

FIR e. V. an der RWTH Aachen  
Institute for Industrial Management at RWTH Aachen University  
Campus-Boulevard 55  
52074 Aachen  
Germany

# Gesamtschlussbericht Forschungsprojekt SmartDroneWatch

Automatisierte Zustandsüberwachung in hochvernetzten  
Produktionsumgebungen unter Realbedingungen

**7-300-190-3358 / 45ILM1017A**



## Inhaltsverzeichnis

Gesamtschlussbericht Forschungsprojekt SmartDroneWatch .....	1
Inhaltsverzeichnis .....	2
Abbildungsverzeichnis .....	4
I. Projektübersicht .....	5
a) Beschreibung und Ziel des Forschungsprojekts.....	5
b) Voraussetzungen & Ausgangssituation.....	6
Testumgebung .....	6
c) Planung und Ablauf des Vorhabens (Lösungsweg).....	8
d) Wissenschaftlicher und technischer Stand .....	8
e) Aktueller Stand der Wissenschaft.....	9
f) Zusammenarbeit mit weiteren Partnern .....	11
II. Verwendung der Zuwendung, Durchführung und Ergebnis des Vorhabens .....	13
a) Übersicht des Projektverlaufs.....	13
Anforderungs- und Technologieanalyse (AP 1.1 & 1.2) .....	13
Konzeptionierung der Drohne und Architektur (AP 1.3) .....	15
Konstruktion der Systemkomponenten (AP 2.1) .....	16
Drohnenbau (AP 2.2) .....	17
Schnittstellenkonzeption und -einrichtung (AP 2.3).....	18
Kollisionsvermeidung (AP 2.4) .....	18
Entwicklung Frontend und Digital Twin (AP 2.5 & 2.6).....	18
Benchmarking Datenübertragungsstandards (AP 3.1) .....	22
Benchmarking Tracking-Lösungen (AP 3.2) .....	22
Erweiterte Versuchsreihe zur Positionsbestimmung.....	29
Benchmarking Kollisionsvermeidung und Tests zur Kollisionsvermeidung (AP 3.3) .....	30
Aufbau Demonstrator & Erweiterung der UWB-Anker (AP 4.1).....	32
Finale Versuchsdurchführung und Validierung des Konzeptes (AP 4.2) .....	34
b) Darstellung zahlenmäßiger Nachweis (Zusammenfassung) .....	36
c) Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	37
d) Voraussichtlicher Nutzen und Verwertungsplan .....	37
Nutzen für die Zielgruppe.....	37
e) Darstellung des fortgeschriebenen Datenmanagementplans .....	38

f)	Öffentlichkeitswirksamen Maßnahmen .....	38
III.	Literaturverzeichnis .....	39

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Autonome Drohne in Produktionsumgebung (Quelle: DFA / Emqopter) .....	5
Abbildung 2: DFA-Produktionsumgebung (Quelle: DFA / FIR).....	7
Abbildung 3: Projektplan .....	8
Abbildung 4: Testflüge im Rahmen des Forschungsprojekts MADER (Quelle: MIT).....	10
Abbildung 5: Objekterkennung in der industriellen Umgebung (Quelle: (Mutijarsa et al. 2022)).....	11
Abbildung 6: Initiales Hardware-Design und -Architektur (Quelle: Emqopter).....	16
Abbildung 7: Prototyp-Design und Referenzprodukt (Quelle: Emqopter) .....	16
Abbildung 8: Im Projekt getestete Drohnen für Outdoor- (in Rot draußen) Indoorbereich (in Schwarz drin) .....	17
Abbildung 9: Digitaler Zwilling der DFA in IndustriQ Elisa (Quelle: DFA).....	19
Abbildung 10: Digitaler Zwilling der DFA in Unity mit dem interaktiven 3D-Modell der SmartDroneWatch-Drohne (Quelle: E4TC).....	20
Abbildung 11: Messreihe der Latenz von MQTT-Paketen über 5GHz WiFi .....	22
Abbildung 12: Testflug in der DFA-Ziel-Umgebung im Bereich hoher Funkwellenbelastung.....	23
Abbildung 13: Pozyx Developer Tag for indoor positioning (Quelle: tags.pozyx.io).....	23
Abbildung 14 - Pozyx Developer Tag (links) mit offenen Hardware-Schnittstellen im Vergleich zu SICK Locu (rechts) (Quelle: tags.pozyx.io; SICK) .....	23
Abbildung 15: Temporäre Installation Pozyx Anker & Messungen auf Hub-, Rollwagen, Stapler, entlang der y- und z-Achse .....	24
Abbildung 16: Prototyp SmartDroneWatch (Modulträger).....	24
Abbildung 17: Flugmanöver y-Achse, translatorisch, eben (Messfehler x-Achse; Pozyx) .....	25
Abbildung 18: Flugmanöver z-Achse (Messfehler x- und y-Achse; Pozyx) .....	26
Abbildung 19 - Flug y-Achse; Plott x-y-Bewegung; Vergleich SICK Vs. Pozyx.....	27
Abbildung 20: Flug y-Achse; Vergleich SICK Vs. Pozyx.....	27
Abbildung 21: Qualitativer Vergleich Barometer Höhenerfassung (SICK) Vs. zusätzlichem Lidar .....	28
Abbildung 22: Vergleich Signalgüte und Abtastrate (y-Achse in Meter, Messung über die Zeit).....	28
Abbildung 23: Zusatztest mit SICK UWB-System, starke Abweichungen in der Positionserfassung.....	29
Abbildung 24: Sensorfusion Bilderkennung (dynamik) und UWB-Werte (absolute Position) unter Laborbedingungen.....	30
Abbildung 25: Vergleich der Übertragungslatenzen vom optischen Verfahren und SICK-UWB-Positionierung.....	30
Abbildung 26 - Testflug der finalen Drohne mit Kollisionserkennung .....	31
Abbildung 27 - Live-Aufnahme der Unterboden-Kamera zur Positions- und Objekterkennung in ca. 5 m Höhe (RTSP-Stream) .....	32
Abbildung 28: Messung der Signalstärken im Bereich der UWB-Antennen (Anker) und sprunghafte Ruhelage des Drohnen-Tags (rechts) (Quelle: DFA).....	32
Abbildung 29: Referenz-Konfiguration Verteilung UWB-Antennen (Anker) in der DFA (Quelle: DFA) ..	33
Abbildung 30: Installationsprozess der zusätzlichen Anker (UWB-Empfangsantenne) und mobile Drohnen-Start-und-Landezone in der DFA .....	33
Abbildung 31: Die zum finalen Testfliegen eingesetzte im Forschungsprojekt entwickelte Drohne.....	34
Abbildung 32: Drohne im autonomen Flug neben einem (künstlich aufgestellten) Hindernis (Leiter) ..	35
Abbildung 33: Digitaler Zwilling der DFA in Unity mit dem interaktiven 3D-Modell der SmartDroneWatch-Drohne (Quelle: E4TC).....	36

## I. Projektübersicht

### a) Beschreibung und Ziel des Forschungsprojekts

Das Erheben von Daten und Informationen über aktuelle Zustände in Produktionsumgebungen ist in der Industrie schon immer eine zentrale Herausforderung gewesen. Trotz moderner Überwachungssysteme bleibt diese Herausforderung bestehen. Meldet ein automatisiertes Fertigungssystem einen Fehler, muss die Situation meistens durch einen Operator vor Ort eingeschätzt werden, um erst dann entsprechende Maßnahmen einzuleiten. Ab der Fehlermeldung fehlt die Information, welche Situation genau vorliegt. Weiterhin fehlen oft Informationen über die aktuelle Position von Flurförderfahrzeugen, Paletten, Geräten und Halbzeug, da keine entsprechende Sensorik oder Tracker vorhanden sind. Ein Fehler von fahrerlosen Transportsystemen besteht oft darin, dass nach einem Not-Stopp nur ein Operator vor Ort die Freigabe zum Betrieb geben kann. Um den Betrieb zentral bzw. aus der Ferne wieder in Betrieb zu nehmen, fehlen aktuell detaillierte Informationen zur Situation, z. B. ob das Hindernis beseitigt wurde. Ein digitaler Zwilling in der Produktion kann heutzutage bereits sehr viele Daten (z. B. Maschinenstatus oder Lokalisierung von Assets) enthalten und diese visualisieren. Jedoch ist die genaue Ausrichtung der Assets im Raum (z. B. Maße von hergestellten Waren) und die Positionierung von nicht verfolgten Assets (z. B. umgefallene Kartons) in einem digitalen Zwilling nicht vorhanden.

Durch ein vollautonomes, hochflexibles drohnenbasiertes Überwachungssystem können diese Lücken geschlossen werden. Das im Forschungsprojekt konzipierte drohnenbasierte Überwachungssystem greift auf den digitalen Zwilling der Produktionsumgebung der Demonstrationsfabrik Aachen GmbH (im Folgenden DFA genannt) zu und erweitert dieses Produktionsabbild um weitere Daten. Die integrierte Sensorik der Drohne ermöglicht eine konstante Kollisionsvermeidung und das aktive Ausweichen bei unerwarteten Hindernissen. Eine hochauflösende Kamera liefert die fehlenden Informationen über einen Livestream. Über entsprechende Schnittstellen ist es möglich, den digitalen Zwilling zu vervollständigen, um so einen effizienteren Produktionsablauf zu ermöglichen. Die Plattform soll modular aufgebaut sein, um die für den sicheren Flug notwendigen Subkomponenten einfach ersetzen und vergleichen zu können. Zu diesen Subkomponenten zählen insbesondere die folgenden: Telemetrie und Videostream (WiFi6), Lokalisierung (UWB), Kollisionsvermeidung (Stereokamera).

Ziel des Projekts ist es, eine Drohne aufzubauen sowie jede der drei Subkomponenten durch die Integration von jeweils mindestens zwei verschiedenen Technologien zu realisieren und wissenschaftlich zu evaluieren. Zur Evaluierung wird dies in die DFA integriert. Die bereits im Digital Twin vorliegenden Daten dienen als Grundlage zur Navigation und Kollisionsvermeidung. Zusätzlich stellt die Drohne selbst ihre Positionsdaten bereit.



Abbildung 1: Autonome Drohne in Produktionsumgebung (Quelle: DFA / Emqopter)



### Das Forschungskonsortium

Das Konsortium besteht aus einer Forschungseinrichtung und zwei Unternehmen.

### Verbundkoordination

- FIR e. V. an der RWTH Aachen, Aachen

### Projektpartner

- Demonstrationsfabrik Aachen GmbH, Aachen
- Emqopter GmbH, Würzburg

### Projektvolumen

342.819,81 Euro (davon 72,58 % Förderanteil durch BMDV)

### Projektlaufzeit

15/12/2022 – 14/12/2023; verlängert bis 15/03/2024

### Forschungsfragen

Die Forschungsfragen, die im Vorhaben SmartDroneWatch beantwortet werden sollen, lauten wie folgt:

- Wie kann die Lokalisierung von indoor operierenden, automatisierten Drohnensystemen sowohl in Echtzeit realisiert werden?
- Welches ist die effizienteste Möglichkeit zur Übertragung von Telemetrie- und Videodaten zu und von einem indoor operierenden, automatisierten Drohnensystem, in Bezug auf Energieverbrauch, Datenrate und Geschwindigkeit?
- Welche Faktoren haben Einfluss auf die Funktion der Kollisionsvermeidung von Drohnensystemen?
- Wie lässt sich der Digitale Zwilling einer Produktionsumgebung durch die zusätzliche Erhebung von Daten mittels automatisierter Drohnensysteme ergänzen?

### **b) Voraussetzungen & Ausgangssituation**

Trotz fortschrittlicher Überwachungssysteme bleibt die ganzheitliche Erfassung von Informationen über den aktuellen Zustand des Produktionsbetriebs eine Herausforderung in der Industrie. Dies betrifft verschiedene Anwendungsbereiche wie automatisierte Fertigungssysteme (z. B. Material wurde eingeklemmt), Lokalisierung von Objekten (z. B. Paletten und Gitterboxen) und Not-Stopps von fahrerlosen Transportsystemen (z. B. aufgrund von einem Hindernis auf dem Fahrweg). Im digitalen Zwilling einer Produktionsumgebung können solche unplanbaren Situationen bisher gar nicht erfasst bzw. überwacht werden, weswegen eine Kontrolle bzw. Überwachung der Situation vor Ort durch Produktionsmitarbeitende notwendig ist.

### **Testumgebung**

Die im Jahr 2015 gegründete Demonstrationsfabrik Aachen GmbH (DFA) ist ein Unternehmen, das sich auf die Umsetzung von Industrie 4.0-Konzepten und anwendungsorientierter Forschung neuer Fertigungstechnologien spezialisiert hat. Neben dem ursprünglichen Forschungsgedanken hat sich die DFA auch zu einem zuverlässigen Zulieferer für verschiedene Branchen in ganz Deutschland entwickelt. Im Rahmen der Lohnfertigung werden verschiedene Produkte aus Stahlblech gefertigt und montiert.

Der Austausch zwischen Unternehmen wird durch die Ausstellung innovativer Use Cases und Demonstratoren gefördert und den Herstellern damit eine Plattform zur Produktpilotierung geboten. Es werden auf 1.600 Quadratmetern Prototypen und Serienprodukte hergestellt, um die Industrie 4.0-Lösungen in einer realen Fertigungsumgebung testen und verbessern zu können (DFA 2024).

Die DFA bietet durch ihren modularen Aufbau ein ideales Umfeld für eine praxisrelevante Versuchsdurchführung. Neben permanenten Installationen, die im Rahmen energieintensiver Auftragsfertigungen genutzt werden und damit große, elektromagnetische Störfelder generieren können, stellen auch die beweglichen Objekte und Anlagen eine Herausforderung für den Betrieb einer Indoor-Drohne dar (s. Abbildung 2). Darüber hinaus sind in der Demonstrationsfabrik auch zahlreiche Antennen und Sender installiert, welche Funkwellen emittieren und damit Signale der Drohne stören können.



Abbildung 2: DFA-Produktionsumgebung (Quelle: DFA / FIR)

## Drohne

Die Gründung von Emqopter GmbH fußt unter anderem auf der Promotionsarbeit Autonome Quadrocopter zur Innenraumerkundung von Gründer und Geschäftsführer Dr. Nils Gageik (Gageik 2015). Dabei kamen insbesondere leichte und kostengünstige Sensoren sowie Sensorfusion zur Hinderniserkennung, Kollisionsvermeidung und aktiven Abstandsregelung zum Einsatz (Gageik et al. 2015). Zuletzt hatte Emqopter bereits im Projekt FlowPro eine Lösung auf UWB-Basis entwickelt, mit deren Hilfe die Transition von draußen nach drinnen zum Einflug in eine Halle sowie die Positionierung im Eingangsbereich der Halle bewerkstelligt wurde. Die Herausforderung in SmartDroneWatch liegt im Vergleich zu den Vorarbeiten insbesondere in der höheren Komplexität der Einsatzumgebung sowie den größeren Störquellen.

### c) Planung und Ablauf des Vorhabens (Lösungsweg)

Die Vorgehensweise zur Erreichung der Forschungsziele gliedert sich in folgende Schwerpunkte innerhalb eines Jahres (s. Abbildung 3):

- Konzeptionelle Entwicklung (AP1): Anforderungsanalyse, Technologieanalyse, Konzeptionierung der Drohne
- Drohnen- und Softwareentwicklung (AP2): Konstruktion der Systemkomponenten, Drohnenbau, Schnittstellenkonzeption und -einrichtung, Kollisionsvermeidung, Entwicklung Frontend, Digital Twin
- Benchmarking (AP3): Datenübertragungsstandards, Tracking-Lösungen, Kollisionsvermeidung
- Validierung (AP4): Aufbau Demonstrator, Test und Validierung des Konzeptes

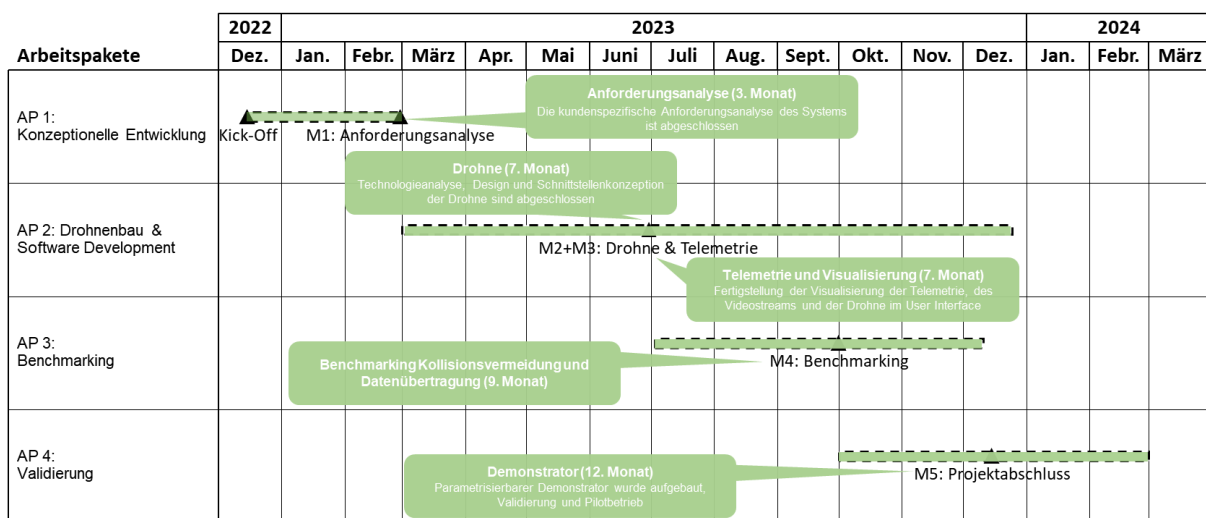


Abbildung 3: Projektplan

### d) Wissenschaftlicher und technischer Stand

Das enorme Potenzial von Drohnen in Logistik- und Industrieprozessen in der Industrie zu optimieren hat in der jüngeren Vergangenheit zu vielen Entwicklungen geführt, in denen Drohnen im Fabrikumfeld eingesetzt werden. Hierbei haben sich Einsatzzwecke jedoch entweder auf die Inspektion (üblicherweise durch manuellen Flug) von Großanlagen und Bauteilen wie etwa Flugzeugrümpfe, auf die Inventur von Lagerbeständen oder auf die Intralogistik beschränkt (s. Wawrla et al. 2019). Einsatzzwecke, in denen Drohnen autonom analytische Aufgaben übernehmen, um tiefere Einblicke in Probleme zu erhalten werden als extrem vielversprechend angesehen, stehen aufgrund der großen technischen Hürden aber noch vor einer Markteinführung (s. Maghazei und Netland 2020). Die hier angestrebte Integration von höherwertigen Informationen, die über einfache Fotos oder Bestandsaufnahmen hinausgehen, stellt eine signifikante technische Neuerung dar und ist insbesondere durch die besondere Infrastruktur der DFA umsetzbar.

Standardmäßig nutzen Drohnen GPS zur Positionsbestimmung. Diese Methode ist jedoch für den Einsatz in Innenräumen ungeeignet, da GPS-Signale in geschlossenen Räumen nur eingeschränkt oder gar nicht verfügbar sind. Zur Bestimmung der Orientierung der Drohne wird ein Magnetfeldsensor verwendet. Dieser kann durch externe Störfelder mit hoher elektromagnetischer Strahlung, wie sie in einer digitalen Zukunftsfabrik, die Metall verarbeitet, zu erwarten sind, beeinflusst werden.



Die Entwicklungsaufgaben des Gesamtsystems gliedern sich in zwei verschiedene Bereiche. Neben der Flugregelung, Pfadplanung und Kollisionsvermeidung, um im Fabrikumfeld einen sicheren autonomen Betrieb zu ermöglichen, sind dies die Datenprozesse, also Datenaufnahme, Übertragung, Verarbeitung sowie Anbindung an den Digital Twin. In beiden Bereichen kann auf bestehende Forschung aufgebaut werden. Die grundsätzliche Anwendbarkeit von Drohnen in der Produktion sind nach aktuellem Stand der Technik bereits gelöst und als machbar erwiesen (s. Nonami 2020), wenngleich die konkrete Umsetzung und nahtlose Integration mit der Drohnentechnik eine Herausforderung darstellen (s. Fast-Berglund et al. 2019). Beispielsweise kann für die Lokalisierung auf SLAM (Simultaneous Localization und Mapping; Cadena et al. 2016) oder auf Beacon-Technologie zurückgegriffen werden, die Datenübertragung über das lokale 4G oder 5G-Netzwerk erfolgen. Für den Einsatz auf einer fliegenden Plattform existieren aber harte Anforderungen beispielsweise an Größe, Gewicht und Stromverbrauch der Subkomponenten (s. Selim und Kamal 2018). Für ein Fabrikumfeld ergeben sich ebenfalls stringente Anforderungen an die funktionale Sicherheit der Drohne. Als Alternative zur Datenauffassung wurden bisher auch Bodenfahrzeuge (AGV) eingesetzt. Im Gegensatz zu einer Drohne erfüllen diese aber nicht in gleichem Maße die Anforderungen an Flexibilität, Geschwindigkeit und Höhe des Automatisationsgrad, weshalb sich bei derartigen Fahrzeugen geringere Verfügbarkeitsraten ergeben.

#### e) **Aktueller Stand der Wissenschaft**

Während der Bewilligung und Durchführung des Projekts wurden noch folgende Forschungsergebnisse bekannt, die teilweise im Forschungsprojekt berücksichtigt konnten.

Ein neuer Algorithmus namens Robust MADER wurde von dem MIT entwickelt, um Drohnen in der Luft vor Kollisionen zu schützen. Ursprünglich als MADER bekannt, ermöglicht dieses System eine optimale, kollisionsfreie Flugbahnplanung für Gruppen von Drohnen, indem jede Drohne ihre geplante Flugbahn an andere sendet. Da reale Drohnenkommunikation Verzögerungen aufweist, die zu Kollisionen führen können, überarbeiteten die Forscher das System, sodass auch bei Kommunikationsverzögerungen kollisionsfreie Flugbahnen erzeugt werden (s. Abbildung 4). Robust MADER beinhaltet einen Überprüfungsschritt, bei dem Drohnen vor der Annahme einer neuen Flugbahn eine Verzögerung einhalten, um aktualisierte Informationen zu erhalten. In Simulationen und praktischen Flugexperimenten war Robust MADER zu 100 Prozent erfolgreich darin, kollisionsfreie Flugbahnen zu generieren, auch wenn die Reisezeiten etwas länger waren. Zukünftig sollen Drohnen mit visuellen Sensoren ausgestattet werden, um Bewegungen anderer Agenten oder Hindernisse zu erkennen und in die Trajektorienplanung einzubeziehen. Unterstützt durch Boeing Research and Technology, werden die Ergebnisse auf der International Conference on Robots and Automation vorgestellt, was eine sicherere Nutzung von Drohnentechnologie in komplexen Umgebungen wie Agrarflächen verspricht (s. Kondo et al. 2023).



Abbildung 4: Testflüge im Rahmen des Forschungsprojekts MADER (Quelle: MIT)

Unbemannte Luftfahrzeuge (UAVs) werden zunehmend für die medizinische Überwachung bei Massenveranstaltungen eingesetzt, doch die Zuverlässigkeit der Live-Videoübertragung zur Identifizierung von gestressten Läufern blieb bisher unerforscht. Eine Studie von Cambridge untersuchte den Erfolg der Live-Videoübertragung von UAVs zur Erkennung akuter Erkrankungen bei Läufern des Montreal Marathons 2022. Vier UAVs mit hochauflösenden Kameras wurden in den letzten 500 Metern des Rennens an zwei Hochrisikobereichen eingesetzt. Über vier Stunden wurde das Videomaterial in Echtzeit an eine Fernbedienungsstation übertragen, wo es von vier Forschungsassistenten überwacht wurde. Von den acht Stunden analysiertem Videomaterial waren 91,7% ununterbrochen und von ausreichender Qualität. Es gab 18 Unterbrechungen der Live-Übertragung mit einer Gesamtunterbrechungszeit von 22 Minuten und 19 Sekunden sowie acht Momente mit unzureichendem Sichtfeld (FOV), die insgesamt 17 Minuten und 33 Sekunden dauerten. Die Überwachung ermöglichte die frühzeitige Identifizierung von zwei Läufern, die medizinische Hilfe benötigten, und die Neupositionierung der UAVs bot eine Echtzeitansicht der Reaktion. Die Studie zeigt, dass die Live-Videoübertragung von UAVs für die medizinische Überwachung bei Marathons machbar ist und durch Übung und zusätzliche Geräteredundanz verbessert werden könnte (s. Lafortune et al. 2023).

Eine Drohne kann zur visuellen Inspektion des Maschinenzustands in der Werkshalle eingesetzt werden. In der Arbeit von Mutijarsa et al. wurde eine Drohne entwickelt, um die Dauer der visuellen Inspektionen zu verkürzen und Objekte an Fräs- und Schleifmaschinen zu erkennen (s. Abbildung 5). Um diese Funktion zu erfüllen, sind Systemteile erforderlich, die für die Bereitstellung visueller Daten für die Inspektoren und den Drohnenpiloten nützlich sind. Dieser Artikel befasst sich mit dem Entwurf, der Implementierung und dem Testen von Produktteilen im Zusammenhang mit der Bilderfassung von einem visuellen Sensor, der Bilddatenübertragung an einen externen Computer und der Erkennung von



Maschinenobjekten. Für diese Teile gibt es vier Produktspezifikationen: Videobildrate, Videoverzögerung, Genauigkeit der Bounding Box und Erkennungsfunktionalität. Die bei den Tests erzielten Ergebnisse stimmen mit den Spezifikationen überein (s. Mutijarsa et al. 2022).



Abbildung 5: Objekterkennung in der industriellen Umgebung (Quelle: (Mutijarsa et al. 2022))

Die Hersteller experimentieren mit dem Einsatz von Drohnen für verschiedene Prozesse wie Überwachung, Inspektion, Zykluszählung und Intralogistik, aber die Einführung in Routineabläufe ist noch selten. Ein Grund für die geringe Akzeptanz liegt in den manuellen Steuerungsanforderungen der meisten Drohnensysteme. Dieser Beitrag untersucht den Einsatz von automatischen Drohnen in der Fertigung. Es wurde eine virtuelle Simulation von Drohnenflügen in einer Fertigungsanlage entwickelt, um das Potenzial automatischer Drohnen für die thermische Inspektion von Spritzgießmaschinen zu ermitteln und zu bewerten. In diesem Beitrag wird über die Durchführung der virtuellen Simulation berichtet und erörtert, wie solche Simulationen den Einsatz automatischer Drohnen für Fabrikinspektionen beeinflussen können. (Maghazei et al. 2021)

#### f) Zusammenarbeit mit weiteren Partnern

Im Laufe des Projekts wurde auch mit anderen Partnern eng zusammengearbeitet. Die Partnerschaften mit der SICK AG und dem European 4.0 Transformation Center (E4TC) haben wesentlich zur erfolgreichen Umsetzung und Weiterentwicklung des Forschungsprojekts beigetragen, indem sie ihre Expertise in den jeweiligen Bereichen eingebracht haben.

Die Zusammenarbeit mit der SICK AG war für die Implementierung und Optimierung der Ultra-Breitband-(UWB)-Technologie im Projekt sehr wichtig. Die SICK AG, als führender Anbieter von Sensorlösungen, brachte umfassendes Fachwissen und innovative Ansätze ein, um die UWB-Anwendung speziell für unsere Anforderungen zu gestalten. Durch die Zusammenarbeit wurden die UWB-Sensoren optimal integriert. Darüber hinaus unterstützte Die SICK AG bei der Auswertung der gesammelten Daten und der Feinabstimmung der UWB-Technologie, um eine hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit in der Praxis sicherzustellen.

Die Experten von der SICK AG arbeiteten eng mit dem Projektteam zusammen, um die UWB-Sensoren optimal zu integrieren und sicherzustellen, dass die gesammelten Daten effektiv genutzt wurden. Ihre

Erfahrung im Bereich der industriellen Automatisierung half, potenzielle Herausforderungen frühzeitig zu erkennen und innovative Lösungen zu entwickeln. Darüber hinaus unterstützte SICK AG bei der Auswertung der gesammelten Daten und der Feinabstimmung der UWB-Technologie, um eine hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit in der Praxis sicherzustellen.

Die Unterstützung des E4TC war von großer Bedeutung für die Integration und Nutzung der Digital Twin Umgebung in unserem Forschungsprojekt. E4TC ist bekannt für seine Expertise im Bereich der virtuellen Realität und Simulationstechnologien, insbesondere in der Anwendung von Unity. Ihre Zusammenarbeit ermöglichte es, die vorhandenen Daten des digitalen Zwillings effektiv zu nutzen und das Umgebungsmodell nahtlos in unsere Drohnen-Steuerung zu integrieren.

Das E4TC hat bei der Konzipierung von Schnittstellen und der Umsetzung der Visualisierungen beraten, um die Daten aus dem digitalen Zwilling in Echtzeit zu verarbeiten und für die Drohnen-Navigation nutzbar zu machen. Mit dem E4TC wurden realitätsnahe Szenarien in der virtuellen Umgebung validiert, die die Grundlage für die Testläufe und Evaluierungen bildeten. Das Engagement und die Fachkenntnisse von E4TC trugen dazu bei, dass die Vorteile des bei der DFA verfügbaren digitalen Zwillings voll ausgeschöpft werden konnten.

## II. Verwendung der Zuwendung, Durchführung und Ergebnis des Vorhabens

### a) Übersicht des Projektverlaufs

Zunächst wurde das Konzept für das Gesamtsystem (Produktionsumgebung und Drohne) durch alle Konsortialpartner gemeinsam definiert. Anschließend wurde durch Emqopter GmbH eine Drohne entwickelt, die mehrere Technologien (Telemetrie und Videostream, Lokalisierung und Kollisionsvermeidung) umfasst und somit zum Betrieb in einer geschlossenen Halle geeignet ist. Die einzelnen Technologien konnten in einer realen Produktionsumgebung (DFA Demonstrationsfabrik Aachen GmbH) anhand dreier Testflüge getestet werden. Die Drohne wurde anschließend in das digitale Zwilling der Produktionsumgebung integriert. Als Visualisierung wurde die Unity-Engine verwendet, denn diese ermöglicht eine einfache Integration und Visualisierung von Daten (Flugdetails durch die Übermittlung von Ereignissen per MQTT-Broker (Message Queuing Telemetry Transport)). Somit konnte man die Position und die Flugbahn der Drohne auch virtuell nachverfolgen. Die Ziele des Projekts wurden somit erreicht.

#### **Anforderungs- und Technologieanalyse (AP 1.1 & 1.2)**

Die Anforderungen an das Drohnenkonzept basieren auf der Anforderungsanalyse in der ersten Projektphase. Durch die gemeinsame umfangreiche Expertise der drei beteiligten Entitäten konnten unterschiedliche Perspektiven beleuchtet und in den Anforderungen berücksichtigt werden. Dabei werden die relevanten Kriterien zum Produkt (Drohne), der Zielumgebung (Fabrik) und zum Einsatzzweck (Use Case) festgehalten (s. Tabelle 1).

Tabelle 1: Anforderungen an das Drohnen- und Integrationskonzept

Anforderung	Drohne	Fabrik-Umgebung	Use Case
Beschreibung von Schnittstellen	Funkverbindung zur Datenübertragung (z. B. WLAN); Alternativ 5G, möglichen Partner prüfen	Integration in GUI der DFA (Thingworks, Unity oder Alternative)	
Funktionale Anforderungen & Performance	Übertragung Position Drohne (x, y, z) Erkennung des Zielobjekts (recognition, detection) Übertragung Position Zielobjekts (x, y, z) Kollisionsvermeidung in Flugrichtung (x) Kollisionsvermeidung in Flugrichtung (z) zunächst über Höhenbegrenzung, ggfs. über zusätzl. Sensor nach (z)  Größe der Drohne (Indoor-Anwendung) max. 80 cm Durchmesser, Ziel: möglichst kompakt	Temperaturen über 8°C sollen gegeben sein min. Decken-/ und Ganghöhe von ca. 7 m  Latenz & Genauigkeit des installierten Positionssystems: Positionsgenauigkeit 30 cm; Rate 0,1-1 Hz	Use Case Demonstrationsrahmen 10-15 min Max. Flugdauer ca. 5 min
Sicherheit	Schirmung gegen Störsignale Redundante Antriebstechnik, oder mech. Kollisionsschutz (Zusatzgewicht)	Dedizierter Drohnen Start- und Lande Bereich.	„Controlled Ground“ für den sicheren Betrieb mit Publikum. Rückfall-Lösung: Manueller Eingriff in die Flugsteuerung
Erste Skizze der angestrebten Systemarchitektur	Intelligente Datenverarbeitung kann in der Drohne oder nach Datenübertragung an einem Rechner stattfinden		

Um in dem begrenzten Projektzeitraum und -budget zielorientiert Ergebnisse und Erkenntnisse gewinnen zu können, werden im Rahmen der Technologieanalyse Module gewählt, die sich auf ihrem jeweiligen Gebiet bewährt haben:

Sensorik für Kollisionserkennung: Stereo-Image-Sensing-Tiefenkamera

Hier werden zwei Kameras mit unterschiedlichen Blickwinkeln genutzt, um die Parallaxe zu analysieren und die Entfernungen der Objekte im Bildfeld zu berechnen (Stereoskopie). Dies ermöglicht die Erstellung von 3D-Modellen der Umgebung und die Identifizierung von Objekten für Anwendungen wie Objekterkennung und Navigation. Im Vergleich zu Radar oder Lidar bieten sie eine höhere räumliche Auflösung und sind kostengünstiger.

#### Module/Sensorik für Lokalisierung: UWB RTLS

Da in geschlossenen Räumen weder das Magnetfeld der Erde noch GPS-Positionen genutzt werden können, benötigt man zur Navigation in einer Produktionsumgebung weitere Sensoren. UWB (Ultra-Wideband) RTLS (Real-Time Location System) ist eine drahtlose Ortungstechnologie, die auf ultrabreiten Frequenzbändern basiert. Sie ermöglicht eine präzise Echtzeitlokalisierung von Objekten in Innenräumen. UWB RTLS nutzt kurze Impulse oder Pulse-Sequenzen mit hohen Bandbreiten. Durch die Verwendung von Laufzeitmessungen zwischen Sender und Empfänger können Positionen genau bestimmt werden, theoretisch selbst in Umgebungen mit vielen Hindernissen oder Reflexionen.

In Zukunft wird es für Drohnen besonders interessant sein, 5G-Technologie zur Ortung einzusetzen, indem die Signallaufzeit zwischen dem mobilen Endgerät (Drohne) und mehreren Basisstationen gemessen wird. Diese Technik wird als ‚Time Difference of Arrival‘ (TDOA) bezeichnet. 5G kann zudem aufgrund seiner hohen Bandbreite und geringen Latenzzeit auch die Übertragung großer Datenmengen in Echtzeit ermöglichen. Durch diese Funktionsintegration ist der Ansatz in einem gewichtssensiblen Feld wie Flugsysteme sehr relevant. Im Rahmen des Projekts SmartDroneWatch fanden bereits einige Gespräche mit einem namhaften Anbieter statt. Aufgrund der technischen Unsicherheiten wird jedoch weiterhin an dem konservativeren UWB RTLS-System gearbeitet.

#### Kamera zur Überwachung sowie der Telemetrie Module: RGB-Kamera

RGB-Kameras sind im Vergleich zu vielen anderen Videotechnologien kostengünstiger. Die günstigere Preisstruktur von RGB-Kameras ermöglicht es, hochwertige Überwachungssysteme zu entwickeln, ohne das Budget erheblich zu belasten. Dadurch können mehr Drohnen mit diesen Kameras ausgestattet werden, was die Abdeckung und Überwachungsfähigkeit der gesamten Produktionsanlage erhöht.

#### **Konzeptionierung der Drohne und Architektur (AP 1.3)**

Eine erste Übersicht zur geplanten Hardware-Architektur (s. Abbildung 6) zeigt die wesentlichen Elemente der Drohne. Für die Energieversorgung sorgt ein Akku mit 7000 mAh. Dies stellt sicher, dass die Drohne eine ausreichend lange Betriebszeit hat, um ihre Aufgaben effizient zu erfüllen. Alle Berechnungen während des Fluges werden von einem BRIX I7-Bordcomputer durchgeführt, der für die Implementierung der angestrebten Produktfeatures relevant ist. Diese hohe Rechenleistung ermöglicht es, komplexe Algorithmen zur Navigation und Datenverarbeitung in Echtzeit auszuführen.

Zur Anbindung von Sensoren und Kameras stehen verschiedene Schnittstellen wie USB-C zur Verfügung. Diese Flexibilität erleichtert die Integration unterschiedlicher Geräte und Sensoren, die für die Navigation und Datenerfassung notwendig sind. Die Kollisionsvermeidung wird durch eine Stereo-Image-Sensing-Tiefenkamera (Intel Realsense) realisiert, welche präzise dreidimensionale Bilder der Umgebung erstellt und somit Hindernisse zuverlässig erkennt und vermeidet. Eine zusätzliche Kamera für die Objekterkennung ermöglicht es der Drohne, spezifische Objekte in der Produktionsumgebung zu identifizieren und darauf zu reagieren.

Ein Garmin-Höhen-Lidar misst präzise die Höhe der Drohne, was für stabile Flugmanöver und genaue Positionsbestimmung unerlässlich ist. Für die genaue Standortbestimmung wird ein UWB RTLS Positionierungssystem eingesetzt, das eine hohe Präzision bei der Verfolgung der Drohne in Echtzeit bietet. Die Steuerung der Drohne erfolgt über eine Pixhawk-Flugsteuerung, die Controller- und PWM-Signale verarbeitet. Dies ist entscheidend für die zuverlässige Steuerung und Stabilisierung des Fluges.

Ein 4-in-1 Electronic Speed Controller (ESC) steuert die vier Elektromotoren, die die Rotoren antreiben. Diese Konfiguration sorgt für eine gleichmäßige und effiziente Leistungsabgabe, was die Flugstabilität und Manövrierfähigkeit der Drohne verbessert. Diese Komponenten bilden zusammen ein komplexes System, das die Drohne in die Lage versetzt, autonom in einer Produktionsanlage zu navigieren, Kollisionen zu vermeiden und spezifische Aufgaben zu erfüllen.

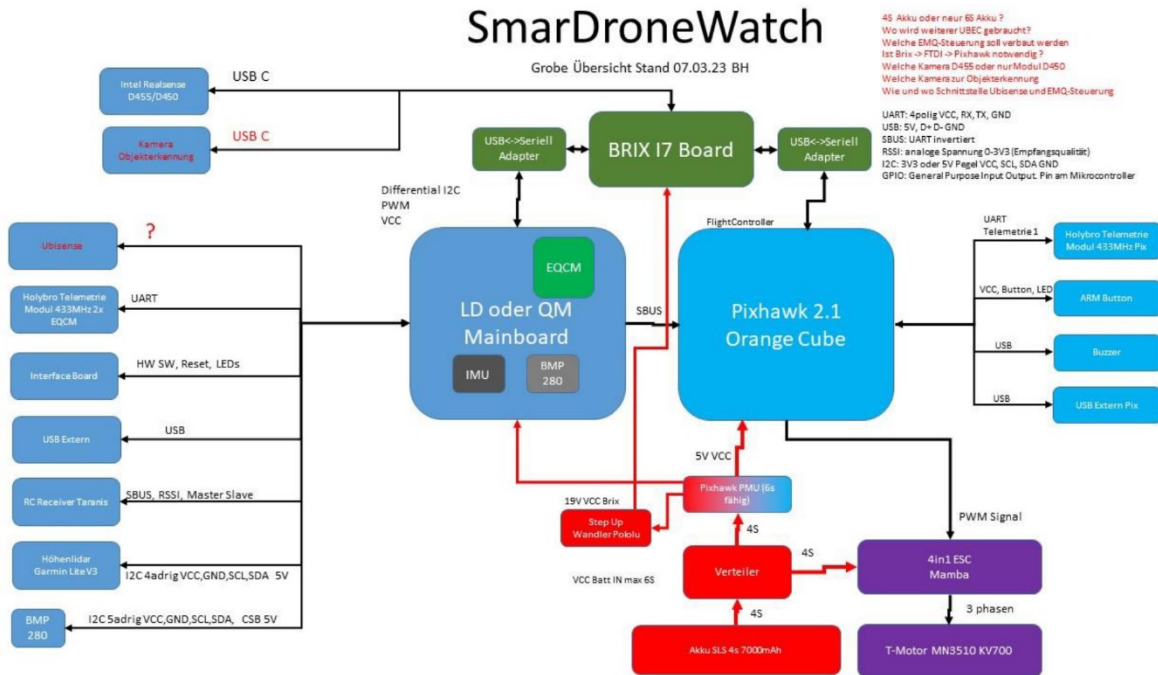


Abbildung 6: Initiales Hardware-Design und -Architektur (Quelle: Emqopter)

Das Ergebnis des AP 1 ist die detaillierte Beschreibung des zielführenden Konzepts des Systems bestehend aus der Produktionsumgebung und der Drohne.

### Konstruktion der Systemkomponenten (AP 2.1)

Der unten abgebildete Design-Entwurf zeigt die 3D-CAD Drohnenkonstruktion in der frühen Entwicklungsphase neben einem Referenz-Modelle der Firma Emqopter. Er basiert auf den abgeleiteten Größen der Anforderungsanalyse und ist mit Schutzbügeln für mehr Sicherheit im Innenraum ausgestattet. Das zentrale Chassis ist für maximale Modularität konstruiert und hat noch keine strömungsoptimierte Formgebung. Diese spielt für Drohnen eine untergeordnete Rolle und ist im Wesentlichen für das finale Endkundenprodukt relevant. Ein Sensor-Set-Up ist neu dazugekommen.

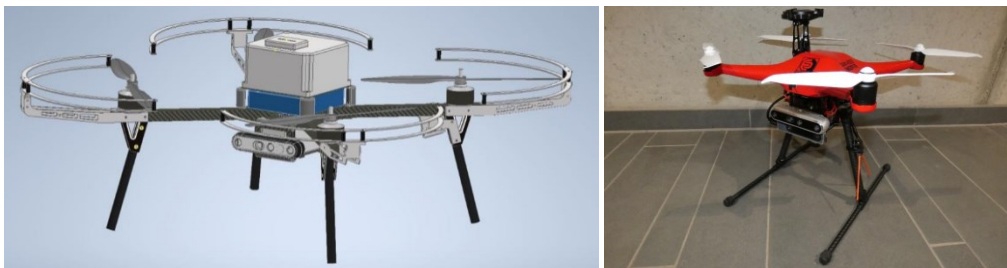


Abbildung 7: Prototyp-Design und Referenzprodukt (Quelle: Emqopter)



## Drohnenbau (AP 2.2)

Zunächst wurde die grundsätzliche Einsetzbarkeit unserer Drohnen in einer einfachen Standardkonfiguration mit lediglich grundlegender Sensorik getestet. Dafür haben wir eine Technologieerprobungsdrohne auf einem mobilen Stativ mit einem 3DOF Gelenk, wie wir es in unserem Lehrsystem Quadrotor Control System (QCS) verwenden, aufgebaut. In diesem Set-Up konnten wir eine Drohne initial in der DFA testen, ohne dabei Schäden durch unkontrolliertes Verhalten der Drohne zu riskieren. Darauf aufbauend haben wir eine Technologieerprobungsdrohne aufgebaut, auf der einzelne Technologiekomponenten, wie etwa UWB-Module oder eine Kamera isoliert getestet werden konnten. Parallel haben wir ein Hardware-Design entworfen, das alle notwendigen Funktionalitäten in einem System verbindet. Bei der Eigenfertigung dieses Designs im Laminierverfahren kamen wir an unsere Grenzen. Es konnte entweder nicht die notwendige Nutzlast erreicht werden oder das System wurde zu groß oder die Vibrationseigenschaften zu hoch. Daher wurde die Entwicklung des endgültigen Designs sowie die Fertigung des Gehäuses an einen Sonderteilefertiger, der spezialisiert ist auf Luft- und Raumfahrt unterbeauftragt – mit Erfolg.



Abbildung 8: Im Projekt getestete Drohnen für Outdoor- (in Rot draußen) Indoorbereich (in Schwarz drin)

### **Schnittstellenkonzeption und -einrichtung (AP 2.3)**

Zum Austausch von Daten zwischen Drohne und Digital Twin wird das vorhandene WLAN (IEEE 802.11a) Netzwerk genutzt. Über dieses werden verschiedene Arten von Daten effizient und zuverlässig übertragen:

- Telemetriedaten: Mithilfe des MQTT-Protokolls werden wichtige Telemetriedaten wie Batteriestand, Lage, Position und Abstandsdaten in Echtzeit übertragen. Die Verwendung von MQTT ermöglicht eine zuverlässige und ressourcenschonende Datenübertragung, die besonders für die Anforderungen der Drohne geeignet ist. Die Datenpakete der Drohne wurden in das JSON-Format bereits vorhandener Daten in der DFA gebracht, um eine einfachere Anbindung an den Digital Twin zu ermöglichen.
- Videostream: Für die Übertragung von Bilddaten zur Objekterkennung kommt das RTSP-Protokoll zum Einsatz. Real-Time Streaming Protocol (RTSP) ermöglicht die Echtzeitübertragung von Bildern mittels eines Videocodecs, sodass der Digital Twin kontinuierlich visuelle Informationen von der Drohne empfangen kann. Dies ist entscheidend für die präzise und schnelle Objekterkennung sowie für eine Reduzierung des Datenvolumens durch Videokompression.

### **Kollisionsvermeidung (AP 2.4)**

Entwicklung eines Algorithmus zur Kollisionsvermeidung basierend auf Sensordaten (Intel Realsense; Stereo-Image-Sensing-Tiefenkamera).

Für den automatisierten Einsatz im Innenbereich ist eine zuverlässige Hinderniserkennung zur Vermeidung von Kollisionen unerlässlich. Neben statischen Hindernissen wie Hochregalen und Maschinen müssen auch dynamische Hindernisse wie Stapler oder Mitarbeiter berücksichtigt werden. Zur Lösung dieses Problems wurde die Tiefenkamera Realsense D455 ausgewählt. Diese 3D-Kamera verfügt über einen stereooptischen und einen Infrarot-Kanal. Im Gegensatz zu einfacheren Sensorlösungen wie Lidar und Ultraschall liefert die Kamera sowohl Tiefeninformationen als auch semantische Daten. Dadurch können wir die gesamte Flugbahn flächendeckend, kontinuierlich analysieren und auch feinere Strukturen unterbrechungsfrei erkennen.

Implementieren des Algorithmus in der Flugsteuerung der Drohne (BRIX I7).

Zur Steuerung der Drohne wurde ein Algorithmus zum Abarbeiten einer Liste von Flugkommandos entwickelt. Vor dem Flug kann der Ablauf von Kommandos wie Start, Wegpunkte und Landung definiert werden. Wird ein Hindernis in der Flugbahn erkannt, wird der Wegpunktflug abgebrochen und automatisch gelandet.

Validierung des Algorithmus durch Praxistests im fliegenden System.

Die Algorithmen wurden innerhalb des Testbereichs der DFA erfolgreich getestet, siehe AP 3.3. Hindernisse wurden zuverlässig erkannt, und es wurde rechtzeitig in den geplanten Flugweg eingegriffen, um Kollisionen zu vermeiden.

### **Entwicklung Frontend und Digital Twin (AP 2.5 & 2.6)**

Die Verbindung unterschiedlicher Datenquellen zur Gewinnung umfassender und zusammenhängender Informationen erfolgt im Sinne der Konnektivität der Industrie 4.0 am besten durch eine Datenintegrationsplattform. Eine solche Plattform kann die Anzahl und Komplexität der



Schnittstellen reduzieren und die Transformation sowie Verknüpfung der Daten ermöglichen. Sie stellt eine interaktive Smart Factory-Lösung dar, die die angebotenen Objekte und dazugehörigen Prozesse überwacht, verwaltet und anpasst. Durch die Integration von Daten aus verschiedenen Quellen in der Fabrik, wie Produktionsmaschinen, digitale Werkzeuge, fahrerlose Transportroboter, ERP- (Enterprise Resource Planning) und ME-Systeme (Manufacturing Execution System), können Regeln definiert, Anpassungen automatisiert und Prozesse sowie Produkte umfassend im Ist-Zustand beschrieben werden. Im Forschungsprojekt SmartDroneWatch wird die in der DFA verfügbare Integrationsplattform ThingWorx von PTC Inc. genutzt.

Diese Daten zum Status der Produktion können zum digitalen Zwilling aggregiert werden. Ein digitaler Zwilling ist ein virtuelles Abbild eines physischen Objekts oder Systems (s. Abbildung 9), das detaillierte Informationen und Statusbeschreibungen des physischen Gegenstücks umfasst. Er ermöglicht die Simulation, Überwachung und Optimierung von Prozessen in Echtzeit. Im Kontext einer Smart Factory bietet der digitale Zwilling die Möglichkeit, Produktionsprozesse zu überwachen und zu steuern, indem er Echtzeitdaten von Maschinen, Werkzeugen und anderen Produktionsmitteln integriert und analysiert.

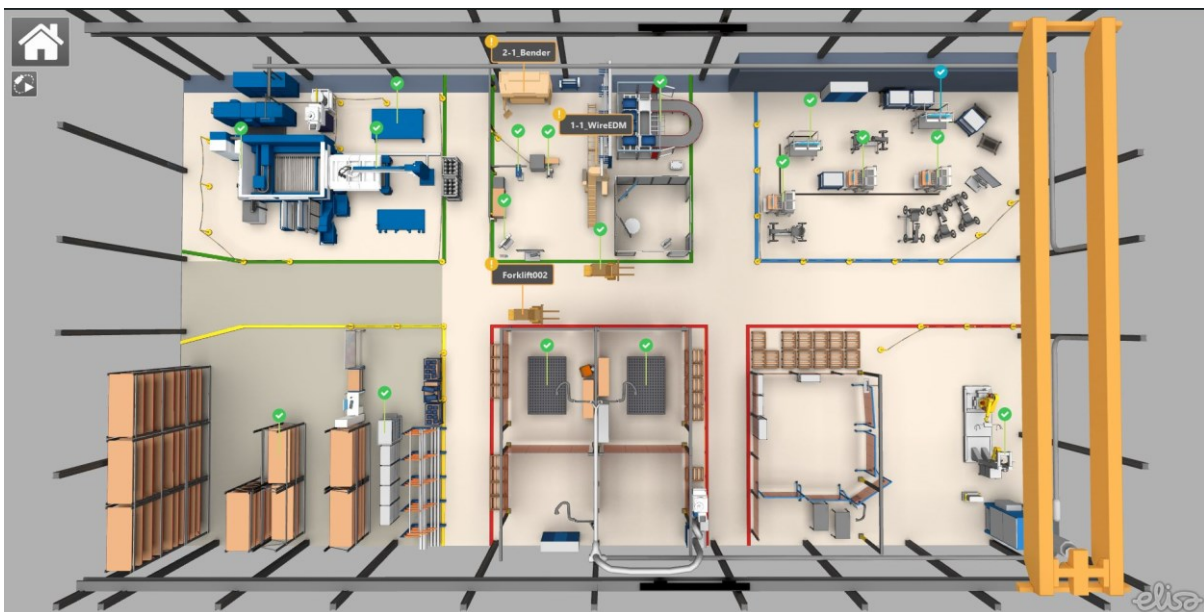


Abbildung 9: Digitaler Zwilling der DFA in IndustriQ Elisa (Quelle: DFA)

In diesem Forschungsprojekt wird der digitale Zwilling verwendet, um die Daten für Endanwendende zugänglich und verständlich zu machen. Dafür wurde eine geeignete Oberfläche zur Visualisierung und Interpretation der Daten erstellt. Diese Visualisierung, insbesondere in einer 3D-Umgebung, stellt die Daten aus der Integrationsplattform für den aktuellen Ist-Zustand dar, einschließlich relevanter Echtzeit-Daten und Nutzerinteraktionen. Eine solche Visualisierung erleichtert es, komplexe Datenmengen zu interpretieren und Entscheidungen auf Basis aktueller Informationen zu treffen.

Für das Projekt war es notwendig, nicht nur eine reine Datenintegration zu schaffen, die auch in der bestehenden Plattform möglich ist, sondern auch um die visuelle Abbildung der beweglichen Drohne zu ermöglichen. Die Daten und Modelle des aktuellen digitalen Zwillings der DFA wurden daher in eine neue Umgebung migriert, die die Abbildung der Drohne aufwandsarm ermöglichte. Dafür wurde in der Zusammenarbeit mit dem European 4.0 Transformation Center (E4TC) die Produktionsumgebung der DFA in einer neuen Plattform umgesetzt (s. Abbildung 10). Die Laufzeit- und Entwicklungsumgebung

"Unity" (eine Spiel-Engine) des Unternehmens „Unity Technologies“ ist eine weit verbreitete Plattform, die kostenlos für Lehr- und Forschungszwecke genutzt werden kann. Dadurch wird eine bessere Zukunftssicherheit für die Weiterverwendung des Digitalen Zwillinges gewährleistet.

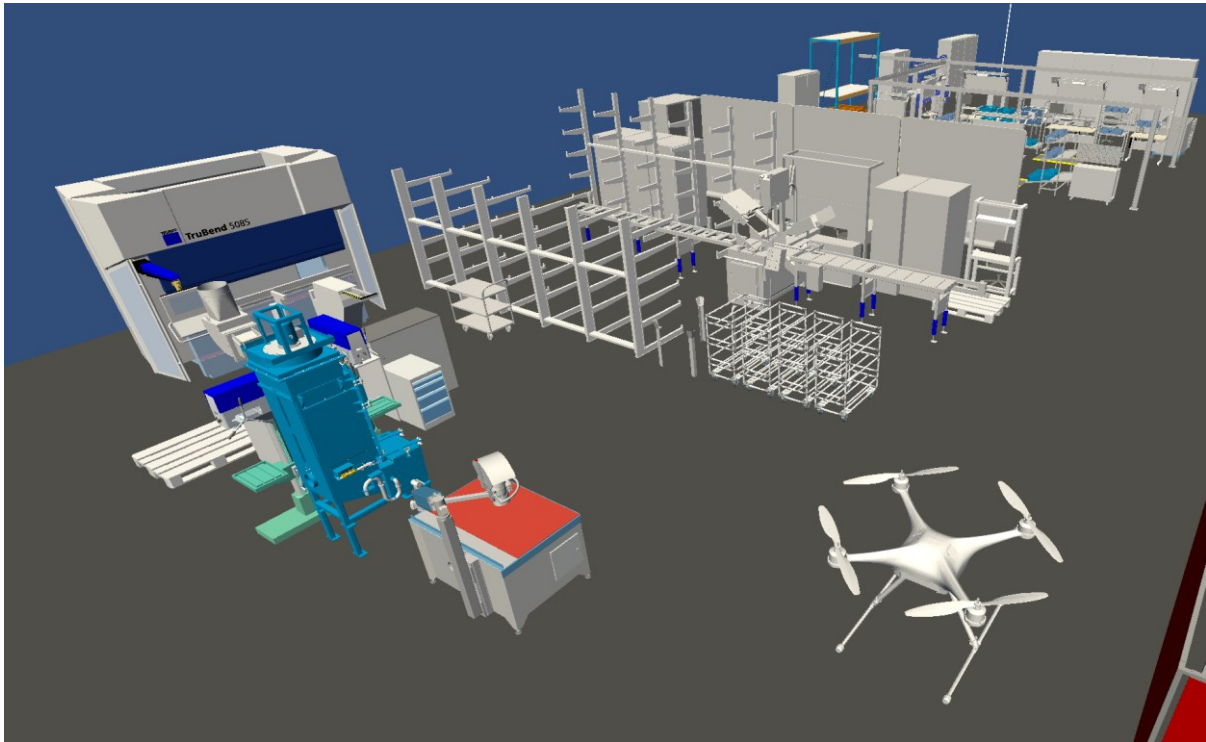


Abbildung 10: Digitaler Zwilling der DFA in Unity mit dem interaktiven 3D-Modell der SmartDroneWatch-Drohne (Quelle: E4TC)

Im Rahmen des Forschungsprojekts SmartDroneWatch fungiert diese Oberfläche sowohl als Benutzeroberfläche für die Bedienung der automatisierten Funktionen der Drohne als auch als zentrale Anzeige für die Videostreams der Kameras. Die Drohnen in diesem System sind mit Kameras und verschiedenen Sensoren ausgestattet, die eine kontinuierliche Überwachung und Datensammlung ermöglichen. Durch die Integration in den digitalen Zwilling kann die Drohne visualisiert und ihre Aktivitäten in Echtzeit überwacht werden, was eine präzise Kontrolle und Optimierung der Produktionsprozesse erlaubt.

Die Datenübertragung der Drohne und der Positionssensoren erfolgt hierbei über das offene Netzwerkprotokoll MQTT. MQTT (ursprünglich MQ Telemetry Transport) wird für die Kommunikation von Maschine zu Maschine (M2M) eingesetzt. Es ermöglicht die Übertragung von Telemetriedaten in Form von Nachrichten zwischen einer Vielzahl von Geräten, darunter Sensoren, Aktoren, Mobiltelefonen, eingebetteten Systemen in Fahrzeugen, Laptops und vollständigen Rechnersystemen, auch unter Bedingungen hoher Verzögerungen oder in Netzwerken mit begrenzter Bandbreite.

Für eine einfache und stabile Anwendung der Unity Digital Twin Anwendung wird ein Webserver im DFA-Rechenzentrum eingesetzt. Hierzu wird eine unveränderliche Datei exportiert (z. B. im WebGL Format). Die Visualisierung erfordert allerdings eine dedizierte GPU. Die Entwicklungsumgebung (Projekt) kann auch serverbasiert oder auf einem lokalen Rechner eingerichtet werden.

**Das Ergebnis des AP 2 ist zum einen eine entwickelte und gefertigte physische Indoor-Drohne und zum anderen der digitale Zwilling der Produktionsumgebung mit der erfolgreichen Integration der Drohne, was das zu testende Gesamtsystem umfasst.**

### Benchmarking Datenübertragungsstandards (AP 3.1)

Für die Übertragung der Position des SICK UWB Positionssystems an die Drohne wurde das Protokoll MQTT verwendet. Zur Evaluation der Übertragungslatenz der SICK-Positionsdaten wurden die empfangenen Positionsdaten mit der errechneten Position aus dem optischen Verfahren verglichen. Die Drohne wurde hierfür entlang einer Achse vor- und zurückbewegt. Das Diagramm zeigt die Position auf dieser Achse für die beiden Positionsquellen.

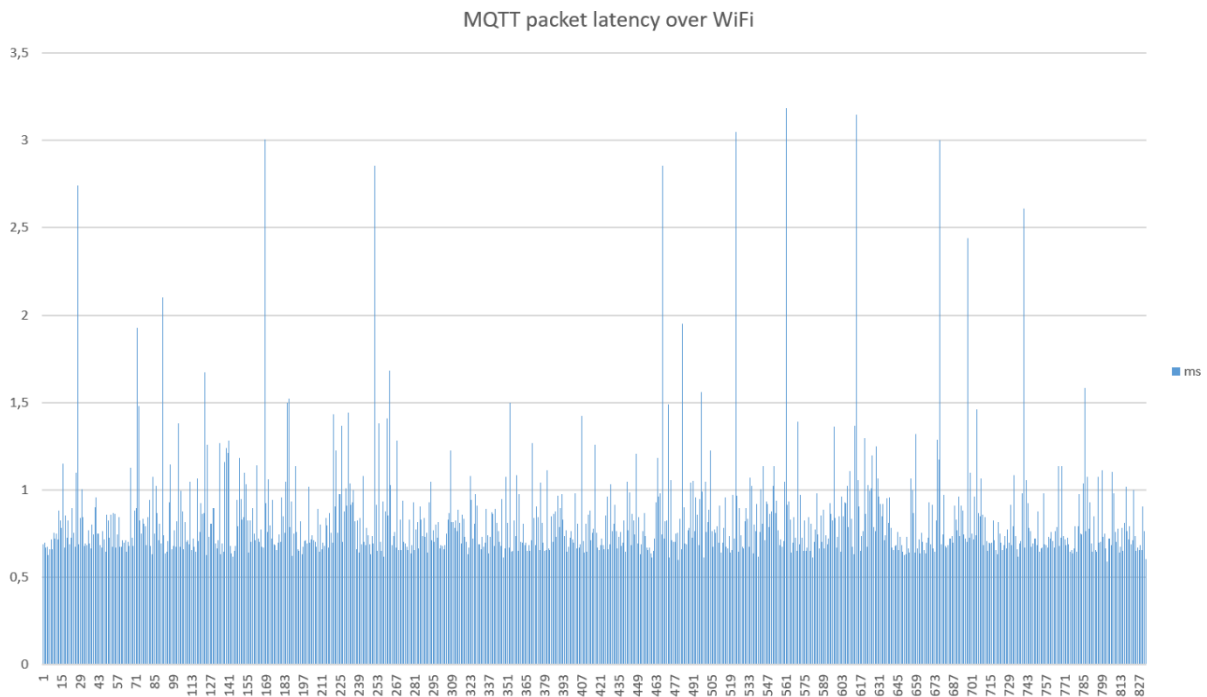


Abbildung 11: Messreihe der Latenz von MQTT-Paketen über 5GHz WiFi

### Benchmarking Tracking-Lösungen (AP 3.2)

Der Start der Testflugreihe am 27. Februar 2023 markiert die initiale Beurteilung der grundsätzlichen technischen Durchführbarkeit des Projekts. Dies wird im manuellen Flugbetrieb geprüft, indem kritische Stellen der Produktionsumgebung angefliegen werden (s. Abbildung 12). Durch den ersten Testflug konnte die prinzipielle Eignung der Umgebung validiert werden. Die Störwirkung der Funkwellen im Innenraum konnte in diesem Rahmen anhand der Manövrierbarkeit der Drohne beurteilt werden: Viele metallische Elemente in der Fabrik (z. B. Kran, Hochregal, Träger) erschweren die Datenübertragung (z. B. Störung und Latenzen bei der Signalübertragung). Parallel werden die relevanten Fluggrößen mit der Drohnen-Steuerungssoftware erfasst und auf Unstetigkeiten analysiert.



Abbildung 12: Testflug in der DFA-Ziel-Umgebung im Bereich hoher Funkwellenbelastung

Während der ersten Benchmarking-Versuche und Testflüge am 21. Juli 2023 wurden zwei unterschiedliche UWB-Systeme verglichen:

- Eine modulare Lösung von Pozyx („Developer Tag“, s. Abbildung 13); diese Tags können sowohl als Anker als auch als Sender genutzt werden. Vorteil ist die Möglichkeit der direkten Anbindung an die Recheneinheiten der Drohne, ohne die Latenzen des Netzwerks in Kauf nehmen zu müssen.
- Eine Lösung (LOCU) von SICK, in der DFA vorinstalliert (s. Abbildung 14); verkapselt, Datenaustausch zurzeit nur über Netzwerk (MQTT), mit optionaler Barometerfunktion zur Höhenmessung.
- Zusätzlich wird die Höhe mit hoher Genauigkeit per Lidar erfasst (nach unten gerichtet).



Abbildung 13: Pozyx Developer Tag for indoor positioning (Quelle: tags.pozyx.io)

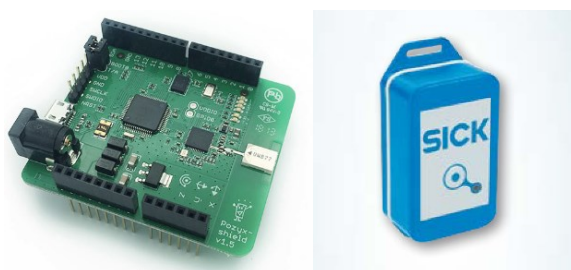


Abbildung 14 - Pozyx Developer Tag (links) mit offenen Hardware-Schnittstellen im Vergleich zu SICK Locu (rechts) (Quelle: tags.pozyx.io; SICK)

Die Empfänger für die Tags wurden in der DFA an den gleichen installiert, um den Einfluss der Positionierung auf die Testdaten zu eliminieren. Um Ungenauigkeiten oder Fehler durch die Manöver-Durchführung zu vermeiden, werden neben Flügen auch die Bewegungsprofile der Drohne während Fahrten auf Roll- oder Hubwagen (Gabelstapler) erfasst, um präzise translatorische Bewegungen zu erzeugen.



Abbildung 15: Temporäre Installation Pozyx Anker & Messungen auf Hub-, Rollwagen, Stapler, entlang der y- und z-Achse



Abbildung 16: Prototyp SmartDroneWatch (Modulträger)



Für diese Versuchsreihe werden alle Daten gleichzeitig erfasst und im Anschluss im direkten Vergleich übereinandergelegt. Diese Manöver zeigen bereits eklatante Schwächen bei der Positionserfassung durch die Pozyx-UWB Sensoren. In dem nachfolgenden Bild sind die drei Raumrichtungen x, y und z (vertikale Achse, Ordinate) über die Zeit (horizontale Achse, Abszisse) dargestellt (s. Abbildung 17). Über eine reine, translatorische Bewegung in y-Richtung soll erreicht werden, dass die Werte in x und z konstant bleiben. Wie aus dem Ergebnis hervorgeht, ändert sich allerdings auch der Wert für die x-Achse durch einen Sprung. Dies führt dazu, dass der Positionswert im Raum nicht hinreichend genau ermittelt werden kann.

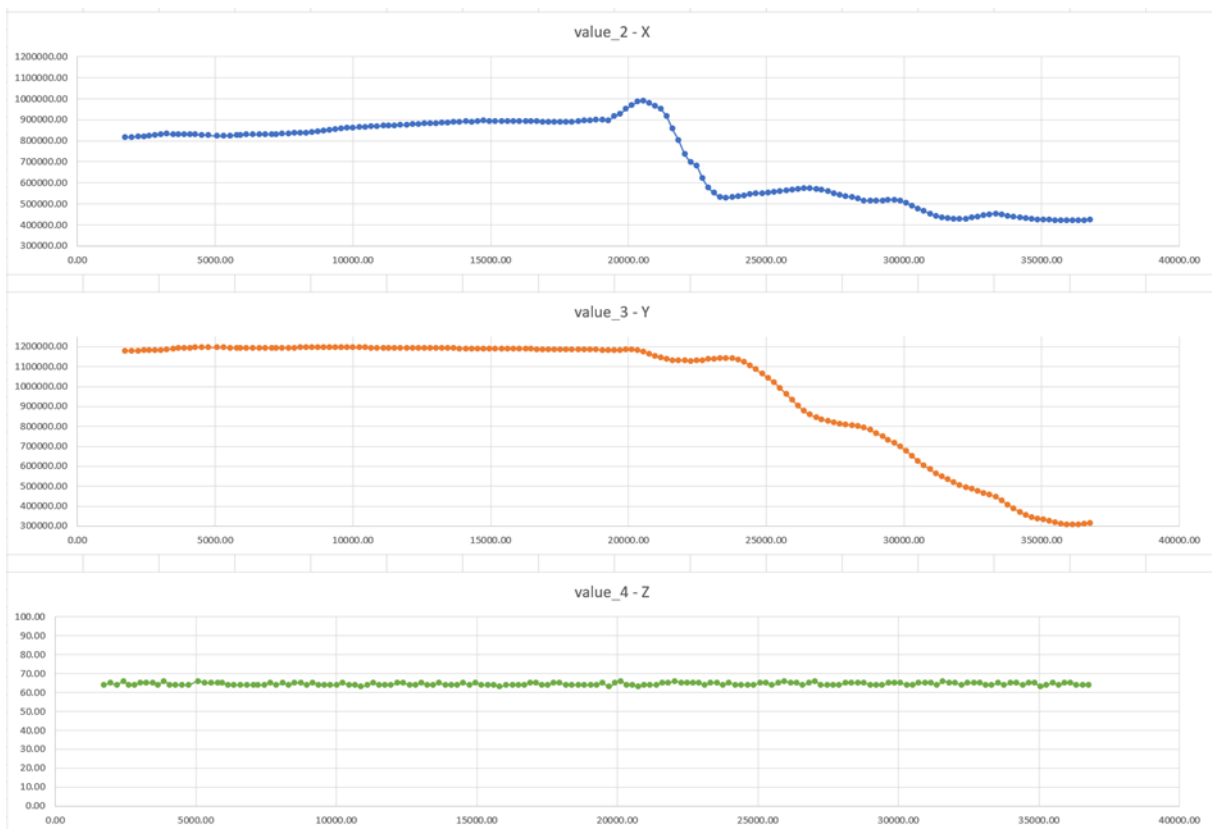


Abbildung 17: Flugmanöver y-Achse, translatorisch, eben (Messfehler x-Achse; Pozyx)



Noch deutlicher zeigt sich dieses Phänomen bei einem reinen Manöver in z-Richtung (Anheben über einen Gabelstapler). Der lineare und geradlinige Verlauf der Höhenmessung über die Zeit (z-Achse; Lidar Messung) zeigt, dass das Manöver wie gewünscht ausgeführt worden ist. Dabei zeigen die Pozyx UWB-Sensoren Ausschläge von über 250 cm in x- und y-Richtung an, obgleich sich die Position der Drohne in diese Raumrichtungen nicht verändert hat (s. Abbildung 18).

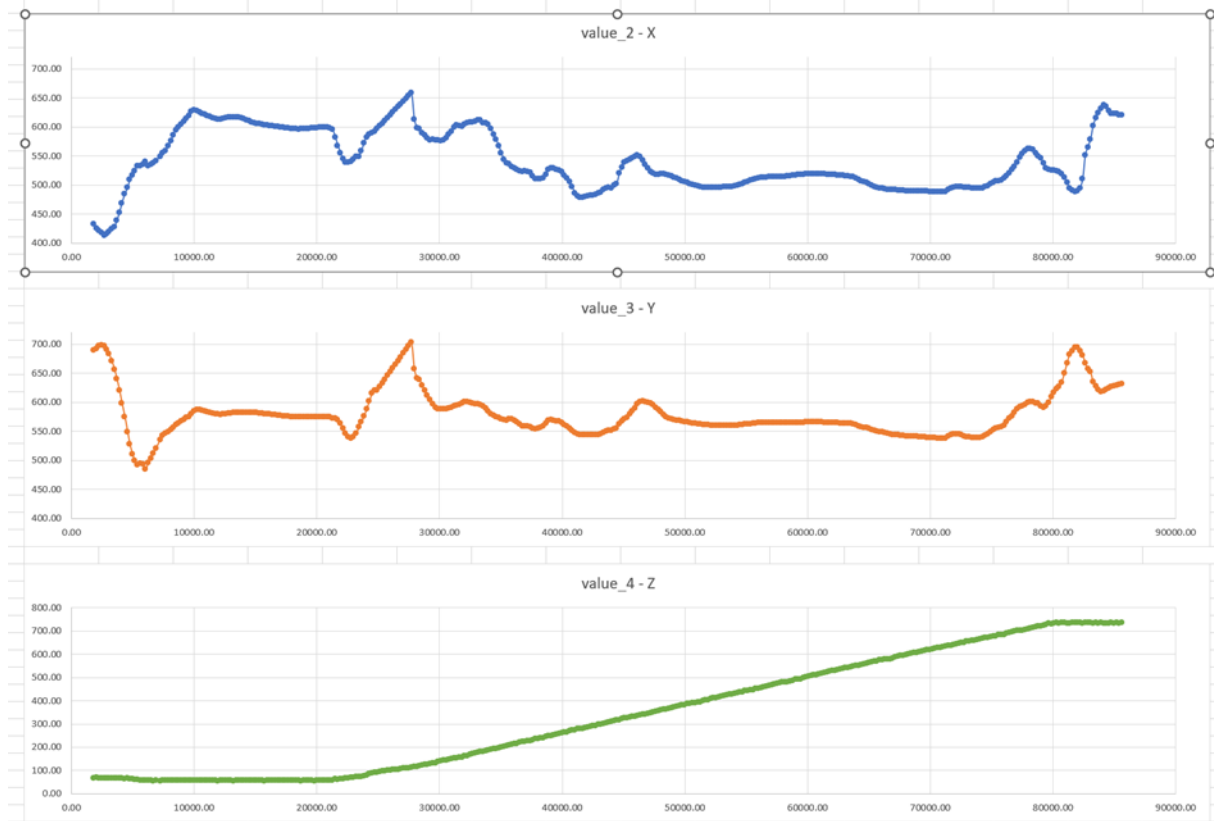


Abbildung 18: Flugmanöver z-Achse (Messfehler x- und y-Achse; Pozyx)

Im Gegensatz zu den Pozyx Sensoren können mit den UWB-Tags und Ankern von SICK sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Dies lässt sich auch im direkten Vergleich der Messungen feststellen. Im Folgenden wird ein freies Flugmanöver in y- und z-Richtung analysiert, die x-Werte sollten hierbei konstant bleiben. Die Messfehler werden insbesondere deutlich, wenn die x- und y-Werte der Messung gegeneinander aufgetragen werden. Dies entspricht der Darstellung für die Lokalisierung der Drohne auf einer Karte oder in einer 3D-Umgebung. Der Flug entlang der y-Achse sollte ohne Abweichung in x-Richtung zu erkennen sein. Die Störungen im Pozyx System verfälschen das Ergebnis erheblich. Allerdings ist auch das SICK-System nicht optimal konfiguriert; Netzwerklatenzen und die geringe Abtastrate (Anzahl Messpunkte) bieten Raum zur Verbesserung (s. Abbildung 19).

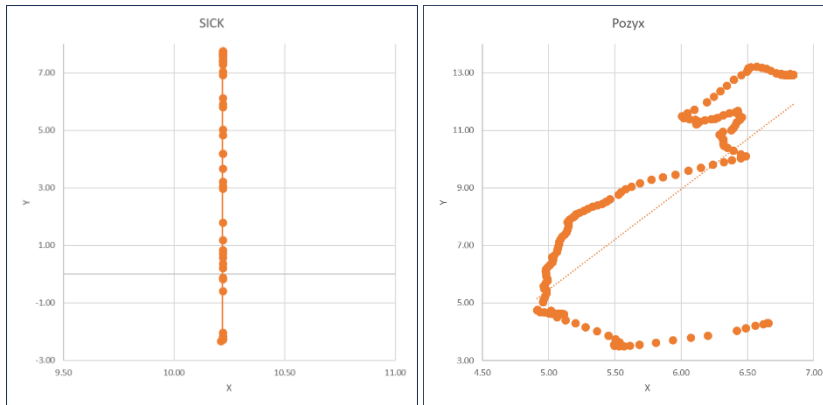


Abbildung 19 - Flug y-Achse; Plott x-y-Bewegung; Vergleich SICK Vs. Pozyx

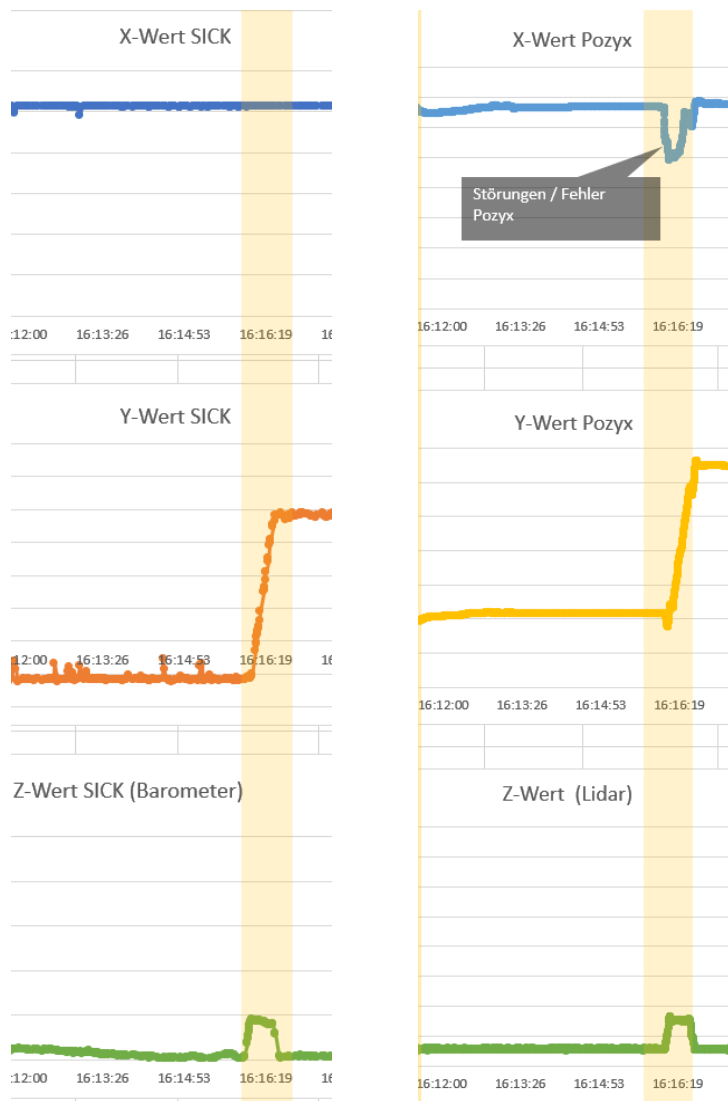


Abbildung 20: Flug y-Achse; Vergleich SICK Vs. Pozyx

Positiv hervorzuheben sind die unerwartet präzisen Messwerte der Höhenerfassung über das integrierte Barometer in den Tags von SICK. Richtig kalibriert (z. B. anhand der Lidar-Werte) kann dies eine kostengünstige und gewichtsparende Lösung darstellen. Die Absolutwerte sind an dieser Stelle nicht vergleichbar, da es sich um unterschiedliche Einheiten ohne Umrechnung und Kalibrierung handelt. Wichtig ist der gleichförmige Verlauf der Luftdruckmessung trotz der starken Luftverwirbelungen an der Drohne – dieser ist vergleichbar zu der optischen Lösung (Lidar). Auch hier wird allerdings die niedrige Abtastrate der SICK-Tags deutlich (s. Abbildung 21).

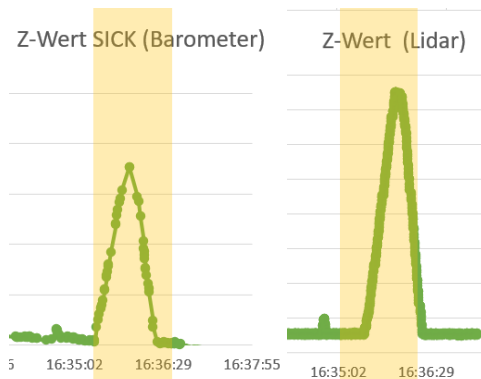


Abbildung 21: Qualitativer Vergleich Barometer Höhenerfassung (SICK) Vs. zusätzlichem Lidar

Die Unterschiede in der Signalgüte und Abtastrate werden auch ersichtlich, wenn man zeitgleich gemessene Kurven direkt übereinanderlegt (s. Abbildung 22). In dem Beispiel ist eine für beide Systeme korrekt erfasste Messung über die Zeit der Bewegung in y zu sehen (in Meter). Die dunklere, unstetigere Linie entspricht der Messung über das SICK-System. Durch passende Filter lassen sich diese kurzen Ausschläge bzw. das Rauschen entfernen; eine plausible Erfassung beider Raumachsen x und y ist für die Lokalisierung wichtiger als eine hohe Abtastrate.

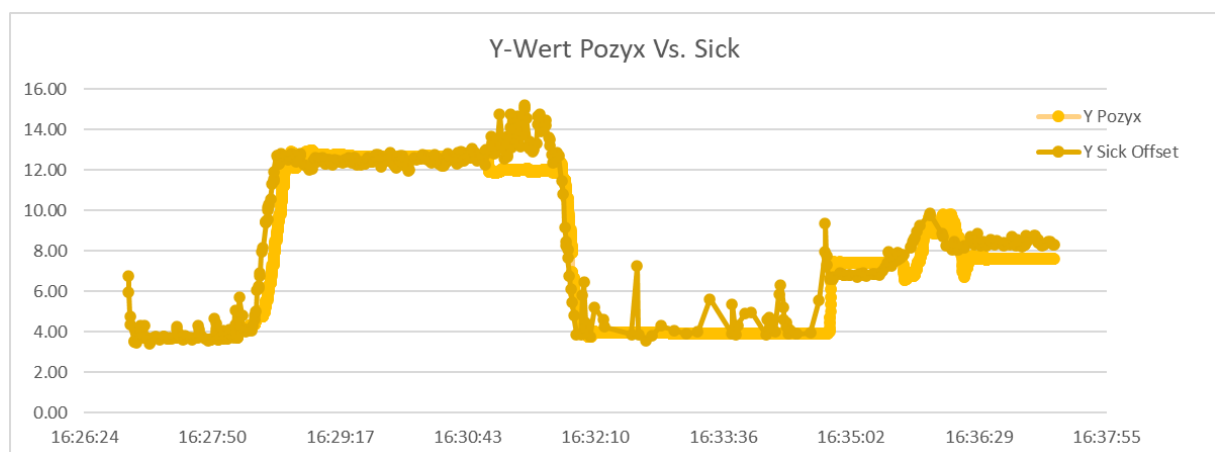


Abbildung 22: Vergleich Signalgüte und Abtastrate (y-Achse in Meter, Messung über die Zeit)

### Erweiterte Versuchsreihe zur Positionsbestimmung

Die guten Ergebnisse der ersten Messung konnten bei weiteren Versuchen am 7. Dezember 2023 nicht bestätigt werden. Durch den Tausch eines SICK-Tags wurden auch bei diesem System signifikante Ungenauigkeiten in der Positionserfassung deutlich. Der dargestellte Flug durch unterschiedliche Bereiche der DFA zeigt, dass auch das SICK-System Optimierungsbedarf hat und dass UWB-Systeme den Anforderungen eines (autonomen) Flugsystems im Innenraum nur bedingt gerecht werden (s. Abbildung 23).



Abbildung 23: Zusatztest mit SICK UWB-System, starke Abweichungen in der Positionserfassung

Im weiteren Verlauf wird die Positionsermittlung nun überwiegend aus den Bilddaten der nach unten gerichteten Kamera gefolgert und der absolute Wert der UWB-Tags stark herunterskaliert. Mit diesem Ansatz wird mittels Sensorfusion & Kalman-Filter die optische Geschwindigkeitsmessung (integriert) für die Position herangezogen, um ein mögliches Abdriften mit den Werten des UWBs zu verhindern (s. Abbildung 24).

Im folgenden Beispiel ist eine frühe Messung unter Laborbedingungen (auf kleinem Raum) mit diesem Ansatz zur Sensor-Fusion zu sehen. Man erkennt, dass die Bewegungsmessung mittels Bilderkennung ( $visual\_y$ ) eine höhere Dynamik erfassen kann als ein UWB-System ( $pozyx\_y$ ). Bei diesen Werten ist insbesondere die absolute Lage im Raum eine relevante Information, die über eine reine Bilderkennung nicht ohne weiteres bestimmt werden kann – das Integral der Geschwindigkeit über die Zeit benötigt eine Integrationskonstante. Mit einer entsprechenden Gewichtung ergeben beide Messungen die graue Kurve ( $fused\_y$ ), welche sich als zielführende Variante für eine autonome Flugregelung erweist.

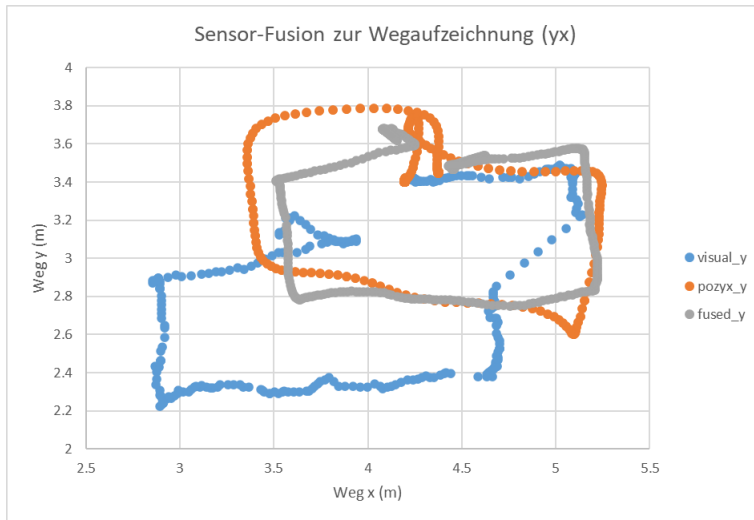


Abbildung 24: Sensorfusion Bilderkennung (Dynamik) und UWB-Werte (absolute Position) unter Laborbedingungen

Zur Evaluation der Latenz der SICK-Positionsdaten wurden die empfangenen Positionsdaten mit der errechneten Position aus dem Optischen Verfahren verglichen. Die Drohne wurde hierfür entlang einer Achse vor- und zurückbewegt. Das Diagramm zeigt die Position auf dieser Achse für die beiden Positionsquellen. Die mit dem UWB-Tracking System erfasste Positionsveränderung wurde zum Teil erst über eine Sekunde später ermittelt und manche Bewegungen wurden nicht erkannt (s. Abbildung 25).

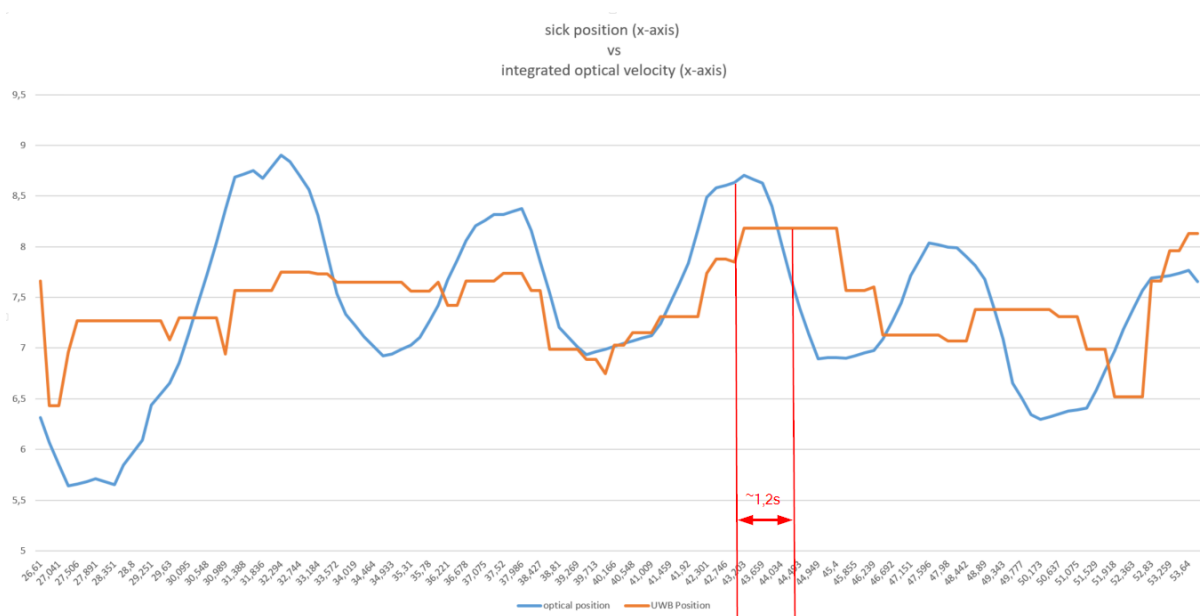


Abbildung 25: Vergleich der Übertragungslatenzen vom optischen Verfahren und SICK-UWB-Positionierung

### Benchmarking Kollisionsvermeidung und Tests zur Kollisionsvermeidung (AP 3.3)

Das Arbeitspaket 3.3 befasst sich mit dem Videostream, Positionsanflug und Tests zur Kollisionsvermeidung. Zur Dokumentation der relevanten Messflüge wurden diese per Video aufgezeichnet, wodurch die Logs aus dem Ordner zugeordnet werden können. Im Wesentlichen wurden rechtwinklige Flugrouten ausgeführt (erst entlang der y-Achse, dann entlang der x-Achse), um

einen spezifischen Koordinatenpunkt anzufliegen, was im Plot sichtbar sein muss. Als Hindernis für die Objekterkennung wurde eine Leiter platziert.

Im Vorfeld der abschließenden Messflüge wurde das SICK-System in der DFA umfassend erweitert, um die Messgenauigkeit der UWB-Signale zu erhöhen. Diese Erweiterung wird im Abschnitt „Aufbau Demonstrator“ näher erläutert. Ziel dieser Flugversuche ist es, mehrere spezifische Use-Case-Anwendungen zu konfigurieren und zu validieren. Der erste Anwendungsfall betrifft den Anflug eines vorgegebenen Koordinatenpunkts im autonomen Flugmodus, was die präzise Navigation der Drohne zu definierten Positionen innerhalb der Produktionsumgebung ermöglicht. Der zweite Anwendungsfall ist die Abbruchsequenz zur Kollisionsvermeidung bei Antreffen eines Hindernisses im autonomen Flugmodus. Die relevanten Daten wurden durch den MQTT-Broker kommuniziert. Darunter sind für die Positionierung und Kollisionsvermeidung folgende Topics von besonders hohem Interesse:

- „copter/proximity“ mit entsprechenden Datenpunkten wie:  
`{"data":{"assetId":"proximity","distance"....}}`
- „copter/pose“ mit entsprechenden Datenpunkten wie:  
`{"data":{"assetId":"posxyz","mapId":"0","position":{"x":,"y":,"z":}}`

Zur Berechnung der Unterschreitung eines definierten Schwellwerts für den Flugabbruch, muss der Wert für Z wieder auf null bzw. die Ausgangsbasis sinken. Der gescannte Bereich erstreckt sich kegelförmig. Sobald ein Objekt in diesem Sichtfeld (Winkel) auftaucht und den eingestellten Wert unterschreitet, wird der Flug abgebrochen.

Darüber hinaus wird das Videostream (z. B. über den RTSP-Stream mittels VLC-Player anzeigbar) zur Objektfindung eingebettet und aufgezeichnet. Als Ausblick ist geplant, eine App zu aktivieren und einzubetten, die QR-Codes lesen kann, um den Use-Case der Objektfindung zu verbessern und die Bilderkennung zur Orientierung der Drohne zu unterstützen.

Für die Überprüfung der Reglerstrategie zur Kollisionsvermeidung wurde eine Leiter als Hindernis gewählt, da sie eine geringe Oberfläche aufweist. Dies ermöglicht eine effektive Überprüfung, ob die Auflösung der Tiefenkamera ausreichend fein ist und ob die Sensoren passend kalibriert sind.

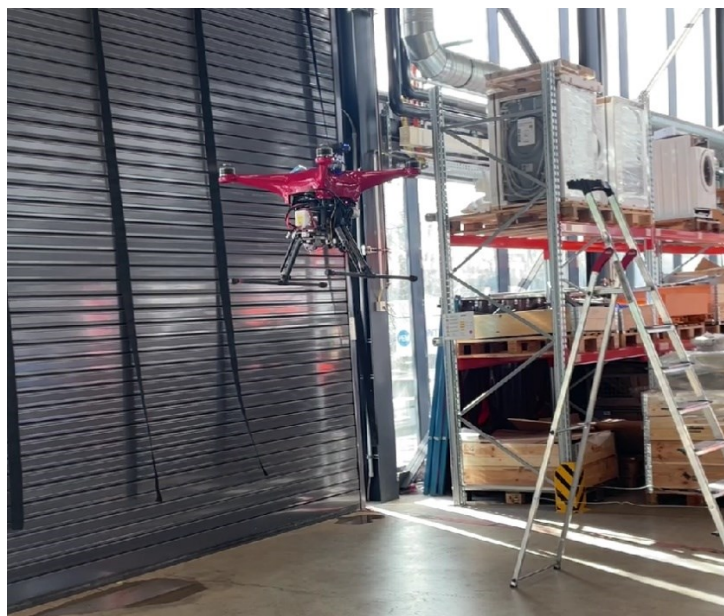


Abbildung 26 - Testflug der finalen Drohne mit Kollisionserkennung



Abbildung 27 - Live-Aufnahme der Unterboden-Kamera zur Positions- und Objekterkennung in ca. 5 m Höhe (RTSP-Stream)

**Das Ergebnis des AP 3 ist der Vergleich und die Auswertung unterschiedlicher Technologien zur Datenübertragung, Tracking und Kollisionsvermeidung.**

#### **Aufbau Demonstrator & Erweiterung der UWB-Anker (AP 4.1)**

Um die UWB-Ausleuchtung der DFA-Halle zu verbessern, wurden in Kooperation mit der Firma SICK Messungen und Simulationen zur optimalen Position weiterer Anker durchgeführt. Während dieser Aktivitäten wurde die Signalstärke am UWB-Tag zu den jeweiligen Anker in der Halle gemessen (s. Abbildung 28, grüne Markierungen im Bild, Namensgebung basierend auf den letzten drei Ziffern der IP-Adressen). Dabei konnte auch reproduziert werden, dass die Position auch in Ruhelage sprunghaft erfasst wird. Durch einen restriktiveren FP-Filter (-100 dB) kann das Signal stabilisiert werden.

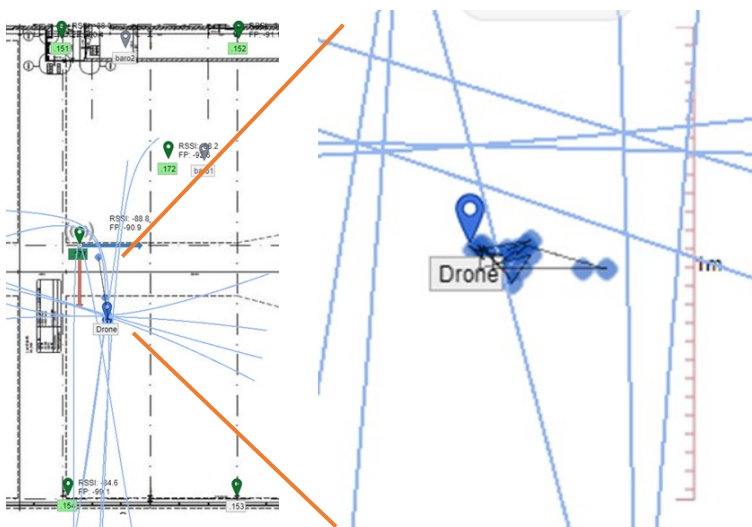


Abbildung 28: Messung der Signalstärken im Bereich der UWB-Antennen (Anker) und sprunghafte Ruhelage des Drohnen-Tags (rechts) (Quelle: DFA)





In der folgenden Abbildung ist die Minimal-Konfiguration einer optimalen Verteilung der UWB-Antennen in der DFA zu sehen, um eine durchgehende Ausleuchtung zu erreichen (grüner Bereich). Hierzu sind mindestens 13 Anker erforderlich, die ohne direkte Hindernisse und möglichst hoch installiert werden müssen (s. Abbildung 29).

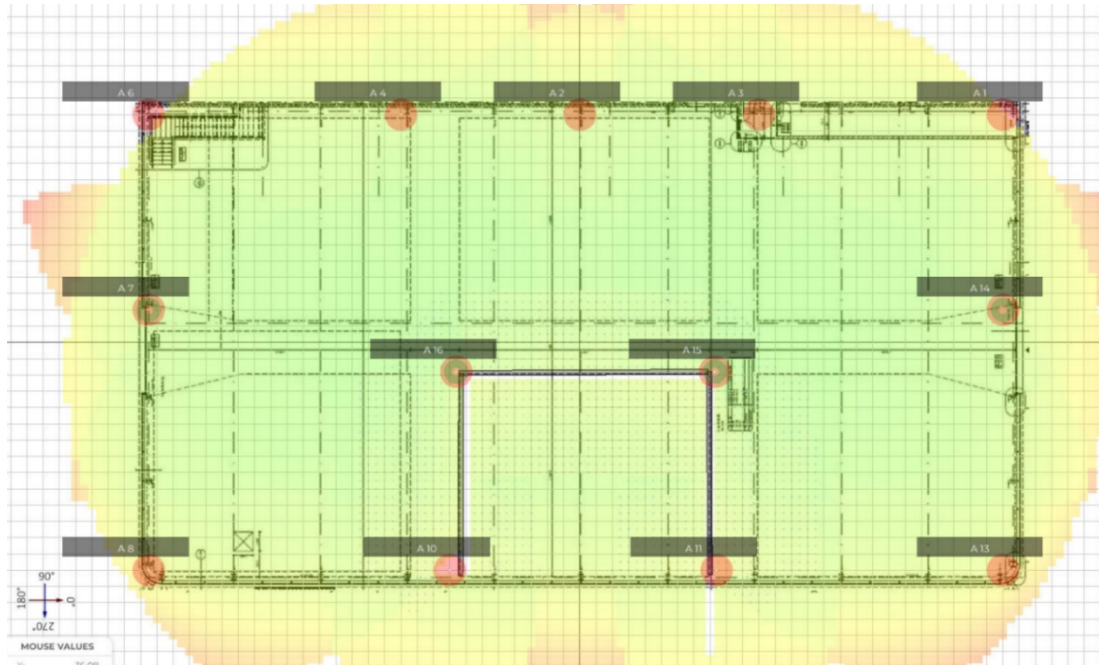


Abbildung 29: Referenz-Konfiguration Verteilung UWB-Antennen (Anker) in der DFA (Quelle: DFA)

Sämtliche Antennen müssen über Ethernet-Kabel im lokalen Netzwerk eingebunden und über den SICK RTLS Manager eingerichtet und konfiguriert werden.



Abbildung 30: Installationsprozess der zusätzlichen Anker (UWB-Empfangsantenne) und mobile Drohnen-Start-und-Landezone in der DFA



Die Infrastruktur der DFA wurde somit weiterentwickelt, um die Indoor-Navigation einer Drohne zu ermöglichen. Als Demonstrator ist das Gesamtkonzept bestehend aus der Infrastruktur und dynamischen Produktionsumgebung (DFA), Drohne (von Emqopter, die sich jedoch aufgrund von weiterem Forschungsbedarf aktuell bei Emqopter befindet) und dem digitalen Zwilling der Umgebung und der Drohne.

#### Finale Versuchsdurchführung und Validierung des Konzeptes (AP 4.2)

Zum Abschluss des Projekts wurde das gesamte Konzept ganzheitlich validiert. Die Drohne soll eine definierte Route in der Produktionsumgebung abfliegen, selbstständig Kollisionen vermeiden und Videostream (z. B. zur Erkennung von Abweichungen in der Position von Materialien und Transportträgern) ermöglichen.



Abbildung 31: Die zum finalen Testfliegen eingesetzte im Forschungsprojekt entwickelte Drohne

Zur sicheren Bewegung in einer dynamischen Produktionsumgebung (z. B. Veränderte Position des Krans) ist die Drohne mit Sensoren zur Messung von Abständen zu verschiedenen Hindernissen ausgestattet. Diese Funktion ist entscheidend für eine sichere Navigation innerhalb enger Räume und hilft, Kollisionen zu vermeiden, wodurch die Drohne sicher um Ausrüstungen und Personal operieren kann. Eine Beispielnachricht aus dem copter/proximity-Thema listet mehrere Abstandsmessungen auf, was die Fähigkeit der Drohne zur dynamischen Hinderniserkennung und -vermeidung verdeutlicht.

Darüber hinaus hat die Drohne Informationen zum eigenen Status (z. B. Batterie) übermittelt. Dies ist wichtig, um sicherzustellen, dass die Drohne ihre Aufgaben ohne Unterbrechungen durch Stromausfälle ausführen kann, und unterstützt die Planung von Ladezyklen zur Aufrechterhaltung der Betriebszeit. Zum Beispiel zeigt eine Nachricht im copter/battery-Thema die Batteriespannung und den verbleibenden Ladungsprozentsatz der Drohne, was für die Betriebsplanung und Wartung unerlässlich ist.

Die Drohne wurde zur Überwachung einer Produktionshalle eingesetzt. Dies ist besonders für Fertigungs- oder Lagerumgebungen wertvoll, in denen die genaue Position von Werkzeugen, Paletten

oder Ausrüstungen für effiziente Abläufe unerlässlich ist. Beispielsweise zeigt eine Nachricht im copter/pose-Thema die Koordinaten der Drohnenposition, was ihre Fähigkeit zur Echtzeitverfolgung und Überwachung der Asset-Positionen belegt. Die Asset-Area-Nachrichten wurden gesammelt, um die Überwachung bestimmter Zonen oder Bereiche zu ermöglichen. Sie kann die falsche Positionierung von Materialien und Transportträgern erkennen und an zuständige Person übermitteln. Ein Beispiel aus dem copter/sick-Thema zeigt, dass die Drohne die Anwesenheit von Assets innerhalb bestimmter Bereiche identifiziert, was für die Aufrechterhaltung sicherer Betriebsabläufe entscheidend ist.

Die Drohne konnte sich in der Umgebung entlang des Hauptgangs frei navigieren (s. Abbildung 32), bei Abweichungen von der Route war jedoch ein Operator mit Fernsteuerung bereit, einzugreifen. Die Drohne konnte im digitalen Zwilling in Echtzeit abgebildet (s. Abbildung 33) werden und konnte die gesammelten Sensordaten über den MQTT-Broker übergeben.



Abbildung 32: Drohne im autonomen Flug neben einem (künstlich aufgestellten) Hindernis (Leiter)

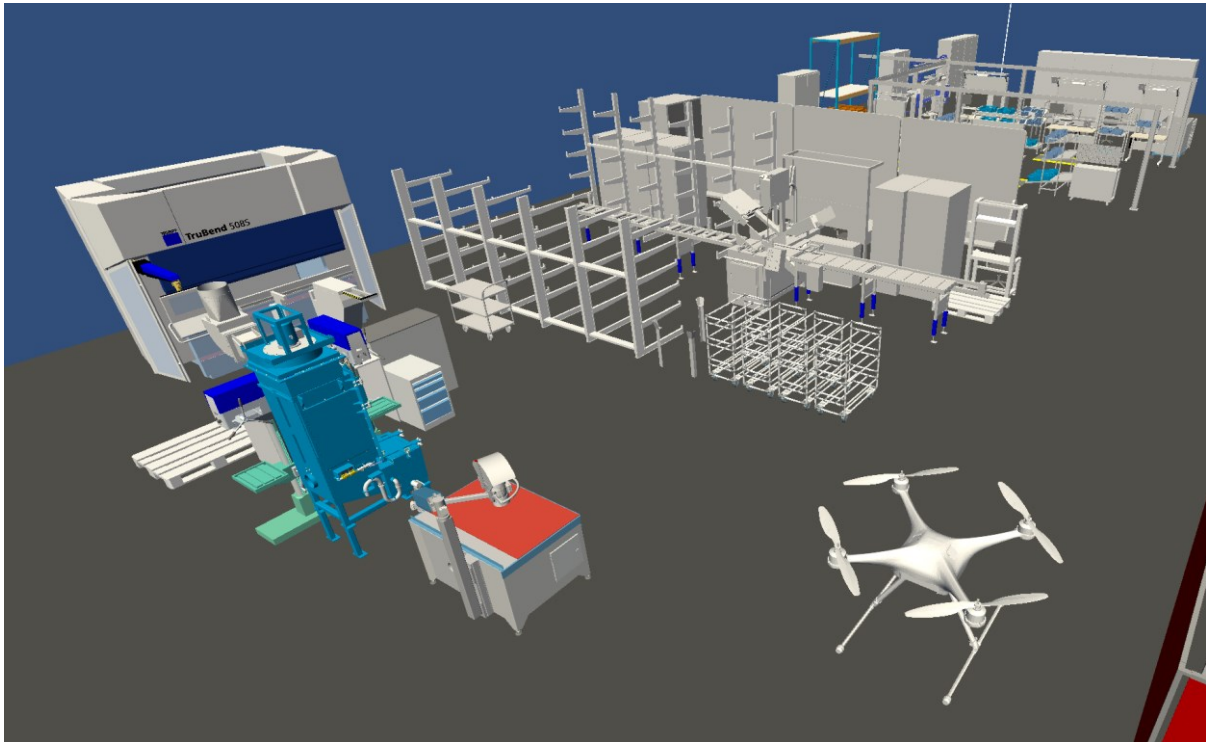


Abbildung 33: Digitaler Zwilling der DFA in Unity mit dem interaktiven 3D-Modell der SmartDroneWatch-Drohne (Quelle: E4TC)

Das Ergebnis des AP 4 ist die erfolgreiche Validierung der autonomen Navigation und Kollisionsvermeidung der Drohne in einer laufenden und daher dynamischen Produktionsumgebung.

**b) Darstellung zahlenmäßiger Nachweis (Zusammenfassung)**

Folgende Mittel wurden im Projekt verwendet:

Tabelle 2: Bezogene Mittel im Forschungsprojekt SmartDroneWatch

	Emqopter	DFA	FIR	Gesamt
Personal	154.370,26	42.350,00	85.447,31	282.167,57
Reisen	1.568,55	-	-	1.568,26
Investitionen / Sachkosten	19.293,71	573,00	2.410,80	22.277,51
Mieten / Leasing	-	-	-	-
Unteraufträge	22.070,00	-	-	22.020,00
Sonstige Kosten	2.265,75	5.585,97	-	7.851,72
Förderquote	69 %	69 %	100 %	
<b>Gesamt</b>	<b>199.568,27</b>	<b>48.858,97</b>	<b>87.858,11</b>	
<b>Gefördertes Volumen</b>	<b>137.702,11</b>	<b>33.471,19</b>	<b>87.858,11</b>	<b>259.031,41</b>

Die Emqopter GmbH hat von den für das Projekt vorgesehenen 139.956,14€ für Personal 154.370,26€ verausgabt. Grund hierfür war der erhöhte Personalbedarf aufgrund der technischen Komplexität, welche letztendlich auch eine Laufzeitverlängerung nötig machte, um das Projekt erfolgreich zum Ende zu führen. Aus dem geplanten Materialbudget von 20.925,15€ wurden 19.293,71€ abgerufen und aus den sonstigen Vorhabenbezogenen Kosten wurden 2.265,75 statt der geplanten 2.113,11€ abgerufen. Im Großen und Ganzen erfolgten die Projektausgaben für Material und Lizenzen demnach planmäßig mit kleineren Differenzen. Aus dem Reisebudget von 4.336,00€ wurden 1.568,55€ abgerufen, da die



technischen Schwierigkeiten mehrere Labortests bei Emqopter vor Ort nötig machten, wodurch es im Rahmen der Projektzeit aus zeitlichen Gründen weniger als den ursprünglich geplanten Terminen für Testing- und Inbetriebnahme bei der DFA gekommen ist. Die Fremdleistungskosten, welche für den Unterauftrag in Höhe von 24.300,00€ eingeplant wurden, wurden mit 22.070,00€ unterschritten, da der Auftrag der Spritzgussteil-Fertigung am Ende weniger kostete als geplant.

Die DFA hat aufgrund von höherer Komplexität der Drohnenanbindung im digitalen Zwilling als erwartet Personalkosten von 42.350,00€ statt geplanten 41.769,00€ bezogen. Dafür sind Kosten für das Material eingespart worden (573,00€ statt 818,05€) sowie die vorhabensbezogene Abschreibung belief sich auf 5.585,97, was unter dem geplanten Budget von 6.958,24€ liegt.

Der FIR e. V. an der RWTH Aachen hat die geplanten 85.447,31€ für das Personal ausgeschöpft. Zusätzlich ergaben sich auch Materialkosten in Höhe von 2.410€.

#### **c) Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die im Forschungsprojekt „Smart Drone Watch“ geleistete Arbeit entspricht in vollem Umfang dem bewilligten Antrag und war daher für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen. Die jeweilige Vorgehensweise in den einzelnen Arbeitspaketen wurde von allen Konsortialpartnern diskutiert und abgestimmt. Es wurde besonderer Wert auf eine ganzheitliche Abarbeitung der Inhalte der Arbeitspakete gelegt. Alle im Rahmen der Projektlaufzeit durchgeführten Arbeiten sind zur Erreichung der Projektziele und des Projekterfolgs begründet.

#### **d) Voraussichtlicher Nutzen und Verwertungsplan**

##### **Nutzen für die Zielgruppe**

Das drohnenbasierte Überwachungssystem trägt zur Steigerung von Effizienz und Sicherheit im Produktionsbetrieb bei, indem es das gesamte Umfeld in Echtzeit überwacht. Die Entwicklung leistungsstarker Algorithmen zur Bilderkennung ermöglicht ein breites Anwendungsspektrum für verschiedene Use Cases und Branchen. Durch die Integration in die IT-Infrastruktur kann zudem die Reaktionszeit im Falle von Prozessstörungen effektiv optimiert werden.

Die in diesem Projekt umgesetzten Innovationen ermöglichen das Erheben von Daten, durch welche sich ein effizienterer Produktionsablauf in der Fertigungsumgebung realisieren lässt. Dies resultiert in der Einsparung von Zeit und Ressourcen, was sowohl ökonomisch als auch ökologisch sinnvoll ist. Unnötige, lästige und zum Teil gefährliche Arbeitsschritte fallen durch die Nutzung des Systems weg oder werden erleichtert. Es ist sicherer, einen schweren Fehler an einer größeren Fertigungsmaschine aus der Ferne zu observieren und die Lage einzuschätzen, als dazu einen Operator direkt in den Gefahrenbereich schicken zu müssen. Weiterhin werden die Informationen über die Positionen von Wagen und Paletten so genutzt, dass sich die Laufwege deutlich reduzieren und die Aufenthaltszeiten von Mitarbeitern in Gefahrenbereichen damit sinken. Es lassen sich jegliche Bilderkennungsalgorithmen implementieren, individuell auf die Umgebung angepasst. So wäre eine automatisierte Erkennung von blockierten Fluchtwegen denkbar. Die Zielgruppe sind hier die Mitarbeiter in Produktionsumgebungen, um ihre Tätigkeiten sicherer und effizienter zu gestalten. Neben den ökonomischen, ökologischen und sicherheitstechnischen Vorteilen ist zu nennen, dass das Voranschreiten der Digitalisierung in der Industrie mit diesem Projekt direkt unterstützt wird. Im Hinblick auf die zukünftige Konkurrenzfähigkeit der deutschen Industrie ist das Voranbringen der Digitalisierung insgesamt von entscheidender Bedeutung, besonders in den fertigenden Betrieben.

## Verwertung der Ergebnisse

Die Erkenntnisse des Forschungsprojekts wurden zum einem in akademische Veranstaltungen am FIR e. V. an der RWTH Aachen eingebunden, z. B. in die Vorlesung „Industrielle Logistik“. Durch diese Maßnahme bleiben Studierende auf dem neuesten Stand der Entwicklungen und können aktuelles Wissen aus der Praxis erlernen. Dies fördert die Innovationsfähigkeit und das kritische Denken. Zudem profitieren Lernende von praktischen Erfahrungen und verbessern ihre Problemlösungsfähigkeiten. Die Integration stärkt den Dialog zwischen Forschung und Praxis, erhöht die Ausbildungsqualität und bereitet die Lernenden besser auf berufliche Herausforderungen vor.

Die Projektergebnisse aus SmartDroneWatch fließen direkt in die Entwicklung der Produktserie Qmed und die Entwicklung des Starqopter bei Emqopter ein. Darüber hinaus hat Emqopter die Ergebnisse des Projektes bei der Innovations Challenge Autonomous Indoor Drones des EIT Manufacturing eingereicht. Dort soll die Technologie von Arcelor Mittal auf reale industrielle Einsatzmöglichkeiten geprüft werden. Aufgrund der positiven Resonanz und der vielversprechenden Projektergebnisse beabsichtigen die Partner darüber hinaus, das Projekt im kommenden Jahr in der Förderlinie 2 Kategorie A des mFUND fortzuführen.

### e) Darstellung des fortgeschriebenen Datenmanagementplans

Da im Laufe des Forschungsprojekts die Initiative zum Austausch von Forschungsdaten – mCLOUD – abgekündigt wurde, werden die im Forschungsprojekt entstandene Daten aus den Testflügen durch die Publikationsplattform OPUS des FIR e. V. an der RWTH Aachen bereitgestellt.

### f) Öffentlichkeitswirksamen Maßnahmen

Das Projekt wurde von der Emqopter GmbH im Jahr 2023 im Rahmen der Messen „transport logistic“ in München, „Logimat“ in Stuttgart und „Hannover Messe“ in Hannover auf dem eigenen Messestand vorgestellt.

Zum Projekt wurde ein Video auf dem YouTube-Kanal von Emqopter veröffentlicht, welches die Projektergebnisse öffentlichkeitswirksam vorstellt. (Emqopter GmbH 2024)

Die Ergebnisse des Projekts werden in einem Beitrag in der Zeitschrift „Unternehmen der Zukunft“ publiziert. Ziel dieser Publikation ist es, andere Unternehmen für das Thema zu sensibilisieren und ihnen die Relevanz der entwickelten Technologien näherzubringen. Durch die Veröffentlichung soll ein Ausblick auf die zukünftigen Entwicklungen und Anwendungsmöglichkeiten gegeben werden. Zudem dient die Publikation als Grundlage, um weitere Use Cases zu identifizieren und zu entwickeln. Unternehmen erhalten dadurch wertvolle Informationen und Inspirationen, wie sie ähnliche Technologien in ihren eigenen Produktionsumgebungen einsetzen können.

### III. Literaturverzeichnis

Cadena, C.; Carlone, L.; Carrillo, H.; Latif, Y.; Scaramuzza, D.; Neira, J. et al.: Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping: Toward the Robust-Perception Age. In: IEEE Trans. Robot. 32(2016)6, S. 1309–1332. DOI: 10.1109/TRO.2016.2624754.

DFA: DFA Demonstrationsfabrik Aachen GmbH. Online verfügbar unter <https://demofabrik-aachen.rwth-campus.com/>. (Link zuletzt geprüft: 26.06.2024)

Emqopter GmbH (2024): SmartDroneWatch - Indoor Drohne für die Logistik. Online verfügbar unter <https://youtu.be/2W6lYzYH4zY>. (Link zuletzt geprüft: 26.06.2024)

Fast-Berglund, Å.; Åkerman, M.; Li, D.; Salunkhe, O.: Conceptualising Assembly 4.0 through the drone factory. In: IFAC-PapersOnLine 52 (2019) 13, S. 1525–1530. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.11.416.

Gageik, N.: Autonome Quadroptopter zur Innenraumerkundung: AQopter18, Forschung und Entwicklung. Doctoral Dissertation. Universität Würzburg. Online verfügbar unter <https://opus.bibliothek.uni-wuerzburg.de/frontdoor/index/index/docid/13024>. (Link zuletzt geprüft: 26.06.2024)

Gageik, N.; Benz, P.; Montenegro, S.: Obstacle Detection and Collision Avoidance for a UAV With Complementary Low-Cost Sensors. In: IEEE Access (2015) 3, S. 599–609. DOI: 10.1109/access.2015.2432455.

Kondo, K.; Figueroa, R.; Rached, J.; Tordesillas, J.; Lusk, P. C.; How, J. P. (2023): Robust MADER: Decentralized Multiagent Trajectory Planner Robust to Communication Delay in Dynamic Environments. Online verfügbar unter <http://arxiv.org/pdf/2303.06222>. (Link zuletzt geprüft: 26.06.2024)

Lafortune, R.; Afram, E.; Grossman, A.; Drolet, A.; de Champlain, F.; Iannuzzi, D.; Homier, V.: Feasibility of Live Video Feed Transmission from Unmanned Aerial Vehicles for Medical Surveillance During the 2022 Montreal Marathon. In: Prehospital and disaster medicine 38 (2023) 5, S. 617–621. DOI: 10.1017/S1049023X23006362.

Maghazei, O.; Netland, T.: Drones in manufacturing: exploring opportunities for research and practice. In: JMTM 31 (2020) 6, S. 1237–1259. DOI: 10.1108/JMTM-03-2019-0099.

Maghazei, O.; Netland, T. H.; Frauenberger, D.; Thalmann, T.: Automatic Drones for Factory Inspection: The Role of Virtual Simulation. In: Advances in production management systems. Artificial intelligence for sustainable and resilient production systems: IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2021, Nantes, France, September 5–9, 2021, proceedings, part IV, Bd. 633. Hrsg.: Alexandre Dolgui, Alain Bernard, David Lemoine, Gregor von Cieminski und David Romero. Springer, Cham (Springer eBook Collection, 633) 2021, S. 457–464.

Mutijarsa, K.; Nabil, D. Z.; Putra, C. S.: Data Transmission And Off-board Object Detection Of A Visual Inspection Drone In The Factory Shop Floor Area. In: 2022 International Conference on Information Technology Systems and Innovation (ICITSI). Proceedings : November 8-9, 2022, Bandung, Indonesia. 2022 International Conference on Information Technology Systems and Innovation (ICITSI). Bandung, Indonesia, 8.11.2022 -9.11.2022. Hrsg.: Suhardi. IEEE, Piscataway, USA, 2022, S. 316–322. DOI: 10.1109/ICITSI56531.2022.9970989.

Nonami, K.: Present state and future prospect of autonomous control technology for industrial drones. In: IEEE Transactions Elec Engng 15 (2020) 1, S. 6–11. DOI: 10.1002/tee.23041.

Selim, M. Y.; Kamal, Ahmed E.: Post-Disaster 4G/5G Network Rehabilitation Using Drones: Solving Battery and Backhaul Issues. In: 2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Abu Dhabi, United Arab Emirates, 09.12.2018 - 13.12.2018: IEEE, S. 1–6.

Wawrla, L.; Maghazei, O.; Netland, T.: [Whitepaper] Applications of drones in warehouse operations. ETH Zürich, Zürich 2019. D-MTEC, Chair of Production and Operations Management. Online verfügbar unter [https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mtec/pom-dam/documents/drones%20in%20warehouse%20operations\\_pom%20whitepaper%202019\\_final.pdf](https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mtec/pom-dam/documents/drones%20in%20warehouse%20operations_pom%20whitepaper%202019_final.pdf). (Link zuletzt geprüft: 26.06.2024)