



Universität Hamburg
DER FORSCHUNG | DER LEHRE | DER BILDUNG

BACHELORTHESIS

DJI-Drohnenflüge im USSP aktivieren und überwachen

vorgelegt von

Leon Bogumil

Fakultät:	MIN-Fakultät
Fachbereich:	Informatik
Studiengang:	Software-System Entwicklung
Matrikelnummer:	6741952
Erstgutachter:	Dr. Martin Semmann
Zweitgutachter:	Dr. Guido Gryczan

1 Zusammenfassung

Mit der Durchführungsverordnung der EU-Kommission vom 22. April 2021 (U-Space Verordnung) wurde erstmalig ein allgemeingültiger Rechtsrahmen für den Drohnenflugverkehr geschaffen. Damit soll der immer relevante werdende Drohnenverkehr in der Zukunft sicher und effizient gestaltet werden.

Nach der Verordnung werden Drohnenpiloten mit U-Space Service Providern (USSP) kommunizieren müssen, um Fluggenehmigungen zu erhalten, ihre Flüge zu aktivieren und deren Routen im Netzwerk zu übertragen und identifizierbar zu machen.

In dieser Arbeit wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem insbesondere der Überwachungsprozess unter Zuhilfenahme verschiedener konzeptioneller und technischer Softwareentwicklungsmaßnahmen durchgeführt werden kann. Dafür werden Drohnenflüge des größten Drohnenherstellers Da-Jiang Innovations Science and Technology Co., Ltd (DJI) an einen USSP übermittelt und der gesamte Genehmigungsprozess wird konform mit der U-Space Verordnung durchlaufen. Dabei werden die relevanten Telemetriedaten einer DJI-Drohne direkt von der Fernbedienung an den USSP übermittelt.

Mithilfe der Methode Domain Storytelling wurde ein Interaktionsdiagramm erstellt, um einen neuen Arbeitsablauf zu modellieren, der den Eingriff in Arbeitsroutinen von DJI-Drohnenpiloten so gering wie möglich hält.

Um zu zeigen, wie die Luftraumüberwachung für DJI-Drohnen in der Praxis funktionieren kann, wurde für diese Arbeit ein bestehendes Spring Boot Projekt, das sich mit dem U-Space-Genehmigungsprozess auseinandergesetzt hat, mithilfe der Softwareentwicklungstechnik Domain-Driven Design angepasst und erweitert. Damit konnte ein funktionierendes Prototypsystem erstellt und ausprobiert werden. Dieses System wurde zunächst mit Simulationsdaten getestet und an die API eines USSPs angebunden. Anschließend wurde ein Test mit einer echten DJI-Drohne durchgeführt. Dabei konnte ein DJI-Drohnenflug erfolgreich genehmigt, aktiviert und überwacht werden.

2 Inhalt

1	Zusammenfassung	2
3	Abkürzungsverzeichnis.....	4
4	Abbildungsverzeichnis.....	5
5	Einleitung	6
5.1	Motivation.....	6
5.2	Zielsetzung	7
5.3	Aufbau der Arbeit	7
6	Problemstellung	8
6.1	U-Space Verordnung	8
6.2	Betroffene UAS.....	9
6.3	Strategisches Konfliktmanagement	11
6.4	Taktisches Konfliktmanagement	11
6.5	DJI im U-Space.....	13
7	Aktueller Forschungsstand.....	14
7.1	Erkenntnisse aus udveo	14
7.2	Einreichung von Fluggenehmigungen mittels DJI Cloud API.....	15
8	Lösungsidee.....	16
8.1	DJI Cloud API	16
8.2	Konzeptionierung mittels Domain Storytelling	17
8.3	Domain-Driven Design	19
9	Umsetzung der Lösung.....	22
9.1	Konfiguration und Anpassung der bisherigen Lösung.....	22
9.2	Umsetzung der Flugaktivierung	23
9.3	Umsetzung der Netzidentifizierung	24
9.4	Evaluation.....	26
10	Ergebnisse und Fazit.....	31
10.1	Netzidentifizierung von DJI	31
10.2	Limitierungen	31
10.3	Fazit	32
11	Ausblick und weitere Forschung	33
11.1	Entwicklung einer App zur Verwaltung der Genehmigungen.....	33
11.2	Weitere U-Space Dienste	33

11.3	Anbindung weiterer Drohnen	34
11.4	Anbindung an weitere UTM's	35
12	Literaturverzeichnis.....	36
13	Eidesstattliche Versicherung	39

3 Abkürzungsverzeichnis

ACL *Anticorruption Layer*
 BVLOS *Behind Visual Line Of Sight*
 DJI *Da-Jiang Innovations Science and Technology Co., Ltd*
 DST *Domain Storytelling*
 DTO *Data Transfer Object, Data Transfer Object*
 EASA *European Union Aviation Safety Agency*
 GNSS *Global Navigation Satellite System*
 GPS *Global Positioning System*
 HHLA *Hamburger Hafen und Logistik*
 JSON *Java Script Object Notation*
 M300 *Matrice 300 RTK*
 MQTT *Message Queuing Telemetry Transport*
 NASA *National Aeronautics and Space Administration*
 UAS *Unmanned Airspace System*
 URL *Uniform Resource Locator*
 U-Space *Universal Space*
 USSP *U-Space Service Provider*
 WGS-84 *World Geodetic System 1984*
 WPML *Waypoint Markup Language*

4 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Technische Klassifizierungen der EASA für ausgewählte Drohnen (EASA, 2023)	10
Abbildung 2: Die Bildsprache im DST (Hofer & Schwentner, 2023, S. U2)	17
Abbildung 3: DST-Interaktionsdiagramm zur Anbindung von DJI-Flügen an den U-Space	18
Abbildung 4: Erweiterung des Bounded Context "Fluggenehmigung"	20
Abbildung 5: Ports-and-Adapters-Architektur für die Anwendung	21
Abbildung 6: Genehmigter DJI-Drohnenflug im neuen USSP	23
Abbildung 7: Der aktivierte Simulationsflug wird im USSP überwacht.....	26
Abbildung 8: Die Pilot 2 App nach erfolgreicher Verbindung mit der Cloud-Anwendung.....	27
Abbildung 9: Die Matrice 300 und ihre Fernbedienung sind in der Datenbank zu sehen	28
Abbildung 10: Die Ausrichtung der Drohne zum geografischen Nordpol wurde normalisiert.	28
Abbildung 11: Die M300 wurde wegen des besseren Empfangs draußen platziert.	29
Abbildung 12: Die M300 wird im USSP überwacht.....	29

5 Einleitung

5.1 Motivation

Mit der immer weiterwachsenden Nachfrage nach Drohnen und weiteren unbemannten Luftraumsystemen, auch UAS genannt, ergibt sich eine Reihe von Herausforderungen, um den Drohnenluftverkehr sicher zu gestalten. Bis 2050 wird erwartet, dass in Europa bis zu 7 Millionen UAS im privaten Einsatz sein werden, sowie weitere 400.000 im wirtschaftlichen und staatlichen Sektor (SESAR, JU, 2016).

Neben dem Markt für private Drohnen wird der Bedarf für den industriellen Einsatz immer größer. Beispielsweise werden Drohnen schon erfolgreich für Inspektionsmissionen eingesetzt, in der Logistik gibt es erste Konzepte für Lieferdienste in der Luft und viele weitere Themenfelder werden noch erforscht (Maghazei, Lewis, & Netland, 2022). Insbesondere für Inspektionen von beispielsweise Brücken, Gebäuden oder Baustellen finden sie bereits heute einen immer breiteren Einsatz (Nooralishahi, et al., 2021).

Im Hinblick auf die immer größer werdende Drohnenflotte steigt auch der Bedarf nach einem Verkehrssicherungssystem, mit dem ein paralleler Betrieb dieser Drohnen in Europa sichergestellt werden kann. Deshalb ist 2021 die U-Space-Verordnung 2021/664 (EU-Kommission, 2021) verabschiedet worden und am 26. Januar 2023 in Kraft getreten. Diese regelt, wie in Zukunft Drohnenflüge angemeldet, aktiviert und überwacht werden sollen. Damit soll es möglich werden, einen sicheren Drohnenflugverkehr zu organisieren und dabei den Luftraum möglichst effizient nutzbar zu machen. Es wird damit möglich, selbst auch vollautomatisch fliegende Drohnen, ohne Sichtkontakt des Piloten (BVLOS) sicher in den Luftraum zu integrieren.

Nach der U-Space Verordnung buchen Drohnen einzelne Bereiche des Luftraums, der von keiner anderen Drohne zeitgleich genutzt werden darf. Um die Einhaltung dieser Vorgabe sicherzustellen, müssen die Drohnen durch einen oder mehrere USSPs ständig überwacht und im Netz identifizierbar gemacht werden. Dafür ist es erforderlich, dass die UAS-Software mit den USSPs kommuniziert, sodass diese ständig ein aktuelles Lagebild der Luftraumsituation bekommen.

Der größte Hersteller von privat und industriell genutzten Drohnen ist die chinesische Firma DJI mit einem Marktanteil von 76% im Jahre 2021 (ArcGroup, 2021). Ein erheblicher Teil der DJI-Modelle wird von der U-Space Verordnung betroffen sein. Hier besteht noch ein großer Entwicklungs- und Forschungsbedarf, um den Überwachungsprozess für DJI-Drohnen möglichst effizient implementieren zu können.

5.2 Zielsetzung

Die Zielsetzung dieser Bachelorarbeit besteht darin, aufbauend auf der Bachelorarbeit von Julian Gersch (Gersch, 2023) die verbleibenden Schritte für eine Anbindung an den U-Space zu implementieren. Nachdem in der Arbeit Fluggenehmigungen für DJI-Drohnen bei einem USSP eingereicht werden konnten, wird hier ein besonderes Augenmerk auf den Netzidentifizierungsdienst gelegt, der die permanente Echtzeitüberwachung von Drohnenflügen über das Netzwerk vorschreibt. Zu diesem Zweck muss der UAS-Betreiber die relevanten Daten an einen USSP übertragen. Außerdem wird der Fokus auf die größeren und stärker von der U-Space Verordnung betroffenen Enterprise-Modelle von DJI gesetzt und auf die technischen Herausforderungen, die es für diese Modelle zu bewältigen gilt. Ziel ist es, einen klaren Überblick über die erforderlichen Entwicklungsschritte zu präsentieren, um eine erfolgreiche Anbindung von DJI-Drohnen an den U-Space zu ermöglichen. Als Ergebnis dieser Arbeit strebe ich die Realisierung eines lauffähigen Prototyps an, der die Integration von DJI-Drohnen in den U-Space demonstriert. Dieser Prototyp soll schließlich zur Evaluation mit einer echten DJI-Drohne getestet werden.

5.3 Aufbau der Arbeit

Zunächst wird im Kapitel Problemstellung ein genauerer Blick auf die Regularien geworfen, die es zu erfüllen gilt. Hier wird auf die wichtigsten Details eingegangen, die zu beachten sind, um konform der europäischen U-Space Verordnung Flüge genehmigen zu lassen und im Netzwerk identifizierbar zu machen. Im Kapitel Aktueller Forschungsstand wird insbesondere auf eine andere Bachelorthesis Bezug genommen, in der bereits Teile der U-Space Verordnung umgesetzt wurden und die Grundlage für die Weiterentwicklung in dieser Arbeit bildet. Weitere Forschungsergebnisse finden hier Erwähnung.

Im nächsten Kapitel wird eine Lösungsidee gezeigt, bei der mithilfe von Domain Storytelling ein möglicher neuer Arbeitsprozess aus Sicht eines DJI-Drohnenpiloten erarbeitet wird. Mithilfe dieser Modellierung wird dann im Sinne von Domain-Driven Design ein passendes Lösungskonzept entworfen.

Im Kapitel Umsetzung der Lösung wird schließlich eine über die DJI Cloud API angebundene Softwarelösung präsentiert, die es DJI-Drohnenpiloten ermöglicht, genehmigte Flüge zu aktivieren und überwachen. Schließlich wird dort auch die praktische Erprobung dieser Lösung mit einer echten DJI-Drohne und der DJI Pilot 2 App thematisiert.

Die Ergebnisse der Arbeit werden schließlich zusammengefasst und es wird auf weitere Forschungsthemen verwiesen.

6 Problemstellung

Mit der Einführung der U-Space-Verordnung sind die Rahmenbedingungen geschaffen worden, um UAS und USSPs in den Luftraum zu integrieren. Sobald die ersten U-Spaces in Europa geschaffen werden, müssen alle UAS-Betreiber sich den neuen Regularien anpassen.

Im Folgenden werden die Auswirkungen der Verordnung auf den UAS-Betrieb von DJI-Drohnen erläutert, welche Schritte bereits unternommen wurden, um DJI-Drohnen in den U-Space zu integrieren und welche noch bevorstehen, um die Einreichung der entsprechenden Telemetriedaten für den Netzidentifikationsdienst zu ermöglichen, sodass die sicherheitskritische aktive Flugüberwachung durch den USSP erreicht werden kann.

6.1 U-Space Verordnung

Die Durchführungsverordnung (EU) 2021/664 (EU-Kommission, 2021), auch bekannt als U-Space Verordnung, beschreibt, wie der europäische Luftraum für Drohnen in Zukunft organisiert werden soll. Diese wurde eingeführt, um trotz der immer größer werdenden Menge an Drohnen im Luftraum einen sicheren Drohnenflugverkehr zu ermöglichen. Im Erwägungsgrund 2 der Verordnung wird ausdrücklich die zunehmende Komplexität erwähnt, die sich insbesondere aus BVLOS Flügen ergibt. Beispielsweise sollen so Kollisionen mit anderen Drohnen vermieden werden, rechtzeitige Warnungen sollen ausgegeben werden, wie etwa bei Helikoptereinsätzen oder außer Kontrolle geratenen Drohnen. Der Drohnenflugverkehr soll somit zentral organisiert werden und alle relevanten Informationen sollen rechtzeitig bei den jeweiligen Betreibern landen. Dabei wird festgelegt, wie der Genehmigungsprozess von Drohnenflügen automatisiert stattfinden wird und inwiefern die Drohnenflüge aktiviert und über das Netzwerk überwacht werden sollen.

Diese Verordnung ist am 26. Januar 2023 in Kraft getreten. Somit ist ein Rechtsrahmen geschaffen worden, um erste U-Spaces in Europa zu definieren, in denen entsprechende Dienste angeboten werden können. Im Text der Verordnung wird unterschieden zwischen der Rolle der UAS-Betreiber und den U-Space Service Providern.

Der U-Space Luftraum ist „ein von den Mitgliedstaaten ausgewiesenes geografisches UAS-Gebiet, in dem UAS-Betrieb nur mit Unterstützung durch U-Space-Dienste durchgeführt werden darf“ (EU-Kommission, 2021, S. 165). Das bedeutet, es steht den Mitgliedsstaaten frei, über welchen Raum sein U-Space oder seine U-Spaces zu definieren sind. Klar ist, dass hier der Luftraum gemeint ist, in dem sowohl unbemannte Luftfahrtsysteme als auch die bemannte Luftfahrt gemeinsam operieren werden. Für diese U-Spaces werden in Artikel 7 die „Anbieter von U-Space Diensten“ (USSP)¹ definiert. USSPs müssen mindestens folgende vier Dienste anbieten: Ein Netzidentifizierungsdienst, ein Geo-Sensibilisierungsdienst, die UAS-Fluggenehmigung und der Verkehrsinformationsdienst.

¹ In der englischen Fassung der U-Space Verordnung heißen diese Anbieter „U-Space Service Provider“ (European Commission, 2021, S. 139), daher ist die Abkürzung USSP gängig.

Über den Netzidentifizierungsdienst wird es ermöglicht, Drohnen während des Flugs zu jeder Zeit zu identifizieren und dem jeweiligen UAS-Betreiber zuzuordnen – dieser Punkt kann auch als ein „digitales Nummernschild“ verstanden werden (DJI, 2023h). Auf die Bedeutung dieses Dienstes, insbesondere aus Sicht der UAS-Betreiber mit DJI-Drohnen wird in Abschnitt 6.4 genauer eingegangen, da die Umsetzung dieses Dienstes den Hauptfokus dieser Arbeit bilden wird.

Der Geo-Sensibilisierungsdienst muss es UAS-Betreibern ermöglichen, ständig über geltende Luftraumbeschränkungen informiert zu sein und die geltenden Grenzen des U-Spaces zu kennen.

Der UAS-Fluggenehmigungsdienst ist ein Mechanismus, der von U-Space-Dienstanbietern bereitgestellt wird, um Drohnenbetreibern die Erlaubnis für jeden einzelnen Drohnenflug zu erteilen. Dieser Dienst legt die Bedingungen für den Flug fest, überprüft Anträge auf Genehmigungen, berücksichtigt Luftraumbeschränkungen und Wetterinformationen, gibt bei Genehmigungen eindeutige Nummern aus und priorisiert Flüge gemäß festgelegter Regeln, um die Sicherheit und Koordination im Luftraum zu gewährleisten.

Über den Verkehrsinformationsdienst muss es UAS-Betreibern ermöglicht werden, ständig über Drohnen, Flugzeuge oder andere Flugsysteme in der Nähe informiert zu sein. Mithilfe dieser Information ist es in der Verantwortung der UAS-Betreiber, das Kollisionsrisiko zu minimieren.

Für den Geo-Sensibilisierungsdienst und den Verkehrsinformationsdienst müssen in erster Linie die USSPs die richtigen Daten bereitstellen und geeignete Schnittstellen definieren. Sie werden in dieser Arbeit daher nicht im Detail behandelt.

Für den UAS-Fluggenehmigungsdienst wurde bereits in der Arbeit von (Gersch, 2023) eine erste Lösung präsentiert. Dort wurde bereits mithilfe der DJI Cloud API die Möglichkeit geschaffen, Genehmigungsanträge beim USSP einzureichen und Fluggenehmigungen zu erhalten. Aufbauend darauf soll in dieser Arbeit untersucht werden, wie der Netzidentifizierungsdienst als nächster Schritt umgesetzt werden und wie die Kommunikation von UAS-Betreibern zum USSP implementiert werden kann.

6.2 Betroffene UAS

In Artikel 1 der Verordnung wird beschrieben, dass grundsätzlich jedes UAS von der neuen Drohnenverordnung betroffen ist. Nur Drohnen der Klasse C0 sind von der Verordnung ausgenommen, sowie UAS, deren Nutzlast unter 250 g liegt und nicht schneller als 19 m/s fliegen.

Die technischen Klassifizierungen gehen von C0 bis C6 und wurden in der Delegiertenverordnung (EU 2019/945 (EU-Kommission, 2019) festgelegt. Verschiedene UAS-Modelle können dann nach Teil 8 oder 9 der Verordnung je nach Nutzlast, Geschwindigkeit und weiteren Parametern zertifiziert und in die Klassen eingeordnet werden. Diese Einordnung ist nach Artikel 20 der Verordnung ab dem 01.01.2024 für alle neuen UAS-Modelle verpflichtend.

Die European Union Aviation Safety Agency (EASA) hat bereits für einige Drohnenmodelle von verschiedenen Herstellern die jeweilige Klassifizierung veröffentlicht, diese sind in Abbildung 1 dargestellt. Darunter fällt auch eine Reihe von DJI-Drohnen. DJI bietet neben Modellen der Klasse C0 auch größere Modelle der Klassen C1 und höher an, die unter die U-Space Verordnung fallen werden. Diese müssen dann für Flüge innerhalb der U-Spaces den gesamten Genehmigungsprozess durchlaufen und während des gesamten Flugs ihren aktuellen Standort an die jeweiligen USSPs übermitteln. Viele dieser größeren Modelle von DJI gehören der Enterprise-Serie an (DJI, 2023i).

UAS with C-Class Markings

Class	Designed By	Type Category	Model	Commercial Name	Low Speed Mode	Noise Level (db)
C0	DJI	Multi-rotor	MT2SD, MT2SDCE	DJI Mini 2 SE	N/A	N/A
C0	DJI	Multi-rotor	MT3PDCE, MT3PD, MT3M3VDB	DJI Mini 3, Mini 3 Pro	N/A	N/A
C0	DJI	Multi-rotor	MT4MFVD	Mini 4 Pro Fly More Combo	N/A	N/A
C1	DJI	Multi-rotor	EB3WBC	DJI AIR 3	N/A	81
C1	DJI	Multi-rotor	L2AA, L2PA, L2C	DJI MAVIC 3 V2.0, Cine V2.0, Classic	N/A	83
C2 C6	AgEagle	Fixed-wing	SENSEFLY EBEE X, GEO, AG, TAC PUBLIC SAFETY	SENSEFLY eBee	No	N/A
C2	DJI	Multi-rotor	M30 RTK EU, M30T RTK EU	M30 EU, M30T EU	Yes	90
C2	DJI	Multi-rotor	M3E-EU, M3T-EU, M3M-EU	DJI MAVIC 3E EU, 3T EU, 3M EU	Yes	82
C3	DJI	Multi-rotor	M350 RTK	Matrice 350 RTK	N/A	97
C3	Quantum-Systems	Fixed-wing	R10	Trinity F90+	N/A	N/A
C3	Wingtra	Fixed-wing	Wingtraone Gen II	WingtraOne	N/A	N/A
C6	Delair	Fixed-wing	UX11-AG-C6, IR-C6, RGB-C6, AG-LE, IR-LE, RGB-LE	Delair UX 11 Camera AG, IR, RGB; Longue Elongation Camera AG, IR, RGB	N/A	N/A

Abbildung 1: Technische Klassifizierungen der EASA für ausgewählte Drohnen (EASA, 2023)

6.3 Strategisches Konfliktmanagement

Im Abschlussbericht von udveo² werden die Begriffe „strategisches Konfliktmanagement“ und „taktisches Konfliktmanagement“ eingeführt (Caesar, et al., 2023, S. 46ff). Die strategische Phase bezeichnet den Zeitraum vor Beginn eines Drohnenfluges, die taktische Phase beginnt mit, beziehungsweise kurz vor dem Start der Drohne. In der strategischen Phase wird dafür gesorgt, dass beispielsweise zwei Fluggenehmigungen sich zeitlich und räumlich nicht überschneiden dürfen. Der USSP überprüft in seinem UAS-Fluggenehmigungsdienst, ob eingereichte Genehmigungsanträge konfliktfrei sind. Anträge werden nur angenommen, wenn der angefragte Luftraum noch nicht gebucht oder auf sonstige Weise gesperrt ist. In der strategischen Phase wird der Betriebsraum des Drohnenflugs festgelegt. Es wird also ein gewisser Bereich für einen bestimmten Flug gebucht, sodass dieser auch später in der taktischen Phase zur Überprüfung und Konfliktvermeidung genutzt werden kann. Es geht in der strategischen Phase darum, alle möglichen Konflikte zu vermeiden, bevor die Drohne abhebt und in die taktische Phase übergeht. Die Anbindung von DJI-Drohnen in der strategischen Phase an den U-Space wurde weitestgehend in einem vorangegangenen Projekt umgesetzt (Gersch, 2023). Diese bildet eine geeignete Grundlage, um den Übergang in die taktische Phase zu realisieren.

6.4 Taktisches Konfliktmanagement

Bevor ein genehmigter Flug tatsächlich starten kann, muss der UAS-Betreiber eine Flugaktivierung beim USSP anfragen. Mit der erfolgreichen Flugaktivierung beginnt der Übergang in die taktische Phase des Konfliktmanagements (Caesar, et al., 2023, S. 46f). Damit beginnt die Flugüberwachung und der UAS-Betreiber muss sicherheitskritische Informationen wie die aktuelle Position und Höhe der Drohne ab diesem Zeitpunkt ständig aktualisieren. Die Flugaktivierung muss vom USSP bestätigt werden, bevor sie wirksam ist. Beim Zeitpunkt der Flugaktivierungsanfrage muss immer eine entsprechende Fluggenehmigung bestehen, damit sie angenommen werden kann. Eine Aktivierung kann unter anderem verweigert werden, wenn der Genehmigungszeitraum noch nicht erreicht wurde oder abgelaufen ist, wenn unerwartet andere Drohnen in den genehmigten Luftraum eindringen oder der Luftraum temporär gesperrt werden muss, beispielsweise aufgrund eines Helikoptereinsatzes. Wird die Aktivierung abgelehnt, darf der Flug trotz bestehender Genehmigung nicht gestartet werden (Caesar, et al., 2023, S. 56).

Mit der Aktivierung und dem damit verbundenen Beginn der taktischen Phase des Konfliktmanagements startet auch die aktive Flugüberwachung der Drohne im USSP. Hier muss auch der Netzidentifizierungsdienst bereitgestellt werden.

Nach Artikel 8 der EU-Verordnung, in dem der Netzidentifizierungsdienst definiert wird, müssen USSPs fortlaufend die Möglichkeit bieten, UAS während der gesamten Flugdauer eindeutig über das

² Auf das udveo-Forschungsprojekt wird in Abschnitt 7.1 genauer eingegangen.

Netzwerk identifizierbar zu machen (EU-Kommission, 2021, S. 168f). Dabei müssen „autorisierte Nutzer“³ laut der Verordnung folgende Daten vom USSP empfangen können:

- Die UAS-Betreibernummer
- Die eindeutige Seriennummer des UAS
- Die geografische Position des UAS inklusive der Höhe
- Den Streckenverlauf
- Die geografische Position des Fernpiloten
- Den Notstatus des UAS
- Den Zeitpunkt der Generierung der Nachricht

Um eine Umsetzung dieser Vorgaben zu ermöglichen, muss also automatisiert während des Fluges in kurzen Zeitabständen ein entsprechendes Datenpaket an den USSP übermittelt werden. Besonders entscheidend ist für die Flugsicherung und das taktische Konfliktmanagement, dass der USSP stets über die aktuelle Flugposition der Drohne informiert ist und diese eindeutig zuordnen kann, um im Zweifelsfall den UAS-Betreiber vor möglichen Gefahrensituationen zu warnen. Aus Sicht von DJI-Drohnenbetreibern ergeben sich im Wesentlichen zwei Herausforderungen.

Die erste Herausforderung für den UAS-Betreiber ist die Beschaffung der jeweiligen Informationen. Dabei muss er zum einen von einer ausgewiesenen Behörde die individuelle Betreibernummer besorgen, zum anderen muss er sicherstellen, dass sein UAS über die notwendigen Technologien verfügt, um die erforderlichen Telemetriedaten der Drohne zu sammeln und bereitzustellen. Dabei muss herausgearbeitet werden, wie er diese Daten automatisiert beschaffen kann, um diese weiterleiten zu können.

Die zweite Herausforderung liegt bei der Einreichung der Daten beim USSP. Es muss vorausgesetzt werden können, dass der jeweilige USSP eine Schnittstelle anbietet, über die der UAS-Betreiber die Informationen zuverlässig und gesichert hochladen kann. Diese Schnittstelle muss alle Anforderungen aus der U-Space Verordnung erfüllen, sodass der Betreiber sein UAS mit dem USSP verbinden kann.

³ Autorisierte Nutzer sind laut der Verordnung die breite Öffentlichkeit, weitere USSPs, Flugverkehrsdienststellen, Anbieter gemeinsamer Informationsdienste und die zuständigen Behörden (EU-Kommission, 2021, S. 169)

6.5 DJI im U-Space

Aufgrund ihres hohen Marktanteils sind DJI-Drohnen besonders relevant für die Umsetzung der U-Space Verordnung. Wie Abschnitt 6.2 und Abbildung 1 bereits gezeigt, werden zukünftig Flüge für größere Drohnenmodelle der Klassifizierung C1 und höher im europäischen U-Space genehmigungspflichtig sein. Ein großer Teil der DJI-Modelle in dieser Klasse gehört zur Enterprise-Reihe, auf denen der Fokus in dieser Arbeit gerichtet werden soll. DJI bietet für Enterprise-Modelle spezifische Softwarelösungen an, mit denen ihre UAS gesteuert und verwaltet werden können. Diese unterscheiden sich von den Apps, die für den privaten Einsatz entwickelt wurden, daher werden die privaten Drohnen in dieser Arbeit ausgeklammert.

Für Entwickler bietet DJI im Wesentlichen zwei Möglichkeiten, für besondere Anwendungsfälle eigene Software zu implementieren. Zum einen können mit dem DJI SDK eigene Apps entwickelt werden, die dann auch für die Drohnen- und Payload-Steuerung eingesetzt werden können. Solche Apps könnten dann auch für die Anbindung an den U-Space genutzt werden. Der Nachteil davon ist, dass zusätzlich ein neues, sicherheitskritisches UAS-Steuerungssystem entwickelt und laufend aktualisiert werden müsste, nur um die Drohnenflüge genehmigen zu lassen. Auch wären DJI-Drohnenpiloten gezwungen, dieses neue System zur Drohnensteuerung zu nutzen anstelle der bekannten DJI-Apps, wie etwa der Pilot-2 App für Enterprise-Drohnen.

Die andere Möglichkeit bildet die Cloud-API. Über diese kann für die Enterprise-Modelle eine eigene Anbindung an selbst entwickelte und gehostete Verwaltungssysteme für Flugmissionen hergestellt werden. Die Cloud-API wurde auch schon in dem dieser Arbeit zugrunde liegenden Projekt genutzt, um bereits Fluggenehmigungen beim USSP einzureichen (Gersch, 2023). Auch die Daten, die zur Erbringung des Netzidentifizierungsdienstes vonnöten sind, können über die Cloud API gewonnen werden, wie in Abschnitt 8.1 diskutiert wird.

7 Aktueller Forschungsstand

7.1 Erkenntnisse aus udveo

Das Forschungsprojekt „Urbaner Drohnenverkehr – effizient organisiert“ (Caesar, et al., 2023) hat sich interdisziplinär mit der Machbarkeit und Umsetzung der U-Space Verordnung sowie deren Ausgestaltung bei der Überführung in nationales Recht auseinandergesetzt. Es werden konkrete Ideen und Lösungen diskutiert, wie die EU-Vorgaben praktisch ausgestaltet werden können und welche Konsequenzen sich für die unbemannte Luftfahrt ergeben. Ein besonderes Augenmerk wird auf die effiziente Herstellung der Luftraumsicherheit gelegt.

Auch auf den in dieser Arbeit besonders relevanten Netzidentifizierungsdienst wurde im Detail eingegangen. Es wurde untersucht, wie die zur Erbringung des Netzidentifizierungsdienstes notwendigen Daten⁴ aus Sicht des UAS-Betreibers erhoben werden können. Dabei wurde erkannt, dass die meisten handelsüblichen UAS-Systeme bereits über die notwendigen GNSS-Empfänger und einen Kompass verfügen, um die entsprechenden Daten auslesen zu können. Die „Bodenstationssoftware“ überträgt die Daten dann an den USSP „und nicht das UAS selbst“ (Caesar, et al., 2023, S. 83). Außerdem wurde festgestellt, dass während der taktischen Phase eine ständige Kommunikation zwischen UAS und USSP erfolgen muss, sodass der USSP zu jedem Zeitpunkt „ein aktuelles Lagebild von den tatsächlichen Flugbewegungen vorliegen hat“ (Caesar, et al., 2023, S. 82). Dieses Lagebild wird in der taktischen Phase im USSP nicht nur für die Netzidentifizierung genutzt, sondern auch mithilfe anderer Datenquellen, wie etwa aus der bemannten Luftfahrt, aggregiert. Diese nutzt der USSP dann beispielsweise auch für den Verkehrsinformationsdienst (Caesar, et al., 2023, S. 47).

Im Rahmen des udveo-Projekts wurde unter anderem ein prototypischer USSP entwickelt, bei dem Fluggenehmigungen, Flugaktivierungen und die Flugüberwachung in mehreren Feldtests erprobt wurden (udveo, 2022, S. 34-36). Dabei wurden bisher ausschließlich Drohnen des Projektpartners eingesetzt und keine DJI-Drohnen.

⁴ Damit sind die Daten gemeint, die in Abschnitt 6.4 aufgelistet wurden.

7.2 Einreichung von Fluggenehmigungen mittels DJI Cloud API

Im Rahmen der Bachelorarbeit von (Gersch, 2023) wurde bereits eine Anwendung erstellt, mit der DJI-Flüge in einem Genehmigungsantrag eingereicht werden können. Mittels Domain Storytelling wurde ein Workflow für einen UAS-Betreiber dargestellt, den dieser durchläuft, um seinen Flug zu genehmigen. Für die Umsetzung wurde ein Java-Projekt mit Spring Boot aufgesetzt. Dieses wurde mithilfe von Domain-Driven Design um den Bounded Context mit den Namen Flight Authorization⁵ erweitert. In dem Projekt wurde exemplarisch ein DJI-Flug im WPML-Format eingelesen. Hieraus wurde ein Fluggenehmigungsantrag erstellt und beim USSP des Forschungsprojekts udveo (Caesar, et al., 2023) eingereicht und genehmigt. Damit wurde gezeigt, dass es möglich ist, DJI-Flüge mithilfe der DJI Cloud API (DJI, 2023c) an einen USSP anzubinden. Die DJI Cloud API wurde in dieser Arbeit als geeignete Schnittstelle identifiziert, um die passenden Daten aus dem DJI-Ökosystem in ein selbst verwaltetes Flugmanagementsystem zu überführen und so an den U-Space anzubinden.

Der in der Arbeit genutzte USSP von udveo war technisch etwas anders aufgebaut als der, der in diesem Projekt genutzt werden soll⁶. Beispielsweise wurden Fluganträge in udveo per Hand genehmigt. Das bedeutet, dass jeder Antrag manuell überprüft wurde und in einer Formulareingabe genehmigt oder abgelehnt wurde. Dieser Prozess läuft im USSP in dieser Arbeit automatisch und das Ergebnis der Berechnung wird in einer Antwort an den UAS-Operator zurückgesendet.

In der Arbeit wurde erwähnt, dass die weiteren Phasen der U-Space Verordnung noch umgesetzt werden können. (Gersch, 2023, S. 39) Mit der Arbeit wurden die notwendigen Daten an den USSP übermittelt, die dieser für die Erbringung des UAS-Fluggenehmigungsdienstes benötigt. Damit wurde das strategische Konfliktmanagement für DJI-Drohnen ermöglicht. Die zur Erfüllung des Netzidentifizierungsdienstes notwendigen Schritte der Aktivierung, Übermitteln der Telemetriedaten, sowie das Deaktivieren des Flugs wurden hingegen noch nicht implementiert. Die Arbeit von Gersch bildet aber einen geeigneten Anknüpfungspunkt, das entwickelte System zu erweitern, um auch die taktische Phase des Konfliktmanagements zu ermöglichen.

⁵ Domain-Driven Design wird in Abschnitt 8.3 näher erklärt.

⁶ In diesem Projekt muss ein anderer USSP genutzt werden. Mehr dazu wird in Kapitel 9 erklärt.

8 Lösungsidee

Aufbauend auf der in Abschnitt 7.2 beschriebenen und über die DJI Cloud API realisierte Spring Boot Anwendung zur Einreichung von Fluggenehmigungen beim USSP, ist es ein naheliegender Ansatz, dieses bestehende System anzupassen und um weitere Funktionen zu erweitern. Auf Grundlage der eingereichten Fluggenehmigungen können dann Aktivierung und Deaktivierung angefragt werden. Außerdem kann so die regelmäßige Übermittlung der Telemetriedaten stattfinden, die zur Erbringung des Netzidentifikationsdienstes benötigt werden. Über die Fluggenehmigungen wird den jeweiligen Flugmissionen seitens des USSPs eine einzigartige Identifikationsnummer zugewiesen, die notwendig ist für die automatische Zuordnung der Aktivierung, Deaktivierung und Telemetriedaten zur jeweiligen Flugmission. Diese kann also auch genutzt werden bei der Erweiterung der bestehenden Lösung.

Dem gegenüber steht die in Abschnitt 6.5 angesprochene Alternative, ein neues System mit dem DJI SDK zu erstellen. Aufgrund der dort beschriebenen Nachteile einer solchen Lösung, sowie dem zusätzlichen Mehraufwand einer Neuentwicklung des UAS-Fluggenehmigungsdienstes wird dieser Ansatz hier nicht weiterverfolgt.

8.1 DJI Cloud API

UAS-Modelle der Enterprise-Serie von DJI bieten die Möglichkeit, externe Dienste über die Cloud-API anzubinden. Diese Modelle nutzen auf ihrer Fernbedienung die DJI Pilot 2 App. Dort kann über einen Menüpunkt die Cloud-Verbindung konfiguriert werden. Für die Anbindung des UAS an den U-Space müsste nach diesem Lösungskonzept hier die U-Space-fähige Cloud-Anwendung ausgewählt werden. Der Vorteil ist, dass Nutzende dieser App weiterhin in ihrer gewohnten Arbeitsumgebung die Drohne steuern können. Der Genehmigungsprozess ist von der ihnen vertrauten Software abgekapselt und alle benötigten Daten werden automatisch an das Lösungssystem übermittelt und von diesem abgefragt. Beim Beispiel von DJI Pilot 2 muss innerhalb der App lediglich die externe Lösung angebunden werden.

Zur Umsetzung dieser Lösung ist es dann vonnöten, ein minimales funktionierendes Verwaltungssystem für Flugmissionen zu implementieren. Die Mindestanforderungen der Schnittstelle müssen erfüllt werden, damit keine unerwarteten Fehler in der Pilot-App ausgelöst werden. Für diesen Zweck existiert ein Open Source Demo-Projekt, das dazu dient, einen einfachen Einstieg zu ermöglichen (DJI, 2023e). Dieses Projekt wurde in der vorangegangenen Bachelorarbeit (Gersch, 2023) genutzt, um DJI-Genehmigungsanträge bei einem USSP einzureichen.

Innerhalb dieses Systems haben Nutzende dann die Möglichkeit, ihre Flüge konform zur U-Space Verordnung genehmigen zu lassen. Bisher war dies nur für die Einreichung von Fluggenehmigungen möglich. In dieser Arbeit sollen auch das Zurückziehen von Genehmigungen, sowie das Aktivieren und Deaktivieren der Genehmigungen hinzukommen. Insbesondere sollen die Telemetriedaten, die von den Drohnen an das Cloud-System übermittelt werden, für den erforderlichen Netzidentifikationsdienst beim USSP genutzt werden.

Nach der Spezifikation der Cloud-API werden die Informationen des UAS auf verschiedenen Kanälen an die externe Cloud-Anwendung gesendet. Auch die Telemetriedaten der Drohne lassen sich über die Cloud-API gewinnen. Es kann ein Signal empfangen werden, das Informationen über die Position, Höhe und Ausrichtung der Drohne enthält, sowie der Geschwindigkeit, Akkustatus und viele weitere Daten (DJI, 2023c). Mithilfe der im bestehenden System genutzten Cloud API lassen sich also auch viele der für die Netzidentifizierung wichtigen Daten gewinnen. Daher soll die Technologie auch in dieser Arbeit weiterverwendet werden.

8.2 Konzeptionierung mittels Domain Storytelling

Um den konkreten Arbeitsablauf zur Genehmigung, Aktivierung der Überwachung von DJI-Drohnen besser verstehen zu können, wird in dieser Arbeit Domain Storytelling (DST) (Hofer, Schwentner, & Tune, 2022) verwendet. Beim DST werden üblicherweise in Workshops gemeinsam mit den Fachanwendern in kurzen beispielhaften Erzählungen die Arbeitsabläufe genau beschrieben. Zeitgleich wird eine Grafik angefertigt, mithilfe derer die Domain Stories dargestellt werden. Dabei werden die verschiedenen Akteure, die an der Story beteiligt sind mit Arbeitsgegenständen verbunden, um deutlich zu machen, wie die Akteure mit welchen Arbeitsgegenständen in einem typischen Arbeitsprozess interagieren. Diese Interaktionspfeile werden Aktivitäten genannt. Die einzelnen Aktivitäten werden mit sogenannten Sequenznummern durchnummeriert, um den zeitlichen Ablauf der Story zu verdeutlichen (Hofer & Schwentner, 2023, S. 18f).

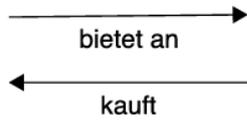
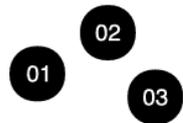
Baustein	Beispiele	Definition
Akteur	 Kinobesucher  Kassierer  Kartenverkaufssystem	Repräsentiert eine Person oder ein Softwaresystem, die oder das eine aktive Rolle in einer Domain Story spielt.
Arbeitsgegenstand	 Kinoprogramm  Kinokarte  Preis	Repräsentiert etwas, an/mit dem ein Akteur arbeitet.
Aktivität		Was ein Akteur mit einem Arbeitsgegenstand macht.
Sequenznummer		Beschreibt die Reihenfolge der Sätze in einer Domain Story.

Abbildung 2: Die Bildsprache im DST (Hofer & Schwentner, 2023, S. U2)

DST wurde schon in der eingangs des Kapitels erwähnten Arbeit genutzt, um den Genehmigungsprozess mithilfe der DJI Cloud API zu modellieren (Gersch, 2023, S. 16). Dort wurde bereits dargestellt, wie UAS-Betreiber ihre Flugmissionen mit der Cloud-Anwendung synchronisieren können und mithilfe dieser Missionen Fluggenehmigungsanträge generieren und einreichen. Aufbauend auf der Arbeit wurde hier gemeinsam mit Fachexperten ein neues Interaktionsdiagramm erstellt, das zusätzlich auch die Aktivierung und Flugüberwachung in das Modell mit einbezieht.

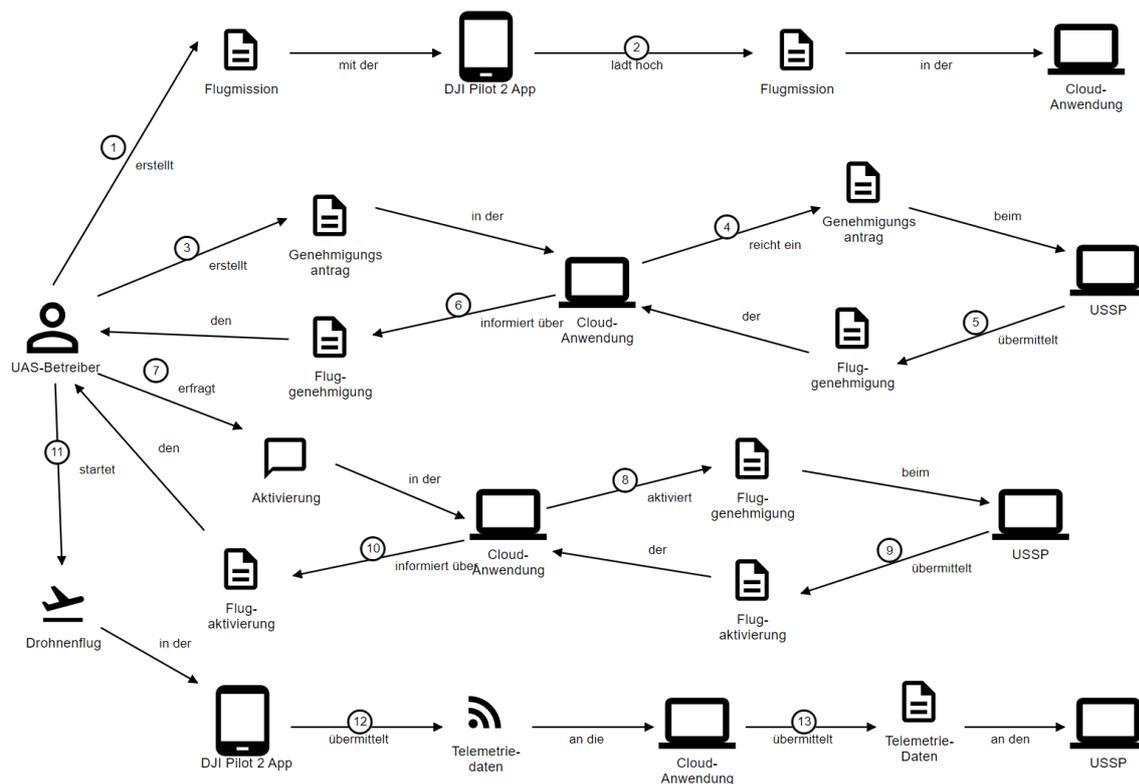


Abbildung 3: DST-Interaktionsdiagramm zur Anbindung von DJI-Flügen an den U-Space

Wie in Abbildung 3 zu sehen ist, kann anhand der Sequenznummern der Aktivitäten verstanden werden, welche Abläufe aus Sicht des Akteurs UAS-Betreiber durchlaufen werden. Während die Aktivitäten mit den Sequenznummern 1-6 bereits in der in Abschnitt 7.2 erwähnten Arbeit für den UAS-Fluggenehmigungsdienst umgesetzt wurden, folgen nun in den Schritten 7-13 die in dieser Arbeit identifizierten Erweiterungen.

In dieser Domain Story erstellt der UAS-Betreiber eine Flugmission in der DJI Pilot App und somit in seiner gewohnten Arbeitsumgebung. Diese wird automatisch bei der selbst erstellten Cloud-Anwendung hochgeladen. Um einen Flug genehmigen zu lassen, muss der UAS-Betreiber dann der Cloud-Anwendung mitteilen, in welchem Zeitraum die Genehmigung gelten soll. Die Cloud-Anwendung kann dann automatisch mithilfe der Daten der Flugmission einen vollständigen Genehmigungsantrag erstellen. Dieser wird dann beim USSP eingereicht. Im Folgenden erteilt der USSP eine Fluggenehmigung, die über die Cloud-Anwendung zurück an den UAS-Betreiber

übergeben wird. Um den Flug starten zu können, muss der UAS-Betreiber dann eine Aktivierung beantragen, indem er diese bei der Cloud-Anwendung auslöst. Die Cloud-Anwendung fragt dann die Aktivierung beim USSP an. Dieser schickt der Cloud-Anwendung eine Flugaktivierung zu, über die der UAS-Betreiber schließlich informiert wird.

Nun kann der UAS-Betreiber in seiner Pilot-App den Flug starten. Dabei werden automatisch in Echtzeit die Telemetriedaten des UAS an die Cloud-Anwendung übermittelt. Diese reicht die Daten wiederum in Echtzeit beim USSP ein.

Der größte Vorteil dieser Lösung ist, dass der Eingriff in die gewohnten Arbeitsabläufe für Nutzer der DJI Pilot App so gering wie möglich gehalten wird. Es muss lediglich die Verbindung zur Cloud App konfiguriert werden, ansonsten kann wie gewohnt mit der DJI Pilot App gearbeitet werden. Die Anbindung an den U-Space läuft abgekapselt davon über eine Verbindung zur externen Cloud, die im Funktionsumfang minimal gehalten werden kann. Somit kann eine klare Trennung der Aufgaben vorgenommen werden.

8.3 Domain-Driven Design

In der vorigen Arbeit wurde zur Implementierung der Einreichung von DJI-Fluggenehmigungen das Entwurfsmuster Domain-Driven Design (DDD) genutzt und wird hier weiterverwendet. DDD ist ein ursprünglich von Eric Evans veröffentlichtes Entwurfsmuster (Evans, 2003) und „ist ein Satz von Werkzeugen, die beim Entwerfen und Implementieren von hochwertiger Software helfen“, wie Vaughn Vernon es in seinem Buch beschreibt (Vernon, Lilienthal, & Schwentner, 2017, S. 1). DDD bietet viele Vorteile, wie beispielsweise eine hohe Wartbarkeit und Testbarkeit, sowie eine klare Fachsprache im Code und eine flexible, skalierbare Architektur.

In der bestehenden Anwendung wurde ein „Bounded Context“ für die Fluggenehmigungen hinzugefügt. Ein Bounded Context bildet die semantische Grenze, in der die Komponente eines Softwaremodells eine bestimmte Bedeutung haben und bestimmte Dinge tun (Vernon, Lilienthal, & Schwentner, 2017, S. 12). Innerhalb eines Bounded Contexts wird eine eigene Fachsprache gesprochen, die „Ubiquitous Language“. Das „Einreichen von Fluggenehmigungsanträgen“ gehört zu dieser Sprache und findet sich so auch als Methodenname im bestehenden Code wieder. In dieser Arbeit können dann das „Aktivieren und Deaktivieren von Fluggenehmigungen“, sowie das „Senden von Drohnen-Telemetriedaten“ hinzukommen.

Der bestehende Bounded Context für die Fluggenehmigungen soll in dieser Arbeit erweitert werden, sodass auch die Flugaktivierung und das Einreichen der Telemetriedaten als weitere Aktivitäten hinzukommen. Im Domain Storytelling können Kontextgrenzen auf den Interaktionsdiagrammen gezogen werden, um die jeweiligen Subdomänen zu identifizieren (Hofer & Schwentner, 2023, S. 130). Diese Kontextgrenzen können dann zur Identifizierung eines Bounded Context genutzt werden. In Abbildung 4 ist die Erweiterung des Bounded Context „Fluggenehmigung“ anhand des im vorigen Abschnitt erstellten Interaktionsdiagramms zu sehen. Mit der gestrichelten Linie wird angedeutet, wie die Grenze zuvor gezogen wurde.

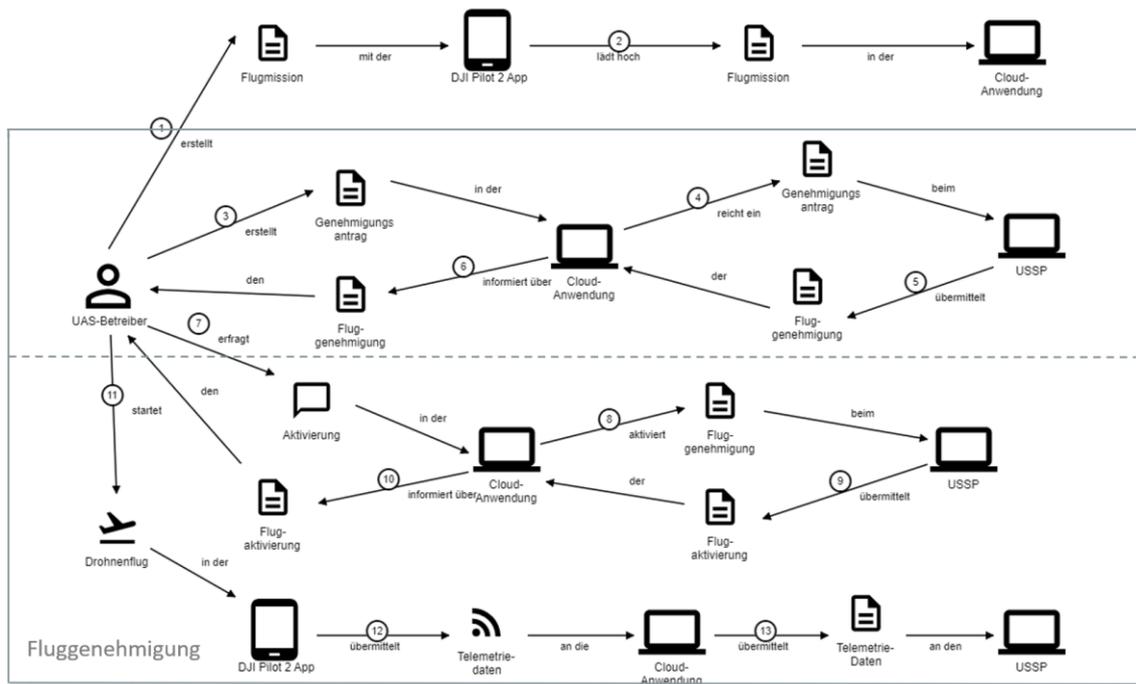


Abbildung 4: Erweiterung des Bounded Context "Fluggenehmigung"

Die in dieser Arbeit weiterentwickelte Anwendung bildet eine Schnittstelle vom DJI-System zum USSP. Zum einen müssen alle nötigen Informationen aus dem Bereich des DJI-Systems über die erweiterte DJI Cloud API in unserer Anwendung landen. Zum anderen müssen die Daten entsprechend transformiert werden, sodass mit der Schnittstelle des USSPs kommuniziert werden kann.

Für den Datenaustausch von einem Bounded Context zu einem anderen wird im DDD das sogenannte „Context Mapping“ verwendet (Vernon, Lilienthal, & Schwentner, 2017, S. 49ff). Es wird angenommen, dass zwischen verschiedenen Bounded Contexts verschiedene Ubiquitous Languages vorherrschen. Um diese Sprachen nicht zwecks des Datenaustauschs zu vermischen, existieren verschiedene Ansätze, Grenzen und Verträge zwischen den Bounded Contexts zu definieren. Eine davon ist das „Anticorruption Layer“ (ACL), also eine zusätzliche Schicht, die beiden Bounded Contexts voneinander isoliert und zwischen ihnen übersetzt.

In Abbildung 5 wird schematisch die Architektur für die Anwendung dargestellt, es handelt sich dabei um eine Ports-and-Adapters Architektur, mit der die Anbindung an externe Systeme über spezialisierte Input- und Output-Adapter realisiert werden kann. Im Kern steht das Domänenmodell, das die Fachlogik der Anwendung enthält. Im Domänenmodell stehen die fachlichen Services, sowie die Entities und Fachwerte. In den Application-Services werden Verwaltungsaufgaben und Transaktionen übernommen. Über die Adapter werden beispielsweise die Cloud API und die REST-Schnittstelle des USSPs angeschlossen (Vernon, Lilienthal, & Schwentner, 2017, S. 40).

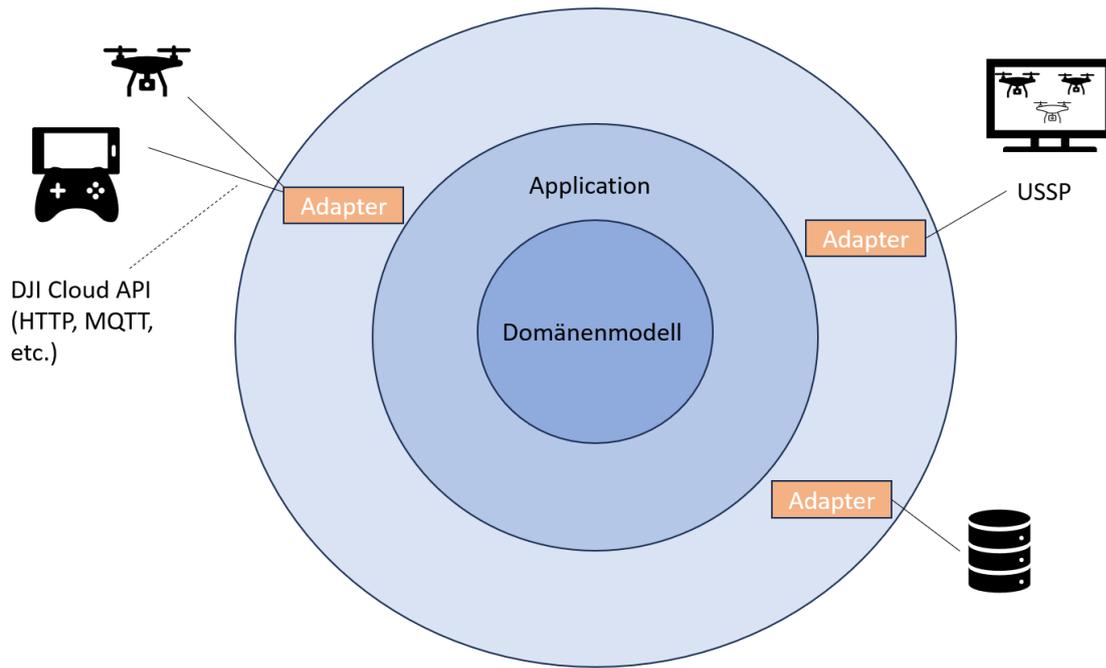


Abbildung 5: Ports-and-Adapters-Architektur für die Anwendung

Die Schnittstellen zum DJI-System und zum USSP sind vor der Implementierung dieser Lösung schon weitestgehend vorgegeben. Für das DJI-System existiert die DJI Cloud API, die über verschiedene Messaging-Protokolle mit der Cloud-Anwendung kommuniziert. In der Arbeit von Gersch ist ein neuer Endpunkt für das Einreichen von Fluggenehmigungen hinzugekommen (Gersch, 2023, S. 24f). In dieser Arbeit wird die bestehende Schnittstelle noch erweitert für das Aktivieren, Deaktivieren und Zurückziehen von Fluggenehmigungen. Auch die Schnittstelle vom USSP steht bereits fest. Hier handelt es sich um eine REST-API. Für die Anbindung an diese beiden Schnittstellen bietet es sich an, ACLs zu nutzen, um eine klare Trennung zu den externen Systemen zu erreichen.

9 Umsetzung der Lösung

Da das udveo-Forschungsprojekt zu dem Zeitpunkt der Implementierung bereits beendet war, musste ich das System an einen neuen USSP anbinden. Ich durfte über die Firma WPS einen an die U-Space Verordnung angepassten, neu entwickelten USSP nutzen. Dieser war also sehr gut für die Weiterentwicklung geeignet, erforderte aber auch einen gewissen Mehraufwand, da das bestehende System für den neuen USSP angepasst werden musste, bevor sie erweitert werden konnte.

9.1 Konfiguration und Anpassung der bisherigen Lösung

Für meine Arbeit habe ich zunächst die vorhandene Spring Boot Anwendung mit der gleichen Konfiguration gestartet, die in der vorherigen Arbeit von (Gersch, 2023) verwendet wurde. Der nächste Schritt bestand darin, diese Anwendung so anzupassen, dass sie den Genehmigungsprozess nicht mehr mit dem USSP von udveo, sondern mit einem anderen USSP der Firma WPS durchführt. Die Umstellung erforderte in der bisherigen Anwendung eine Anpassung der Konfiguration und eine Überarbeitung des Authentifizierungsprozesses beim USSP.

Der Authentifizierungsprozess für den neuen USSP erwies sich als komplexer im Vergleich zum ursprünglichen Projekt. Um diese Komplexität zu bewältigen und die REST-API-Schnittstelle der neuen Lösung effizienter zu bedienen, wurden im Projekt verschiedene Abhängigkeiten des Projektmanagement-Werkzeugs Maven hinzugefügt (Apache, 2023). Insbesondere wurde das OpenAPI Generator Plugin (OpenAPI, 2023) in das Projekt integriert, sowie das Sicherheitsplugin Spring Security (Spring, 2023).

Das OpenAPI Generator Plugin vereinfachte die Umstellung, da mit dessen Hilfe automatisch die erforderlichen Java-Klassen zur Interaktion mit der REST-API-Schnittstelle des USSPs generiert wurden. Dies wurde durch das Einlesen der API-Spezifikation im JSON-Format ermöglicht. Die generierten Java-Klassen erleichterten die Implementierung der Schnittstelle für den neuen USSP erheblich und sorgten dafür, dass die Anpassung an ein neues System reibungslos verlief. Mithilfe von Spring Security konnten auch die nötigen Klassen generiert werden, die sich aus der API für den Authentifizierungsprozess am neuen USSP ergeben.

Die Integration der Maven-Dependencies und die Nutzung des OpenAPI Generator Plugins spielten somit eine wichtige Rolle in der erfolgreichen Anpassung der Spring Boot Anwendung an den USSP. Dieser Vorgang ermöglichte es, den Genehmigungsprozess für DJI-Drohnenflüge über den neuen USSP der WPS durchzuführen.

Mit der neuen Konfiguration konnten schnell erste Flugpläne mit dem API-Werkzeug Postman (Postman, 2023) an das Cloud-System versendet und Fluggenehmigungen erstellt werden. Aus dem fachlichen Service für die Fluggenehmigungen heraus wurde dann eine Adapter-Klasse aufgerufen, die für die Einreichung der Genehmigungen verantwortlich war. Diese Fluggenehmigungen gingen auch erfolgreich beim USSP ein und wurden dort angezeigt und genehmigt. Auch das Zurückziehen

wird nun unterstützt. In Abbildung 6 ist ein im USSP eingereichter Flugplan zu sehen in der Genehmigungsansicht des USSPs.

The screenshot displays the USSP flight approval interface. It is divided into three main sections: 'FLIGHT INFORMATION', 'CONTACT PERSON', and 'FLIGHT PREVIEW'. The 'FLIGHT INFORMATION' section contains a table with the following data:

Operation ID	Application status
HH-23-3UUVXE	APPROVED
Planned Timeperiod	Last change
Sep 12, 2023, 01:16 PM - 02:16 PM	Sep 12, 2023, 01:16 PM
Title	Description
TestOperation	very important mission
UAS Identification	UAS Operator
DJI/Cloud/SerialNumber	DE.HH-SI-001
Flight mode	Priority
BRLOS	0

The 'CONTACT PERSON' section shows:

Name	Phone no.
Karl Franz	0147 48875682

The 'FLIGHT PREVIEW' section shows a map of an urban area with a cyan-colored flight path overlaid. The path starts at approximately 01:15 PM and ends at 02:15 PM. The map includes street names like 'KAMERUNWEG', 'AFRIKASTRAßE', and 'AM KAMERUNKA'. A 'Withdraw authorisation' button is visible in the top right corner. A timeline at the bottom of the map shows the flight duration from 01:15 PM to 02:15 PM.

Abbildung 6: Genehmigter DJI-Drohnenflug im neuen USSP

9.2 Umsetzung der Flugaktivierung

Für die Implementierung der Flugaktivierung habe ich zunächst die API der Cloud-Anwendung um einen weiteren POST-Request erweitert. Um eine Aktivierung anzufordern, muss die dem zu aktivierenden Flug zugehörige Identifikationsnummer als Pfadparameter des POST-Requests angegeben werden. Mit der Identifikationsnummer des Pfadparameters wird dann innerhalb der Cloud-Anwendung für den zugehörigen Flug eine Aktivierung beim USSP angefragt. Dabei wird an die REST-Schnittstelle des USSPs ebenfalls ein POST-Request gesendet. Dieser bestätigt die Aktivierung dann in seiner Response. Im Cloud-System wird hierbei die passende Flugmission-Entity aus der Datenbank geladen und aktiviert. Zur besseren Kapselung der Fachlogik im Sinne von DDD wurde der Aktiviert-Zustand an der Entity nicht von außen gesetzt, sondern in einer gesonderten Methode an der Flugmission. Dabei wird innerhalb der Flugmission ein Zustandsfeld auf aktiviert gesetzt und gespeichert. Dieser Zustand der Flugmission wird dann genutzt, um zu entscheiden, ob die eingehenden Telemetriedaten an den USSP weitergeleitet werden oder nicht. Denn erst ab dem Zeitpunkt der Aktivierung akzeptiert der USSP auch die Telemetriedaten und nutzt diese, um den Netzidentifikationsdienst zu leisten.

Die Deaktivierung am Ende des Fluges funktioniert nach dem gleichen Schema. Auch hier wurde ein neuer POST-Request in der Cloud-Anwendung eingeführt und der Flug wird mit der entsprechenden Identifikationsnummer aus dem Pfadparameter beim USSP deaktiviert. Damit endet auch der Netzidentifikationsdienst für diesen Flug und es werden keine weiteren Telemetriedaten an den USSP gesendet.

9.3 Umsetzung der Netzidentifizierung

Die Anforderungen, die für die Umsetzung der Übermittlung der Telemetriedaten an den USSP erfüllt werden müssen, wurden in Abschnitt 6.4 beschrieben. Daran orientierte ich mich bei Umsetzung und versuchte möglichst viele der benötigten Daten zu ermitteln und an den USSP zu senden. Dazu musste ich mir zum einen erarbeiten, welche Daten über welche Übertragungswege in der Cloud API gesendet werden und zum anderen, wie sie in dem Spring-Boot Projekt empfangen und weiterverarbeitet werden können.

Der USSP bietet für die Übertragung eine REST-Schnittstelle an, die den Anforderungen der U-Space Verordnung entsprechend gestaltet wurde. Das bedeutet, hier waren alle Datenfelder vorhanden, die für die Erbringung des Netzidentifizierungsdienstes vonnöten waren. Um diese Schnittstelle zu bedienen, musste ich also zunächst alle erforderlichen Daten sammeln und schließlich im vorgegebenen Format an den USSP senden. Um die Daten in das korrekte Format bringen zu können, nutzte ich ein entsprechendes Data Transfer Object (DTO), das automatisch mithilfe des OpenAPI-Tools generiert wurde. Für die Einreichung der Daten war wiederum ein Adapter mit integriertem ACL verantwortlich.

Die größte Herausforderung war es, die geeigneten Daten mithilfe der Cloud API zu aggregieren, sodass die Schnittstelle des USSPs bedient werden konnte.

Für die UAS-Betreibernummer habe ich eine Simulationsnummer genutzt, die vom USSP ausgegeben wurde. Hier wäre in einem echten U-Space eine von der entsprechenden Behörde vergebene Betreibernummer vonnöten.

Den Kern der Arbeit bildete die Übertragung der passenden Telemetriedaten der Drohne zum USSP in regelmäßigen zeitlichen Abständen. In der Cloud-API werden anders als bei den für die Genehmigungen relevanten Daten keine Telemetriedaten über HTTP-Requests versendet. Für diese wird in der Cloud-API das MQTT-Protokoll verwendet. In MQTT verbinden sich sogenannte MQTT-Clients mit einem MQTT-Broker und können entweder Nachrichten an den Broker senden oder passende Kanäle abonnieren, um die entsprechenden Nachrichten von anderen Clients empfangen zu können (AWS, 2023). Laut der Dokumentation der DJI-Cloud-API (DJI, 2023c) werden zweimal pro Sekunde die aktuellen Telemetriedaten der Drohne über ein MQTT-Signal an einen MQTT-Broker gesendet. Ein solcher MQTT-Broker muss von der externen Cloud bereitgestellt werden. Im Open Source Demo-Projekt (DJI, 2023e), das diesem Projekt zugrunde liegt, wird ein EMQX-Broker (EMQ Technologies, 2023) in einem Docker-Container (Docker, 2023) gestartet. Dieser wird von der DJI Pilot 2 App automatisch angebunden, sodass die Telemetriedaten bei diesem Broker verteilt werden. Die Konfiguration der Spring Boot Anwendung wurde in diesem Projekt so angepasst, dass alle MQTT-Kanäle abonniert werden, die den aktuellen Status der verbundenen Drohnen beschreiben.

Mithilfe der aus dem MQTT-Signal gewonnenen Daten habe ich dann regelmäßige POST-Requests aus der Cloud-Anwendung an die REST-Schnittstelle des USSPs gesendet, die den aktuellen Status der Drohne beschreiben. Die Voraussetzung für das Senden war eine bestehende und aktivierte Fluggenehmigung.

Für den Netzidentifizierungsdienst konnten nun mithilfe dieser Erweiterung die GPS-Koordinaten der Drohne in Form ihrer Breiten- und Längengrade sowie ihrer aktuellen Flughöhe an den USSP übertragen werden. Zusätzlich war die aktuelle Geschwindigkeit und die Ausrichtung der Drohne im Verhältnis zum geografischen Nordpol, sowie die UAS-Seriennummer in der Nachricht enthalten. Mithilfe der Telemetriedaten wurde es dem USSP auch möglich, den Streckenverlauf der Drohne nachzustellen.

Die aktuelle Position des UAS-Fernpiloten habe ich in der Entwicklung aus Zeitgründen nicht näher berücksichtigen können und hier Dummy-Koordinaten übertragen. Es wäre aber möglich gewesen, hier beispielsweise einen weiteren MQTT-Kanal aus dem Signal der Fernbedienung zu abonnieren. Für diese werden laut der Spezifikation der Cloud-API ebenfalls Positionsdaten versendet (DJI, 2023c). Auch der aktuelle Notstatus der Drohne war nicht direkt im MQTT-Signal enthalten und wurde mit Dummy-Daten implementiert. Es müsste erst noch erarbeitet werden, welche Umstände für DJI-Drohnen einen Notstatus bedeuten würden.

Während der Entwicklung stand mir nicht zu jeder Zeit eine echte Drohne zur Verfügung. Um trotzdem in der MQTT-Anbindung zwischendurch testen zu können, ob alle Daten im erwarteten Format beim USSP ankommen, musste ich ein MQTT-Signal simulieren. Dafür brauchte ich ein geeignetes Programm, das in regelmäßigen Abständen die Daten versendet. Ich bin bei einem Open Source MQTT-Simulator fündig geworden (Damasceno, 2023). Dieser Simulator musste so konfiguriert werden, dass er die Daten im richtigen Format an den EMQX-Broker sendet. Hierzu musste eine Konfigurationsdatei im JSON-Format angepasst werden. Außerdem musste der zugrundeliegende Python-Code, der für die Generierung der MQTT-Signale genutzt wurde, an einigen Stellen verändert werden, sodass die Daten im gleichen Format verschickt werden wie in der Dokumentation für die Cloud-API vorgesehen.

Anhand der Dokumentation habe ich dann die wichtigsten Datenfelder im Simulator mit befüllt und so einen kurzen Simulationsflug innerhalb des in der Fluggenehmigung angegebenen Betriebsraums erstellt. Dazu gehörten die Koordinaten, Höhe und Ausrichtung der Drohne. Diese Daten wurden dann zweimal pro Sekunde an den Broker verschickt auf einem Kanal, der von der Cloud-Anwendung abonniert wurde. Wie anfangs dieses Abschnitts beschrieben, wurden diese Daten beim USSP eingereicht. Der USSP hat die Funktion, während eines aktivierten Fluges den aktuellen Standort der Drohne auf einer dreidimensionalen Karte anzuzeigen und ihren Streckenverlauf nachzuzeichnen. In Abbildung 7 ist eine Momentaufnahme aus Sicht des USSPs während des Simulationsflugs zu sehen. Dort ist die Drohne auf der 3D-Karte innerhalb ihres in der Fluggenehmigung festgelegten Betriebsraums dargestellt. Die Position der Drohne auf der Karte ergibt sich aus den eingereichten Koordinaten. Über der Drohne werden ihre vom USSP festgelegte Flugnummer, sowie ihre aktuelle Flughöhe im WGS-84 Format⁷ dargestellt. Links in der Abbildung ist auch die Telefonnummer des UAS-Betreibers angegeben, sodass der USSP diesen im Notfall erreichen kann.

⁷ Das World Geodetic System 1984 ist der Standard für GPS-Signale. Mit der WGS-84 Höhe ist die Höhe über dem Referenzellipsoiden gemeint (International Civil Aviation Organization, 2002)

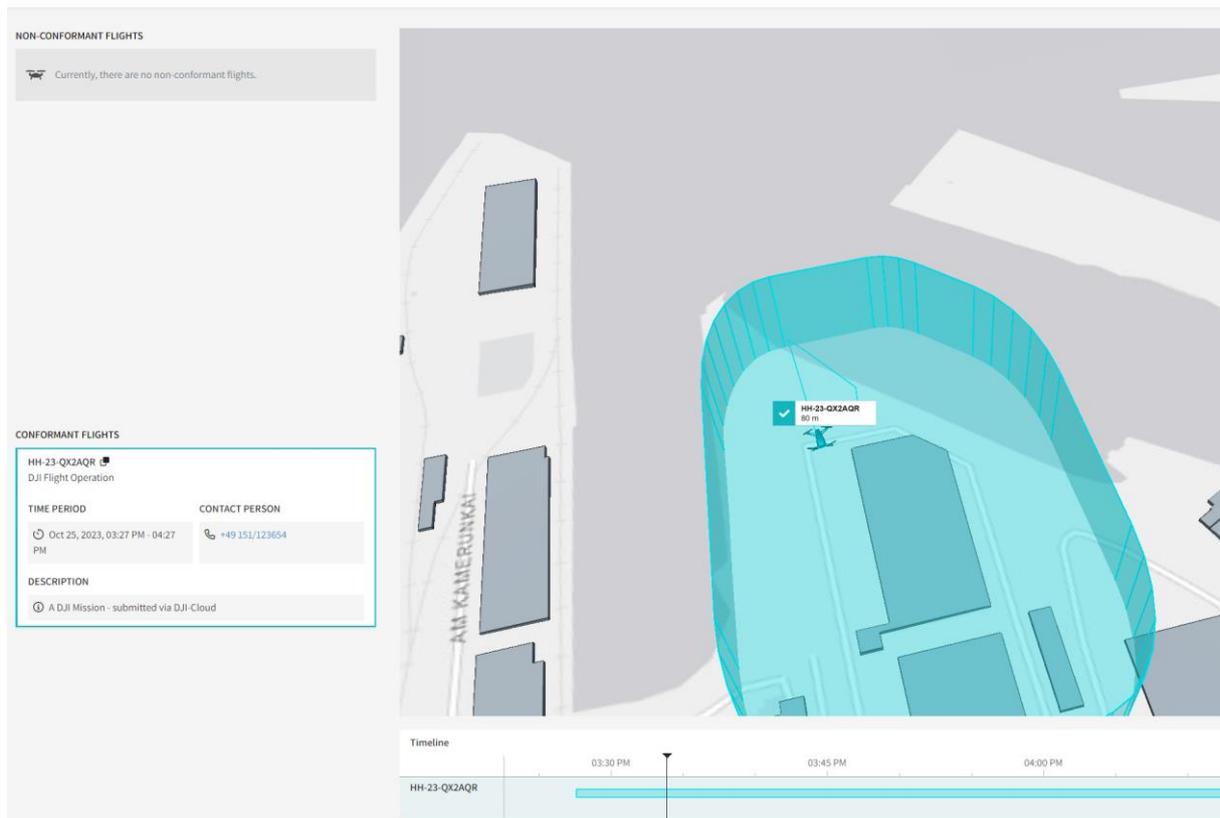


Abbildung 7: Der aktivierte Simulationsflug wird im USSP überwacht

9.4 Evaluation

Um meine Lösung mit einer echten DJI-Drohne zu testen, bekam ich die Gelegenheit, mir eine DJI Matrice 300 RTK (M300) vor Ort bei der Firma HHLA Sky auszuleihen. Die M300 gehört zur Enterprise-Serie von DJI. Für sie existiert derzeit noch keine offizielle Klassifizierung der EASA, jedoch unterscheidet sie sich in ihrer Bauart und im Gewicht nur geringfügig von der Matrice 350 RTK, die in die Klasse C3 fällt, wie in Abbildung 1 zu sehen ist.

Für diese Drohne sind also Flüge im U-Space künftig genehmigungspflichtig. Außerdem verfügt sie über die für die Netzidentifikation erforderlichen technischen Voraussetzungen (DJI, 2023h). Daher ist sie auch für den Praxistest gut geeignet. Die Tests habe ich an zwei Tagen durchgeführt. Mein Ziel war dabei für einen aktivierten Flug die reale Position der Drohne in der Flugüberwachung des USSPs nachvollziehen zu können.

Zur Vorbereitung auf den Test habe ich zusätzlich zu meiner Anwendung noch die Vorlage für das Frontend von DJI installiert (DJI, 2023b). Hier musste die Konfigurationsdatei angepasst werden. Ich habe dort meinen DJI-Developer Key mit dem entsprechenden Username und Passwort sowie die URL des Backends hinterlegt. Das Beispiel-Frontend dient für die DJI-Pilot 2 App als Einstiegspunkt für die externe Cloud-Anbindung. Die IP-Adresse wird unter Angabe des Ports bei der Pilot App eingegeben, womit sich das Anmeldefenster der Webanwendung öffnet. Hier kann man sich mit einem Beispieluser anmelden. Daraufhin wird unter anderem die MQTT-Verbindung zum EMQX-

Broker aufgebaut. Wenn dies erfolgreich verläuft, sendet die M300 daraufhin ihre Daten und sie können vom Backend ausgewertet werden. Sie übermittelt unter anderem ihren Online-Status und ihre Seriennummer. Die Seriennummer ist für jede Drohne einzigartig und daher wichtig für die Identifikation der Drohne im U-Space.

Am ersten Testtag habe ich dann zunächst die Verbindung von der Fernbedienung der Drohne zu meinem Programm hergestellt. Bei der Fernbedienung handelt es sich um den DJI Smart Controller Enterprise (DJI, 2023a). Auf diesem war die Pilot 2 App in der Version 7.0.2.5 installiert. In der App konnte ich dann den externen Cloud-Dienst hinzufügen. Dafür musste ich die lokale IP-Adresse meines Rechners eingeben, um eine Verbindung zur Web-App herzustellen. Über landete man dann auf der Login-Seite der Web-App. Hier konnte man sich mit einem Beispieluser anmelden, wodurch die Verbindung zum Backend hergestellt wurde. Außerdem wurde der Pilot-App automatisch vermittelt, an welchen Broker ihre MQTT-Signale gesendet werden sollen. Für einen erfolgreichen Test musste ich die Windows-Firewall kurzfristig ausschalten. Eine bessere Alternative wäre das Hinzufügen von Sonderregeln in der Firewall gewesen. Die Verbindung zur Cloud-Anwendung konnte so schließlich aufgebaut werden. In Abbildung 8 ist die Fernbedienung nach der erfolgreichen Verbindung zu sehen.

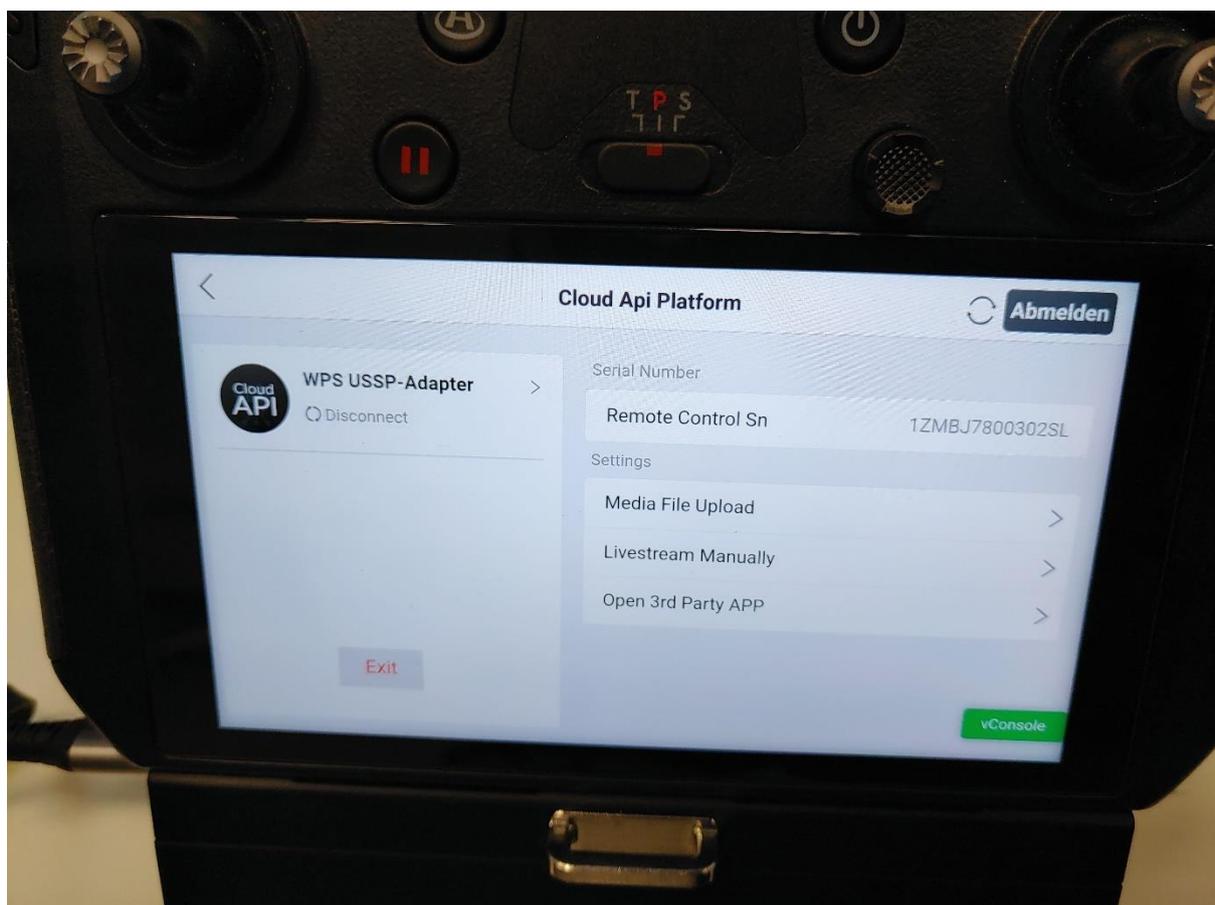


Abbildung 8: Die Pilot 2 App nach erfolgreicher Verbindung mit der Cloud-Anwendung

Im zweiten Schritt habe ich die M300-Drohne eingeschaltet. Diese stellte eine Verbindung zur Pilot 2 App her. Sowohl die Drohne als auch die Fernbedienung wurden vom Backend erkannt und mit ihrer Seriennummer in der Datenbank des Backends gespeichert (siehe Abbildung 9).

	id	device_sn	device_name	user_id	nickname
1	2	dummygatewaysn	DJI Dock	a1559e7c-8dd8-478...	My Device
2	10	dummydronesn	Mavic 3E		Mavic 3E
3	11	1ZMBJ7800302SL	DJI Smart Controller	be7c6c3d-afe9-4be...	DJI Smart Controller
4	12	1ZNBJ7T00C0085	Matrice 300 RTK		Matrice 300 RTK

Abbildung 9: Die Matrice 300 und ihre Fernbedienung sind in der Datenbank zu sehen

Beim zweiten Testtag konnte ich schließlich die Übertragung der für den Netzidentifizierungsdienst benötigten Daten untersuchen. Ich reichte eine Fluggenehmigung für die M300 ein und aktivierte diese, um das Einreichen der Telemetriedaten zu starten. Im ersten Versuch schlug dieser Vorgang fehl, da die Ausrichtung zum geografischen Nordpol im Wertebereich von -180° bis 180° eingereicht wurde, statt im von der API des USSP verlangten Wertebereich von 0° bis 360° .

```
float attitudeHead = (droneState.getAttitudeHead() + 360) % 360;
```

Abbildung 10: Die Ausrichtung der Drohne zum geografischen Nordpol wurde normalisiert.

Die in Abbildung 10 dargestellte Normalisierung führte zum gewünschten Ergebnis. Ein hin und her drehen der Drohne wurde im USSP daraufhin korrekt dargestellt. Die Telemetriedaten wurden nun vom USSP akzeptiert. Als nächstes fiel auf, dass es in Innenräumen schwer ist, ein GPS-Signal zu empfangen. Die Drohne sendete „Zero Island“-Daten, also jeweils Nullkoordinaten. Dadurch erschien die Drohne in der Anwendung als nicht konform. Für eine zukünftige Weiterentwicklung müsste bei fehlendem GPS-Signal dafür gesorgt werden, dass die Nullkoordinaten nicht einfach an den USSP weitergeleitet werden. Wir haben die Drohne schließlich außerhalb des Gebäudes positioniert. Draußen war der Empfang besser und die Drohne wurde nun in der Flugüberwachung des USSPs angezeigt. Da wir keine Flugerlaubnis an dem Tag bekommen haben, konnte die Drohne nur eingeschaltet, aber nicht gestartet werden. Also haben wir ein Flugszenario simuliert, indem wir die Drohne über den Parkplatz getragen haben. In Abbildung 12 ist das Ergebnis dieser Simulation in der Ansicht der Flugüberwachung des USSPs zu sehen. Dort kann der Streckenverlauf nachvollzogen werden und die aktuelle Position der Drohne inklusive ihrer Höhe⁸.

⁸ Die Höhe von 48,3m erklärt sich dadurch, dass im USSP die WGS-84 Höhe über dem Referenzellipsoiden angezeigt wird (International Civil Aviation Organization, 2002).

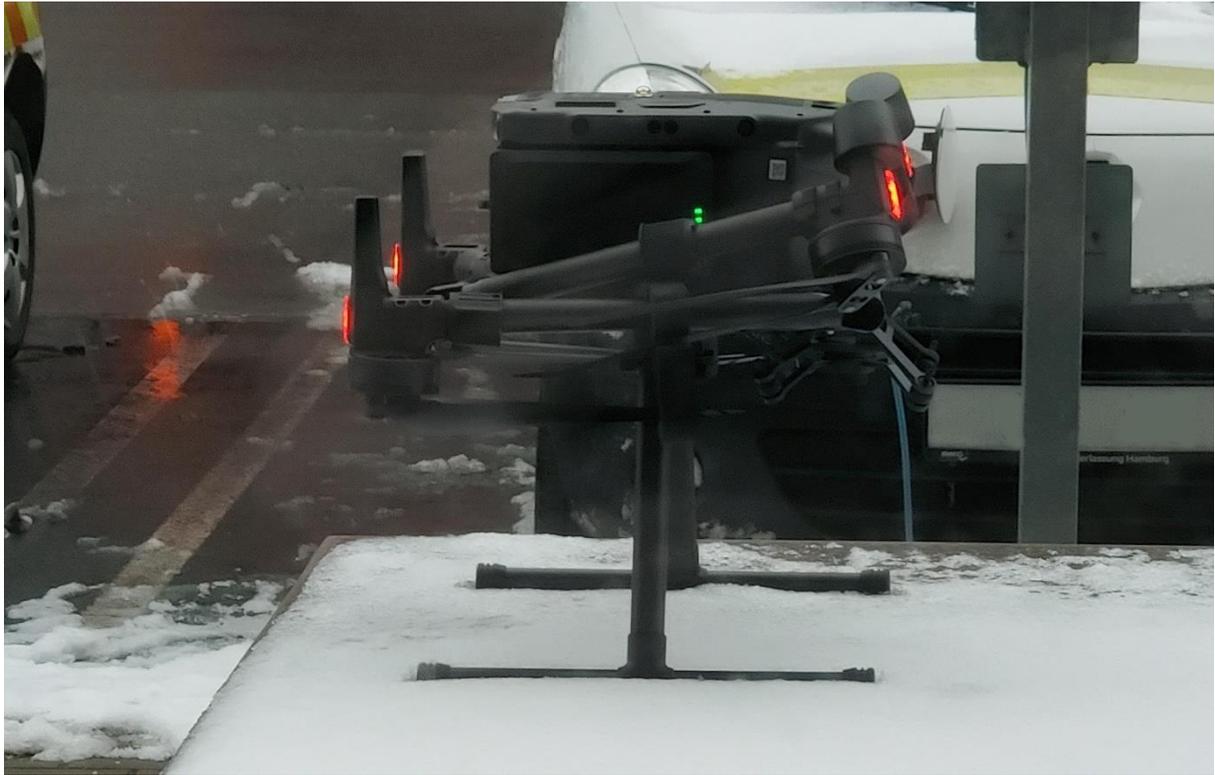


Abbildung 11: Die M300 wurde wegen des besseren Empfangs draußen platziert.

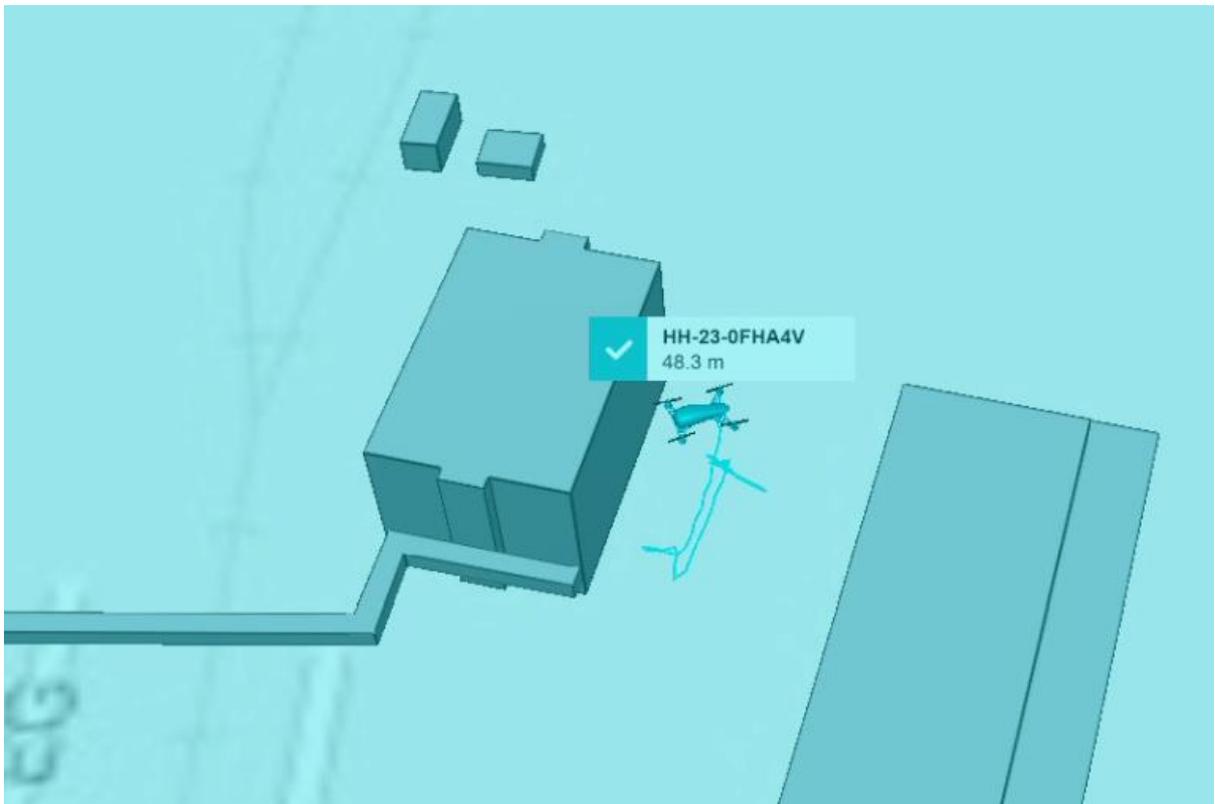


Abbildung 12: Die M300 wird im USSP überwacht.

So konnte eine Fluggenehmigung eingereicht und aktiviert werden und im Anschluss konnte in der Lagebild-Ansicht des USSPs beobachtet werden, wo sich die Drohne aktuell befindet. Die Drohne

musste also nicht fliegen oder flugbereit sein, ihr GPS-Signal sendete sie trotzdem. Auch die Ausrichtung wurde nach einer kleinen Anpassung im Code korrekt angezeigt. Die Höhendaten wurden ebenfalls korrekt übertragen, sobald das GPS-Signal empfangen werden konnte. Diese kamen nach meiner Beobachtung im WGS84-Format an, das auch an den USSP weitergeleitet werden konnte. Auch kamen die Daten mit nur kurzer Verzögerung im USSP an. Wenn die Drohne bewegt wurde, konnte innerhalb kurzer Zeit die entsprechende Bewegung im USSP nachvollzogen werden. Leistungseinbrüche oder Ruckeln traten in dem System keine auf.

10 Ergebnisse und Fazit

10.1 Netzidentifizierung von DJI

In dieser Arbeit wurde eine bestehende Lösung für die Einreichung von Fluggenehmigungen von DJI-Drohnen so erweitert, dass zusätzlich und automatisiert die für den Netzidentifizierungsdienst benötigten Daten beim USSP eingereicht werden. In mehreren Schritten wurde das Cloud-System für einen neuen USSP angepasst und die Möglichkeit geschaffen, genehmigte Anträge zu aktivieren, in Echtzeit im USSP zu überwachen und wieder zu deaktivieren.

Mithilfe einer DJI-Flugmission konnte bei dem neuen USSP ein Fluggenehmigungsantrag erstellt werden, der den Bestimmungen der U-Space Verordnung entspricht. Dieser Antrag wurde dann eingereicht und angenommen. Mit der Erweiterung der Schnittstelle der Cloud API ist es dann auch gelungen, diesen Antrag dann zu aktivieren und die Flugmission zu starten. Bei der Durchführung wurden die für die Netzidentifizierung erforderlichen Daten aus dem MQTT-Signal der Drohne erfolgreich an den USSP übertragen, sodass dieser in regelmäßigen Abständen über die aktuelle Position der Drohne informiert wurde. In der Flugüberwachungsansicht des USSP konnte der Drohnenflug nachvollzogen werden und ständig auf die Einhaltung seiner Genehmigung überprüft werden. Schließlich wurde der Flug beendet und die Fluggenehmigung wurde deaktiviert. Die Drohne war zu jedem Zeitpunkt eindeutig identifizierbar, da sie ihre Seriennummer in ihrem MQTT-Signal übermittelt hat und dieses auch an den USSP übertragen wurde.

Die Softwarelösung konnte mit einer DJI M300 RTK-Drohne getestet werden. Leider konnte die Drohne aufgrund einer fehlenden Flugerlaubnis nicht gestartet werden, es ist aber trotzdem ein praktischer Test gelungen, bei dem in einem realistischen Szenario eine echte Drohne ihre Telemetriedaten in regelmäßigen Abständen an den USSP übermittelte.

10.2 Limitierungen

Es wurde hier gezeigt, wie mit den Enterprise-Modellen, auf deren Fernbedienung die DJI-Pilot 2 App mit integrierter Anbindung an eine externe Cloud installiert ist, die Anbindung an den U-Space in Europa gelingen kann. Dabei wurde der Happy-Path gewählt, bei dem es zu keinen Komplikationen mit temporären Luftraumbeschränkungen oder ähnlichem kommt. Für Anwendungsfälle, bei denen es zu Störungen kommt oder Flugpläne kurzfristig geändert werden müssen, muss diese Lösung noch erweitert werden. Die API des USSP bietet bereits eine Anbindung für den Konformitätsüberwachungsdienst an, anhand dessen das Projekt weiter ausgebaut werden kann. In Abschnitt 11.2 wird auf die Implementierung weiterer U-Space Dienste eingegangen.

Neben den Enterprise-Modellen existieren noch weitere UAS von DJI, die mit anderen Apps funktionieren und nicht mit der Pilot 2 App. Wie bereits in Abschnitt 6.2 besprochen, werden nicht alle diese Drohnen den gesamten Genehmigungsprozess durchlaufen müssen. Für den Teil, die aber

in die entsprechenden Klassifizierungen fallen, muss ein anderer Ansatz gewählt werden als die Cloud API. Dabei wäre der Einsatz der SDKs von DJI denkbar.

Eine weitere Limitierung ist die fehlende Anzeige für U-Space Funktionen in der Pilot 2 App. Bisher werden dort für die Missionsplanung nur Zonen angezeigt, die nicht beflogen werden dürfen. Aber eine Anzeige für durch USSPs belegten Luftraum fehlt zurzeit. Dieses Problem könnte behoben werden, indem eine entsprechende Anzeige auf einer Karte mit dem bisher fehlenden Frontend für die Cloud API Lösung entwickelt wird. Wie eine solche Lösung aussehen könnte, wird in Abschnitt 11.1 besprochen.

10.3 Fazit

Mit den Ergebnissen dieser Arbeit wird klar, dass die Anbindung von DJI-Drohnen an den U-Space nicht nur in der Theorie möglich ist. Es wurde ein funktionierender Prototyp vorgestellt, der die wichtigsten Voraussetzungen aus der U-Space-Verordnung erfüllt. Damit ist die Grundlage gelegt worden für eine vollumfängliche Lösung, wie sie auch im täglichen Betrieb funktionieren könnte.

Die Modellierungstechnik DST hat einen schnellen Überblick über ein komplexes Problem geben können und mit einer einfachen Bildsprache konnte der neue U-Space-Genehmigungsprozess aus Sicht eines UAS-Betreibers veranschaulicht werden. So konnten die relevanten Prozesse und Abläufe identifiziert werden und somit konnte schnell und effizient eine Grundlage gelegt werden, wie eine Softwarelösung zur Implementierung dieser Prozesse aussehen kann. Dank des DST-Interaktionsdiagramms ist es dann gelungen, den bisher genutzten Bounded Context für die Fluggenehmigung zu erweitern und die taktische Phase des Konfliktmanagements dort einzubeziehen.

Bei der Implementierung der Lösung bildete Domain-Driven Design einen hilfreichen Leitfaden, um die im DST identifizierten fachlichen Prozesse im Code nachzubilden. Da der Bestandscode bereits als ein Bounded Context im Sinne von DDD implementiert war, konnte ich schnell die relevanten Orte im Code identifizieren und anpassen. Durch die Struktur, die DDD dem Code gegeben hat, erweist er sich als einfach skalierbar. Das im Projekt implementierte Domänenmodell ließ sich schnell anpassen und erweitern, sodass auch die Aktivierung und das Einreichen der Telemetriedaten in die Anwendung integriert werden konnten.

Es konnte mithilfe der DJI Cloud API die für den UAS-Fluggenehmigungsdienst und den Netzidentifizierungsdienst erforderlichen Daten aggregiert und an den USSP weitergeleitet werden.

Insbesondere der Praxistest mit einer passenden DJI-Drohne war ein sehr hilfreicher Schritt, um die Erreichbarkeit des Ziels der vollständigen Anbindung von DJI-Drohnen zu zeigen. So ist nicht nur ein theoretisches Arbeitsergebnis erzielt worden, sondern es konnte auch ein laufendes System praktisch ausprobiert werden, um wichtige Erfahrungswerte zu sammeln und erste für die Praxis wichtige Details auszuarbeiten.

11 Ausblick und weitere Forschung

Im Bereich der Genehmigung von Drohnenflügen, der Netzidentifikation und der Datenerfassung, sowie zur Gestaltung eines sicheren Luftraums in Europa und weltweit gibt es noch viele mögliche Forschungsfelder. Im Folgenden werden auszugswise einige Themen vorgestellt, die eine gute Fortsetzung zu dieser Arbeit bilden würden oder eng verwandt zum in dieser Arbeit behandelten Thema sind.

11.1 Entwicklung einer App zur Verwaltung der Genehmigungen

In diesem Projekt wurden die Fluggenehmigungen noch mithilfe von angepassten API-Calls und der Software Postman eingereicht. Dieser Ansatz eignete sich gut, um eine Beispiellösung zu erstellen für die Genehmigung, Aktivierung und das Überwachen von DJI-Drohnen.

Jedoch bräuchten echte Anwender dieser Lösung eine benutzerfreundliche Bedienoberfläche, mithilfe derer sie sich mit der Cloud-Anwendung verbinden können und ihre Fluggenehmigungen verwalten könnten. Eine solche Oberfläche könnte beispielsweise eine Webanwendung sein, eine App oder eine Desktop-Anwendung.

In einer solchen App könnte dann eine Übersicht aller Fluggenehmigungen angezeigt werden und es müsste interaktive Bedienelemente geben, um Genehmigungen und Aktivierungen anzufragen. Insgesamt wäre der Aufwand zur Entwicklung einer solchen App gering, da die nötigen Berechnungen in der Cloud-Anwendung schon existieren. Sie müsste lediglich Möglichkeiten bieten, diese zu steuern und die richtigen Informationen anzuzeigen.

Einen guten Einstieg für eine derartige App bietet die Cloud API Web-Demo (DJI, 2023b), die in diesem Projekt schon für die Verbindung der Fernbedienung mit der Cloud-Anwendung eingesetzt wurde. Hier wurde schon passend zur Cloud-Anwendung eine kleine Weboberfläche bereitgestellt, mit der die Cloud-Funktionen bedient werden können. Diese könnte um die in dieser Arbeit vorgestellten U-Space-Funktionen erweitert werden.

11.2 Weitere U-Space Dienste

Wie in Abschnitt 6.1 besprochen müssen USSPs einen Netzidentifizierungsdienst, ein Geo-Sensibilisierungsdienst, die UAS-Fluggenehmigung und der Verkehrsinformationsdienst verpflichtend bereitstellen. Zusätzlich können die Mitgliedsstaaten noch einen Wetterinformationsdienst oder Konformitätsüberwachungsdienst vorschreiben.

Mit der in dieser Arbeit besprochene Lösung wurde der Fokus auf den Netzidentifizierungsdienst gelegt, nachdem der dem zugrundeliegende Fluggenehmigungsdienst schon implementiert war. Für den Geo-Sensibilisierungsdienst, der UAS-Betreiber über bestehende Luftraumbeschränkungen

informiert, sowie den Verkehrsinformationsdienst, bei dem USSPs den UAS-Betreibern ein Lagebild über weitere Flüge in dessen Nähe bereitstellt, wurde die Lösung noch nicht erweitert. Für die Geo-Sensibilisierung bietet der in dieser Arbeit genutzte USSP bereits einen passenden GET-Request an, mit dem bestehende Luftraumbeschränkungen angefordert werden können, um diese in einer Benutzeroberfläche anzuzeigen. Außerdem besitzt er eine Schnittstelle für den Konformitätsüberwachungsdienst. Dieser wird in Artikel 13 des U-Space Verordnung beschrieben (EU-Kommission, 2021, S. 139), laut dem Anbieter dieses Dienstes den UAS-Betreibern eine Möglichkeit bieten zu überprüfen, ob ihr Flug konform zu den Richtlinien abläuft. Sollte der Flug beispielsweise den in seiner Fluggenehmigung gebuchten Bereich verlassen oder dort außerhalb seines Genehmigungszeitraums unterwegs sein, muss der UAS-Betreiber eine Warnung erhalten. Auch wenn der UAS-Betreiber sich konform zu seiner Fluggenehmigung verhält, kann der Luftraum ganz oder teilweise gesperrt werden. Dies kann beispielsweise auftreten, wenn in der Nähe ein Rettungshelikopter im Einsatz ist oder ein höher priorisierter Drohnenflug stattfinden soll. In diesem Fall muss der UAS-Betreiber den Erhalt der Warnung bestätigen. Auch der Konformitätsüberwachungsdienst wurde im Rahmen dieser Arbeit noch nicht behandelt und kann noch ergänzt werden. Beispielsweise könnte die in Kapitel 11.1 beschriebene App um die Anzeige und Bestätigung von Konformitätswarnungen ergänzt werden. Denkbar wäre auch ein System, das den UAS-Betreiber direkt auf seinem Mobilfunkgerät benachrichtigt und dieser es dort auch bestätigen kann.

11.3 Anbindung weiterer Drohnen

Bisher können mit der hier behandelten Lösung nur Drohnen aus dem Enterprise-Sektor von DJI an den U-Space angebunden werden. Voraussetzung für einen Erfolg dieser Lösung ist derzeit, dass die Drohnen mit einer Software gesteuert werden kann, die eine Missionsplanung ermöglicht und über die Cloud API mit einer externen Cloud-Lösung kommunizieren kann. Damit kann bisher nur der Enterprise-Teil der DJI-Drohnenflotte mit dem USSP verbunden werden.

Wie in Abschnitt 6.2 beschrieben wurde, fällt ein Teil der kleineren Modelle der DJI-Drohnen aus dem Verbrauchermarkt in die technische Klasse C0 und wird somit nicht zum Gegenstand der U-Space-Verordnung. Jedoch existieren auch für den Verbrauchermarkt DJI-Drohnen, für die bisher keine direkte Möglichkeit für eine Anbindung über die Cloud API besteht. Somit ist die in dieser Arbeit präsentierte Lösung zurzeit noch nicht geeignet, um diese Gruppe von Drohnen mit dem U-Space zu verbinden. Für diese wäre eine Möglichkeit, mithilfe der in Abschnitt 6.5 vorgestellten SDKs von DJI eine Software zu entwickeln, die auch mit diesen Modellen kompatibel ist.

Auch wenn DJI derzeit der größte Hersteller auf dem Drohnenmarkt ist, gibt es noch weitere Hersteller, deren Drohnen in Zukunft den EU-Regularien entsprechen müssen. Auch für diese werden Konzepte und Softwarelösungen nötig sein, mit deren Hilfe dieses Ziel erreicht werden kann.

Beispielsweise könnte die in dieser Arbeit präsentierte Lösung um weitere Schnittstellen erweitert werden, um weitere Drohrentypen zu unterstützen. Damit könnte die Transformation und Einreichung der Daten wiederverwendet werden, ohne eine komplett neue Lösung implementieren zu müssen.

11.4 Anbindung an weitere UTM

Eine Besonderheit der EU-Verordnung ist, dass es durchaus möglich sein wird, dass mehrere USSPs für denselben U-Space verantwortlich sind. Es kann „in einem U-Space mehrere USSP geben, die in einem Wettbewerb zueinanderstehen und sich in Service und Preis voneinander unterscheiden.“ (DFS, 2022)

In dieser Arbeit wurde die API für einen bestimmten USSP implementiert, deshalb funktioniert diese Lösung bisher auch nur für diesen einen USSP. Es wäre aber durchaus möglich, auch weitere USSPs von anderen Herstellern anzubinden. Auch hier müsste das Rad nicht in einem komplett neuen Projekt neu erfunden werden. Diese Arbeit kann als Grundlage dienen, DJI-Drohnen auch an weitere USSPs anzubinden, um den Genehmigungsprozess zu vereinfachen.

Außerdem ist das Verkehrsmanagement für Drohnen kein rein europäisches Thema. Weltweit wird daran gearbeitet, UAS sicher und effizient in den Luftraum zu integrieren. Allgemein wird das Verkehrsmanagement der unbemannten Luftfahrt „Unmanned Aircraft System Traffic Management“ (UTM) genannt. Weltweit wird an verschiedenen Implementierungen für UTM gearbeitet. Die NASA hat in den USA beispielsweise ein Forschungsprojekt zur sicheren Integration von Drohnen in den Luftraum durchgeführt (NASA, 2021). Für die weitere Forschung wäre dies ein interessantes Themenfeld, um auch außerhalb der EU in anderen Rechtslagen DJI-Drohnen mit den jeweiligen UTM zu verbinden. Auch für internationale Systeme dürfte die Lösung in dieser Arbeit geeignet sein, um eine Grundlage für die Anbindung daran zu bilden, besonders in Ländern, die ähnliche Ansätze verfolgen und Verkehrssysteme mit einem integrierten Fluggenehmigungsprozess nutzen.

12 Literaturverzeichnis

- Apache. (18. November 2023). *Apache Maven Project*. Abgerufen am 28. November 2023 von <https://maven.apache.org/>
- ArcGroup (Hrsg.). (6. Juni 2021). *China's Thriving Drone Industry*. Abgerufen am 23. Juli 2023 von <https://arc-group.com/china-thriving-drone-industry/>
- ASTM International. (17. Juni 2022). F3411 – 22a Standard Specification for Remote ID and Tracking.
- Aviaportal. (2023). *Geschichte Luftvg*. Abgerufen am 24. November 2023 von <https://aviaportal.de/index.php/archiv/geschichte-luftvg>
- AWS. (2023). Was ist MQTT? Abgerufen am 14. Dezember 2023 von <https://aws.amazon.com/de/what-is/mqtt/>
- Belwafi, K., Alameri, S. A., Al Hamadi, H., & Shoufan, A. (2022). Unmanned Aerial Vehicles' Remote Identification: A Tutorial and Survey. *IEEE Access*(10), 87577-87601. doi:10.1109/ACCESS.2022.3199909
- Caesar, B., Grebner, T., Fay, A., Maltzahn, H. F., Schuler-Harms, M., Victor, K., . . . Henniges, J. (2023). *UDVeO - Urbaner Drohnenverkehr effizient organisiert: Gemeinsamer Schlussbericht*. Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg.
- Cockburn, A. (2005). Hexagonal architecture. Abgerufen am 5. Dezember 2023 von <https://alistair.cockburn.us/hexagonal-architecture/>
- Damasceno, R. (2023). MQTT Simulator. Abgerufen am 15. Dezember 2023 von <https://github.com/DamascenoRafael/mqtt-simulator>
- DFS. (17. Februar 2022). Deutschland will Drohnengebiete zeitnah umsetzen. Abgerufen am 13. November 2023 von <https://dfs.de/homepage/de/medien/presse/2022/17-02-2022-deutschland-will-drohnengebiete-zeitnah-umsetzen/>
- DFS. (2023). *DFS - Rechtlicher Rahmen*. Abgerufen am 24. November 2023 von <https://www.dfs.de/homepage/de/flugsicherung/rechtlicher-rahmen/>
- DJI. (2023a). Abgerufen am 21. November 2023 von <https://store.dji.com/uk/product/m300-dji-smart-controller-enterprise?vid=101001>
- DJI. (2023b). Cloud API Demo Web. Abgerufen am 13. November 2023 von <https://github.com/dji-sdk/Cloud-API-Demo-Web>
- DJI. (2023c). DJI Cloud API Dokumentation. Abgerufen am 23. Juli 2023 von <https://developer.dji.com/doc/cloud-api-tutorial/en/>
- DJI. (2023d). DJI Cloud API Function Display Video. Abgerufen am 13. November 2023 von <https://developer.dji.com/doc/cloud-api-tutorial/en/quick-start/function-display-video.html>
- DJI. (2023e). DJI-Cloud-API-Demo. Abgerufen am 25. Oktober 2023 von <https://github.com/dji-sdk/DJI-Cloud-API-Demo/tree/v1.5.0>

- DJI. (2023f). Matrice 300 RTK. Abgerufen am 15. November 2023 von <https://enterprise.dji.com/de/matrice-300>
- DJI. (2023g). Matrice 300 RTK User Manual. Abgerufen am 29. November 2023 von https://dl.djicdn.com/downloads/matrice-300/20200507/M300_RTK_User_Manual_EN.pdf
- DJI. (10. April 2023h). What you need to know about Remote ID if you fly DJI Enterprise. Abgerufen am 4. Dezember 2023 von <https://enterprise-insights.dji.com/blog/remote-id-dji-enterprise-drones>
- DJI. (2023i). DJI Enterprise Drones. Abgerufen am 8. Dezember 2023 von <https://www.dji.com/products/enterprise>
- Docker. (2023). *docker*. Abgerufen am 28. November 2023 von <https://www.docker.com/>
- EASA. (25. Oktober 2023). *Open Category - Civil Drones*. Abgerufen am 02. November 2023 von <https://www.easa.europa.eu/en/domains/civil-drones/drones-regulatory-framework-background/open-category-civil-drones>
- EMQ Technologies. (2023). *EMQX*. Abgerufen am 28. November 2023 von <https://www.emqx.com/en/products/emqx>
- EU-Kommission. (11. Juni 2019). DELEGIERTE VERORDNUNG (EU) 2019/945 DER KOMMISSION. Abgerufen am 25. Oktober 2023 von <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0945&from=DE>
- EU-Kommission. (22. April 2021). U-Space Verordnung. *DURCHFÜHRUNGSVERORDNUNG (EU) 2021/664 DER KOMMISSION vom 22. April 2021 über einen Rechtsrahmen für den U-Space*. Abgerufen am 20. Juli 2023 von <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R0664&from=EN>
- European Commission. (22. April 2021). COMMISSION IMPLEMENTING REGULATION (EU) 2021/664 of 22 April 2021 on a regulatory framework for the U-Space. Von <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R0664> abgerufen
- Evans, E. (2003). *Domain-Driven Design*. Addison-Wesley.
- FOCA. (27. Juni 2022). UAS Flight Authorisation Automated Testing. Abgerufen am 29. November 2023 von <https://susi.swiss/2022/06/28/uas-flight-authorisation-automated-testing/>
- Gersch, J. (Juni 2023). BA Gersch. *Die Anbindung von DJI Drohnen an den U-Space*. Hamburg, Deutschland.
- Hofer, S., & Schwentner, H. (2023). *Domain Storytelling - Gemeinschaftlich, visuell und agil zu fachlich wertvoller Software*. d.punkt.verlag.
- Hofer, S., Schwentner, H., & Tune, N. (2022). *Domain storytelling: A collaborative, visual, and agile way to build domain-driven software*. Addison-Wesley.

- International Civil Aviation Organization. (2002). *World Geodetic System - 1984 (WGS-84) Manual*. Abgerufen am 12. Dezember 2023 von <https://www.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2014/ECARAIM/REF08-Doc9674.pdf>
- Maghazei, O., Lewis, M. A., & Netland, T. H. (21. Mai 2022). Emerging technologies and the use case: A multi-year study of drone adoption. (Wiley, Hrsg.) *Journal of Operations Management*, 68(6-7), 560-591. doi:10.1002/joom.1196
- Mejia, L. (15. November 2022). *ANRA Technologies Wins FAA Contract for Broadcast Remote ID Collection, Correlation, and Network Dissemination*. Abgerufen am 27. November 2023 von <https://www.anratechnologies.com/home/news/anra-technologies-wins-faa-contract-for-broadcast-remote-id-collection-correlation-and-network-dissemination/>
- NASA. (27. Mai 2021). What is Unmanned Aircraft Systems Traffic Management? USA. Abgerufen am 13. November 2023 von <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/ames/what-is-unmanned-aircraft-systems-traffic-management/>
- Nooralishahi, P., Ibarra-Castanedo, C., Deane, S., López, F., Pant, S., Genest, M., . . . Maldague, X. (2021). Drone-Based Non-Destructive Inspection of Industrial Sites: A Review and Case Studies. *Drones*, 5. doi:10.3390/drones5040106
- OpenAPI. (2023). *OpenAPI Generator*. Abgerufen am 01. September 2023 von <https://openapi-generator.tech/>
- Postman. (2023). Postman. Abgerufen am 22. November 2023 von <https://www.postman.com/>
- Sedov, L., Polishchuk, V., & Acuna, V. (2020). Altitude Zoning for UTM. *10th SESAR Innovation Days*. Abgerufen am 29. November 2023 von <https://itn-web.it.liu.se/~valpo40/pages/cars.pdf>
- SESAR, JU. (2016). *European drones outlook study unlocking the value for europe*. Siebert, JU. Abgerufen am 26. Oktober 2023 von <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/93d90664-28b3-11e7-ab65-01aa75ed71a1/language-en>
- Spring. (2023). *Spring Security*. Abgerufen am 28. November 2023 von <https://spring.io/projects/spring-security>
- udveo. (2022). *Zentrale Erkenntnisse zur U-Space-Verordnung und ihrer*. Projektbericht, Hamburg. Abgerufen am 23. Juli 2023 von https://udveo.eu/wp-content/uploads/2022/05/20220307_UDVeo-Handlungsempfehlungen-Anhang_aktualisiert.pdf
- Vernon, V., Lilienthal, C., & Schwentner, H. (2017). *Domain-Driven Design kompakt*. dpunkt.verlag.
- WPS. (2023). *Urbaner Drohnenverkehr - effizient organisiert*. Hamburg, Deutschland. Abgerufen am 23. Juli 2023 von <https://www.wps.de/leistungen/forschung/urbanen-drohnen-verkehr-effizient-organisieren>

13 Eidesstattliche Versicherung

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit im Bachelorstudiengang Software-System Entwicklung selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel – insbesondere keine im Quellenverzeichnis nicht benannten Internet-Quellen – benutzt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Ich versichere weiterhin, dass ich die Arbeit vorher nicht in einem anderen Prüfungsverfahren eingereicht habe.

Ich stimme der Einstellung der Arbeit in die Bibliothek des Fachbereichs Informatik zu.

Hamburg, den 22.12.2023

X *L. Bogumil* _____

Leon Bogumil