



**Hochschule für Technik
und Wirtschaft Berlin**

University of Applied Sciences

ABSCHLUSSBERICHT

WIR! - Feuerwehr der Zukunft - Konzeption, pilothafte Entwicklung und
feuerwehrtechnische Erprobung eines Löschdrohnenschwarms zur
direkten Vegetationsbrandbekämpfung (PEELIKAN)

TP2: Steuerungssoftware für Drohnenschwarm

Förderkennzeichen: 03WIR3305B

Teil 1

Kurzbericht

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Vorhabens *PEELIKAN* [12] war die prototypische Entwicklung eines Schwarms von Löschdrohnen, die für die Bekämpfung von Vegetationsbränden eingesetzt werden können. Dabei sollte das Flug- und Brandlöschverhalten der Einzeldrohnen sowie des Schwarms untersucht und weiterentwickelt werden.

Das im Rahmen dieses Kooperationsprojektes umgesetzte Konzept sieht neben dem Drohnenschwarm eine Bodenstation zum Befüllen der Wassertanks und dem Wechsel der Akkus an den Drohnen vor. Sowohl die Drohnen selbst als auch die Bodenstation wurden innerhalb des Projektes durch den Projektpartner und -koordinator *Harald Müller Metall Sonderfertigung GmbH (HMM)* entwickelt und aufgebaut.

Schwerpunkt der Arbeit der *Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (HTW)* war die Entwicklung der für die Ansteuerung der Drohnen erforderlichen Softwarekomponenten, insbesondere:

- Entwicklung der *Bedienoberfläche* für die Einsatzkräfte zur Festlegung der Löschziele und -strategien, zum Starten/ Beenden der Missionen sowie zur Überwachung des Status der einzelnen Drohnen.
- Entwicklung einer *automatischen Planung der Flugrouten* anhand der definierten Zielpunkte und der gewählten Löschstrategie sowie *Übermittlung der generierten Missionen* an die einzelnen Drohnen.
- Entwicklung von sensorbasierte Kollisionsvermeidungsstrategien, um Kollisionen der Drohnen untereinander oder mit anderen (statischen und dynamischen) Objekten zu verhindern.
- Entwicklung der *Kommunikationsschnittstellen zur Bodenstation* und die Koordination des Drohnenflugs mit den Abläufen in der Bodenstation (z. B. Freigabe der Landung auf der Bodenstation).
- Entwicklung von *Notfallstrategien*, z. B. die Notlandung einzelner Drohnen oder des gesamten Schwarms bei technischen Defekten oder das gezielte Rückholen der Drohnen (bspw. bei Missionsabbruch). Diese sollen teils über die Bodenstation ausgelöst werden, teils müssen die Drohnen diese selbst aufgrund erkannter Probleme auslösen.

In allen Verwendungsphasen war die Sicherheit des Bedienpersonals und weiterer involvierter Personen sicherzustellen.

1.2 Stand der Technik und Forschung

Schwere Drohnen erfordern wesentlich bessere, sicherere Steuerungen und speziell bei hohen Geschwindigkeiten und dem Flug außerhalb des Sichtbereiches ein sicheres System zur Kollisionsvermeidung mit anderen Flugobjekten sowie statischen Hindernissen. Hier existieren noch keine kommerziellen Lösungen, die sich als Grundlage anbieten.

Im Vorgängerprojekt zu *PEELIKAN* wurde eine Koaxialcopter-Drohne entwickelt [8], [19]. Diese sollte ursprünglich auch als Basis für *PEELIKAN* genutzt werden. Aufgrund verschiedener technischer und rechtlicher Probleme wurde zu Projektbeginn entschieden, stattdessen eine neue Drohne in Quadrocopter-Bauweise zu entwickeln und verwenden. Die bereits mit dem alten Drohnentyp gewonnenen Erfahrungen zu großen lasttragenden Drohnen konnten deshalb nur teilweise auf das neue Projekt übertragen werden.

Es zeigte sich, dass die Anforderungen an Software und Sensorik, insbesondere zur Vermeidung von Kollisionen komplex sind. Bei den hohen Fluggeschwindigkeiten (im Projekt maximal 60 km/h) können statische Objekte noch in vertretbarem Maße behandelt werden; Kollisionen mit dynamischen Objekten sind mit der verwendeten Sensorik [29] nur bedingt detektierbar. Problematisch bei der hohen Geschwindigkeit ist die Sicherstellung des freien Luftraums. Geeignete Sensoren im mittleren Preissegment können hier nur in unzureichenden Entfernungen, Messergebnisse liefern [5], [28]. Bedingt durch die notwendigen Redundanzen und Sicherheitslevel ist hier noch eine weitere umfassende Entwicklungsarbeit sichtbar geworden. Die interne Überwachung des Betriebszustandes der Drohnen zur frühzeitigen Erkennung kritischer Zustände ist elementar und musste entwickelt werden.

1.3 Ablauf des Vorhabens

Zu Beginn des Projektes wurden die relevanten Software-Frameworks [27], [6] für das Projekt definiert. Im Vergleich zum Vorgängerprojekt ergaben sich dadurch einige wesentliche Änderungen. Die Folge war, dass viele Software-Bestandteile angepasst oder neu geschrieben werden mussten.

Der Test der entwickelten Software war in drei Stufen geplant: zuerst wurde die Software in der Simulationsumgebung Gazebo [24] getestet, anschließend erfolgten reale Flugtests mit handelsüblichen Drohnen ([13], Traglast ca. 1,5 kg), auf denen auch möglichst schon die Hardwarekomponenten der großen Drohnen zum Einsatz kamen. Die abschließenden Tests wurden dann auf den großen Drohnen durchgeführt. Durch diese Aufteilung der Tests sollte die Software-Entwicklung beschleunigt und das Risiko von Abstürzen an den großen Drohnen minimiert werden. Im Projektverlauf zeigte sich allerdings, dass gerade beim Übergang zu den realen Tests noch viele Problemstellungen aufgetreten sind, die in den Simulationen nicht abgebildet wurden. Hier war noch einmal unerwartet viel Anpassungsaufwand notwendig, um das simulierte Verhalten auch auf den realen Systemen umzusetzen. Ein direkter Beginn der Entwicklung mit den kleinen Drohnen wäre wahrscheinlich effizienter gewesen. Ungeplant musste außerdem der Projektpartner HMM bei der Umstellung der Flight-Controller-Firmware unterstützt werden.

Aufgrund dieser durch verschiedene Effekte bedingten Verzögerungen wurde im Oktober 2024 (ca. 6 Monate vor Ende der Projektlaufzeit) der Arbeitsplan der HTW in Absprache mit dem Projektkoordinator angepasst und auf die für den Einsatz auf den großen Drohnen wesentlichen Funktionselemente fokussiert.

1.4 Wesentliche Ergebnisse

Umgesetzte Funktionen der entwickelten Bedienoberfläche :

- Ansteuerung mehrerer Drohnen
- Darstellung der dynamischen Drohnenpositionen auf der Karte
- Darstellung der Zustände der Drohnen visuell und textbasiert
- Festlegung von Missions- und Abwurfpunkten auf der Karte
- anhand der Festlegungen: Automatische Generierung einer Flugbahn und Übertragung der entsprechenden Missionspunkte an die individuellen Drohnen
- Abbrechen der Mission / Rückholung der Drohnen auslösen

Umgesetzte Funktionen der Drohnensteuerungssoftware:

- zyklische Ausführung einer Mission mit mehreren Missionspunkten
- Erkennung statischer und dynamischer Hindernisse und entsprechende Ausführung von Ausweichmanövern
- Erkennung von Batterieladezustand und Füllstand des Wassertanks; Übermittlung dieser Informationen an die Bedienstation und ggf. Ausführung von Notfallmanövern (z. B. bei niedrigem Ladezustand)

Ergänzend wurde ein Sicherheitskonzept für den Aufbau der Start-/Landefelder und die generelle Verwendung am Einsatzort aufgestellt und z. T. auch prototypisch umgesetzt (z. B. Landefeldüberwachung).

Teil 2

Ausführlicher Bericht

2.1 Programmcode

Die im Projekt entwickelte Software als wesentliches Ergebnis der Projektbearbeitung ist in den folgenden Repositories abgelegt:

- Software, die auf dem Companion Computer jeder einzelnen Drohne läuft:
<https://gitlab.rz.htw-berlin.de/drohenschwarum/Companion> [18].
- Software für die Bedienstation (inkl. Bedienoberfläche):
<https://gitlab.rz.htw-berlin.de/drohenschwarum/drohnenbedienstation> [17]
- Proof-Of-Concept für die automatisierte Landefeldüberwachung:
<https://gitlab.rz.htw-berlin.de/drohenschwarum/drohnen-landefeld-detektion> [16]

Die Repositories sind nicht öffentlich freigegeben. Personen, die Zugriff auf die Repositories haben möchten (Projektpartner, Projektträger, andere Interessierte) wenden sich dazu bitte per Email an:

`christian.lehmann@htw-berlin.de`.

2.2 Arbeitsplan

Der Arbeitsplan des Projektantrags gliederte sich in die folgenden Arbeitspunkte:

- AP 1: Weiterentwicklung Drohnensteuerung, Steuerung im Schwarm, Bedienkonzept
- AP 2: Entwicklung und Ausstattung einer Beobachtungs- und Kommunikationsdrohne
- AP 3: Tests, Erprobung, Zulassung
- AP 4: Konzeption, Realisierung, Test und Inbetriebnahme Bodenstation
- AP 6: Spezielle Flugeigenschaften einer Löschdrohne
- AP 11: Optimierung und Anpassung der Bedienoberfläche für den Feuerwehreinsatz

Dieser Arbeitsplan basierte u. a. auf der Annahme, dass die im Vorgängerprojekt entwickelte Koaxialcopter-Drohne [19] als Basis für die Weiterentwicklung des Drohnenschwarms geeignet ist. Aufgrund verschiedener technischer und rechtlicher Probleme wurde zu Projektbeginn aber entschieden, stattdessen eine neue Drohne in Qudarocopter-Bauform zu entwickeln. Dadurch ergaben sich verschiedene Verschiebungen im Arbeitsplan. Im Folgenden wird pro Arbeitspaket (AP) auf die durchgeführten Arbeiten, Abweichungen vom ursprünglichen Arbeitsplan und die erzielten Ergebnisse eingegangen (nur Arbeitspakete mit HTW-Beteiligung).

2.2.1 AP 1: Weiterentwicklung Drohnensteuerung, Steuerung im Schwarm

Übergeordnetes Ziel des Arbeitspaketes war die Weiterentwicklung der für eine einzelne Drohne bestehenden Steuerung zu einer Lösung, die in der Lage ist, einen Drohnenschwarm anzusteuern (daher im Folgenden auch "Schwarmsteuerung" genannt).

Bedingt durch den Wechsel der Drohnenplattform, aber auch aufgrund von Inkompatibilitäten bei den verwendeten (und zwischenzeitlich nicht mehr aktuellen) Softwareframeworks konnten nur wenige Code-Bestandteile wiederverwendet werden. Anstatt der geplanten Weiterentwicklung war daher im Wesentlichen eine Neuentwicklung der Software notwendig. Die Erarbeitung der neuen Software hat zu einem erheblichen Mehraufwand geführt, welcher in der ursprünglichen Zeitplanung des Projekts nicht vorgesehen war.

Die Entwicklung der Schwarmsteuerung erfolgt in einer ROS2 (Robot Operating System 2) [25] Umgebung. Mit dieser können einzelne Prozesse unabhängig implementiert und getestet werden. Damit kommt es zu einer deutlichen Erleichterung bei der Integration in den Hauptprozess. Weiterhin findet damit auch eine Entkopplung der Prozesse und deren Fehlermanagement statt.

Die Schwarmsteuerung soll die folgenden Funktionen ermöglichen:

- Die Einzeldrohnen fliegen zyklisch zwischen Brand (Wasserabwurf) und Basiscontainer (Aufnahme von Wasser und Tauschen der Akkus), im Folgenden "AB-Container" genannt.
- Mehrere Drohnen fliegen die Brandstelle nacheinander an, so dass in gleichmäßigen Abständen Wasser/ Löschmittel ausgebracht wird. Auch der AB-Container wird durch die Drohnen nacheinander angefliegen (Tausch des Tanks und des Akkus kann immer nur bei einer Drohne gleichzeitig erfolgen).
- Die Drohnen beginnen und beenden die Mission auf zugewiesenen Start-/Landefeldern.
- Kollisionen der Drohnen untereinander, aber auch mit weiteren (statischen oder bewegten) Objekten werden verhindert.
- Die Sicherheit der Einsatzkräfte und weiterer Personen wird gewährleistet. Das System wird vor unbefugtem Zugriff und technischen Ausfällen von Einzelkomponenten geschützt.

Um diese Funktionen zu realisieren, wurden die folgenden Problemstellungen bearbeitet:

- *Positionsbestimmung über GPS RTK*: Insbesondere die Landung auf dem AB-Container erfordert eine genaue Positionierung der Drohne (<1 m). Dazu wurde im Projekt GPS-RTK [31] verwendet. Hierbei handelt es sich um ein Verfahren, dass die Abweichung der Position eines GPS-Sensors (Rover) mit den einer statischen Bodenstation (Base) vergleicht. Damit sind die Drohnen (Rover) in der Lage, ihre Position bis auf ± 5 cm genau zu berechnen, welches eine ausreichend hohe Genauigkeit für die Landung auf dem AB-Container und dem Landefeld darstellt. Die Übertragung der Korrekturwerte an die Drohnen erfolgt durch eine drahtlose IP-basierten Kommunikation (WLAN des AB-Containers). Außerhalb der WLAN-Reichweite werden die Daten des GPS-Sensor der Drohne ohne Korrekturwerte verwendet – die erhöhte Genauigkeit ist in dieser Flugphase nicht erforderlich.
- *Die Kommunikation zwischen Drohne und Bedienstation* über lange Wegstrecken erfolgt über Telemetriemodule der Firma RF-Design. Die Konfiguration der Module wurde durch die Partnerhochschule TH-Wildau (TH-W) erarbeitet. Entsprechend der durch die TH-W bereitgestellten Anleitung wurden die Telemetriemodule in das Gesamtsystem aus Drohnen und Bedienstation übernommen. Über diesen Kommunikationskanal können die verschiedenen Drohnen bspw. ihre Position und ihren Status an die Bedienstation übermitteln.
- *Zur Gewährleistung der Kommunikationssicherheit gegen unbefugten Zugriff* wurde im Projekt eine State-of-the-Art Studie durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass es hier zur Laufzeit des Projekts nur wenige Arbeiten im Bezug auf die Sicherheit und Verschlüsselung des im Projekt verwendeten MAVLINK-Protokolls gibt. Eine Lösung für das Problem bildet dabei MAVsec [1]. Die Integration wurde durch die HTW begonnen; in Absprache mit den Projektpartnern jedoch hinter anderen Arbeiten zurückgestellt.

- Es wurde ein *Sicherheitskonzept* zu Größe, Aufteilung und Einrichtung der Lande- und Notlandefelder aufgestellt (vgl. [4]). Teil des Konzeptes ist eine automatisierte Landefeldüberwachung (Erkennung, ob das Landefeld frei von Personen ist); diese wurde prototypisch als Proof-Of-Concept umgesetzt.
- Die *Hinderniserkennung* wurde auf Basis eines Time-Of-Flight (ToF) Sensor-Arrays (3 ToF-Sensoren Terrabee-60M) realisiert [29] und ein *Ausweichmanöver* implementiert, welches die Drohnen erkannten Objekten selbstständig ausweichen lässt.
- Es wurden weitere *Notfallstrategien/ -manöver* als Reaktion auf verschiedene Problemsituationen (z. B. Verlust GPS-Position, (ungeplant) niedriger Akkustand, Probleme an der Wasserabwurfteinrichtung, etc.) definiert. Als Reaktion auf solche sicherheitskritische Zustände kann z. B. eine sofortige Landung oder der Rückflug zu einem (Not-) Landefeld ausgelöst werden. Im Projekt wurde als Testfall der von der Flight Control Unit (FCU) bereit gestellte Batteriestatus verwendet. Bei einer Unterschreitung eines definierten Mindestladestands wird die Mission bei der betroffenen Drohne abgebrochen und diese kehrt zum Landefeld zurück. Zusätzlich können Notfallreaktionen durch die Bedienstation ausgelöst werden (z. B. Abbruch der Mission und Rückkehr aller Drohnen).
- Weiterhin wurde eine *Statusübertragung des Füllstandssensor des Wassertanks* vorbereitet. Hier wurde als Prototyp ein GPIO-Ausgang des Companion Computer (CC) verwendet, der den Wassertanksensor simuliert.
- Zur *Überprüfung der Wasserausbringung über der Brandstelle* wurde die Verwendung eines Thermalsensors überprüft. Der Sensor wurde im Rahmen einer Masterarbeit [3] auf einer Drohne integriert und die Erkennung von Brandherden (Fläche ab 1 m²) während des Flugs nachgewiesen. Eine Integration des Systems in den Hauptprozess der Drohnensteuerung wurde nicht durchgeführt

Tabelle 2.2 zeigt die im AP 1 beschriebenen Ziele laut Projektplan im Vergleich zu den von der HTW im Projektzeitraum erreichten Zielen.

2.2.2 AP 2: Entwicklung und Ausstattung einer Beobachtungs- und Kommunikationsdrohne

Die HTW war nur in einigen Unterarbeitspaketen des AP 2 involviert. Andere Unterarbeitspakete wurden durch die Kooperationspartner bearbeitet. Die Anpassung der Beobachtungsdrohne erfolgte allein durch die TH-W, die Ihre Konzepte dem geänderten Projektplan angepasst hat.

In Absprache mit der TH-W wurden der *Flugbereich* sowohl der Löschdrohnen als auch der Beobachtungs- und der Kommunikationsdrohne festgelegt. Jedem Drohnensystem wurde ein Höhenbereich zugewiesen, in dem es seine Mission ausführt. Der Flughöhenbereich wurde in der Bediensoftware mithilfe von Maximal- und Minimalwerten eingebunden. Somit werden den Löschdrohnen ausschließlich Missionen gesendet, die innerhalb der vereinbarten Flughöhenbegrenzung liegen. Eine maximale Flughöhe wurde im Projekt nicht definiert. Die minimale Flughöhe wurde anhand der durchschnittlichen Baumhöhe von 30 m auf einen Wert von 32 m gesetzt. Der Drohnenoperator ist damit jedoch in der Pflicht einen entsprechenden Wert zu ermitteln, der sich oberhalb der vor Ort befindlichen Baumkronen befindet.

Die *direkte Kommunikation zur Bedienstation* wurde sowohl auf der großen Löschdrohne (siehe Abschnitt 2.2.1) als auch den Modellen der HTW integriert und getestet. Die *Verbindung zwischen Drohne und Bedienstation über die Kommunikationsdrohne* konnte in einem Testszenario erfolgreich überprüft werden.

Zur Nachkontrolle des Flugverhaltens der Löschdrohnen ist es notwendig, ein *Datenloggersystem* zu integrieren. Dafür wurde die in PX4 vorhandenen Datenloggerfunktion eingerichtet. Die Flugdaten des Flightcontrollers werden damit auf einer in der FCU befindlichen Speicherkarte gesichert. Somit können auch bei einem Absturz oder Fehlverhalten der Drohne entsprechend notwendige Daten zur Auswertung ausgelesen werden.

Tabelle 2.3 zeigt die im AP 2 beschriebenen Ziele laut Projektplan im Vergleich zu den von der HTW im Projektzeitraum erreichten Zielen.

AP Nr.	Ergebnisse nach Projektplan	Erreichte Ergebnisse
AP1.1.1	Die Steuerungssoftware muss mit festen und insbesondere beweglichen Hindernissen sicher umgehen können und Kollisionen der Drohnen vermeiden.	Mit Hilfe von ToF Sensoren ist eine Erkennung durch die Drohne möglich. Die in [29] gezeigten Ergebnisse belegen, dass eine Detektion von verschiedenen großen Objekten sichergestellt ist. Zusätzlich wurde ein Ausweichmanöver der Drohne implementiert.
AP1.1.2	Die Steuerungssoftware muss eine große Anzahl von Drohnen (ca. 20) unterstützen. - Abstandssteuerung zwischen den Drohnen - Not-/Ersatz-/Alternativmanöver bei unvorhersehbaren Situationen (mit Notlandefeld)	Die Steuerungssoftware ist auf bis zu sieben Drohnen entwickelt worden (basierend auf der Auslegung des AB-Containers auf sieben Drohnen). Es können prinzipiell auch mehr Drohnen angesteuert werden. Bottleneck ist die aktuelle Konfiguration und Integration der Telemetriemodule. Ein Notfallmanöver kann durch die Bedienstation für alle Drohnen ausgelöst werden oder bei den einzelnen Drohnen durch die Unterschreitung des Batterieladestands.
AP1.2.2	Sichere Landung von Drohnen in verschiedenen Notsituationen; Implementierung der Szenarien auf der Basis von AP 7 (H2)	Die Landefelder der Drohnen werden vor Flugantritt durch den Drohnenoperator festgelegt. Die Startposition der Drohne wird dann intern beim ersten Start als Lande- als auch Notlandefeld durch die Drohne gespeichert. Die Landung der Drohne erfolgt mit Hilfe von GPS-RTK, das eine präzise Landung (± 5 cm) gewährleistet. Bei Ausfall von GPS RTK steht ein redundanter GPS-Sensor zur Verfügung (geringere Genauigkeit der Positionsbestimmung). Für die automatisierte Überwachung der Landefelder wurde ein Prototyp entwickelt [16].
AP1.3.1	Verfügbarkeit weiterer Betriebs- und Statusinformationen: GPS-Positionen, Löschstaus, externe und interne Temperatur, Höhe, Akkustand in der Bedienstation, evtl. Gassensoren, Infos über Rauchentwicklung	Die Statusinformationen GPS-Position, Batterieladestand, Wassertankstand werden zur Bedienstation übertragen und dargestellt.
AP1.3.2	Neben den Steuerkommandos werden auch Statusdaten der Drohne an die Bedienstation über große Entfernungen (bis 15 km) übertragen	Die Übertragung der Information über eine Strecke von bis zu 15 km wurde durch die Nutzung des Telemetriemoduls RFDesign 868 sichergestellt. Die Parametrisierung der Module erfolgte auf Grundlage der Arbeiten der TH-W.
AP1.3.3	Fotos vom Einsatzgebiet werden dem Einsatzleiter und dem Drohnenführer auch während der Mission von den Löschdrohnen bereitgestellt, damit ggf. die Routen der Drohnen und die Lösgebiete angepasst werden können	Innerhalb des Projekts wurde ein Prototyp zur Übertragung von Thermaldaten an die Bedienstation entwickelt (siehe [3]).
AP1.4	Vertiefung der Sicherheit beim Flug der Drohne und bei der Bedienung des Systems durch software- und hardwareseitige Maßnahmen wie Verschlüsselung oder optischer Käfig	Es wurden Untersuchungen zur Sicherheit von MAVSDK durchgeführt. Eine mögliche Lösung mittels MAVsecure wurde identifiziert jedoch aufgrund des hohen Umsetzungsaufwandes nicht integriert.

Tabelle 2.2: Ergebnistabelle Arbeitspaket 1

AP Nr.	Ergebnisse nach Projektplan	Erreichte Ergebnisse
AP2.1	Ausgewählte Technik ist an Beobachtungsdrohne angeschlossen und diese kann Videostreams (normal/thermal) und ggf. weitere Sensordaten an Bodenstation senden (Kommunikationssystem + Tracking Hardware angeschlossen)	Die Anpassung der Beobachtungsdrohne erfolgte allein durch die TH-W, die Ihre Konzepte dem Projektplan angepasst hat.
AP2.2	Es wurde entschieden, wie die Kommunikation zwischen Schwarm und Beobachtungsdrohne erfolgen soll (Einsatzziel/ Branderkennung festlegen). Außerdem wurde eine Strategie zum parallelen Fliegen, Starten und Landen von Beobachtungsdrohne und Schwarm entwickelt.	Die Kommunikation mit den Löschdrohnen wurde entwickelt und erfolgreich getestet.
AP2.3	Alle relevanten Daten wie Stromverbrauch, Steuerkommandos usw., die während des Fluges von den Löschdrohnen gesammelt werden, werden zur nachträglichen Auswertung verfügbar gemacht; Tools zur Datenauswertung stehen zur Verfügung	Ein Datenloggersystem wurde auf dem Flightcontroller eingerichtet.
AP2.4	Die Einhaltung der geforderten Leistungsparameter wie Flugdauer, Auftrieb, Energieverbrauch, schnelle Manövrierfähigkeit usw. wird nachgewiesen. Marktanalyse und -vergleich (Vergleich der technischen Parameter zu anderen Drohnen wie Flugtaxis)	Die Bearbeitung des Arbeitspakets konnte nicht wie geplant durchgeführt werden, da aufgrund der Neuentwicklung der Drohnen die entsprechenden Daten teilweise nicht bzw. teilweise erst zum Projektende zur Verfügung standen.

Tabelle 2.3: Ergebnistabelle Arbeitspaket 2

2.2.3 AP 3: Tests, Erprobung, Zulassung

Die in diesem Arbeitspaket vorgesehenen Flugtests mit den großen Drohnen wurden durch die Harald Müller Metall Sonderfertigung GmbH (HMM) durchgeführt. Durch die notwendig gewordene Neuentwicklung der großen Drohnen standen diese auch deutlich später als ursprünglich geplant für Tests zur Verfügung. Zudem wurden die großen Drohnen zunächst auf Basis des Systems ArduPilot entwickelt und erst zum Projektende hin zur Zielplattform PX4 migriert. Im Rahmen des Projektes konnte deshalb die Gesamtsteuerung noch nicht auf den Drohnenschwarm angewendet werden, da zu Projektende erst eine Drohne auf das zur Steuerungssoftware kompatible System umgerüstet war.

Die durch die HTW durchgeführten Tests wurden mit den kleinen Modelldrohnen durchgeführt. Mit diesen wurde die erstellte Software getestet, um Fehlverhalten, Deadlocks oder Kommunikationsprobleme zu identifizieren. In den Testszenarien wurden außerdem der Missionsablauf, die Fähigkeit eine Mission abzubrechen, die Kommunikationsstrecke und das Kollisionsvermeidungsverhalten der Drohnen getestet.

Diese Vorgehensweise hatte den Vorteil, dass die großen (kostenintensiven) Drohnen weniger Risiken bei der Erprobung ausgesetzt werden mussten. Allerdings war das Flugverhalten der kleinen Drohnen nicht sehr stabil, so dass hier - im Vergleich zu den großen Drohnen - zusätzliche Fehlermöglichkeiten bestehen (vgl. auch Tab. 2.4). Beispielsweise war die Messung der Höhe sehr ungenau, wodurch die Drohnen trotz identisch übersendeter Missionen häufig andere Bahnen flogen oder sogar abstürzten, weil sie zu dicht über dem Boden flogen. Die entsprechenden Fehleranalysen und Nacharbeiten haben im Projekt viel Zeit in Anspruch genommen und die Durchführung der Tests generell erschwert. In Tabelle 2.4 sind verbleibende Probleme aufgelistet, die im Rahmen des Projektes nicht mehr gelöst wurden und bei der Verwendung der Software ggf. zu beachten sind. In der Tabelle ist auch angegeben, welche der Probleme aus der Verwendung der kleinen Drohnen resultieren und welche ggf. auch für den Einsatz auf den großen Drohnen relevant sind.

<p>Verhalten: teilweise Abbrechen des Programms nach Übertragen der Mission</p> <p>Auswirkung (kleine Drohnen): Companion Computer wird gestoppt / Mission wird nicht gestartet</p> <p>Ursache: Telemetrieübertragungsstrecke RFD868 sendet leere Mission</p> <p>Lösung: Fehlerbehebung innerhalb der Telemetriestrecke oder Wechsel auf anderes Verfahren (Telemetriestrecke Holybro funktioniert bspw. fehlerfrei)</p> <p>Auswirkung (große Drohnen): gleiches Problem, da gleiche Telemetriemodule verwendet; Fehleranalyse in der Telemetriestrecke notwendig</p>
<p>Verhalten: Mehrfachstart des „Arm“-Befehls (Aktivieren der Motoren)</p> <p>Auswirkung (kleine Drohnen): verzögerter Missionsstart</p> <p>Ursache: aufgrund ungenauer GPS-Position oder bei schief stehender Drohne gerät die FCU in einen Fehlerzustand (dadurch kein Ausführen des Befehls)</p> <p>Lösung: Prüfung des FCU-Zustands vor Senden des Befehls; Anzeige Fehlerzustand auf Bedienoberfläche; Verwendung andere GPS-Module</p> <p>Auswirkung (große Drohnen): voraussichtlich wenig bis keine – die großen Drohnen verwenden andere (genauere) GPS-Module und sind durch Bodenebenheiten weniger stark beeinflusst</p>
<p>Verhalten: Drohne weicht von eingestellter Flughöhe ab</p> <p>Auswirkung (kleine Drohnen): geplante Flughöhe wird nicht eingehalten; erhöhte Kollisions- und Absturzgefahr (insbesondere bei zu niedriger Höhe)</p> <p>Ursache: ungenaue Bestimmung der Höhe über GPS</p> <p>Lösung: Messung der Höhe mit anderem System (z. B. ToF)</p> <p>Auswirkung (große Drohnen): keine, da bereits Höhenmessung über ToF integriert</p>
<p>Verhalten: Statusübermittlung vom AB-Container nicht möglich</p> <p>Auswirkung (kleine Drohnen): Drohne kann Zustand AB-Container nicht berücksichtigen (z. B. Warten, solange AB-Container noch belegt)</p> <p>Ursache: Problem der MAVSDK-Kommunikation¹</p> <p>Lösung: Workaround über Zeitsteuerung möglich, aber nicht zuverlässig; anderen Kommunikationsweg verwenden (z. B. WLAN des AB-Containers) oder Behebung des MAVSDK-Fehler abwarten</p> <p>Auswirkung (große Drohnen): identisches Problem</p>
<p>Verhalten: Objekte werden durch ToF-Sensor (zu) spät identifiziert</p> <p>Auswirkung (kleine Drohnen): Kollisionsgefahr bei hohen Fluggeschwindigkeiten</p> <p>Ursache: aufgrund des Strombedarfs nur ein (anstatt wie geplant drei) ToF-Sensoren verwendet und geringe Reaktionsdistanz gewählt</p> <p>Lösung: Vergrößerung der Reaktionsdistanz und Verwendung aller drei ToF-Sensoren</p> <p>Auswirkung (große Drohnen): keine, da ausreichend Energie zur Versorgung der Sensoren vorhanden</p>

Tabelle 2.4: Verbleibende Probleme beim Einsatz der Steuerungssoftware

Trotz der Einschränkungen konnten verschieden Szenarien an den Modelldrohnen getestet werden:

1. Test einer Drohne mit der Bediensoftware (vgl. Abschnitt 2.2.6) – Ergebnisse:

- Eine Mission kann durch die Bediensoftware geplant werden (Mission besteht aus Bodenstation, Flugroute und Abwurfpunkt)
- Der Drohne kann im Prozess eine neue Mission empfangen, die nach Erfüllung der bestehenden Mission geupdated wird.
- Die Mission kann während jedes Prozessschrittes der Löschdrohne durch die Bedienstation unterbrochen werden. Damit wird ein Rückflug der Drohne zum Landefeld ausgelöst. Die Drohne landet selbstständig auf dem Landefeld.
- Die Drohne ist in der Lage, Objekte in ihrer Flugbahn zu identifizieren und durch Ausweichmanöver zu umfliegen.
- Die Drohne kann mit Hilfe von GPS-RTK eine hochgenaue Landung (sowohl auf Landefeld als auch AB-Container) vornehmen.
- Statusdaten werden auf der Bedienoberfläche dargestellt.

¹<https://github.com/mavlink/MAVSDK/issues/2527>

- Die Position der Drohnen wird auf der Bedienoberfläche mit zyklischen Updates (1x pro Sekunde) dargestellt.

2. Test von mehreren Drohnen mit der Bediensoftware – Ergebnisse:

- Die Kommunikation mit mehreren Drohnen über die Telemetrestrecke (RFDesign) konnte erfolgreich getestet werden (Tests mit max. drei Drohnen gleichzeitig). In späteren Tests kam es zu nicht lösbaren Problemen beim Lesen der Statusnachrichten und der Übertragung der Missionspunkte. Dieses führte zum Abbruch des Programms im Companion Computer. Die Ausführung einer Mission mit mehreren Drohnen konnte somit nicht für alle entwickelten Funktionen vollständig geprüft werden.
- Frühe Test aus dem November 2023 zeigen jedoch die Nutzbarkeit der Drohnensoftware auch mit mehreren Drohnen.

Aufgrund der umfangreichen Abweichungen vom ursprünglichen Projektplan entfällt der tabellarische Vergleich der erwarteten und erreichten Ergebnisse.

2.2.4 AP 4: Konzeption, Realisierung, Test und Inbetriebnahme Bodenstation

Das Auffüllen der Wassertanks und das Laden der Akkus der Drohnen erfolgt an einer zentralen Bodenstation. Das im Projektantrag vorgesehene Konzept der Bodenstation als Förderband wurde nach Rücksprache mit der Feuerwehr Ludwigsfelde verworfen. Die Ausführung als Förderband wurde als nicht praktikabel und zu komplex für den Einsatzzweck bewertet. Aus diesem Grund wurde ein neues Konzept für die Bodenstation in Form eines Wechselcontainers (im Folgenden "AB-Container") aufgestellt und durch den Projektpartner HMM neu entwickelt. Die Entwicklung und Realisierung des AB-Containers lag dabei vollständig bei HMM.

Der AB-Container stellt eine Landeplattform mit einer Fläche ca. 2×2 m bereit, auf der eine einzelne Drohne landen kann. Nach der Landung wird die Drohne auf der Plattform mechanisch zentriert. Die Drohne enthält Akku und Wassertank in einer gemeinsamen Baugruppe. Diese wird automatisiert entnommen und gegen ein gefülltes und aufgeladenes Exemplar getauscht. Die leere Einheit wird innerhalb des Containers an eine Ladeposition gefahren. An dieser erfolgt die Befüllung mit Wasser und das Aufladen des Akkus. Pro Drohne im Einsatz sind jeweils drei Akku-Tank-Einheiten vorgesehen, um einen zyklischen Einsatz der Drohnen zu ermöglichen.

AB-Container (HMM) und Bodenstation (HTW) müssen miteinander kommunizieren – bspw. muss der AB-Container mitteilen, wenn er gerade durch eine Drohne belegt ist (damit keine weitere landet) oder wenn der Wechsel der Akku-Tank-Einheit erfolgt ist (Startfreigabe für die Drohne).

Es wurde eine OPC-UA-Schnittstelle entwickelt, über die die erforderlichen Informationen ausgetauscht werden können. Hierüber kann bspw. der Wechselstatus, die Lande- und Startfreigabe, als auch der Systemstatus der Anlage an die Bodenstation weitergeleitet werden, so dass die Missionen der einzelnen Drohnen entsprechend beeinflusst werden können.

Eine direkte Übertragung der Statusnachrichten an die Drohnen konnte innerhalb des Projektes leider nicht realisiert werden. Hier existiert ein Problem beim eingesetzten MAVSDK [21]. Eine entsprechende Problembewegung wurde im Repository von MAVSDK angeregt², während der Projektlaufzeit jedoch nicht umgesetzt.

Tabelle 2.5 zeigt die im AP 4 beschriebenen Ziele laut Projektplan im Vergleich zu den von der HTW im Projektzeitraum erreichten Zielen.

²<https://github.com/mavlink/MAVSDK/issues/2527>

AP Nr.	Ergebnisse nach Projektplan	Erreichte Ergebnisse
AP4.8	Es steht eine getestete Steuerungssoftware zur Verfügung mit der ein automatisierter Betrieb der Bodenstation (Container) möglich ist.	Die Implementierung der Steuerungssoftware des AB-Containers wurde durch HMM durchgeführt.
AP4.9	Die flug- und betriebsrelevanten Drohnenzustände sind zwischen Versorgungsstation und Bedienstation stets synchronisiert, damit bei Fehlverhalten sofort eingegriffen werden kann.	Eine Schnittstelle zwischen der Bodenstation und dem Container wurde entwickelt und getestet. Eine Integration der Statusnachrichten des AB-Containers in die Bedienoberfläche der Bodenstation ist nicht erfolgt.
AP4.10	Funktionsfähigkeit der Versorgungsstation auch in Sondersituationen gewährleistet - Aktualisiertes Sicherheitskonzept unter Berücksichtigung der erarbeiteten Ergebnisse im Kontext Testbetrieb, Funktionsfähigkeit Drohnen Schwarm (EASC)	Aufgrund der veränderten Umsetzung der Bodenstation durch HMM hat keine Untersuchung durch die HTW stattgefunden

Tabelle 2.5: Ergebnistabelle Arbeitspaket 4

2.2.5 AP 6: Spezielle Flugeigenschaften einer Löschdrohne

Im AP6 sollten die Flugeigenschaften der Testdrohne beobachtet werden. Die Ergebnisse der Beobachtung sollten zur Einstellung der Drohnenregler genutzt werden.

Das im Projektplan vorgesehene Ergebnis bezog sich auf die Annahme, dass die Modelldrohnen der HTW als Referenz zur Drohne von HMM genutzt werden können. Es zeigt sich jedoch, dass sich die Flugeigenschaften (und dementsprechend auch die Parameter der Flugsteuerung) der Modelldrohne (Holybro S500) stark von denen der realen großen Drohne (HMM) unterscheiden.

Andererseits wurden sowohl mit den kleinen als auch mit den großen Drohnen (der Flug erfolgte in diesen Test mit einer Handbedienung per RC-Modul) Lastabwürfe durchgeführt (kleine Drohnen: 500 g bei ca. 800 g Eigengewicht; große Drohnen: verschiedene Abwürfe bis zu etwa 30 kg). Dabei wurden keine Auffälligkeiten des Flugverhaltens festgestellt. Aus diesem Grund wurde keine genauere Analyse oder Anpassung der Reglerparameter durchgeführt.

Tabelle 2.6 zeigt die im AP 6 beschriebenen Ziele laut Projektplan im Vergleich zu den von der HTW im Projektzeitraum erreichten Zielen.

AP Nr.	Ergebnisse nach Projektplan	Erreichte Ergebnisse
AP6.1	Stabiler Flug der Drohne nach Lastabwurf (Löschmittel) Einhaltung der Flughöhe	Testabwürfe wurden durch die HTW und durch HMM durchgeführt. Es wurden keine Auffälligkeiten festgestellt.

Tabelle 2.6: Ergebnistabelle Arbeitspaket 6

2.2.6 AP 11: Optimierung und Anpassung der Bedienoberfläche für den Feuerwehreinsatz

Aufgrund des in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Mehraufwandes bei der Entwicklung der Steuerungssoftware stand eine Version der Bediensoftware, mit einem für die Usability-Tests geeigneten Funktionsumfang, erst später als geplant zur Verfügung. Anstatt die Usability-Optimierung gemeinsam mit der Feuerwehr (Endanwender) durchzuführen, hat die HTW deshalb die durch den Projektpartner HMM (Anbieter des Drohnensystems) vorgegebenen Anforderungen umgesetzt. Die Abbildung 2.1 zeigt die Nutzeroberfläche der Bedienstation zum Abschluss des Projekts.

Zum Ende des Projekts hat die Bediensoftware den folgenden Umfang:

- Anzeige der Missionsumgebung auf einer Karte.
- Eingabe der Position des AB-Containers per GPS-Koordinaten (schwarzer Marker)
- Anzeige der Positionen der einzelnen Drohnen auf der Karte mit farblicher Kennzeichnung des Drohnenstatus
- Anzeige weiterer Statusinformationen für mehrere Drohnen (unterhalb der Karte)
- Eine Missionsroute mit mindestens drei Routenpunkten kann definiert werden (blaue Linie)
- Der Wasser-Abwurfpunkt kann definiert werden (rot-transparenter Punkt)
- Die Mission kann abgebrochen werden (Notfall- oder Home-Button auf der linken Seite)
- Die Missionsroute kann gelöscht / neu definiert werden (Papierkorbbutton oben rechts auf der Karte).

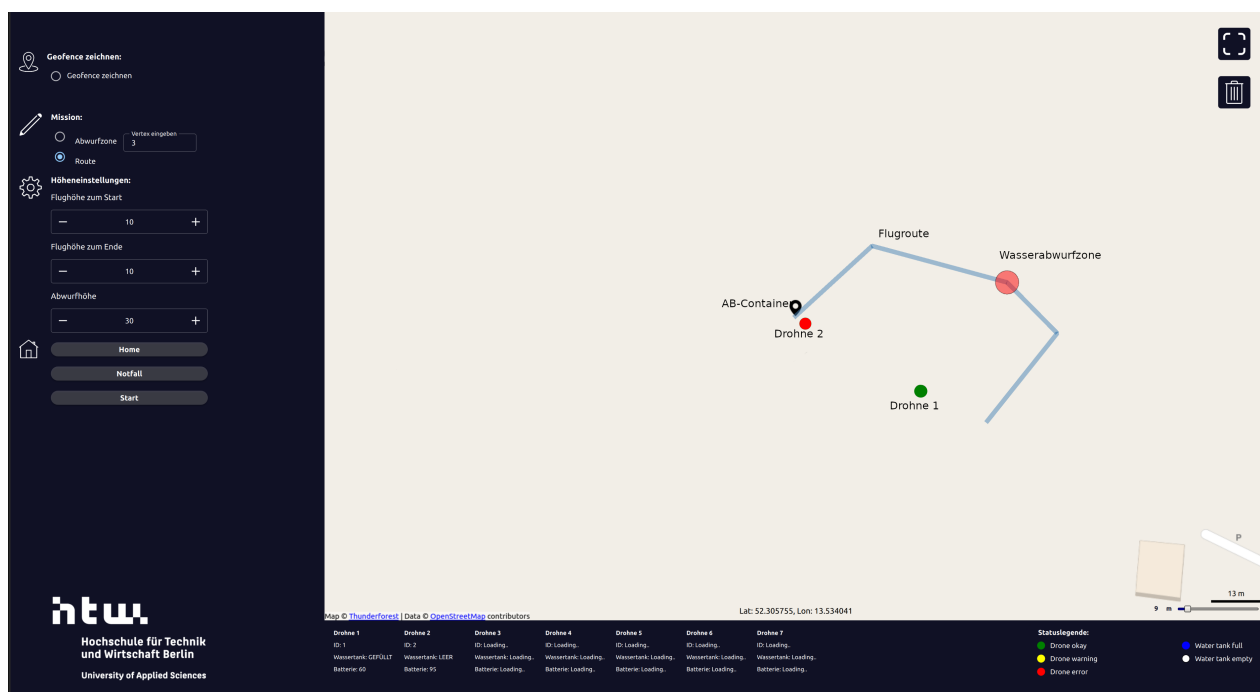


Abbildung 2.1: Bedienoberfläche zum Erstellen, Starten und Abbrechen von Missionen, mit Flugroute (blau), Abwurfpunkt (rot transparent) und AB-Container (schwarzer Marker). Der Status der einzelnen Drohnen wird in der Karte farblich gekennzeichnet; Detailinformationen finden sich im unteren Bereich.

Tabelle 2.6 zeigt die im AP 6 beschriebenen Ziele laut Projektplan im Vergleich zu den von der HTW im Projektzeitraum erreichten Zielen.

AP Nr.	Ergebnisse nach Projektplan	Erreichte Ergebnisse
AP11	Bedienoberfläche mit bester Usability, GUI verständlich für Einsatzkräfte, Vermeidung von Fehlbedienungen	Die Bedienoberfläche wurde entsprechend den Forderungen von HMM angepasst, entwickelt und getestet. Die Verständlichkeit und Nutzbarkeit durch andere Personen konnte innerhalb des Projekts nicht verifiziert werden. Eine Fehlbedienung ist nicht vollständig auszuschließen.

Tabelle 2.7: Ergebnistabelle Arbeitspaket 11

2.2.7 Auswertung

Im Projektverlauf hat sich gezeigt, dass für viele Arbeiten der im Projektplan vorgesehene Aufwand zu niedrig angesetzt war. Dies lag meist daran, dass die Arbeiten aus dem Vorgängerprojekt (Drohnenhardware, Steuerungssoftware) nicht oder nur in kleinem Umfang wiederverwendet werden konnten. Insbesondere bei der Softwareentwicklung wurden die zugrunde liegenden Probleme teils erst spät im Projektverlauf identifiziert.

Auch die stufenweise Erprobung der Software (zuerst in der Simulation, dann auf kleinen Modelldrohnen, abschließend auf den großen Löschdrohnen), die durch frühzeitige und kleinteiligere Tests die Projektbearbeitung vereinfachen sollte, hat am Ende das Projekt eher behindert als unterstützt. Wesentliche Gründe hierfür waren:

- Kommunikationsschnittstellen konnten in der Simulationsumgebung Gazebo nicht 1:1 in ihrem Verhalten nachgebildet werden, so dass entsprechende Programmbestandteile auf dem realen System nicht korrekt funktionierten (obwohl sie in der Simulation erfolgreich getestet wurden).
- Schlechte Zuverlässigkeit der kleinen Modelldrohnen (Flugverhalten, Zuverlässigkeit und Leistung der Akkus) erschwerten die entsprechenden Tests und stellten z. T. zusätzliche Fehlerquellen dar.

Ebenfalls als problematisch erwiesen hat sich die Verwendung von MAVSDK. Viele der Probleme von MAVSDK konnten nicht gelöst werden oder mussten durch zusätzliche Kommunikationsschnittstellen umgangen werden (z. B. Übertragung der GPS-RTK-Daten via WLAN).

Dennoch konnten innerhalb des Projekts viele Lösungen zum sicheren Betrieb eines Drohnenschwarms entwickelt werden. Darunter zählen:

- Implementierung und Integration eines Companion Computers zur Datenverarbeitung, Steuerung und Kommunikation auf der Drohne.
- Weiterentwicklung der Bediensoftware mit Möglichkeiten zur Steuerung und Statusüberwachung der in Betrieb befindlichen Drohnen
- Entwicklung einer Kollisionsvermeidung mittels ToF-Sensoren
- Entwicklung einer präzisen Landearchitektur auf Basis von GPS-RTK
- Entwicklung einer Schnittstelle zum AB-Container (Landeplattform)

Außerdem konnten innerhalb des Projekts mehrere studentische Projekte und Abschlussarbeiten abgeschlossen werden. Durch diese wurden verschiedene Teilaspekte des Projekts erarbeitet und so Beiträge zu den Projektergebnissen geleistet.

- Bachelorarbeit: Nutzung eines ToF-Sensors im Quadrocopter für eine Drohnensteuerung zum Löscheinsatz (Philipp Siegerist) [29]
- Bachelorarbeit: Implementierung eines Flugroutenalgorithmus zur Brandbekämpfung (Leonid Hornscheidt) [14]
- Masterarbeit: Realisierung eines Branderkennungssystems zur Waldbrandbekämpfung durch an Drohnen montierter Wärmebildtechnologie (Fabian Bressel) [3]
- Projekt: Proof-Of-Concept automatisierte Landefeldüberwachung [16]
- Projekt: Drohnenbeleuchtung für Dämmerungs- und Nachtflug
- Projekt: Entwicklung eines Gimbal zur Steuerung der Sensorblickrichtung

Die im Projekt erreichten Ergebnisse zeigen die grundlegenden Funktionen einer Drohnenschwarmsteuerung. Sie sind damit ein erster Schritt zur Applikation eines autonomen Drohnenschwarms zur Brandbekämpfung. Offene Arbeiten betreffen vor allem die zwischen Drohnen und Bedienstation eingesetzte MAVSDK-Schnittstelle und die eingesetzte Telemetriestrecke.

2.3 Wesentliche Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wesentlichen zur Bearbeitung des Projektes erforderlichen Ausgaben waren:

- *Personalkosten für wissenschaftliche Mitarbeiter:*
 - Finanzierung von zwei wissenschaftlichen Mitarbeitern während der Projektlaufzeit für Softwareentwicklung, Hardwareaufbau etc.
 - ca. 283,8 T€ von 288,8 T€ verwendet
 - zusätzlich Mitarbeit auf professoraler Ebene finanziert aus dem Grundhaushalt der Hochschule
- *Personalkosten für studentische Mitarbeiter:*
 - mehrere studentische Mitarbeiter zur Unterstützung der Softwareentwicklung
 - ca. 41,3 T€ von 62,7 T€ verwendet
 - zusätzlich zu den aus dem Projekt finanzierten studentischen Mitarbeitern verschiedene studentische Projekt- und Abschlussarbeiten
- *Kosten für Rechentechnik, Drohnen, Sensorik und sonstige Hardware:*
 - Computer zur Softwareerstellung und Simulation
 - vier Drohnen vom Typ Holybro S500 („Modelldrohnen“)
 - verschiedene Sensoren, Kameras und elektronische Kleinkomponenten für die Erprobung und zur Ausstattung der Modelldrohnen
 - ca. 11,3 T€ von 15,0 T€ verwendet

2.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die durchgeführten Arbeiten (siehe Abschnitte 2.2.1–2.2.6) waren *notwendig*, denn:

- Der geplante Einsatz für die Waldbrandbekämpfung erfordert aufgrund der begrenzten Traglast den Betrieb mehrerer Drohnen gleichzeitig. Eine manuelle Steuerung der Drohnen durch mehrere verschiedene Drohnen-PilotInnen ist nicht praktikabel. Daher ist eine automatische Steuerungslösung erforderlich, in der durch das Bedienpersonal nur noch die wesentlichen Missionseckdaten vorgegeben werden. Da – insbesondere für diesen speziellen Einsatzzweck und die erforderlichen Einzelaufgaben – keine Lösung existiert(e), musste eine solche Steuerung entwickelt werden.
- Auch die entwickelten Einzelkomponenten (Kollisionsvermeidung, hochgenaue Positionierung über GPS RTK, Schnittstelle zum AB-Container, Notlandeszenarien, etc.) ergaben sich zwingend aus dem geforderten Einsatzablauf.

Die durchgeführten Arbeiten waren *angemessen*, denn:

- Die Arbeiten waren zielführend. Die Ergebnisse der Arbeiten stellen eine wesentliche Weiterentwicklung hin zu einem einsatzfähigen Drohnensystem zur Vegetationsbrandbekämpfung dar.
- Die Vergabe eines Unterauftrags an Dritte wäre aufgrund des speziellen Themenfeldes schwierig umzusetzen und voraussichtlich mit deutlich höheren Kosten verbunden gewesen.

2.5 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Verwertung ist im Wesentlichen über den Projektpartner HMM im Zusammenhang mit der Kommerzialisierung des vollständigen Drohnenschwarm-Systems vorgesehen. Aufgrund der speziellen Systemfunktionen (z. B. Löschmittelabwurf) ist ein Vertrieb der Software ohne die Hardware, die diese Funktionen umsetzen kann, nicht sinnvoll. Genauso ist die Drohnenschwarm-Hardware ohne passende Steuerungssoftware kaum einsetzbar, da eine manuelle Ansteuerung nur bedingt möglich ist.

Als wesentliche Voraussetzung für die Verwendung der Software muss noch die Umstellung der Hardware der großen Drohnen auf das PX4-System abgeschlossen werden (vgl. Abschnitt 2.2.3). Anschließend muss das System noch mit dem großen Schwarm getestet werden. Dabei sind insbesondere die in Tab. 2.4 aufgeführten Themen zu beobachten und ggf. während der Tests identifizierte Probleme zu beheben.

Zur Sicherstellung der Verwertung der Ergebnisse wurden der Programmcode der Bediensoftware und des Companion jeweils einem Repository für die Weiterverwendung bereitgestellt [17], [18] (siehe auch Abschnitt 2.1). Dieses Repository ist nur nach manueller Freigabe einsehbar. Von unserer Seite wird der Transfer auf ein öffentlich zugängliches Repository befürwortet, damit auch andere / zukünftige Projekte die Ergebnisse als Grundlage ihrer Arbeit verwenden können.

2.6 Entwicklungen bei Dritten

Es gibt verschiedene Industrie- und Wirtschaftprojekte, die sich mit dem Thema Katastrophenschutz im Allgemeinen sowie Waldbrand-Vorsorge und -Bekämpfung im Speziellen beschäftigen.

Im Projekt *Evolonic* [10] wurde beispielsweise eine hocheffiziente Langstreckendrohne entwickelt, die sich aus der Luft mit Hilfe von RGB- und Thermalkameras auf die Suche nach ersten Anzeichen von Feuern machen kann. Eine KI-unterstützte Analyse-Software soll dabei helfen, Rauchfahnen und Hitzepunkte so punktgenau wie möglich zu erkennen.

Die Firma *Dryad Networks* [7] hat ein drahtloses Netzwerk solarbetriebener Sensoren entwickelt, das Waldbrände bereits in der Entstehungsphase erkennt. Ergänzt wird dieses System durch eine autonome Drohne, die bei einem Brandalarm automatisch startet, die Lage analysiert und künftig auch Löschnahmen einleiten soll.

Auch im deutsch-niederländischen Projekt *Emergency Drone* [9] werden Drohnen als lebensrettende Technologie für Katastrophenfälle entwickelt. Ziel ist es, Notfall-Kommunikationsnetzwerke aufzubauen, ertrunkene Personen aufzuspüren und Waldbrände frühzeitig zu erkennen, wobei Drohnen und KI innovative Lösungen bieten.

Die genannten Projekte konzentrieren sich vor allem auf die Brandentdeckung und Brandfortschrittsüberwachung sowie die Übermittlung und Analyse der erhaltenen Informationen. Sie ergänzen also sinnvoll das in PEELIKAN entwickelte Drohnensystem zur aktiven Bekämpfung der Vegetationsbrände.

2.7 Veröffentlichungen

Spezifische Teile der Projektergebnisse wurden in den im Abschnitt 2.2.7 genannten Abschlussarbeiten, veröffentlicht ([29], [14], [3], [16]). Der Programmcode wurde in Repositories hinterlegt (siehe Abschnitt 2.1), welche ohne persönliche Freigabe (siehe Abschnitt 2.1) nicht öffentlich zugänglich sind.

Durch die HTW Berlin wurden während der Projektlaufzeit keine weiteren Veröffentlichungen getätigt. Es sind aktuell auch keine weiteren projektbezogenen Veröffentlichungen geplant.

Literatur

- [1] Allouch, Azza u. a. *MAVSec: Securing the MAVLink Protocol for Ardupilot/PX4 Unmanned Aerial Systems*. <https://arxiv.org/pdf/1905.00265>. 2019.
- [2] BBK. *Fachkongress „Forschung für den Bevölkerungsschutz“*. https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Termine/DE/2027/01/27-29-fachkongress-wccb_termin.html?nn=96640. 2025.
- [3] Bressel, Fabian. *Realisierung eines Branderkennungssystems zur Waldbrandbekämpfung durch an Drohnen montierter Wärmebildtechnologie*. Masterarbeit. HTW Berlin, 2024.
- [4] Brühns, Jannis. *Steuerung eines Drohnenschwarms beim Start*. Bachelorarbeit. HTW Berlin, 2023.
- [5] cube eye. *Hersteller Website*. https://cube-eye.co.kr/old/en/#/spec/product_I200.asp. 2025.
- [6] Dronecode Foundation. *MAVSDK2.0*. <https://mavsdk.mavlink.io/v2.0/en/>. 2025.
- [7] DryAd. *MOZ*. <https://www.moz.de/lokales/eberswalde/dryad-networks-aus-eberswalde-internet-der-baeume-erkennt-braende-vor-entstehung-77950002.html>. 2024.
- [8] Elfgen, Max u. a. „Comprehensive Drone System for Deployment in Disaster Scenarios with Focus on Forest Fire Fighting“. In: *Advances and New Trends in Environmental Informatics*. https://doi.org/10.1007/978-3-031-18311-9_9. Cham: Springer Nature, 2022, S. 149–164.
- [9] Emergency Drone. *euregio*. <https://www.euregio.eu/de/aktuell/drohnen-als-lebensretter-im-katastrophenfall/>. 2024.
- [10] Evolnic. *Drones Magazin*. <https://www.drones-magazin.de/news/fire-fighter/>. 2023.
- [11] Fairnamic GmbH. *AERO Friedrichshafen - The Leading Show for General Aviation*. <https://www.aero-expo.de/>. 2025.
- [12] Harald Müller Metall Sonderfertigung GmbH. *Projektwebsite PEELIKAN*. <https://www.peelikan.de>. 2025.
- [13] Holybro. *PX4 Development Kit - X500 v2*. <https://holybro.com/products/px4-development-kit-x500-v2>. 2025.
- [14] Hornscheid, Leonid. *Implementierung eines Flugrouten Algorithmus zur Brandbekämpfung*. Bachelorarbeit. HTW Berlin, 2024.
- [15] HTW Berlin. *Fachtagung Technische Rettung - Elektro mobilität / Heavy Rescue*. <https://events.htw-berlin.de/forschung/fachtagung-technische-rettung-elektromobilitaet-heavy-rescue/>. 2025.
- [16] HTW Berlin. *Proof-Of-Concept: Automatisierte Landefeldüberwachung (PEELIKAN)*. <https://gitlab.rz.htw-berlin.de/drohnenschwarum/drohnen-landefeld-detektion>. 2025.
- [17] HTW Berlin. *Quellcode für Bedienstation Drohnenschwarm (PEELIKAN)*. <https://gitlab.rz.htw-berlin.de/drohnenschwarum/drohnenbedienstation>. 2025.
- [18] HTW Berlin. *Quellcode für Companion Computer (PEELIKAN)*. <https://gitlab.rz.htw-berlin.de/drohnenschwarum/Companion>. 2025.
- [19] Hüttinger, Gisela und Kaulich, Philipp. *Drohnen als nützliche Helfer in Katastrophen*. <https://campus-stories.htw-berlin.de/jahr/2021/drohnen-als-nuetzliche-helfer-in-katastrophen/>. 2021.
- [20] ILA Berlin. *ILA Berlin - Pioneering Aerospace*. <https://www.aero-expo.de/>. 2025.
- [21] MAVSDK. *Projekt Website*. <https://mavsdk.mavlink.io/main/en/index.html>. 2025.
- [22] Messe Dortmund GmbH. *112Rescue - For a safer tomorrow*. <https://www.112rescue.de/>. 2025.

-
- [23] Neue Messe Fulda. *FIRE mobil*. <https://neue-messe-fulda.de/events/firemobil>. 2025.
- [24] Open Robotics. *Gazebo Website*. <https://docs.ros.org/>. 2025.
- [25] Open Robotics. *ROS Developer Documentation*. <https://docs.ros.org/>. 2025.
- [26] ORTEC Messe und Kongress GmbH. *FLORIAN*. <https://www.messe-florian.de/>. 2025.
- [27] Qt Group. *Qt Framework*. <https://www.qt.io/product/framework>. 2025.
- [28] RobotShop. *Händler Website*. <https://eu.robotshop.com/de/products/xt-s1-tof-einzelpunkt-entfernungsmessung-lidar-sensor-03-30m>. 2025.
- [29] Siegerist, Philipp. *Nutzung eines ToF-Sensors im Quadrocopter für eine Drohnensteuerung zum Löscheinsatz*. Bachelorarbeit. HTW Berlin, 2024.
- [30] Universität Rostock. *MARESEC 2025 - European Workshop on Maritime Systems Resilience and Security*. <https://maresec2025.uni-rostock.de/>. 2025.
- [31] Wikipedia. *Real-time kinematic positioning*. https://en.wikipedia.org/wiki/Real-time_kinematic_positioning. 2025.