde die Bürger*innenwerkstatt am 22. September 2022 um 9:00 mit einem Empfang. Von 9:15 bis 10:00 Uhr wurde zunächst das Vorhaben und der Ablauf des Tages vorgestellt, um im Anschluss eine Interaktive Kennenlernrunde durchzuführen. Der erste Workshop, in dem die Erwartungen, Potenziale und Befürchtungen formuliert wurden, startete um 10:00 Uhr und dauerte eine dreiviertel Stunde. Nach einer kurzen Kaffeepause wurde um 11:00 Uhr der Impulsvortrag zu Potenzialen von UAM abgehalten. Im Anschluss an den Vortrag verlagerte sich der Workshop nach Eschweiler, wo vor

Ort um 11:45 eine erste praktische Demonstration von Drohnen durchgeführt wurde. Die zweite praktische Demonstration von Drohnen wurde im Anschluss der Mittagspause um 13:15 Uhr durchgeführt. Gegen 14:15 wurde auf der Rückfahrt nach Aachen eine Evaluation der neugewonnenen Eindrücke durchgeführt. In Aachen angekommen wurde von 14:45-15:30 der zweite Workshop abgehalten, indem die Anforderungen an Drohnen in der Stadt formuliert wurden.

Ergebnisse der zwei Umfragen grafisch dargestellt (Umfrage 1 = vor dem Workshop, Umfrage 2 = nach dem Workshop)

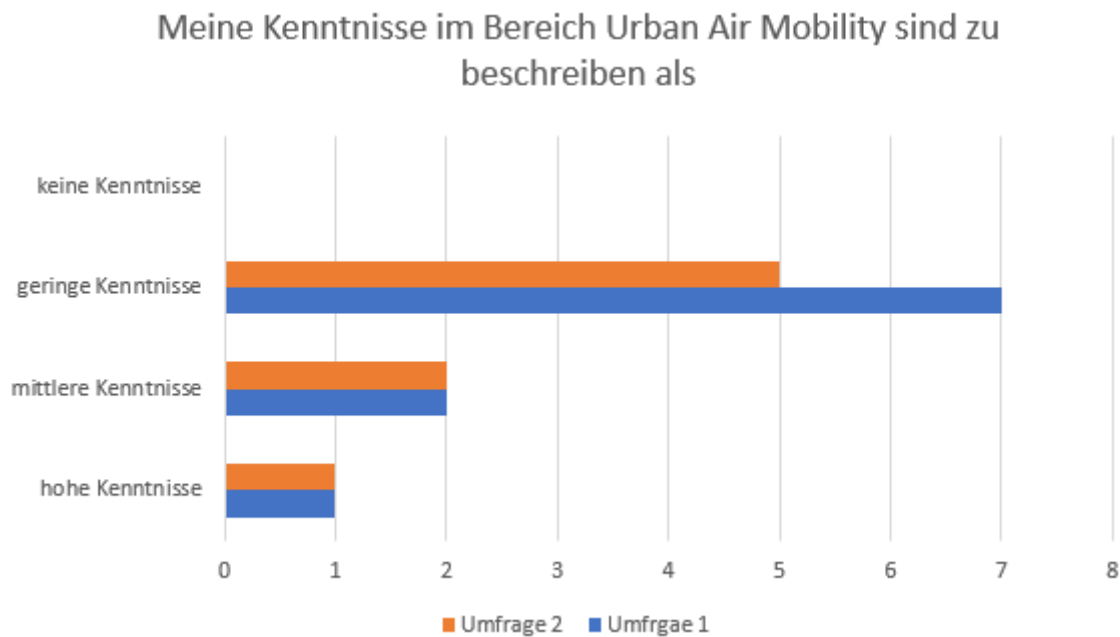


Abbildung 50 Umfrageergebnis Kenntnisse Urban Air Mobility

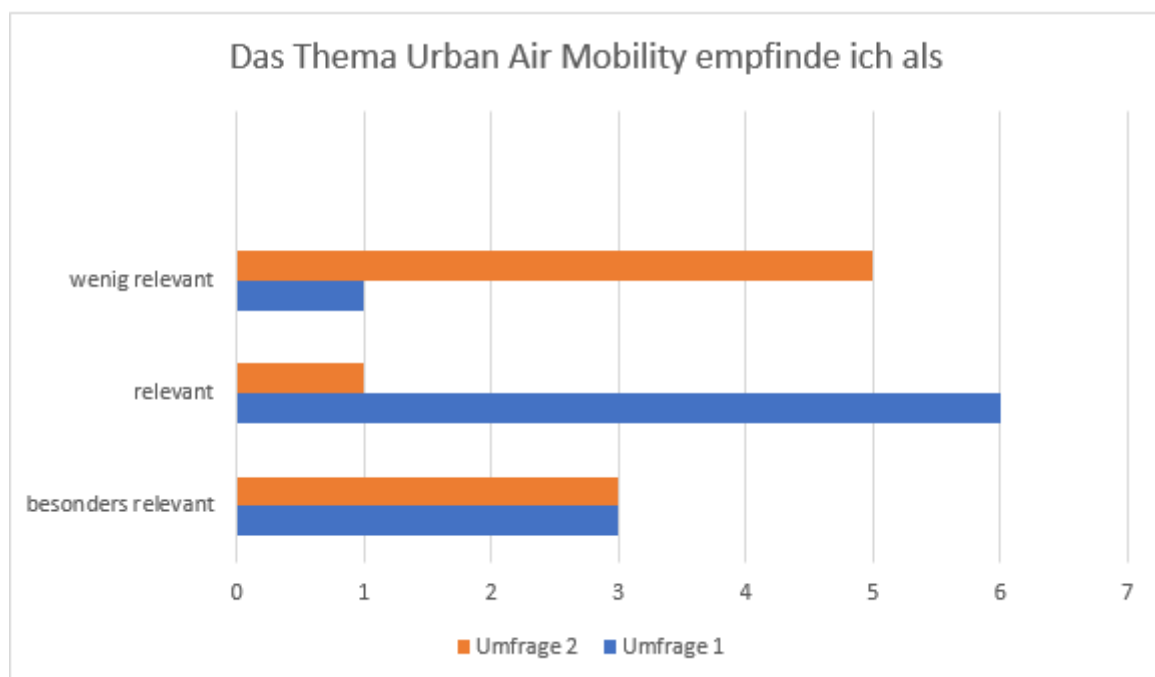


Abbildung 51 Umfrageergebnis Urban Air Mobility

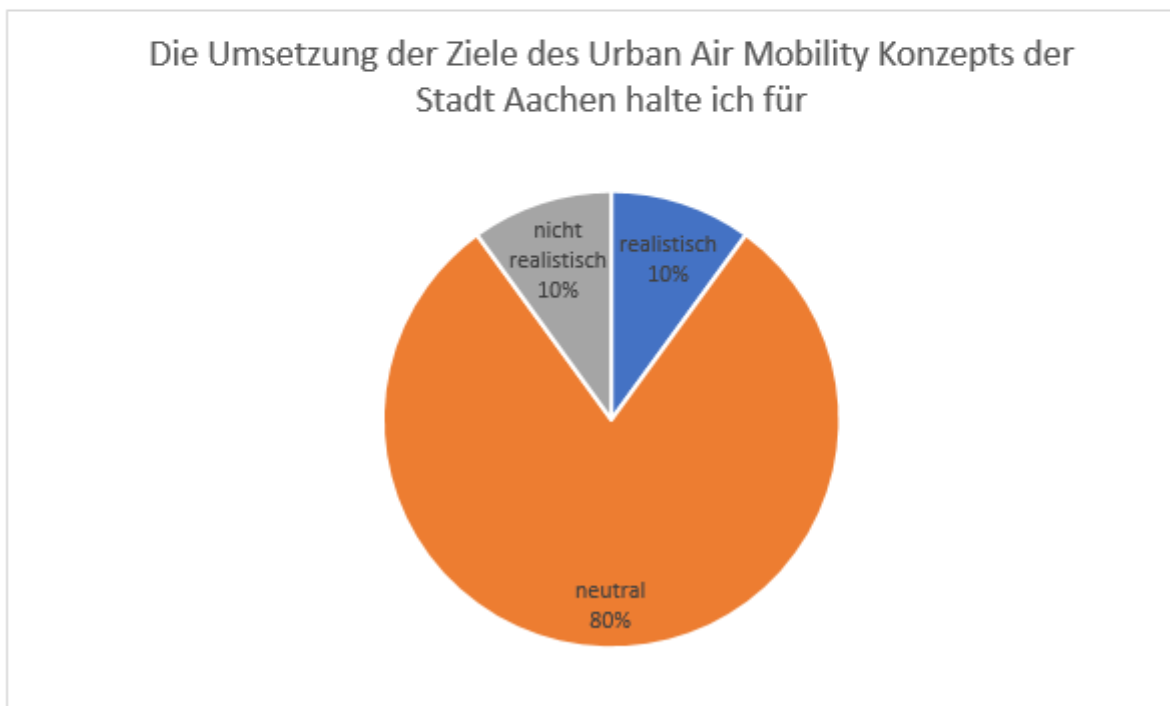
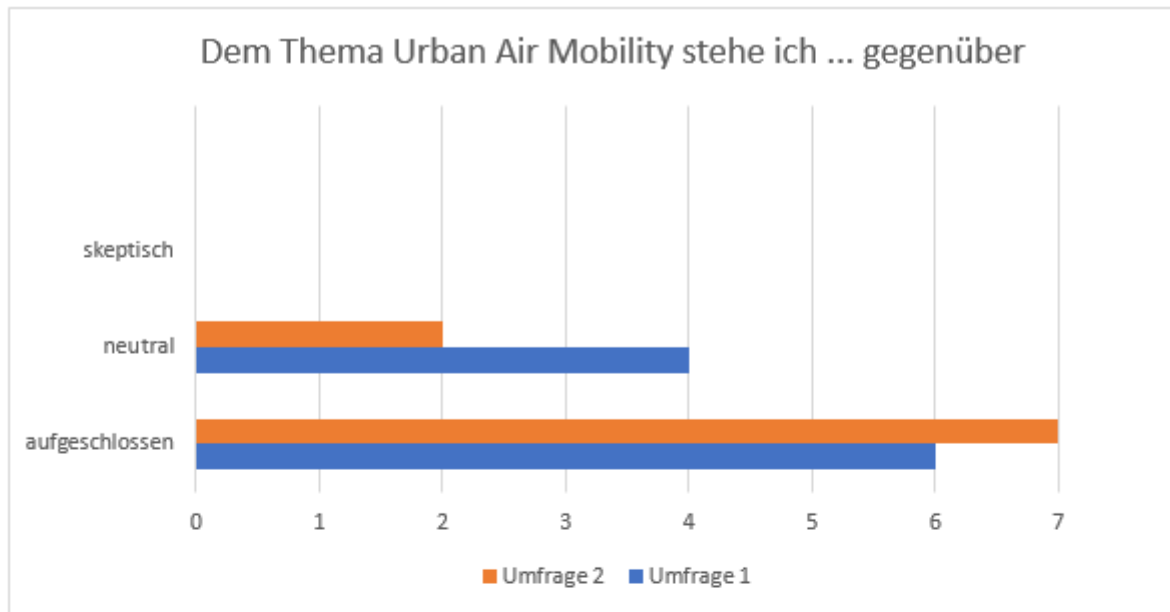


Abbildung 52 Umfrageergebnis Urban Air Mobility Konzept Stadt Aachen

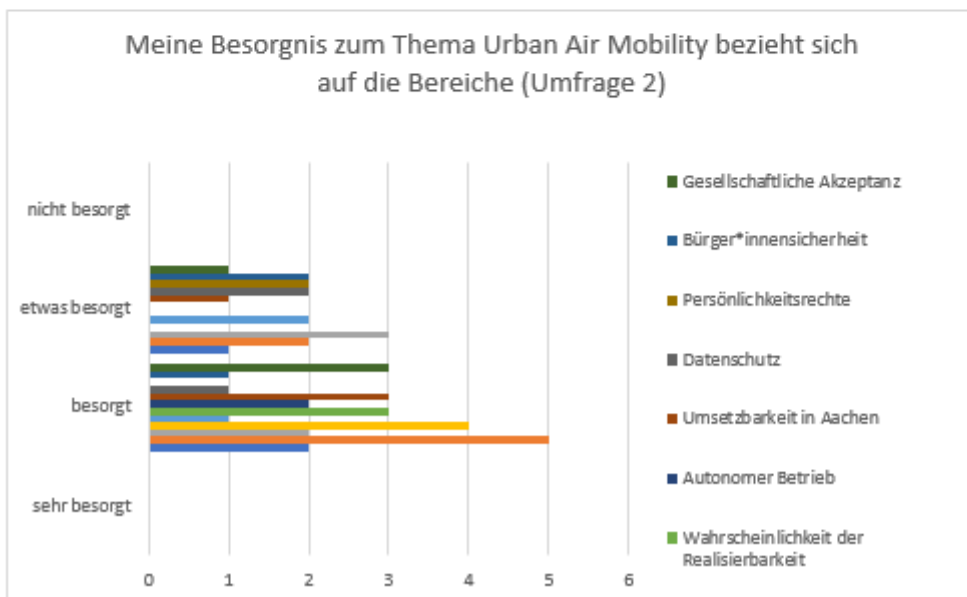
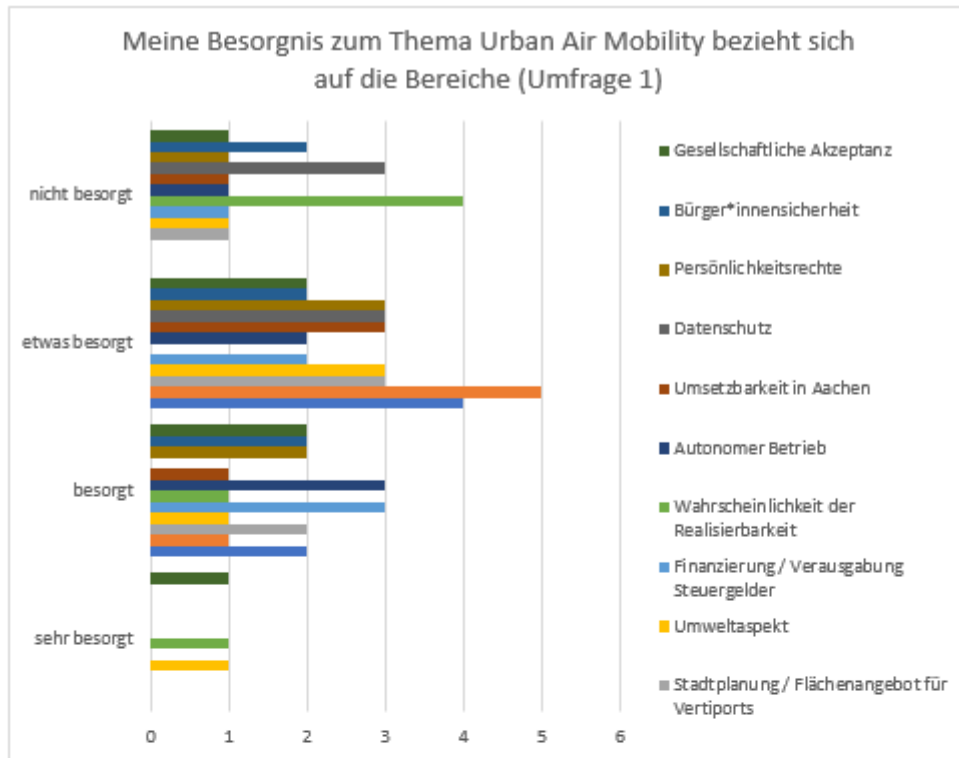


Abbildung 53 Umfrageergebnis zur „Besorgnis“ vor und nach der Bürger*innenwerkstatt

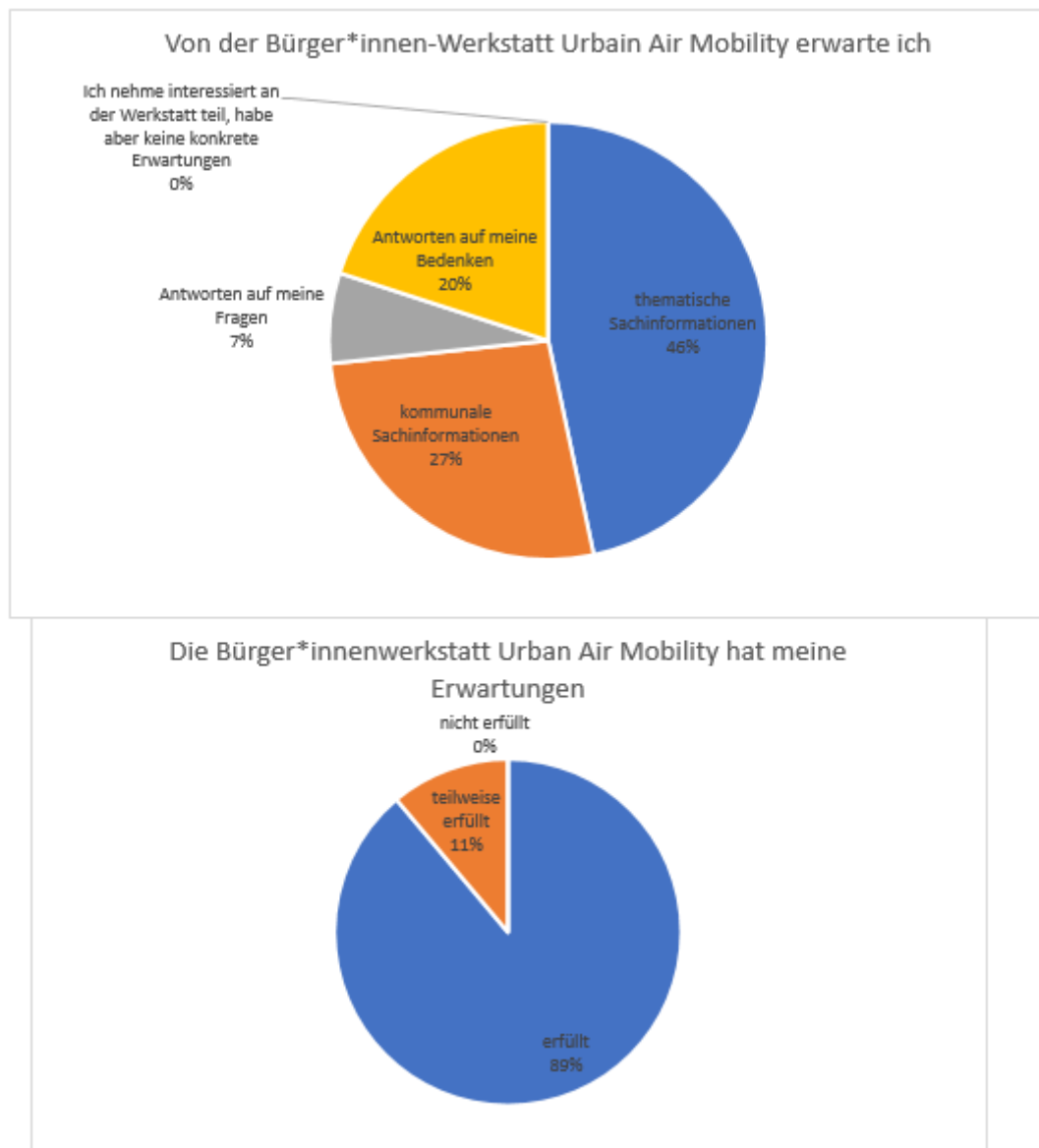


*Abbildung 54 Umfrageergebnis Erwartungen Bürger*innenwerkstatt*

Die Umfragen zum Urban Air Mobility Workshop haben ergeben, dass die Bürger*innenwerkstatt die Erwartungen der Teilnehmer erfüllt oder teilweise erfüllt hat. Bei der Frage nach der Relevanz von Urban Air Mobility waren sich die Teilnehmer zu Beginn des Workshops nicht einig, jedoch waren sie dem Thema nicht skeptisch gegenüber eingestellt. Die größten Sorgen der Teilnehmer, bei der ersten Umfrage, lagen bei den Themen „Finanzierung / Verausgabung Steuergelder“, „Autonomer Betrieb“ und „Gesellschaftliche Akzeptanz“. Bei einer zweiten Umfrage verschob sich der Schwerpunkt. Die Themen „Lärmschutz“ und „Umweltaspekt“ führten nun die Liste an. Ebenfalls hat sich das Ergebnis der Frage nach der Relevanz von Urban Air Mobility verschoben. Das Thema wird mit Abschluss des Workshops als überwiegend Relevant oder besonders Relevant beantwortet.

Die im Verlauf der Bürger*innenwerkstatt erstellte Mindmap (siehe Abbildung 55) umfasst ein großes Spektrum von Themen rund um Urban Air Mobility. Die Themen befassen sich mit der Finanzierbarkeit und der Wirtschaftlichkeit von Drohnen, aber auch mit den potenziellen Einsatzgebieten und den einhergehenden Änderungen für uns Menschen. Als potenzielle Einsatzgebiete wurde häufig der mögliche Einsatz in der Medizin und Notfallversorgung genannt. Die Frage nach der Privatsphäre und

der Lärmbelästigung wird aufgeworfen, ebenso wie die der Luftsicherheit und der des Umweltschutzes. Großer Fokus wird ebenfalls auf die Realisierbarkeit und der Finanzierung gelegt. Die Frage nach den Konsequenzen für die Mitbürger in jeglicher Art steht somit bei vielen im Mittelpunkt.



Abbildung 55 Mindmap Bürger*innenwerkstatt

Die Bürger*innenwerkstatt wurde fotografisch begleitet, hier ein paar Eindrücke:



Anregungen für den Regelbetrieb wurden auch im März 2023 bei der Veranstaltung „Innovationsprozesse für zukunftsfähige Mobilität in Kommunen – und wie sie gelingen können“ gesammelt. Im Rahmen einer Paneldiskussion wurden die Projekthalte kommuniziert und die Anforderungen der Stadt in diesem Bereich evaluiert. Die Ergebnisse zeigen, dass Kommunen vor der Herausforderung stehen, eine Balance zwischen Beständigkeit und Innovationsoffenheit zu finden. Dabei müssen sie sowohl die Notwendigkeit der Bewahrung traditioneller Verwaltungsstrukturen als auch die Anforderungen an agile und schnelllebige Innovationsprozesse berücksichtigen, was zahlreiche neue Herausforderungen mit sich bringt. Dennoch wird das Engagement von Städten im Bereich UAM als Win-Win-Situation für alle Beteiligten gesehen, da sie durch ihre Schnittstellenfunktion und den direkten Kontakt zu verschiedenen Stakeholdern eine nachhaltige Innovationsentwicklung unterstützen können.

Im Jahr 2023 wurde in der Stadt Aachen ein Meinungsbildungsprozess zur Missionsdefinition im Bereich UAM durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Akteursgruppen wie Wirtschaftsförderung, Sicherheit und Ordnung, Feuerwehr, Stadtentwicklung und Mobilität sowie weitere relevante Organisationen eingebunden. Themen wie Genehmigungen, Flugbetrieb und Unfallmanagement wurden diskutiert, wobei insbesondere Feuerwehr und Polizei klare Vorstellungen äußerten. Im Rahmen dieser mehrtägigen Veranstaltung wurde auch das Projekt EULE mitgedacht. Es wurde deutlich, dass es organisatorische Herausforderungen bei der Implementierung von UAM gibt und die Unfähigkeit, schnell auf disruptive Innovationen zu reagieren, wurde hervorgehoben. Die Schaffung spezifischer Stellen und Ressourcen sowie mehr Eigeninitiative werden als notwendig erachtet, um den Herausforderungen zu begegnen und eine effektive Missionsdefinition zu unterstützen.

Im Rahmen eines Anwenderworkshops am 27. Juni 2024, der gemeinsam mit den Projektpartnern geplant wurde, konnten zahlreiche mögliche Routinerouten aufgezeigt werden. Neben Vertretern verschiedener medizinischer Fachbereiche des Universitätsklinikums Aachen wurden drei externe Krankenhäuser in Euskirchen, Mechernich und Erkelenz eingeladen. Außerdem wurde dem labor-medicinische Zentrum MVZ Stein sowie der Apotheken-Großhandel Otto Geilenkirchen (beide mit Standort Mönchengladbach) die Teilnahme am Workshop ermöglicht.

Als Vorbereitung wurde ein Konzept entwickelt, dass die Sammlung der möglichen Transportbedarfe methodisch sinnvoll aufbereitet. Die Teilnehmenden eines Standortes erhielten ein Satellitenbild des Standortes und sollen dort mögliche Landeplätze markieren sowie die Einbindung in die Logistikkette des Standortes skizzieren. Anschließend konnten Karten für Güter ausgefüllt werden, die die Anwender zu anderen Standorten transportieren könnten. Diese Karten enthielten dabei folgende Grundinformationen:

- a. Was soll transportiert werden?
- b. Wie oft würde der Transport stattfinden?
- c. Wie viel Vorlauf wäre erforderlich/ wie dringend wäre der Transport?
- d. Gibt es besondere Transportbedingungen?
- e. Ungefähre Abmessung und Gewicht

Die ausgefüllten Karten konnten abschließend an entsprechende Routen, die auf einer Pinwand dargestellt waren, angeheftet werden (Abbildung 56).

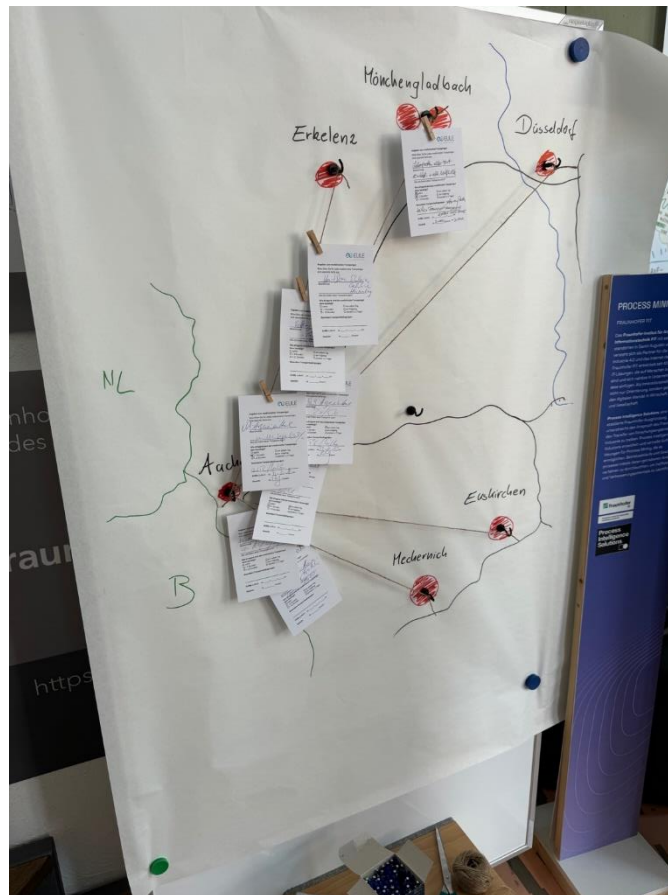


Abbildung 56 Methodisch aufbereitete Sammlung möglicher Transportgüter auf Routinerouten

Im Rahmen der Veranstaltung wurden die Teilnehmenden durch mehrere Kurzvorträge auf das Thema eingestimmt. Philipp Müller vom FSD eröffnete mit einem ersten Impulsvortrag, in dem er einen umfassenden Überblick über den aktuellen Forschungsstand des EULE-Projektes vermittelte. Anschließend präsentierte Dr. Johanna Holsten von flyXdrive eine detaillierte Darstellung des Flugbetriebs der medizinischen Drohne und erläuterte mögliche Flugrouten im Rheinischen Revier. Als Vertreter des Uniklinikums der RWTH lieferte Dr. Andreas Follmann Input zu einem konkreten Anwendungsbeispiel, das im Projekt bereits erfolgreich getestet worden ist: Anhand von Testflügen der Drohne mit Gewebespenden der Aachener Hornhautbank zeigte Follmann den Teilnehmenden detailliert auf, wie die Nutzung der UAV-unterstützten Transportlösung im Regelbetrieb aussehen könnte.

Im Laufe des Workshops wurde deutlich, dass sich alle Anwender*innen einen Start- und Landeplatz für die Drohne möglichst in Gebäudenähe wünschen. Generell wurde von den Teilnehmenden angemerkt, dass folgende Punkte für den zukünftigen Regelbetrieb wünschenswert wären:

- automatisiertes Be- und Entladen
- automatisierte Aufladung der Drohne, z. B. durch Induktion
- direkte Nähe zum weiteren Logistikprozess
- Möglichkeit der Temperatursteuerung und -überwachung
- Einsatz 24/7 und spontan/kurzfristig für Notfalltransporte

- Bedienung durch einfach einzuweisendes Personal
- technologische Einbindung in Überwachung: Wo ist die Drohne gerade? Wann ist die Ankunft?
- standardisierte Transportmedien (z. B. Box)
- Berücksichtigung von Hubschrauberlandeplätzen an Kliniken



Abbildung 57 Eindruck vom Anwenderworkshop

DiC war als Projektpartner vor Ort, um den persönlichen Austausch mit den zukünftigen Nutzerinnen und Nutzern aktiv zu suchen. Dieser direkte Dialog ermöglichte es, wertvolle Einblicke in die Erwartungen, Bedürfnisse und Anregungen der Nutzer zu gewinnen. Die Rückmeldungen aus erster Hand lieferten wichtige Impulse für die nutzerzentrierte Weiterentwicklung des Systems und unterstreichen die Bedeutung praxisnaher Beteiligung im Projektverlauf.

Zur Vorbereitung eines Regelbetriebs und zur Erhöhung der Akzeptanz in der Bevölkerung hat das FSD aktiv an den von der Stadt Aachen veranstalteten Workshops mitgearbeitet und die luftfahrttechnischen Aspekte in den Workshops eingebracht.

Im März 2024 fand ein Workshop zum Thema „Harmonisierung von Regularien bei grenzüberschreitenden Flügen“ mit Vertretern der Stadt Heerlen, des BMDV, des MUNV und des niederländischen Ministeriums für Infrastruktur und Wasserwirtschaft statt. In diesem Workshop wurden die gesammelten Erfahrungen mit grenzüberschreitenden Flügen sowie die damit verbundenen Herausforderungen erörtert. Zudem wurden Lösungen diskutiert, um die entsprechenden Verfahren zu vereinfachen.

AP 5.2	Flugdurchführung auf ausgewählten Routen
Ziele des Arbeitspakets	
Durchführung eines Flugbetriebs auf ausgewählten Routen zur Demonstration des Gesamtsystems	

Machbarkeitsstudie

Im Rahmen des Projektes wurde eine Machbarkeitsstudie in Zusammenarbeit mit der Hornhautbank der Uniklinik Aachen geplant. Ziel war es, die Auswirkungen von Lufttransporten mittels Drohne auf humane Hornhautpräparate zu testen.

Dafür wurden zunächst die umfangreichen Studienvorbereitungen durchgeführt. Nach Festlegung des Studiendesigns, der Erstellung des Prüfplans und der Einreichung des Ethikantrages konnte im Jahr 2023 mit der Durchführung der Studie begonnen werden.

In der ersten Phase der Studie wurden im Jahr 2023 bereits 12 Hornhautpaare sowohl per Pkw (Kontrollgruppe) als auch per Drohne (Interventionsgruppe) transportiert und anschließend histologisch ausgewertet.

Zusätzlich wurden Parameter wie Vibration und Temperatur während des Transports erfasst. Diese Tests simulieren einen Routinebetrieb und helfen, die Sicherheit und Unversehrtheit der Präparate beim Drohnentransport zu beurteilen.

Die 2023 begonnene Machbarkeitsstudie wurde in Q1 sowie Q2 2024 schließlich erfolgreich beendet nachdem weitere 8 Drohnentransporte von Hornhautpaaren erfolgt waren.

Im Rahmen dieser Studie wurden von FSD und flyXdrive in Zusammenarbeit mit dem UKA und der Hornhautbank Aachen 20 Hornhauttransplantate mit dem Flugsystem transportiert. Die Flugdurchführung erfolgte mit medizinischem Transportgut auf Streckenlängen, die den realen Betriebsbedingungen entsprechen. Diese Flüge waren entscheidend, um die Praktikabilität des Transports unter realistischen Bedingungen zu evaluieren. Die für die Machbarkeitsstudie genutzte Flugstrecke ist in Abbildung 58 zu sehen.

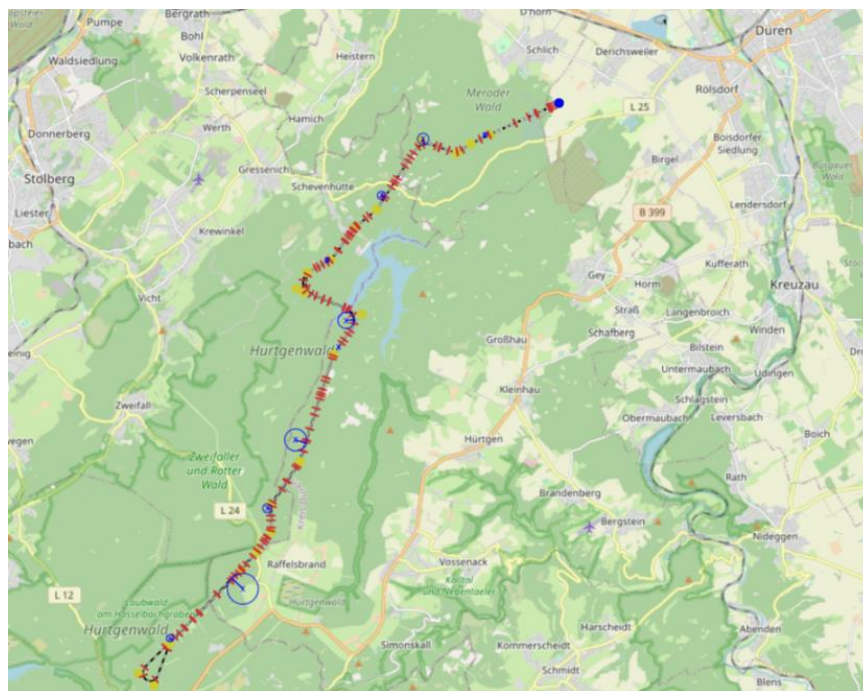


Abbildung 58 Flugroute der Machbarkeitsstudie über dem Hürtgenwald

Die während der Flugtests gesammelten Erfahrungen flossen direkt in kontinuierliche Verbesserungen an der Bodenstation ein (Arbeitspaket 3.3). Durch diese fortlaufenden Anpassungen wird sichergestellt,

dass sowohl die Abläufe als auch die technische Ausstattung optimal auf die Anforderungen des Betriebs abgestimmt sind.

Die Auswertung der histologischen Präparate zeigte lediglich bei einer Hornhaut, die luftgebunden transportiert wurde, einen auffälligen Verlust der Endothelzellzahl (Abbildung 59), die als Qualitätskriterium für die zu transplantierende Hornhaut gilt. Weitere Analysen müssen nun zeigen, ob anhand der Temperatur- und Vibrationsverläufe eine mögliche Ursache für diese Schädigung detektiert werden kann. Alle anderen Hornhäute zeigten keine Unterschiede hinsichtlich der Transportvariante.

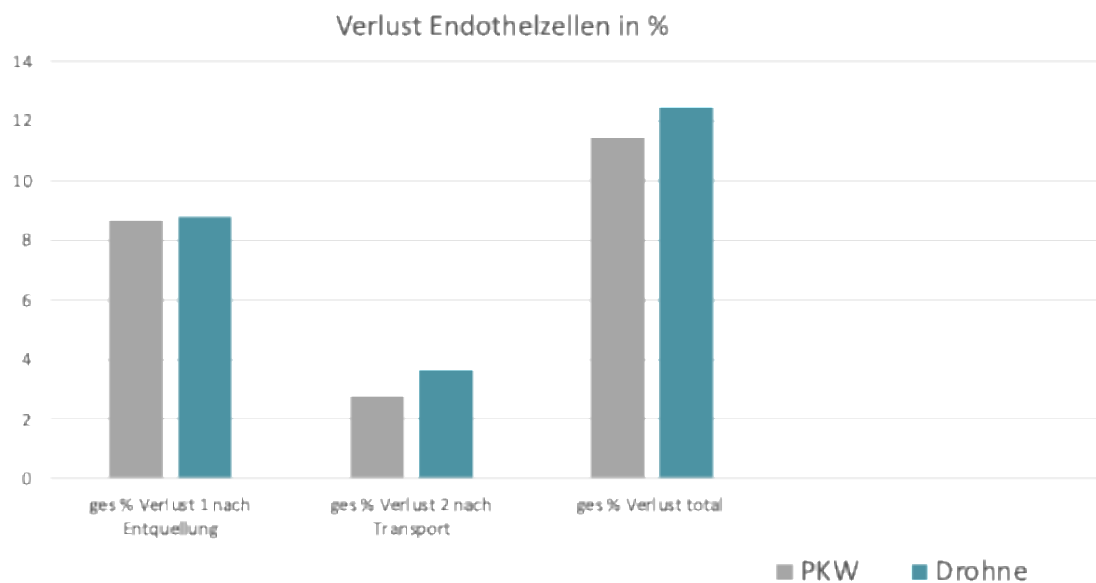


Abbildung 59 Vergleich der transportierten Hornhäute (jeweils n=20) nach Transportmittel (PKW vs. Drohne)

Testreihe zum Transport bei niedrigen Temperaturen

Zum Jahresende wurde eine weitere Testreihe gestartet, die den Transport von Hornhautpräparaten bei niedrigen Temperaturen untersucht (Abbildung 60). Hierbei wurden passive Erwärmungsmethoden mittels verschiedener Wärmequellen (Wärmepads und Heizkissen) getestet und der Temperaturverlauf im Transportmedium (Flasche mit Flüssigkeit) überwacht. Diese Tests waren entscheidend, um die optimalen Transportbedingungen für die Hornhautpräparate zu gewährleisten.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass die Wärmemaßnahmen nicht nur ein Auskühlen verhindert haben, sondern sogar eine Erwärmung im Nährmedium stattgefunden hat. Diese Erwärmung befand sich zu jedem Zeitpunkt, auch zum Ende der jeweiligen Messung, im Rahmen des vorgegebenen Temperaturbereiches (10 - 40°C). Zudem konnten wir zeigen, dass der Temperaturverlauf im Nährmedium ohne Wärmemaßnahmen ein langsames Absinken zeigt als der Temperaturverlauf in der Nase (in unmittelbarer Umgebung zum Nährmedium).



Abbildung 60 Temperaturmessung im Transportmedium mit Wärmequellen

Im Jahr 2023 wurde der Flugbetrieb auf verschiedenen Routen durchgeführt, die der Erprobung von Systemen und Prozessen dienten. Dies umfasst Flüge unter einer vorliegenden SAIL II-Genehmigung über dem Hürtgenwald und in Eschweiler. Diese Flüge dienen auch einer ersten Validierung des Gesamtsystems.

Im Jahr 2024 wurde weiterhin Flugbetrieb auf verschiedenen Routen durchgeführt, die der Erprobung von Systemen und Prozessen dienten. Dies umfasst Flüge unter einer vorliegenden SAIL II-Genehmigung über dem Hürtgenwald und in Eschweiler und in der Nähe des UKA. Diese Flüge dienen auch einer ersten Validierung des Gesamtsystems.

Nach erfolgreicher Durchführung der Testflüge wurden die Telemetriedaten auf Korrektheit geprüft und Feedback gegeben. Nach Korrektur wurde das Hook in Device von FlyXDrive auf das produktive System der Droniq umgezogen.

medPort Fangprozess

Innerhalb des Labors wurde eine Testkampagne mit über 50 erfolgreichen Fangversuchen durchgeführt. Dabei wurde der Fluggerät-Dummy aus unterschiedlichen Richtungen und Geschwindigkeiten in den Arbeitsbereich des medPorts eingeführt und gefangen. Die dadurch gesammelten Erfahrungen haben signifikant zur Ausarbeitung und Verbesserung der AP 2.3 aufgeführten Fangbedingungen beigetragen und die Zuverlässigkeit des Systems erhöht.

Im Anschluss wurde der medPort an insgesamt vier Tagen in Kombination mit dem Fluggerät an unterschiedlichen Aufstellorten und wechselnden Umweltbedingungen im Freien getestet. In aufeinanderfolgenden Versuchsreihen wurde zunächst die Synchronisation des Roboters mit der Position des Fluggeräts validiert, wobei ein vertikaler Sicherheitsabstand eingehalten wurde. In sukzessiven Tests wurde das Fluggerät unter verschiedenen Wind- und Lichtverhältnissen von dem Roboter gefangen und in die Station geführt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der medPort im Labor und unter verschiedenen Umweltbedingungen im Freien ausgiebig getestet wurde.

Zwischendemonstration

Zur Demonstration der vollständigen Prozesskette fand im Oktober 2024 eine Zwischendemonstration in unmittelbarem Umfeld des Universitätsklinikums Aachen (UKA) statt, an der alle Partner beteiligt waren. Der medPort wurde direkt neben dem UKA eingerichtet, und der Beladeprozess wurde zusammen mit dem anschließenden Start des Flugsystems aus dem Roboterarm präsentiert. Ein Mitarbeiter des Uniklinikums stellte über die Benutzeroberfläche von Docs in Clouds eine Transportanfrage, platzierte anschließend mithilfe eines Tutorials die Nutzlast in die Drohne, woraufhin diese vom medPort abhob, eine kurze Route auf dem Klinikgelände absolvierte und schließlich wieder auf dem Roboterarm landete. Im Anschluss wurde gezeigt, wie der Mitarbeiter unter Anleitung des Tutorials die Nutzlast – in diesem Fall eine Flasche, die für den Transport von Hornhäuten verwendet wird – sicher aus der Drohne entnehmen konnte. Durch diese Demonstration konnte das Zusammenspiel der von den Partnern entwickelten Lösungen gezeigt werden. Im Vorfeld der Demonstration fanden gemeinsam mit den Projektpartnern diverse Erprobungsflüge statt.

Zur Durchführung wurden alle relevanten Stabsstellen des Universitätsklinikums in den Planungsprozess einbezogen: Neben der Stabsstelle für Gebäudemanagement, der Unternehmenskommunikation sowie der Logistik wurde der Leiter des Flugbetriebs involviert, um einen Flug im unmittelbaren Umfeld

auf der Nordseite des Universitätsklinikums zu ermöglichen. Dabei wurden die Projektpartner bei der nötigen Beantragung von Genehmigungen unterstützt.

Hierbei konnte erfolgreich die Beladung im „medPort“ demonstriert werden und eine menschliches Hornhauttransplantat konnte die Logistikkette bis zum Start durchlaufen. Die Zwischendemonstration wurde durch die Unternehmenskommunikation des Universitätsklinikums Aachen begleitet, um Foto- und Videomaterial für Vorträge zu generieren (Abbildung 61).



Abbildung 61 Beladevorgang im „medPort“ auf dem Gelände im Nordbereich des Universitätsklinikums Aachen

In Abbildung 62 und Abbildung 63 wird der Fangvorgang des Fluggeräts dargestellt, wie er im Rahmen der Zwischendemonstration vorgeführt wurde. Der Vorgang wurde aus verschiedenen Perspektiven fotografiert und gefilmt.



Abbildung 62: Zwischendemonstration der Bodenplattform medPort

In Abbildung 63 wird das Fangen des Fluggeräts im Detail dargestellt. Über einen Zeitraum von ca. 0.7 s werden die jeweiligen Zustände des Zustandsautomaten und die relevanten z-Positionen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen des Roboters dargestellt. In der zeitlichen Darstellung der z-Positionen sind die sich sukzessiv verringernden Sollpositionen zum Fluggerät $z_{pos,ref}$ zu erkennen. Der Regler folgt der Vorgabe mit $z_{pos,sol}$ im Rahmen der vorgegebenen Beschleunigungsgrenzen. Schließlich zeigt der nacheilende Positionsverlauf des Roboters $z_{pos,r}$ die Totzeit der verwendeten Hardware. Durch die Berücksichtigung dieser Totzeit im Regler-Design wurde eine verzögerungsfreie Synchronisation und ein sicherer Zugriff mit anschließender Entschleunigung des Fluggeräts erreicht.

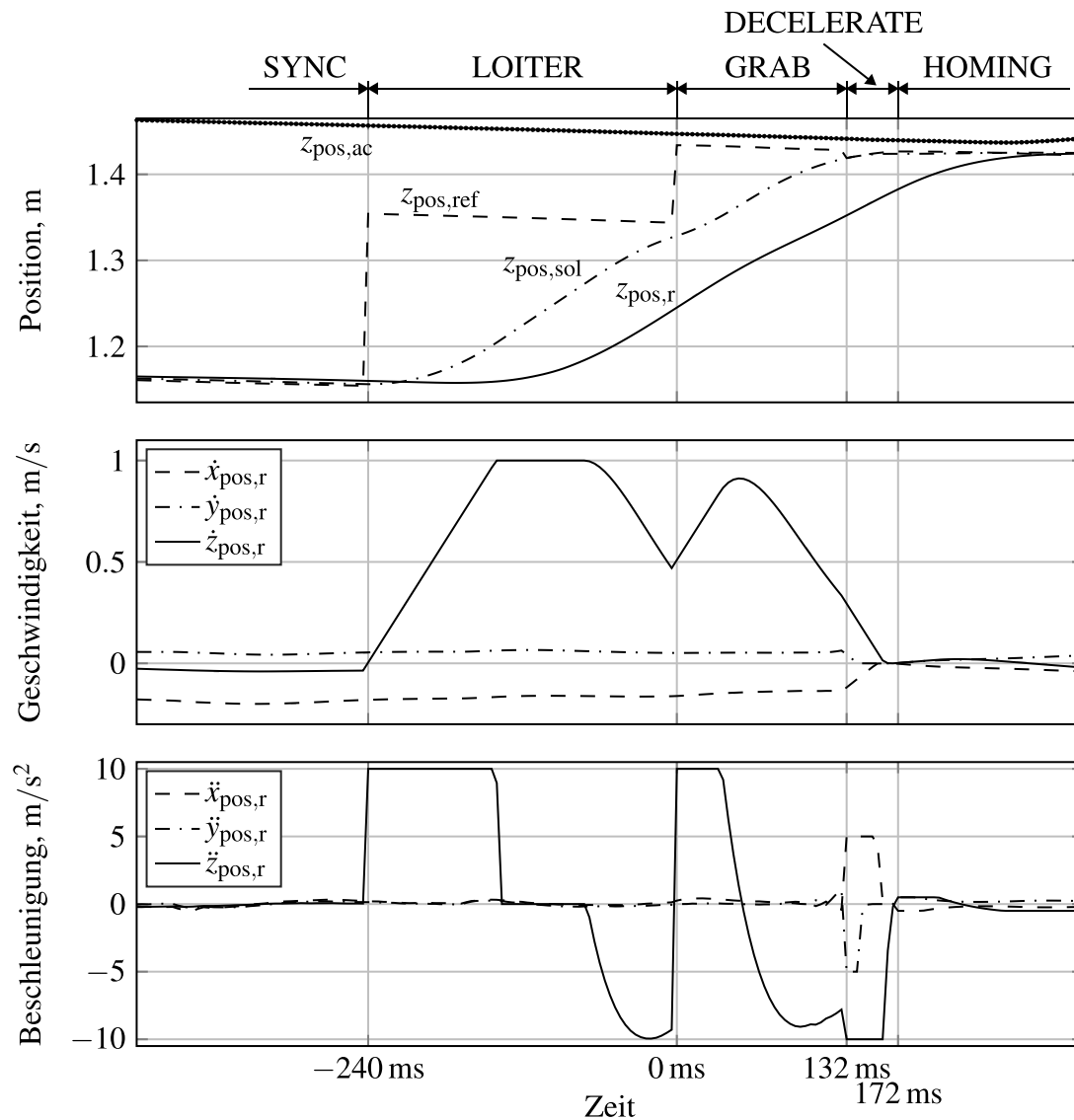


Abbildung 63: Fangvorgang der Zwischendemonstration

AP 5.3	Validierung und Verwertung
Ziele des Arbeitspakets	
In einem anschließenden Validierungs- und Verwertungs-Teilarbeitspaket wird die Zuverlässigkeit des Flugsystems validiert. Es werden Angaben zur Anwendungsmöglichkeit definiert, wie beispielsweise die maximale Windgeschwindigkeit, bei der das Flugsystem betrieben werden kann. Zudem wird die Möglichkeit für einen 24/7 Betrieb evaluiert. In der Verwertung werden die Möglichkeiten zur Umsetzung der gewonnenen Ergebnisse in einen Regelbetrieb sowie die dazu notwendigen Schritte ausgearbeitet. Für die Öffentlichkeitsarbeit werden die Ergebnisse des Projektes EULE und der Flugdurchführungen seitens Vodafone und der Stadt Aachen auf Messen und Ausstellungen präsentiert. Die wissenschaftlichen Ergebnisse werden zudem durch FSD und FH Aachen auf nationalen und internationalen Konferenzen veröffentlicht. Die FXD bereitet die durch die Flugdurchführung gewonnenen Daten zur Weiterverwendung und für Erkenntnisse für einen späteren Regelbetrieb auf. DiC bezieht die Erkenntnisse in die Weiterentwicklung seiner Kompetenzfelder ein. Droniq verwendet Informationen aus den Flugdurchführungen bei der weiterführenden technischen Entwicklung des Hook-In-Device. Die Erkenntnisse zur Integration in die Krankenhausprozesse werden vom UKA aufbereitet und evaluiert	

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden die Projektergebnisse verwertet und der Öffentlichkeit auf verschiedene Arten zugänglich gemacht. Die wissenschaftlichen Ergebnisse wurden von der FH Aachen, dem FSD und dem UKA auf verschiedenen Konferenzen vorgestellt. Darüber hinaus wurde das Projekt und die erzielten Ergebnisse durch mehrere Partner auch auf verschiedenen Messen präsentiert.

Im Rahmen des Forschungsprojekts EULE wurde von Seiten der FH ein Konferenzbeitrag mit dem Titel „Robot Assisted Landing Process of small UAVs using Decentralized Kalman Filter“ bei der CEAS EuroGNC 2024 an der University of Bristol veröffentlicht und vorgestellt. In der Veröffentlichung werden alle notwendigen Voraussetzungen und Annahmen für einen robotisch assistierten Fangvorgang eines schwebeflugfähigen Fluggeräts dargelegt, die Bodenplattform vorgestellt und erste Ergebnisse aus Laborversuchen präsentiert. Eine weitere Veröffentlichung zum entwickelten modellprädiktiven Regler und den Feldversuchen ist geplant. Zudem wurden an der FH Aachen fünf Abschlussarbeiten im Rahmen des Forschungsprojekts EULE angefertigt.

Das FSD veröffentlichte mehrere Konferenzbeiträge im Zusammenhang mit dem Forschungsprojekt EULE. Auf der International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS) 2022 in Dubrovnik wurde der Beitrag „Modified Constrained Wavefront Expansion Path Planning Algorithm for Tilt-Wing UAV“ sowohl veröffentlicht als auch präsentiert. Bei der International Micro Air Vehicle Conference (IMAV) 2023 in Aachen fand die Präsentation und Veröffentlichung des Beitrags „Multi Method Local Path Planning Considering Flight Dynamics Constraints for Collision Avoidance“ statt. Im Rahmen des Deutschen Luft- und Raumfahrtkongresses (DLRK) 2023 in Stuttgart wurde der Beitrag „Missionsplanung und Disponierung von unbemannten Fluggeräten für den Transport medizinischer Güter“ veröffentlicht und in einem Vortrag vorgestellt.

Im März 2023 wurde das Forschungsprojekt beim Treffen der Europäischen Hornhautbanken (EEBA) in Aachen vorgestellt. Inhalt des Poster-Beitrages war die Untersuchung der Machbarkeit und Sicherheit des Transports von humanen Hornhautpräparaten mittels Drohne. Diese innovative Transportmethode könnte die Effizienz und Schnelligkeit der Hornhauttransporte signifikant verbessern und somit die Qualität der Transplantate erhöhen.

Im Juni 2024 (20.-23.06.2024) wurde das Projekt u.a. im Rahmen eines wissenschaftlichen Posters auf dem *International Congress of Emergency Medicine (ICEM)* 2024 in Taiwan präsentiert. Hier wurden die Potentiale eines Drohen-Transportes relevanter medizinischer Güter auch im Zusammenhang mit der Nutzung von Telemedizin im Katastrophenfall diskutiert. Die Ergebnisse sind dabei auch mit Vorarbeiten verschiedener Projektpartner zum grenzüberschreitenden Flug in Zusammenhang zu bringen, um internationale Transportrouten in einer möglicherweise nächsten Phase ins Auge zu fassen.

Auf Basis des Anwenderworkshops sowie einer erneuten Literaturrecherche wurde ein Whitepaper zum „Lufttransport von medizinischen Gütern mit unbemannten Flugsystemen“ erstellt. Dieses enthält eine Sammlung aller relevanten Güter, aufgeteilt nach medizinischer Technik, Laborproben, Blutkonserven, Arzneimitteln sowie Transplantaten.

Nach Projektende wird die Auswertung und Publikation der genannten Machbarkeitsstudie geplant, mit dem Ziel die Auswirkung von Lufttransporten mit Drohnen auf die Hornhäute zu untersuchen. Neben dem rein-wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn ist eines der indirekten Ziele der Studie das Informieren der medizinischen Fachkreise über das Projekt EULE und seine Ergebnisse. Hierzu ist

ebenfalls eine zweite Publikation geplant, die die logistischen Herausforderungen, erforderliche technische Anpassungen (z.B. an das Transportgefäß) sowie die Ergebnisse der Messreihe zum Transport bei niedrigen Außentemperaturen beinhaltet. Beide Publikationen sollen in der internationalen Fachpresse mit „open Access“ erfolgen.

Der aktuelle Stand des Projekts sowie die bereits identifizierten Lösungen wurden im Rahmen eines Vortrags auf der Messe polis Mobility 2024 in Köln präsentiert. Neben dem Vortrag war das FSD gemeinsam mit der Stadt Aachen auch auf dem Messestand des mFUND vertreten, an dem Fachbesucher und Interessierte sich über das Projekt informieren konnten. Der Austausch mit dem Messepublikum konzentrierte sich insbesondere auf weitere Entwicklungs- und Einsatzmöglichkeiten unbemannter Flugsysteme, insbesondere im medizinischen Bereich sowie für städtische Transportlösungen.

Auf der Florian Messe 2023 Messe in Dresden wurde das Projekt in einem Vortrag dem Fachpublikum vorgestellt. Am Messestand des Projekts fand ein Austausch mit Anwendern zu potenziellen Weiterentwicklungen und den Ergebnissen des Projekts statt.

Für einen einheitlichen Auftritt und eine gesamteinheitliche Kommunikation des Projektes wurde ein EULE-Corporate Design entwickelt und durch den Aufbau einer Website ergänzt. In diesem Corporate Design wurden auch Flyer, RollUps und Hintergründe für Videokonferenzen für einen einheitlichen Auftritt erstellt

Die Website² wurde als MultiPager aufgebaut, auf dem das Projekt, das Konsortium, News/Events, Medien (in welchen das Informationsmaterial, ein Glossar, die Datenbank sowie Downloads zu finden sind) sowie Kontaktmöglichkeiten dargestellt werden.

Die Inhalte des Projekts wurden außerdem über die neue Website „UrbanAirSpaceAC³“, zum Thema Urban Air Mobility verbreitet.

Zur Visualisierung des Gesamtprojektes wurde ein informativer Projektfilm⁴ produziert. Der Erklärfilm stellt die Ziele der einzelnen Projektpartner vor und präsentiert die Projektidee in niedrigschwelliger Form. Die Darstellung unterstreicht die Relevanz des Projektvorhabens für die breite Öffentlichkeit.

Ein Höhepunkt im Berichtszeitraum war das „Science Camp“. In der zweiten Herbstferienwoche fand in Aachen eine Wissenschaftswoche für Kinder und Familien statt. Neben einer Ausstellung im OecherLab wurden verschiedene Workshops zu neuen Entwicklungen und Zukunftstechnologien angeboten. Im Rahmen dieser einwöchigen Veranstaltung konnte das Projekt EULE durch die thematische Konvergenz vorgestellt werden. Dazu wurde das Roll-Up ausgestellt und Flyer verteilt.

Insgesamt wurden im Berichtszeitraum verschiedene Marketingmaßnahmen eingesetzt, darunter die Platzierung von Plakaten und Flyern, Pressemitteilungen und Social-Media-Aktivitäten. Alle öffentlichkeitswirksamen Ereignisse innerhalb des Projekts wurden auf der projekteigenen Website veröffentlicht. Unter dem Reiter News werden laufend neue Artikel und Berichte eingestellt.

² www.eule-mfund.de

³ <https://www.urbanairspace-ac.de/timeline/projektstart-eule>

⁴ <https://www.youtube.com/watch?v=F0CENuvZXWQ>

Die Beiträge auf der Website, Veranstaltungen und Ankündigungen wurden ebenfalls über die Social Media-Kanäle der Wirtschaftsförderung der Stadt Aachen und des OecherLabs (und dessen Website) oder das FutureLab des Aachener Stadtmarketing geteilt.

Die Stadt Aachen engagierte sich aktiv bei vielen Vernetzungsinitiativen von Kommunen und Städten zur Gestaltung der Urban Air Mobility und brachte die Ergebnisse und Erfahrungen aus dem Projekt dort mit ein. Dazu kam die Teilnahme an verschiedenen Workshops und Diskussionspaneln im Rahmen von Messen. Hier sind insbesondere die Amsterdam Drone Week mit der Teilnahme am Panel „Cities and Regions“ und der Teilnahme am UIC2-DE Workshop zur Forcierung gemeinsamer Linien und Projekte sowie der Teilnahme und Moderation der Urban Air Hamburg 2025 zu nennen.

Die im Projekt durchgeführten Testflüge wurden über das Hook-In-Device elektronisch sichtbar gemacht und verfolgt. Die daraus generierten Daten der Testflüge wurden zur Weiterentwicklung des Hook-In-Devices genutzt. Daraus resultierend wurde eine neue Version der Transpondertechnologie entwickelt (HOD V3), die bereits in anderen Kontexten zur Anwendung kommt.

Für Docs in Clouds stellt insbesondere die Entwicklung einer sicheren, auf dem Matrix-Protokoll basierenden Kommunikationsschnittstelle einen bedeutenden Beitrag zur strategischen Weiterentwicklung des Unternehmens dar. Die Integration dieser dezentralen, Ende-zu-Ende verschlüsselten Infrastruktur ist ein technologisch zukunftsweisender Schritt, um die Interoperabilität mit externen Partnern – etwa in der Telemedizin oder in sektorenübergreifenden Versorgungsprozessen – sicherzustellen. Gerade im Gesundheitswesen, wo Datenschutz und Ausfallsicherheit höchste Priorität haben, ermöglicht die Matrix-Schnittstelle eine robuste, skalierbare und vertrauenswürdige Kommunikation. Docs in Clouds nutzt die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse bereits aktiv in anderen Entwicklungsvorhaben weiter und stärkt damit die eigene Wettbewerbsfähigkeit im Bereich sicherer digitaler Gesundheitsanwendungen langfristig.

Aus der Zwischendemonstration, den Fallschirmerprobungsflügen sowie dem Anwenderworkshop konnten valide Erkenntnisse für einen späteren Regelbetrieb gewonnen werden. Insbesondere durch den Anwenderworkshop wurden die Ergebnisse des Projektes relevanten Stakeholdern und der Öffentlichkeit vorgestellt.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Rahmen des Projektes wurden Positionen aus den beantragten Fördermitteln finanziert. Den größten Anteil hatten bei allen Projektpartnern die Personalkosten.

Im Verlauf des Projekts zeigte sich für die RWTH, dass einige der ursprünglich für studentische Hilfskräfte (Kostenstelle 0822) vorgesehenen Aufgaben aufgrund ihrer Komplexität von wissenschaftlichen Mitarbeitern (Kostenstelle 0812) übernommen werden mussten. Der dadurch entstandene Mehraufwand bei Kostenstelle 0812 konnte jedoch nahezu vollständig durch Einsparungen bei Kostenstelle 0822 ausgeglichen werden.

Die zweitwichtigste Position im zahlenmäßigen Nachweis der RWTH stellt die Anschaffung der Fluggeräte dar. Zudem war in der ursprünglichen Planung eine Unterbeauftragung der Deutschen Flugsicherung (DFS) vorgesehen. Die hierfür geplanten Aufgaben konnten jedoch im Laufe des Projekts erfolgreich durch die Konsortialpartner selbst übernommen werden, so dass eine externe Beauftragung nicht mehr erforderlich war.

Die zweitgrößte Kostenposition für die Droniq bestand aus den sonstigen Vorhabenkosten. Hier wurden die UTM-Lizenzen für die Partner, sowie die Hardware inkludiert.

Neben den Personalkosten, die den größten Kostenpunkt darstellen, sind weitere wichtige Ausgabenpositionen für die FH Aachen zu erwähnen. Die Personalkosten wurden wie geplant für wissenschaftliche und studentische Mitarbeiter eingesetzt. Zu den zentralen Anschaffungen zählen ein Robotersystem als Kernkomponente des medPorts sowie ein optisches Tracking-System zur Erfassung des Fluggeräts. Zudem wurde ein Anemometer beschafft, um den lokalen Wind bestimmen zu können.

Der Aufwand der Stadt Aachen im Berichtszeitraum entspricht grundsätzlich der Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung. Allerdings wurde Ende 2023 ein Antrag auf Mittelumwidmung von der Kostenstelle 0812 (Beschäftigte E12-E15) zur Verwendung in der Kostenstelle 0822 (Beschäftigte E1-E11) gestellt.

Hintergrund ist eine personelle Lücke, die durch einen Personalwechsel im Projekt entstanden ist.

Durch die Einstellung einer neuen Projektmanagerin wurde das Projekt in diesem Jahr für einige Monate ohne Personal geführt. Darüber hinaus gab es auf niederländischer Seite Änderungen in der Gesetzgebung bezüglich (grenz-überschreitender) Drohnenflüge. Trotz dieser Hindernisse konnten die Meilensteine weitgehend fristgerecht abgearbeitet werden. Dennoch muss in den nächsten Monaten verdichtet gearbeitet werden. Um den damit verbundenen Mehraufwand und das Volumen innerhalb der Projektlaufzeit bewältigen zu können, würden wir gerne zur

Unterstützung der Projektmanagerin eine studentische Hilfskraft einstellen.

Der Arbeits- und Zeitplan wird dahingehend angepasst, dass teilweise ein erhöhter

Austauschbedarf besteht und die geplanten Workshops auf einer anderen Ebene stattfinden werden.

Durch die flyXdrive wurde eine Antragsänderung am 30.05./01.06.2022 eingereicht und mit dem Änderungsbescheid vom 19.07.2022 und 26.08.2022 bestätigt. Die Umwidmung ergibt sich aus den tatsächlich weniger Ausgaben für die Hardware für die Leitwarten. Die Pos. 0847 „vorhabensspezifische Abschreibungen“ wurden reduziert und die Pos.0850 „sonstigen unmittelbaren Vorhabenskosten“ um die Summe erhöht. Die Pos. 0813 „Material“ wurde um die zusätzlichen Ausgaben für die Fallschirmentwicklung erhöht.

Bei der flyXdrive fielen hauptsächlich Materialkosten zur Adaption der Outdoor-Flugsysteme insbesondere der Fallschirmentwicklung sowie sonstige Vorhabenskosten zur Durchführung der Flüge und Lizenzgebühren für Simulationen zur Absicherung der Sicherheitsfunktionen an. Bei den Anlagen ist der Aufbau einer Leitwarte sowie eines Flugsystems zu nennen.

Im Einzelnen beinhalteten die Materialkosten Kosten zur Fallschirm- und FTS- Entwicklung, Änderungen des verbauten Autopiloten inklusive Missionssteuerung und teilweise der verbauten Module. Für die Fallschirmkonstruktion wurde die Software Fusion 360 genutzt. Zusätzlich wurden Ersatzteile und Platinenanpassungen benötigt. Für die Datenübertragung zwischen Flugsystem und Bodenstation und Flugsystem und UTM-Server fielen Gebühren für die Datennutzung an. Die Kosten beinhalten Kosten für die Datenübertragung mit Mobilfunk und mit Satellitenkommunikation. Für den sicheren Betrieb insbesondere außerhalb der Sichtweite muss ein Wechsel des Netzes während des Fluges automatisch möglich sein. Hierfür wurden spezielle Roaming-Simkarten verwendet, die diese Funktion anbieten. Für die Flugerprobung wurden Betriebsgenehmigungen angepasst und eine Luftfahrthalterhaftpflichtversicherung abgeschlossen.

Die bei der flyXdrive GmbH angefallenen Reiskosten waren deutlich geringer als geplant, da viele Treffen in Aachen stattgefunden haben

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Beiträge des UKA waren essenziell für die medizinische Fundierung des Projekts EULE. Ohne die Expertise in der Auswahl, Prüfung und Bewertung medizinischer Güter und deren Transportanforderungen wäre eine realitätsnahe Umsetzung des Projektes nicht möglich gewesen. Die entwickelte Machbarkeitsstudie wurde vollständig durchgeführt und war für den Nachweis der Eignung des Lufttransports medizinischer Präparate unverzichtbar. Zudem konnte mit der Machbarkeitsstudie weltweit erstmalig der Transport von Hornhäuten realisiert werden. Mit der durchgeführten Testreihe zum Transport von Hornhäuten bei niedrigen Temperaturen, konnte gezeigt werden, dass mit relativ simplen Wärmemethoden auch im Winter Drohnentransporte von Hornhäuten möglich wären.

Auch die Einbindung interner und externer medizinischer Partner durch das UKA war Grundlage für die spätere Demonstration realitätsnaher Anwendungsszenarien.

Die fortschreitende Entwicklung des Drohnenmarkts, insbesondere im Bereich der zeitkritischen medizinischen Versorgung, macht die sichere und zuverlässige Integration unbemannter Flugsysteme in den regulären Luftraum zu einer zentralen Herausforderung der heutigen Zeit. Use Cases wie die Lieferung von Medikamenten, Blutkonserven oder Laborproben per Drohne gewinnen zunehmend an Relevanz – vor allem in besonders zeitkritischen Szenarien. Eine Voraussetzung für deren Umsetzung ist jedoch die nahtlose Einbindung der Drohnen in U-Space-Strukturen, um Kollisionen zu vermeiden, Flugbewegungen zu koordinieren und regulatorische Anforderungen zu erfüllen.

Die von Droniq im Projekt durchgeführten Arbeiten in den Arbeitspaketen AP4.2, AP5.2 und AP5.3 waren in diesem Zusammenhang notwendig und zielgerichtet. Die Integration, Erprobung und Validierung des Hook-In-Devices sowie die Integration in das Droniq UTM-System ermöglichten die elektronische Sichtbarkeit von Drohnen und legten damit die Grundlage für deren sichere Teilnahme am Luftverkehr. Die zahlreichen Testflüge und daraus abgeleiteten Optimierungen führten zur Entwicklung einer neuen Generation von Transpondertechnologie (HOD V3), die den steigenden Anforderungen des Betriebs in U-Space-Umgebungen gerecht wird.

Durch diese Arbeiten konnte ein realitätsnaher Testbetrieb für medizinische Drohnenlieferungen abgebildet werden. Die erhobenen Daten und entwickelten Systemkomponenten leisten einen konkreten Beitrag zur Übertragbarkeit auf reale Einsatzszenarien und unterstützen so die Etablierung sicherer und effizienter Drohnenlogistiklösungen im Gesundheitswesen. Die geleistete Arbeit war damit nicht nur angemessen, sondern auch essenziell für die Weiterentwicklung praxisnaher U-Space-Anwendungen.

Im Rahmen des Projekts wurden wesentliche Beiträge zur möglichen Verbesserung der medizinischen Versorgung, insbesondere in ländlichen und strukturschwachen Regionen, geleistet. Diese Regionen haben oft nur eingeschränkten Zugang zu medizinischer Infrastruktur und die im Projekt entwickelten Lösungen zielen darauf ab, diesen Zugang durch den Einsatz innovativer Technologien zu verbessern.

Eine zentrale Neuerung ist die Kombination aus einer automatisierten Bodenplattform und einem unbemannten Fluggerät, die in bestehende Prozesse medizinischer Betriebe integriert wird. Durch diese Schnittstelle wird ein effizienter Transport von medizinischen Gütern und eine schnelle und zuverlässige Bereitstellung von Materialien ermöglicht. Ein weiterer wichtiger Aspekt des Projekts war die Automatisierung und Reduktion der Größe der Landeplattform für das Fluggerät. Dies erhöht die

Flexibilität bei der Wahl des Standorts für den Einsatz der Flugsysteme und erlaubt die Implementierung der Technologie auch an Orten mit begrenztem Platzangebot. Neben diesen Gründen wurde auch das Handling und die Bereitstellung des Fluggeräts beachtet, um sicherzustellen, dass die Bedienung einfach und sicher in den Arbeitsalltag medizinischer Betriebe integriert werden kann.

Ein Vergleich mit alternativen Lösungen, wie der im mFUND Forschungsprojekt *FreeRail* vorgestellte *Drone Port* von Quantum Systems, zeigt sich die Relevanz der im Projekt geleisteten Arbeit. Quantum Systems bietet zwar einen ähnlichen Ansatz, jedoch liegen die Hauptanwendungsfelder der Systeme von Quantum Systems im militärischen Bereich. Zudem fehlt eine geeignete Station für die Be- und Entladung der Fluggeräte.

Die bei der flyXdrive geleisteten Forschungsarbeiten waren notwendig und angemessen. Alle im Arbeitsplan des Teilvorhabens formulierten Aufgaben wurden bearbeitet. Insbesondere die Auseinandersetzung mit den rechtlichen Rahmenbedingungen die sichere Integration in den Luftraum sind hochaktuelle Themen, die auch in Zukunft noch weiter betrachtet werden müssen.

Die am Institut für Flugsystemdynamik geleisteten Forschungsarbeiten waren notwendig und angemessen. Alle im Arbeitsplan des Teilvorhabens formulierten Aufgaben wurden bearbeitet. Die Ergebnisse entsprechen den im Projektantrag definierten Zielsetzungen. Es waren keine zusätzlichen Ressourcen für das Projekt notwendig.

Die von Docs in Clouds entwickelte Schnittstelle stellte einen wichtigen Beitrag zur Akzeptanz der Anwendung für mögliche Benutzer dar. Durch sie wurde eine nahtlose Einbindung des Flugsystems in bestehende Krankenhausprozesse ermöglicht, wodurch ein durchgängiger Informationsfluss zwischen den beteiligten Einrichtungen sichergestellt werden konnte. Damit leistet die Schnittstelle nicht nur einen technischen, sondern auch einen strukturellen Beitrag zur Integration der Lösung in den realen Krankenhausalltag.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse bieten eine belastbare Grundlage für die zukünftige Integration von UAS (Unmanned Aircraft Systems) in die medizinische Versorgung. Die im Rahmen von EULE konzipierten Routinerouten, die Evaluation medizinischer Transportgüter und die Erkenntnisse zur Nutzerakzeptanz bilden die Basis für weitere klinische Implementierungen. Perspektivisch könnten die entwickelten Konzepte über den klinischen Bereich hinaus Anwendung finden – etwa bei der Versorgung von Pflegeeinrichtungen oder Arztpraxen im ländlichen Raum. Eine Nutzung der Ergebnisse ist zudem in zukünftigen Forschungsprojekten (z. B. Folgeanträgen im EU- oder BMBF-Kontext) vorgesehen.

Darüber hinaus sollen die im Projekt EULE erzielten Ergebnisse nicht nur auf nationaler Ebene, sondern insbesondere auch im internationalen Kontext weiterentwickelt werden. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf grenzüberschreitenden Transporten medizinischer Güter – etwa im Dreiländereck und der Euregio Maas-Rhein. In dieser Region befinden sich Krankenhäuser aus verschiedenen Ländern in unmittelbarer geografischer Nähe, wodurch eine verstärkte Kooperation und Vernetzung im Gesundheitswesen sowohl sinnvoll als auch praktisch umsetzbar erscheint. Das Projekt EULE leistet damit einen Beitrag zur Diskussion über die Harmonisierung von Regularien und logistischen Schnittstellen im europäischen Raum.

Zudem fließen die Erkenntnisse aus EULE auch in die medizinische Lehre am Universitätsklinikum Aachen ein. In verschiedenen Lehrveranstaltungen, Seminaren und interdisziplinären

Qualifikationsprofilen werden Inhalte des Projekts vermittelt. Studierende erhalten dadurch einen praxisnahen Einblick in die Potenziale drohnengestützter Technologien für die Gesundheitsversorgung und lernen zukünftige Versorgungsmodelle im Kontext der digitalen und logistischen Transformation kennen.

Die im Projekt erzielten Ergebnisse leisten einen direkten Beitrag zur Weiterentwicklung der Droniq-Systeme: Das UTM-System wurde funktional erweitert und erstmals mit APIs zur Integration von U-Space-Services ausgestattet. Parallel wurde das Hook-In-Device (HID) über praktische Erprobung zur Version HOD V3 weiterentwickelt. Diese neue Transpondergeneration ermöglicht eine zuverlässige elektronische Sichtbarkeit von Drohnen im Luftraum und ist bereits in weiteren Anwendungsfällen einsetzbar. Damit stärken die Ergebnisse das Angebot sicherheitsrelevanter U-Space-Technologien. Die Systeme sind unmittelbar verwertbar für kommerzielle Anwendungen, etwa in der medizinischen Drohnenlogistik oder im infrastrukturellen Monitoring, und bilden eine robuste Basis für die künftige Skalierung des Drohneneinsatzes im kontrollierten Luftraum.

Durch die Anpassungen und die Entwicklung einer eigenen Software zur Steuerung des Roboters werden die Nutzungsmöglichkeiten nicht nur auf das Projekt *EULE* beschränkt, sondern auch für andere Anwender:innen erweitert. Der entwickelte und veröffentlichte Treiber ermöglicht eine bisher nicht mögliche Echtzeitsteuerung des Roboters. Darüber hinaus wurde im Rahmen des Projekts Material gesammelt, dass als Grundlage für künftige Veröffentlichungen, Folgeprojekte oder wissenschaftliche Arbeiten genutzt werden kann. Diese Basis trägt zur Weiterentwicklung des Forschungsfeldes bei und schafft Anknüpfungspunkte für weiterführende Projekte.

Die erarbeiteten Ergebnisse und die im Projekt eingesetzte Hardware sollen zudem in Lehrveranstaltungen, wie z. B. Praktika verwendet werden. Dies bietet Studierenden und Forschenden die Möglichkeit, während ihrer Ausbildung praktische Erfahrungen zu sammeln und von den technologischen Fortschritten zu profitieren.

Ein weiterer Beitrag des Projekts ist die Bereitstellung der während der Tests erfassten Winddaten in der mCLOUD/mobilithek. Diese Daten stehen damit auch anderen Forschenden oder Interessierten zur Verfügung, die sie für eigene Untersuchungen nutzen können. Diese offene Verfügbarkeit unterstützt die Forschungsgemeinschaft und fördert die Weiterentwicklung in verwandten Bereichen. Außerdem ermöglichen die im Projekt erzielten technologischen Fortschritte eine Weiterverwendung in anderen Kontexten, wie zum Beispiel im Bereich der Urban Air Mobility oder für zukünftige Entwicklungen von Lufttaxis. Die erarbeiteten Lösungen bieten hier Potenzial, um innovative Mobilitätskonzepte im urbanen Raum weiter voranzutreiben.

Die Ergebnisse der Stadt Aachen können in zukünftige städtische Innovationsprojekte überführt werden. Die erarbeiteten Beteiligungsformate, Kommunikationsmaterialien und Erkenntnisse zur Akzeptanz bilden die Grundlage für Folgeprojekte im Bereich smarter Mobilität und Luftfahrtintegration. Die Stadt plant, ihre Rolle in Netzwerken wie UIC2 weiter auszubauen.

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes EULE werden durch die flyXdrive auf unterschiedlichen Ebenen verwertet. Vor dem Hintergrund der stattfindenden regulatorischen Änderungen beim Betrieb von unbemannten Luftfahrzeugen bot sich für die flyXdrive die Gelegenheit, seine technologische Kompetenzfrüh am Markt zu etablieren. Im Projekt wurden die Grundlagen gelegt und noch offenen Punkte detektiert, um einen Ad-hoc Service 24/7 zwischen Mönchengladbach, Euskirchen, Aachen/Heerlen/Maastricht betreiben zu können und damit die vergleichsweise aufwändigen

Einzeltransporte über Straßen zu ersetzen. Dafür wurde eine zentrale Leitstelle aufgebaut und von der aus mehrere Flugsysteme mit den entsprechenden MedPorts in einen Dauerbetrieb übergehen können. Innerhalb von 2 bis 5 Jahren nach Projektende sollen alle erforderlichen Arbeiten die Umsetzung dieser Version abgeschlossen sein.

Zudem ermöglicht der kommerzielle Betrieb unbemannter Flugsysteme außerhalb der Sichtweite, wie die flyXdrive ihn verfolgt, weitere Anwendungsfälle vor dem Hintergrund des stark wachsenden Bedarfs an Informationsbereitstellung im industriellen Umfeld. Hier sind beispielweise Inspektionen von Industrieanlagen, bzw. Energieinfrastrukturen, Umwelt- und Naturschutzaufgaben oder auch die Erfassung von Verkehrsdaten zu nennen. Für solche Anwendungen sind eine sichere Integration in den Luftraum sowie die Überwachung der Flüge über eine Leitwarte zwingende Voraussetzungen. Eine kommerzielle Verwertung von Entwicklungen, die auf Grundlage der im Projekt getätigten Arbeiten entstanden sind, sind schon kurz nach Abschluss des Projekts absehbar und weisen eine deutliche Überlegenheit gegenüber Konkurrenzlösungen auf.

Die RWTH Aachen University ist eine Körperschaft öffentlichen Rechts. Als Teil der RWTH Aachen verfolgt das Institut für Flugsystemdynamik keine wirtschaftlichen Verwertungsziele. Stattdessen richtet sich der Hauptfokus auf Wissensbildung und Verbreitung der erzielten Erfahrungen durch wissenschaftliche Publikationen, Teilnahme an Konferenzen und den wissenschaftlichen Austausch in der Fachgemeinschaft. Eine weitere Verwertung der im Projekt erzielten Ergebnisse zielt auf die Schärfung des wissenschaftlichen Profils und der Kompetenzen des Instituts sowie der Ausbildung von Studierenden und Nachwuchswissenschaftlern. Außerdem wurden in mehreren Studienarbeiten Studierenden die Möglichkeit gegeben im Rahmen des Projektes EULE ihre Kenntnisse zu vertiefen und Erkenntnisse beizutragen. Die Verwertung und Nutzung der im Projekt erzielten Ergebnisse geschieht am Institut für Flugsystemdynamik in Form von Aufbau von Expertise, Wissenstransfer und der Ausbildung von Studierenden. Demonstratoren, Testumgebungen und Algorithmen werden weiterentwickelt und stehen künftigen Vorhaben zur Verfügung. Teile der im Projekt erlangten Fachkompetenz werden in weiteren Projekten mit internationalem Bezug weiterverwendet.

Eine direkte kommerzielle Verwertung der im Projekt entwickelten Lösung durch die Docs in Clouds ist derzeit nicht vorgesehen. Dennoch bieten die erzielten Ergebnisse ein hohes Potenzial für eine spätere Nutzung, insbesondere durch die vollständige Entwicklung einer grafischen Benutzeroberfläche (GUI), die auch unabhängig vom Projektkontext im Krankenhausumfeld einsetzbar ist. Voraussetzung für eine praktische Anwendung bleibt jedoch die Verfügbarkeit externer Partner, die den operativen Flugbetrieb bereitstellen können. Ein besonders wertvolles Ergebnis stellt die auf dem Matrix-Protokoll basierende Kommunikationslösung dar, die sich bereits in weiteren Projekten als flexibel, sicher und vielseitig einsetzbar erwiesen hat und damit langfristig zur technologischen Basis weiterer Anwendungen im Bereich der Telemedizin wird.

2.5 Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit wurden diverse Fortschritte in verwandten Projekten bekannt. Besonders erwähnenswert ist das EU-Projekt SAFIR-Med, das neue Standards im Bereich der BVLOS-Flüge (Beyond Visual Line of Sight) setzte und konkrete Handlungsempfehlungen zur gesellschaftlichen Akzeptanz formulierte. Im Austausch mit dem Projekt Medifly2 konnten wertvolle Erkenntnisse zur urbanen Luftraumintegration und zu Genehmigungsverfahren gewonnen werden. Auch nationale Entwicklungen, wie die Weiterentwicklung des Projekts FlowPro zur Prozessoptimierung im medizinischen Drohnentransport, wurden im Projektverlauf berücksichtigt.

Der Transport von Gütern mithilfe von unbemannten Fluggeräten wird zum aktuellen Zeitpunkt von verschiedensten Forschungseinrichtungen und Unternehmen vorangetrieben. Die FH Aachen hat mit dem medPort eine kompakte und vollautomatisierte Bodenplattform entwickelt, welche ein schwebendes Fluggerät aus der Luft greifen kann zur anschließenden Handhabung, Verladung weiterer Güter und erneutem Start. Bodenplattformen für (unbemannte) Fluggeräte wurden bereits in der Vergangenheit vorgestellt. Besonders bei der Landung auf maritimen Fahrzeugen ist ein aktiver geregelter Fangmechanismus sinnvoll, um die Schwankungen des Untergrunds auszugleichen. Im medizinischen Bereich setzt das Unternehmen Matternet erste automatisierte Bodenplattformen für Kurzstreckenflüge innerhalb eines Stadtgebiets ein. Dabei handelt es sich jedoch um eine passive Landeplattformen. Das Unternehmen Quantum Systems stellte 2022 im Rahmen des mFUND-Projekts *FreeRail* den *Drone Port* vor, eine robotisch gestützte Bodenplattform. Im Vergleich zum medPort ist diese Bodenplattform für einen anderen, leichteren Flugzeugtyp ausgelegt (5.8 kg Tilt-Rotor UAV im Vergleich zu dem in EULE eingesetzten 8.5 kg Tilt-Wing UAV). Des Weiteren wird in EULE eine andere Fangstrategie verfolgt. Während sich das Fluggerät im Drone Port auf einen horizontal verfahrenen Greifer herabsenkt, wird es in im medPort aktiv aus der Luft gegriffen. Der Zugriff wird somit nicht durch das herabsinkende Fluggerät bestimmt, sondern wird zum optimalen von der Regelung der Bodenplattform durchgeführt. Das Fluggerät schwebt dabei passiv und wird nur über den Erfolg des Zugriffs informiert, um die Motoren zu deaktivieren.

Neben dem Projekt EULE gibt es weitere Projekte, die sich mit der Verwendung von Drohnen für medizinische Transporte befassen. Zum Beispiel Projekte mit Fokus auf die praktische Erprobung medizinischer Drohnenlieferungen.

Projekt MediCargo (ADAC Luftrettung & DRK-Blutspendedienst)

Ziel dieses Projekts war die Entwicklung eines standardisierten Drohnensystems für zeitkritische Transporte medizinischer Güter zwischen Einrichtungen wie Kliniken und Blutbanken. In Zusammenarbeit mit dem Universitätsklinikum Ulm, dem DRK-Blutspendedienst und der Multirotor GmbH wurden über 100 erfolgreiche Flüge durchgeführt. Die Transportzeit wurde dabei im Vergleich zu herkömmlichen Methoden um den Faktor fünf reduziert. Besonders hervorzuheben ist die gelungene Integration der Drohnenflüge in die bestehende Luftrettungsinfrastruktur – ein Schritt, der auf den in EULE entwickelten UTM- und Transponderlösungen aufbaut, wenngleich das Projekt unabhängig von EULE durchgeführt wurde.

Europäisches Projekt TCS, ANWB & ÖAMTC

Dieses trilaterale Projekt zielte auf die Erprobung grenzüberschreitender medizinischer Drohneinsätze innerhalb Europas. Erste Tests zeigten die Machbarkeit solcher Transporte sowie Ansätze zur Integration in bestehende Logistiksysteme. Im Fokus standen dabei regulatorische Harmonisierung und praktische Umsetzungsfragen. Auch hier finden sich Parallelen zu den technischen und regulatorischen Herausforderungen, die im EULE-Projekt adressiert wurden, etwa in der Sichtbarmachung von Drohnen im Luftraum durch Transponder und UTM-Systeme.

Beide Projekte bestätigen die Relevanz und Praxistauglichkeit der in EULE geschaffenen Grundlagen und unterstreichen deren übertragbaren Nutzen im medizinischen Drohnenmarkt.

2.6 Veröffentlichungen der Ergebnisse

Neben den bereits erfolgten Präsentationen auf dem EEBA-Treffen 2023 und dem ICEM 2024 in Taiwan sind zwei wissenschaftliche Publikationen in Vorbereitung. Die erste zielt auf die Darstellung der

Ergebnisse der Machbarkeitsstudie zur Sicherheit des Drohnentransports von Hornhautpräparaten. Die zweite Publikation adressiert die logistischen Herausforderungen, technische Anpassungen sowie die Ergebnisse der Temperaturstudien. Beide Publikationen werden „open access“ veröffentlicht. Darüber hinaus wurde ein Whitepaper zum Lufttransport medizinischer Güter erstellt, das als Handreichung für Kliniken und Logistikdienstleister dienen soll.

Das Projekt EULE wurde zu unterschiedlichen Gelegenheiten präsentiert. Im Rahmen verschiedener Treffen mit dem Arbeitskreis Luft im Kompetenznetzwerk automatisierte und vernetzte Mobilität „innocam.NRW“ wurde EULE vorgestellt (Beiratssitzung am 18.11.2022, Arbeitskreistreffen am 24.11.2022 in Düsseldorf, Arbeitskreistreffen Innocam.Luft am 23.06.2024 und einem Netzwerktreffen am 28.11.2024 in Köln). Besonders hervorzuheben ist der daraus resultierende, konstruktive Austausch mit der Firma Koerschulte, Lüdinghausen (Austauschtreffen 03.11.2022), die auch im Sektor der medizinischen, unbemannten Transporte tätig sind.

Des Weiteren wurden zur Zwischendemo des Projekts Interviews von der Stadt Aachen mit der flyXdrive-Geschäftsführerin Johanna Holsten durchgeführt (20.11.2023), und in Anwenderworkshops 27.06.2024 und 23.10.2024 gemeinsam mit dem Konsortium in Aachen veranstaltet.

Am 03.04.2025 fand die Abschlusspräsentation am UKA Aachen statt und auch über das Projektende hinaus gab es weitere Möglichkeiten der Vorstellung des Projekts, wie am 26.06.2025 beim mFund Vernetzungstreffen in Jülich oder Panel-Talks wie am 05.02.2025 in Hamburg (Urban Air Mobility).

Im Rahmen des Projekts wurde von der FH Aachen ein Konferenzbeitrag bei der CEAS EuroGNC an der University of Bristol, UK (12.06.2024 – 14.06.2024) veröffentlicht:

- Vincent Konnow, Jannes Terlau, Lukas Hildebrand, Philipp Hartmann. „Robot Assisted Landing Process of small UAVs using Decentralized Kalman Filter“. In: Proceedings of the 2024 CEAS EuroGNC conference. CEAS-GNC-2024-084. Bristol, UK, Juni 2024.

Eine weitere Veröffentlichung mit den finalen Ergebnissen des Forschungsprojekts ist aktuell in Arbeit. Zudem wurden im Rahmen des Projekts an der FH Aachen folgende Studienarbeiten durchgeführt:

- Enes Tokbay. „Inverse Kinematik für den Fangprozess“. Praxisprojekt, FH Aachen, 2024.
- Chiara Wainer. „Optisches Flugsystemtracking und Sensordatenfusion“. Praxisprojekt, FH Aachen, 2024.
- Chiara Wainer. „Kalman-Filter für die Inertialnavigation mit optischer Stützung und fragmentierten Sensordaten“, Bachelorarbeit, FH Aachen, 2024.
- Vincent Konnow. „Entwicklung und Analyse einer Echtzeit-Systemarchitektur für die roboterunterstützte Landung schwebefähiger Fluggeräte“. Masterarbeit, FH Aachen, 2023.
- Jannes Terlau. „Modellprädiktive Trajektorienplanung für robotisch assistierte Landungen unbemannter Flugsysteme“. Masterarbeit, FH Aachen, 2025.

Die Fortschritte und Ergebnisse aus dem EULE-Projekt wurden Droniq-seitig auf der eigenen Webseite veröffentlicht (www.droniq.de). Hier wurden im Blog auch Konsortialtreffen, die Zwischendemonstration und das Abschlusstreffen dokumentiert und der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Außerdem wurden Neuigkeiten zum Projekt auf Droniqs Social Media-Kanälen veröffentlicht.

Am FSD sind im Projektverlauf die folgenden Veröffentlichungen entstanden:

- L. Danielmeier, S. Seitz, I. Barz, P. Hartmann, M. Hartmann and D. Moormann, "Modified Constrained Wavefront Expansion Path Planning Algorithm for Tilt-Wing UAV," 2022 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Dubrovnik, Croatia, 2022, pp. 676-685
- L. Danielmeier, S. Seitz, M. Hartmann, N. Voget and D. Moormann. „Multi Method Local Path Planning Considering Flight Dynamics Constraints for Collision Avoidance“ In 14th annual International Micro Air Vehicle Conference and Competition (pp. 200-207).
- Müller, P.; Sturm, A.; et al. (2025): „Missionsplanung und Disponierung von unbemannten Fluggeräten für den Transport medizinischer Güter.“ Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V.. (Text).

Die wissenschaftlichen Ergebnisse sind zudem Teil der folgenden studentischen Arbeiten:

- Atlas Türksan. „Entwicklung eines Bahnplanungsmoduls für UAVs in der horizontalen Ebene“. Bachelorarbeit, RWTH Aachen, 2024.
- Lukas Bucker. „Parameterstudie eines Object Detection Models zur Steigerung derer Effizienz und Güte“. Bachelorarbeit, RWTH Aachen, 2024.

Außerdem wurde die Arbeit durch verschiedene studentische Hilfskräfte unterstützt.

Die Stadt Aachen war verantwortlich für die Website (www.eule-mfund.de), die laufend mit Artikeln und Berichten ergänzt wurde. Zusätzlich wurden Projekthinhalte über die Seite www.urbanairspace-ac.de verbreitet. Es erschienen Pressemeldungen, Eventberichte und Social-Media-Beiträge über die Kanäle der Wirtschaftsförderung sowie des OecherLab und FutureLab. Der von der Stadt verantwortete Erklärfilm wurde auf Messen, im OecherLab, auf EULE-Veranstaltungen und online gezeigt. Die Bürger*innenwerkstatt wurde dokumentiert und aufbereitet.

3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Übersicht über die Operational Volumes im Fluggebiet Hürtgenwald	15
Abbildung 2 Aufbau Gesamtsystem EULE	17
Abbildung 3 Systemarchitektur des Subsystem medPort.....	17
Abbildung 4 Überblick über die Komponenten der Kommunikationsarchitektur.....	19
Abbildung 5 Login-Seite der EULE-Benutzeroberfläche.	20
Abbildung 6 Auf der "Übersicht"-Seite werden aktive Aufträge angezeigt und auf einer Karte visualisiert.....	20
Abbildung 7 Oberfläche zum Anlegen eines neuen Transportauftrags.....	21
Abbildung 8 Eine interaktive Anleitung führt den Nutzer interaktiv durch den Be- und Entladeprozess	22
Abbildung 9 : Integration in bestehende Informationssysteme könnte über die FHIR-Datenstrukturen SupplyRequest und SupplyDelivery erreicht werden	22
Abbildung 10 Ablauf des Erstellens eines neuen Transportauftrags	23
Abbildung 11 Konzept eines erweiterten Datenmodells, welches logistische Daten von medizinischen Daten trennt	24
Abbildung 12 Ablauf des gesamten Transportprozesses.....	24
<i>Abbildung 13: Ausschnitt aus den definierten M2M-Nachrichten zwischen FH Aachen und FSD</i>	<i>26</i>
Abbildung 14 Nutzlastbehälter zum Anbringen am Flugsystem mit Öffnung zur Aufnahme eines Augenhornhaut-Transportgefäßes	28
Abbildung 15 Sensorsystemprototyp zur Überwachung der Transportparameter während des Fluges	29
Abbildung 16 ESP-Telemetriemodul mit Antenne im TW-Neo	29
Abbildung 17 Funkschnittstellentest	30
Abbildung 18 Synchronisierungstests.....	30
Abbildung 19 Benötigte Achsgeschwindigkeiten des Roboters bei mittleren Windgeschwindigkeiten von 11 m/s. Links: Gesamte Simulationsdauer. Rechts: Detailansicht 10 Sekunden-Abschnitt	33
Abbildung 20: Analyse des Arbeitsraums. Links: Neutralpose des Roboters. Rechts: Darstellung der Konditionszahl des Roboterarbeitsraums.....	34
<i>Abbildung 21: Robotergreifer in finaler Iteration</i>	<i>35</i>
<i>Abbildung 22: Dummy-Flugsystem im Greifer am Roboter</i>	<i>35</i>
<i>Abbildung 23: Darstellung des vom Tracking-System detektierten Fluggeräts und des Greifers (links) und Foto der Szene (rechts)</i>	<i>36</i>
<i>Abbildung 24: Aufbau des medPorts im Labor mit überlagerten Daten des optischen Trackingsystems</i>	<i>37</i>
<i>Abbildung 25: Kalman-gefilterte Daten, Ausfälle des Kamera-Systems in grau markiert</i>	<i>38</i>
<i>Abbildung 26: Zustandsautomat zur Steuerung des Roboters</i>	<i>40</i>
<i>Abbildung 27: Ausschnitt aus dem genutzten Behavior-Tree</i>	<i>41</i>
<i>Abbildung 28: Aufbau des medPorts. Oben: Rendering der CAD-Konstruktion. Unten links: Visualisierung in RViz. Unten rechts: Realer Aufbau auf verankerter Bodenplatte im Laborbetrieb.....</i>	<i>42</i>
<i>Abbildung 29: Phasen des Fangprozesses</i>	<i>44</i>
<i>Abbildung 30: Betrieb des medPorts bei Feldtests</i>	<i>45</i>
Abbildung 31 PCIs mit denen das Endgerät jeweils während drei der Messflüge verbunden war	46
Abbildung 32 Ergebnisse der Messung während der drei durchgeführten Messflüge	47
Abbildung 33 Ergebnisse der Messungen der RSRP entlang der Messflugstrecke	48

Abbildung 34 Übersicht einer komplexen Flugmission	50
Abbildung 35 Analyse der Populationsdichten entlang möglicher Flugrouten.	50
Abbildung 36 Hauptdarstellung der GCS	51
Abbildung 37 Neo Overview Plugin der GCS	52
Abbildung 38 Architektur Flottenmanagement.....	52
Abbildung 39 Ablaufplan des Flottenmanagements für EULE	53
Abbildung 40 Abbildung 5 Leitwarten Plugin Flottenmanagement	54
Abbildung 41 Zustandsautomat Missionssteuerung	54
Abbildung 42 : Die Nase des Fluggeräts zur Be- oder Entladung bereitgestellt	56
Abbildung 43 Fallschirmkonzeption und FTS.....	58
Abbildung 44 Fallschirm-Erprobungsflugversuche	58
Abbildung 45 Synthetisches Trainingsbild	60
Abbildung 46 Precision-Recall Curve	61
Abbildung 47 Objekterkennung vom trainierten Netz	62
Abbildung 48 Kollisionswarnung	62
Abbildung 49 Ausweichmanöver mit anschließender Rückkehr auf Ursprungsbahn	64
Abbildung 50 Umfrageergebnis Kenntnisse Urban Air Mobility	65
Abbildung 51 Umfrageergebnis Urban Air Mobility	65
Abbildung 52 Umfrageergebnis Urban Air Mobility Konzept Stadt Aachen.....	66
Abbildung 53 Umfrageergebnis zur „Besorgnis“ vor und nach der Bürger*innenwerkstatt.....	67
Abbildung 54 Umfrageergebnis Erwartungen Bürger*innenwerkstatt	68
Abbildung 55 Mindmap Bürger*innenwerkstatt	69
Abbildung 56 Methodisch aufbereitete Sammlung möglicher Transportgüter auf Routinerouten	72
Abbildung 57 Eindruck vom Anwenderworkshop	73
Abbildung 58 Flugroute der Machbarkeitsstudie über dem Hürtgenwald	74
Abbildung 59 Vergleich der transportierten Hornhäute (jeweils n=20) nach Transportmittel (PKW vs. Drohne).....	75
Abbildung 60 Temperatur-messung im Transport-medium mit Wärmequellen	75
Abbildung 61 Beladevorgang im „medPort“ auf dem Gelände im Nordbereich des Universitätsklinikums Aachen	77
Abbildung 62: Zwischendemonstration der Bodenplattform medPort.....	78
Abbildung 63: Fangvorgang der Zwischendemonstration	79

4 Glossar

ADS-B	Automatic Dependent Surveillance - Broadcast
AP	Arbeitspaket
API	Application Programming Interface (Programmierschnittstelle)
ATM	Air Traffic Management
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung der Bundesrepublik Deutschland
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BOS	Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben
BVLOS	Beyond Visual Line of Sight
COWEX	COntained Wavefront EXpansion
CAD	Computer Aided Design
DFS	Deutsche Flugsicherung DFS GmbH
DiC	Docs in Clouds Telecare GmbH
EASA	European Union Aviation Safety Agency
EULE	Europäische UAV unterstützte Transportlösungen für medizinische Güter
FHIR	Fast Healthcare Interoperability Resources
FLARM	„Flight Alarm“ Verkehrsinformations- und Kollisionsvermeidungssystem
flyXdrive (FXD)	flyXdrive GmbH
FTS	Flight Termination System
GCS	Ground Control Station
Geoservice	Service zur Speicherung von Geodaten
GIS	Geographisches Informations System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GUI	Graphical User Interface
HID	Hook-In-Device
HOD	Hook-On-Device
IMU	Inertial Measurement Unit
Kalman Filter	Math. Verfahren; Schätzer für a-priori Aussagen eines dynamischen Systems auf Basis von Daten eines vorherigen Zeitintervalls
LTE	Long Term Evolution (Mobilstandard der dritten Generation)
MS	Meilenstein
SORA	Specific Operations Risk Analysis
ROS	Robot Operating System
RWTH	Rheinisch-Westfälische technische Hochschule Aachen, Institut für Flugsystemdynamik
TAP	Teilarbeitspaket
UAS	unmanned aircraft system (Unbemanntes Luftfahrzeug)
UAV	unmanned aerial vehicle (Unbemanntes Luftfahrzeug)
UI	User Interface (Benutzerschnittstelle)
UTM	Unmanned Aerial Traffic Management
UX	User Experience (Nutzererfahrung)
STAC	Stadt Aachen
Droniq	Droniq GmbH
FH	Fachhochschule Aachen
UKA	Uniklinik RWTH Aachen
VF	Vodafone GmbH