

# Schlussbericht vom 30.09.2022

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 21395 N

## Thema

Autonomer Drohnenflug im Produktionsumfeld zur logistischen Prozessunterstützung  
(Autodrohne in der Produktion)

## Berichtszeitraum

01.10.2020 – 30.09.2022

## Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft Intralogistik/ Fördertechnik und Logistiksysteme e.V. - IFL

## Forschungseinrichtung(en)

IPH - Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH

Gefördert durch:

## **Inhalt**

1. Projektsteckbrief und Problemstellung .....	3
2. Gegenüberstellung angestrebter Teilziele (TZ) und erzielter Ergebnisse .....	4
TZ 1: Entwicklung eines Sicherheitskonzeptes .....	4
TZ 2: Auswahl von geeigneter Hardware: .....	5
TZ 3: Entwicklung von Routenplanungs- und Navigationsalgorithmen: .....	5
TZ 4: Simulative und experimentelle Validierung: .....	6
3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse Verwendung der Zuwendung .....	7
AP 1: Anforderungsanalyse .....	7
AP 2: Konzeption eines MKS .....	7
AP 2.1: Entwicklung und iterative Optimierung eines Sicherheitskonzeptes .....	7
AP 2.2: Auswahl eines Hardwarekonzeptes .....	11
AP 2.3 Entwicklung von Algorithmen zur Exploration und Kollisionsvermeidung .....	12
AP 3: Simulative Verifizierung des MKS .....	13
AP 3.1: Erstellung einer Simulationsumgebung .....	13
AP 3.2: Implementierung des MKS-Konzeptes .....	14
AP 3.3 Verifizierung und iterative Optimierung des MKS-Konzeptes .....	15
AP 4: Umsetzung und Validierung .....	15
AP 4.1: Umsetzung des MKS-Konzeptes .....	15
AP 4.2: Flugversuche im Testumfeld .....	16
AP 4.3: Flugversuche bei PA-Mitgliedern .....	18
4. Verwendung der Zuwendung .....	19
5. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	20
6. Innovativer Beitrag und wirtschaftlicher Nutzen .....	20
6.1. Voraussichtliche Nutzung der Angestrebten Forschungsergebnisse .....	20
6.2. Möglicher Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit von KMU .....	20
7. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft .....	21
8. Durchführende Forschungsstelle .....	24
9. Literaturverzeichnis .....	26
10. Richtlinien und Verordnungen .....	27

## 1. Projektsteckbrief und Problemstellung

Fabrikplanungen lassen sich in verschiedene Grundfälle einteilen [Gru13]. Den größten Anteil von Fabrikplanungen bildet dabei der Grundfall der Um- und Neugestaltung bestehender Strukturen. Die Ziele dieses Grundfalls sind die Rationalisierung und/oder Modernisierung bestehender Strukturen. Eine Studie von TOMPKINS ET AL. [Tom10] zeigt, dass die Betriebskosten in einer Fabrik durch Um- und Neugestaltung um bis zu 50 % reduziert werden können. Im Rahmen einer derartigen Fabrikplanung muss das Ist-Layout einer Produktions- und Logistikumgebung aufgenommen werden. Die Ist-Aufnahme kann zu einem Teil auf Basis von vorhandenen digitalen oder physischen Dokumenten umgesetzt werden, muss aber in vielen Fällen durch eine dreidimensionale Ausmessung der Fabrik ergänzt werden. In letzterem Fall besteht die Ist-Aufnahme eines Fabriklayouts aus der Umgebungserfassung und der digitalen Rekonstruktion (vgl. Bild 1).



**Bild 1: Digitale Rekonstruktion einer Produktions- und Logistikumgebung**

Die Umgebungserfassung der Fabrik wird manuell mit einfachen Sensoren wie z. B. Laser-Abstandssensoren durchgeführt. Aus diesem Grund ist die Ist-Aufnahme sehr zeit- und kostenaufwendig und kann bis zu 50 % des gesamten Aufwands einer Fabrikplanung in Anspruch nehmen [Wie14]. Um den Aufwand bei diesem Vorgang zu reduzieren, konnte in dem vorangegangenen Forschungsvorhaben „Instant Factory Maps“ (IGF-Vorhaben 19170 N) die digitale Rekonstruktion des Layouts teilautomatisiert werden [Mel20]. Ein weiterer, entscheidender Schritt zur Reduzierung des Aufwands ist die Erhöhung des Automatisierungsgrads der Umgebungserfassung. Eine Möglichkeit dafür ist der Einsatz von

360°-Laserscannern, die bei der Umgebungserfassung manuell oder automatisiert bewegt werden. Nachteilig bei diesem Ansatz ist, dass der Laserscanner nur eingeschränkt dreidimensional bewegt werden kann und somit nicht alle Bereiche einer Fabrik abdeckt [Gue11]. Durch eine mangelnde Abdeckung der Umgebung wird die Qualität der Daten reduziert, sodass die 3D-Rekonstruktion nicht mehr vollständig ist. Um diesem Nachteil zu begegnen, kann ein Multikoptersystem (MKS) mit entsprechenden Sensoren ausgerüstet und für eine Umgebungserfassung eingesetzt werden [Mel18]. Auf diese Weise wird zwar die Abdeckung der Umgebungserfassung deutlich gesteigert und die Ist-Aufnahme erheblich beschleunigt, die Kosten für die Datenaufnahme bleiben jedoch bestehen, da das MKS manuell von einem Fernpiloten gesteuert werden muss. Die Notwendigkeit eines Fernpiloten kann durch eine Automatisierung der MKS-Steuerung reduziert oder vollständig eliminiert werden. Durch den Einsatz von MKS, die automatisiert navigieren und erkunden, kann also der Aufwand bei Fabrikplanung signifikant verringert werden.

## **2. Gegenüberstellung angestrebter Teilziele (TZ) und erzielter Ergebnisse**

### **TZ 1: Entwicklung eines Sicherheitskonzeptes**

#### ***Angestrebtes TZ aus dem Forschungsantrag***

*Auf nationaler und internationaler Ebene existieren noch keine Gesetzgebungen, die die Indoor-Verwendung von MKS regeln. Um dennoch eine höchstmögliche Integrierbarkeit in zukünftige Gesetze zu gewährleisten, bildet ein fundiertes Sicherheitskonzept die Grundlage des angestrebten MKS. Dafür werden bereits bestehende internationale und nationale Sicherheitsleitfäden verwendet und Richtlinien aus verwandten Systemen wie bspw. FTS adaptiert.*

#### ***Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens***

Während der Projektbearbeitung hat sich die Maschinenrichtlinie (Richtlinie 2006/42/EG) als Gesetzgebung für den MKS-Einsatz innerhalb von Gebäuden durchgesetzt. Die Maschinenrichtlinie erfordert u. a. die Durchführung einer Gefährdungsbeurteilung und das Erstellen von Betriebsanweisungen. Im Rahmen der Entwicklung eines Sicherheitskonzeptes (AP 2.1) wurde neben der Erstellung von Betriebsanweisungen und der Durchführung einer Gefährdungsbeurteilung noch weitere sicherheitskritische Hinweise wie z. B. zur Qualifikation des Fernpiloten zusammengetragen. Die erarbeiteten Dokumente sind zwar speziell für den Fabriklayoutscan mittels MKS zusammengestellt, können aber gleichzeitig als Leitfaden für ähnliche Indoor-Einsätze mittels Drohne aufgefasst werden. Mit dem Leitfaden können KMU niederschwellig Hemmnisse überwinden und Wissenslücken zur Sicherheitsanforderungen schließend.

Während der Projektbearbeitung wurde das Sicherheitskonzept darüber hinaus z. B. in Workshops mit dem Projektbegleitenden Ausschuss (PA) in einem iterativen Prozess weiterentwickelt und optimiert. Wesentliche Erfahrungen bei der Entwicklung des MKS und bei den Flugversuchen konnten so in dem Sicherheitskonzept Berücksichtigung finden. Im Rahmen dieses Prozesses wurde auch eine Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA) durchgeführt (vgl. Anhang 2)

## **TZ 2: Auswahl von geeigneter Hardware:**

### ***Angestrebtes TZ aus dem Forschungsantrag***

*Die notwendige Hardware für das angestrebte System wird durch Komponenten wie bspw. einen Multikopter, Sensoren zur Umgebungserfassung und eine Recheneinheiten gebildet. Da diese Komponenten in geeigneter Form bereits vorhanden sind, ist die Entwicklung der Hardware nicht Bestandteil dieses Vorhabens. Die Komponenten werden lediglich anhand ihrer Übereinstimmung mit dem Sicherheitskonzept (TZ 1), der Eignung für den Anwendungsfall und ihrer Kompatibilität untereinander ausgewählt.*

### ***Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens***

Die notwendige Hardware wurde in AP 2.2 im Einklang mit dem Sicherheitskonzept (TZ 1) ausgewählt und beschafft. Ein Multikopter, der allen Anforderungen des Sicherheitskonzepts entspricht, konnte zu dem Zeitpunkt nicht auf dem Markt gefunden werden. Eine besondere Herausforderung stellte eine offene Steuerung und die GNSS-freie Navigation in einer Produktions- und Logistikumgebung dar. Weiterhin kam es insbesondere bei anfänglichen Flugversuchen zu Unfällen, die eine teilweise Reparatur des MKS erforderlich machten. Aus diesen Gründen wurde die Struktur des MKS selbst gefertigt und eine eigene MKS-Konfiguration entwickelt, die dem Sicherheitskonzept entsprach.

Für die Umgebungserfassung wurde ein Velodyne Puck Lite VLP 16 [Vel22] verwendet. Dieser LiDAR zeichnet sich durch seine hohe Präzision, hohe Abtastrate und ein besonders großes Bildfeld (360 ° entlang der horizontalen Achse und 30 ° entlang der vertikalen Achse) aus. Außerdem verfügt der Sensor über eine frei zugängliche ROS (Robot Operating System) Bibliothek, wodurch die Implementierung deutlich erleichtert wurde.

Für die Flugregelung wurde ein Holybro Pixhawk 4 [Hol19] aus dem Bestand des IPH verwendet. Dieser kleine On-Board Computer enthält bereits verschiedene Sensoren zur Navigation, verschiedene Schnittstellen und eine frei verfügbare Firmware zur Steuerung eines MKS.

Außerdem wurden weitere geeignete Hardwarekomponenten wie z. B. Propeller, Elektromotoren, ein Optical Flow Modul und Motorcontroller ausgewählt und beschafft.

## **TZ 3: Entwicklung von Routenplanungs- und Navigationsalgorithmen:**

### ***Angestrebtes TZ aus dem Forschungsantrag***

*Die Ergebnisse aus TZ 1 und TZ 2 definieren die Bedingungen wie bspw. Sicherheitsabstände, technische Redundanz und Datenintegrität, die für die kollisionsfreie Algorithmen zur Routenplanung und Navigation in unbekanntem, dynamischen Umgebungen erforderlich sind. Das Ziel von TZ 3 ist die Konzeption und Implementierung dieser Algorithmen.*

### ***Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens***

Bei der Konzeption der Algorithmen wurde sich für einen DRL (Deep Reinforcement Learning) - Ansatz entschieden. Die Vor- und Nachteile dieses Ansatzes sind in Kapitel 3 unter AP 2.3 dargestellt. Im Laufe der Implementierung der Algorithmen in die Simulationsumgebung hat sich gezeigt, dass dieser Ansatz innerhalb der gegebenen Projektlaufzeit nicht umsetzbar ist, da das Anlernen der KI bei den gegebenen Umständen sehr viel Zeit in Anspruch nehmen würde. Aus diesem Grund wurde der DRL-Ansatz verworfen, um alternativ eine effiziente Variante des etablierten A\*-Algorithmus umzusetzen. Da der A\*-Algorithmus das MKS lediglich dazu befähigt

einen kollisionsfreien Weg zu einer Zielposition zu finden, wurde dieser Ansatz um einen weiteren Algorithmus zum Identifizieren von nicht erkundeten Bereichen erweitert. Dieser Algorithmus teilt die erkundeten Bereiche in ein dreidimensionales Raster ein und sucht darin Randbereiche, die nicht an Hindernissen oder Wänden liegen. In Kombination ermöglichen es die Algorithmen dem MKS unbekannte Bereiche für eine Erkundung auszuwählen und diese kollisionsfrei anzusteuern. Sobald alle unbekannt Bereiche erkundet wurden, gilt der Fabriklayoutsan als erfolgreich abgeschlossen.

#### **TZ 4: Simulative und experimentelle Validierung:**

##### ***Angestrebtes TZ aus dem Forschungsantrag***

*Zuerst werden die Algorithmen aus TZ 3 in einer Simulationsumgebung simulativ getestet und ggf. iterativ optimiert. Anschließend werden die Komponenten des MKS aus TZ 2 zu einem Demonstrator zusammengesetzt. Der Demonstrator wird danach zur experimentellen Validierung der autonomen Routenplanung, Navigation und Fabriklayout-Erfassung verwendet.*

##### ***Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens***

Für den Test der Algorithmen wurden mehrere Simulationsumgebungen mittels ROS Gazebo entwickelt, die den speziellen Anforderungen einer Produktions- und Logistikumgebung genügen (vgl. Bild 3). Beim Test der Algorithmen bzw. bei der iterativen Optimierung der Algorithmen in dieser Simulationsumgebung ist aufgefallen, dass der DRL-Ansatz (vgl. Beschreibung von TZ 3 und AP 2.3) nicht geeignet war. Aus diesem Grund wurde ein anderer Ansatz, der einen A\*-Algorithmus und einen selbst entwickelten Algorithmus zur Identifikation von nicht erkundeten Bereichen, verwendet und validiert.

Ein Ergebnis von TZ 2 war die Auswahl von Hardwarekomponenten. Diese Komponenten wurden in AP 4.1. beschafft und zu einem MKS-Demonstrator zusammengesetzt. Über einen On-Board-Computer konnte der Algorithmus zur Routenplanung und Navigation in den Demonstrator integriert werden (vgl. Bild 5).

Anschließend wurde der Demonstrator in drei verschiedenen Testumfeldern getestet. Dabei wurde ein Testumfeld für Versuche, die eine besondere Gefährdung aufweisen, verwendet und zwei weitere repräsentierten verschiedene Produktions- und Logistikumgebungen. Versuche bei PA-Mitgliedern konnten aus Gründen der fehlenden Zulassung bzw. Zertifizierung des MKS nicht durchgeführt werden. TZ 4 wurde aber trotzdem erfüllt, da der Demonstrator auch ohne die Versuche bei PA-Mitglieder experimentell validiert werden konnte.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse Verwendung der Zuwendung**

#### **AP 1: Anforderungsanalyse**

##### ***Durchgeführte Arbeiten***

Im Rahmen der Anforderungsanalyse wurden Anforderungen aus dem Anwendungsfall abgeleitet und nach Priorität bewertet. Im ersten Projekttreffen (Januar 2021) wurden diese Anforderungen zusammen mit dem PA diskutiert und weiterentwickelt werden.

##### ***Erzielte Ergebnisse***

Eine strukturierte Dokumentation der Anforderungen erfolgte in einem Lastenheft. Das Lastenheft ist dem Anhang 1 zu entnehmen.

#### **AP 2: Konzeption eines MKS**

##### **AP 2.1: Entwicklung und iterative Optimierung eines Sicherheitskonzepts**

##### ***Durchgeführte Arbeiten***

Ein vorläufiges Sicherheitskonzept wurde durch den Projektbearbeiter in ständiger Rücksprache mit den Sicherheitsbeauftragten des IPH entwickelt und dient als Grundlage für weitere Arbeiten. Es enthält bereits wesentliche Grundzüge für eine Gefährdungsbeurteilung, die Festlegung von Anwendungsgrenzen, eine Auflistung der relevanten Richtlinien bzgl. einer Conformité Européenne-Kennzeichnung (CE-Kennzeichnung) und eine Einschätzung durch den Projektbearbeiter. Während des gesamten Projektlaufzeit wurde das Sicherheitskonzept darüber hinaus entweder mit Experten aus dem Bereich der Sicherheit wie z. B. Vertretern aus der Berufsgenossenschaft Handel und Warenlogistik (BGHW) oder mit einzelnen Mitgliedern des PA diskutiert und optimiert.

Ein Teil der iterativen Optimierung des Sicherheitskonzepts zudem ein Workshop zusammen mit dem PA, bei dem eine FMEA durchgeführt wurde. Bei der FMEA wurde aus der Perspektive der Produktentwicklung systematisch der Komponenten des MKS auf Gefährdungen bewertet und Maßnahmen zur Begegnung dieser Gefährdungen abgeleitet.

##### ***Erzielte Ergebnisse***

Die Ergebnisse der FMEA wurden tabellarisch dokumentiert und sind im Anhang 2 zu finden. Für das Sicherheitskonzept für einen Indoor-MKS-Einsatz wurden die folgenden Gefährdungen identifiziert und zur Optimierung immer wieder herangezogen:

##### **Festlegung der Anwendungsgrenzen für einen teilautomatisierten UAS-Einsatz**

- Der Einsatz erfolgt in Produktions- und Logistikumgebungen innerhalb von Fabrikgebäuden.
- Start und Landung werden manuell durch einen Piloten durchgeführt.
- Der Pilot besitzt ein Kennnismnachweis nach Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO).

- Der Pilot kann in Notfällen einschreiten (automatisierte Erkundung wird beendet und der Pilot übernimmt die Steuerung des Unmanned Aircraft Systems (UAS)).
- Bei der automatisierten Erkundung befinden sich bis auf den Piloten keine Personen im Gefahrenbereich.
- Der Pilot verfolgt das UAS in einem sicheren Abstand.
- Der Pilot darf bei der Erkundung nicht überflogen werden.
- Der Pilot hat zu jedem Zeitpunkt Sichtkontakt zum UAS.
- Bei der automatisierten Erkundung bewegen sich keine Maschinen im Gefahrenbereich
- Bevor die automatische Erkundung beginnt, wird der gesamte Gefahrenbereich von besonders schmalen oder kleinen herunterhängenden Objekten wie z. B. Kabel und Ketten befreit.
- Bevor die automatische Erkundung beginnt, wird der gesamte Gefahrenbereich von durchsichtigen Flächen wie z. B. Fenstern und Türen befreit, indem diese bspw. überklebt oder übermalt werden.

### Entwicklung: CE-Kennzeichnung für ein UAS

Produkte, die auf dem europäischen Markt vertrieben und eingesetzt werden sollen, müssen eine CE-Kennzeichnung aufweisen. Je nach Produkt und Verwendungszweck müssen dafür verschiedene Richtlinien berücksichtigt werden. In Tabelle 1 sind relevante Richtlinien für den potenziellen industriellen Einsatz eines teilautomatisierten UAS für die Ist-Aufnahme mit dem Zweck einer 3D-Rekonstruktion von Fabriken aufgelistet. Für Demonstratoren im Rahmen von wissenschaftlicher Arbeit ist keine CE-Kennzeichnung erforderlich.

**Tabelle 1: Relevanten Richtlinien bei der Entwicklung eines UAS bzgl. CE-Kennzeichnung**

Art	Name	Nummer	Gegenstand	Verbindlichkeit/Anwendung
Sicherheit & Gesundheit	Funkgeräterichtlinie RED	2014/53/EU	Gesundheit, elektromagnetische Verträglichkeit, effiziente Nutzung von Funkfrequenzen	Für UAS, die elektromagnetische Wellen unterhalb von 3000 GHz ausstrahlen
	Maschinenrichtlinie MD	2006/42/EG	Sicherheit von Maschinen	Für UAS Indoor, die nicht zum Personen- oder Materialtransport vorgesehen sind
	Niederspannungsrichtlinie	2014/35/EU	Sicherheit von elektrischen Geräten	UAS mit Betriebsspannungen von 50 V-1000 V AC oder 75 V-1500 V DC; Ladegeräte
	Elektromagnetische Verträglichkeit EMV	2014/30/EU	elektromagnetische Verträglichkeit (Kompatibilität) & Unempfindlichkeit (Immunität).	Explizit für UAS ohne Funkfernsteuerung, implizit für alle elektrischen Geräte
	Elektro- und Elektronik-Altgeräte WEEE	2012/19/EU	Vermeidung von Abfällen von Elektro- und Elektronikgeräten	Sämtliche privat und gewerblich genutzte Elektro- und Elektronikgeräte
Umwelt- und Nachhaltigkeitsanforderungen	Batterien und Akkumulatoren	2006/66/EG	Registrierung, Rücknahme von Altbatterien	Für alle Batterien und Akkumulatoren

### **Anwendung: Gefährdungsbeurteilung für einen UAS-Einsatz**

Die folgende Gefährdungsbeurteilung soll als allgemeine Vorlage für Gefährdungsbeurteilungen für den UAS-Einsatz in Indoor-Umgebungen dienen und muss ggf. erweitert und an neue Umgebungen angepasst werden.

Auftretende Gefährdungen werden allgemein nach der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) ermittelt. Dabei müssen herstellereitige Sicherheitshinweise (Bedienungsanleitung) und allgemeine Gefährdungen bei UAS-Einsatz sowie einsatzbezogene Gefährdungen wie z. B. Wechselwirkungen mit anderen Arbeitsplätzen berücksichtigt werden. Im Anschluss an die Ermittlung der Gefährdungen werden technische, organisatorische und personengebundene Maßnahmen zur Vermeidung und/oder Reduzierung der Gefährdungen abgeleitet. Für den UAS-Einsatz im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden die folgenden vier Gefährdungen ermittelt und jeweils Maßnahmen abgeleitet.

#### **Gefährdung durch Absturz des UAS sowie herabfallende Komponenten**

Herabfallende Komponenten können entweder das gesamte UAS oder einzelne Teile des UAS wie z. B. eine Kamera, das Landegestell oder ein Gimbal sein. Entscheidend dabei ist die Fallhöhe (Differenz zw. Flughöhe und Höhe einer Person) und Beschaffenheit der Gegenstände (z. B.: Form, Gewicht, Konsistenz). Eine detaillierte Beschreibung ist in Schutz vor Absturz und herabfallenden Gegenständen, Betreten von Gefahrenbereichen (ASR A2.1) zu finden.

#### Mögliche Maßnahmen:

- Technisch
  - Das UAS so klein und leicht wie möglich konstruieren, um die kinetische Energie zu reduzieren
  - Bei der Auslegung des UAS sich potenziell lösende Komponenten reduzieren/vermeiden
  - Redundante Motoren vorsehen, um bei Motorausfällen eine kontrollierte Notlandung zu ermöglichen (Quadrocopter → Octacopter)
  - Gehäuse vorsehen, damit einzelne Komponenten des UAS bei einer Kollision geschützt werden
  - Verwendung von Propellerschutz/Propellerkäfigen, um die Propeller vor einem Ausfall zu schützen
- Organisatorisch
  - Bis auf den Piloten dürfen sich keine Personen im Einsatzbereich befinden (Flug während Pausenzeiten oder vor/nach Arbeitszeiten)
- Personengebunden
  - Für den Piloten ist eine persönliche Schutzausrüstung vorzusehen z. B. eine Schutzbrille gegen Sandaufwirbelungen

#### **Gefährdung durch Kontakt mit den rotierenden Teilen, Schneiden oder Splintern**

Rotierende Propeller sind bei UAS durch die scharfkantige Ausführung und der hohen Rotationsgeschwindigkeit in der Regel die größte Gefahrenquelle. Darüber hinaus können durch Kollisionen verursachte Splitter zu Schnitt- und Stichverletzungen führen. Weitere Informationen sind unter Mechanische Gefährdungen – Allgemeine Anforderungen (TRBS 2111) und

Mechanische Gefährdungen Teil 1 – Maßnahmen zum Schutz vor Gefährdungen beim Verwenden von mobilen Arbeitsmitteln (TRBS 2111) zu finden.

Mögliche Maßnahmen:

- Technisch
  - Verwendung von Propellerschutz/Propellerkäfigen
  - Beseitigen von hängenden Kabeln etc.; Krane in Sicherheitsposition fahren
- Organisatorisch
  - Kollisionsvermeidung durch omnidirektionale Sensorsysteme mit verschiedenen Sensortypen à EU-Maschinenrichtlinie: sicherheitszertifizierte Sensoren erforderlich
  - Bei der Wartung des UAS müssen die Propeller demontiert werden
- Personengebunden
  - Für den Piloten eine persönliche Schutzausrüstung vorsehen (z. B. Helm, Schutzbrille, Schutzkleidung)

**Gefährdung durch Schallemission**

Für die Beurteilung der Gefährdung durch Schallemissionen wird der Tages-Lärmexpositionspegel  $L_{EX,8h}$  und der Spitzenschalldruckpegel  $L_{C,peak}$  gemessen. Maßnahmen sind erst erforderlich, wenn  $L_{EX,8h} = 80\text{db(A)}$  und  $L_{C,peak} = 135\text{ db(C)}$  überschritten werden. Bei der Ermittlung der Schallemissionen ist der Umgebungslärm mit zu berücksichtigen. Bei Einsatz von UAS in Fabrikumgebungen ist eine Überschreitung dieser Kennwerte beim UAS-Einsatz nicht zu erwarten. Weiterführende Informationen sind in den Technischen Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung (TRVL) [Bau22] zu finden.

Mögliche Maßnahmen:

- Technisch
  - Verwendung von schallarmen Rotoren
- Organisatorisch
- Personengebunden
  - Piloten mit Gehörschutz-Kopfhörern ausstatten

**Gefährdung durch Akku und Ladegeräte (Brand und Rauch)**

Im UAS-Kontext werden häufig Lithium-Ionen-Batterien als Akkus verwendet. Zur Lagerung und Bereitstellung von Lithium-Ionen-Batterien sind im Allgemeinen die Maßnahmen gegen Brände (ASR A2.2), die Brandschutzmaßnahmen (TRGS 800) und Hinweise zum betrieblichen Brandschutz bei der Lagerung und Verwendung von Lithium-Ionen-Akkus [DGU20] der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) einzuhalten. Eine weitere Orientierung bietet eine Publikation von deutschen Versicherern zur Schadenverhütung „Vertrauen durch Sicherheit“ mit den Richtlinien in VdS 3103. Nach VdS 3103 sind für typische UAS-Akkus (>250 Wh) erweiterte Sicherheitsmaßnahmen erforderlich [VdS22].

Mögliche Maßnahmen:

- Technisch
- Organisatorisch
  - Anzahl der vorhandenen Akkus auf das Minimum reduzieren
  - Akkus müssen in feuerfesten Behältern aufbewahrt werden

- Feuerlöscheinrichtungen im Nahbereich vorhalten
  - Besonders geeignete Feuerlöscheinrichtungen sind mit Wasser und ggf. Löschmittelzusätzen wie z.B. der Lith Ex oder der F-500 EA [Def22]
  - Akkus dürfen nur unter Aufsicht geladen werden
  - Ladebereich von brennbaren Gegenständen wie z. B. Pappe, Papier oder Styropor freihalten
  - Bei der Wartung des UAS muss der Akku abgeschaltet werden
- Personengebunden

## **AP 2.2: Auswahl eines Hardwarekonzepts**

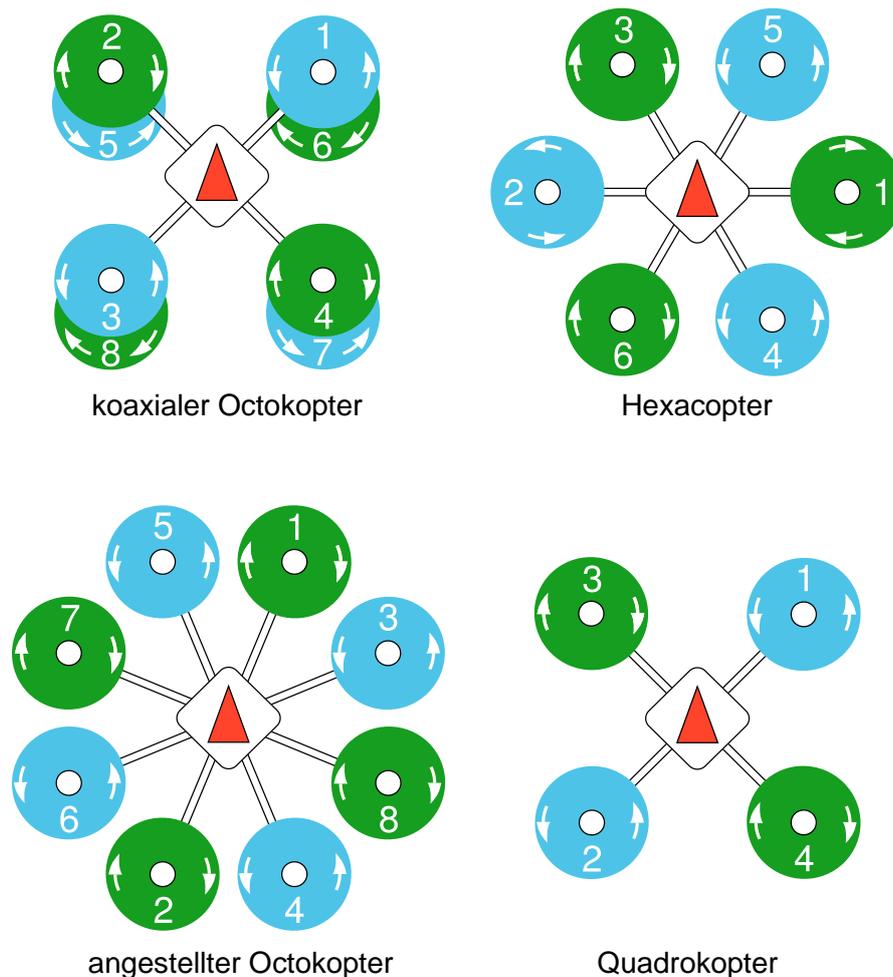
### ***Durchgeführte Arbeiten***

Die Auswahl des Hardwarekonzepts erfolgte in einem ersten Schritt IPH-intern durch den Projektmitarbeiter und einen technischen Mitarbeiter. Diese interne Ausarbeitung bildete ein Zwischenergebnis der Hardwareauswahl und beinhaltete eine Auslegung für die vier verschiedenen MKS Konfigurationen coaxialer Octokopter, Hexakopter, angestellter Octokopter und Quadroptopter (vgl. Bild 2). Diese Konfigurationen dienten in einem Workshop zur MKS-Konzeption, der im Sommer 2021 zusammen mit Mitgliedern des PA durchgeführt wurde, als Entscheidungsgrundlage.

### ***Erzielte Ergebnisse***

In diesem AP wurden verschiedene Konzepte miteinander verglichen und gemeinsam mit Mitgliedern des PA in einem Workshop die Quadroptopter-Konfiguration für das MKS ausgewählt. In diesem Workshop fiel die Entscheidung auf die Quadroptopter-Konfiguration. Die wichtigsten Vorteile dieser Konfiguration waren:

- Geringer Außendurchmesser (sehr wichtig, da das MKS in Indoor-Umgebungen eingesetzt werden soll).
- In der Praxis ist das Verhalten bei einem Unfall, wie z. B. bei einem Zusammenstoß mit einer Wand, sicherheitstechnisch ähnlich gut wie die der anderen Konfigurationen; auch wenn die Rotoren nicht redundant sind.
- Das Gewicht ist geringer und damit die Einsatzdauer länger.
- Die Konfiguration ist sehr etabliert und gewährleistet eine weniger komplexe Umsetzung.
- Die Flugleistung ist mit vier Rotoren bereits ausreichend.



**Bild 2: Vier potenzielle Hardware-Konfigurationen**

## **AP 2.3 Entwicklung von Algorithmen zur Exploration und Kollisionsvermeidung**

### ***Durchgeführte Arbeiten***

In diesem AP wurden verschiedene Ansätze zur Gestaltung von Algorithmen zur Exploration und Kollisionsvermeidung miteinander verglichen und bewertet. Als Bewertungsgrundlage dienten hierbei neben der Navigationsgenauigkeit Kriterien wie z. B. die Quasi-Echtzeitfähigkeit, die erforderliche Rechenleistung und die notwendige Datenqualität. Zum Vergleich wurden mehrere etablierte Algorithmen wie z. B. Next-Best-View-Planner, Random-Tree-Algorithmus oder DRL herangezogen.

### ***Erzielte Ergebnisse***

Bei dem Vergleich stellte sich heraus, dass ein DRL-Ansatz (Dueling-Double-DQN-Algorithmus) für diesen Anwendungsfall am geeignetsten ist, da bei diesem eine hohe Genauigkeit bei geringer Rechenleistung zu erwarten war. Neben dem Dueling-Double-DQN-Algorithmus war ein wesentlicher Anteil des Ansatzes die Umgebungskartenerstellung, die für die Lösung der Explorationsaufgabe notwendig war. Zum Lösen dieser Explorationsaufgabe wurde der Voxblox-

Algorithmus [Git22] verwendet, da dieser im Vergleich zu anderen Algorithmen wie z. B. Octomap die als einziges ein geeignetes Ausgabeformat lieferte.

Charakteristisch für DRL-Algorithmen ist das Anlernen (sog. Training) von intelligenten Algorithmen (sog. Agent). Im Vergleich zu anderen Algorithmen aus der Künstlichen Intelligenz (KI) ergibt sich daraus der Vorteil, dass kein umfangreicher Datensatz als Grundlage für den Lernprozess zur Verfügung stehen muss. Das Training bedarf andererseits eine große Vielzahl von Trainingsdurchläufen, um dem Agenten die erwünschten Fähigkeiten wie z. B. Kollisionsvermeidung beizubringen (ca. 500.000 Durchläufe). Beim Training der Algorithmen hat sich gezeigt, dass die Simulationsumgebung (vgl. AP 3.1) keine stabile Simulation schneller als Echtzeit gewährleisten konnte. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass das keine Frage der Hardwareleistung, sondern eine der Simulationsumgebung war. Der DRL-Ansatz wurde deswegen als für theoretisch umsetzbar, aber als praktisch nicht in zwei Jahren Projektlaufzeit realisierbar bewertet. Aus diesem Grund wurde der DRL-Ansatz verworfen und ein im Stand der Technik etablierter A\*-Algorithmus verwendet.

### AP 3: Simulative Verifizierung des MKS

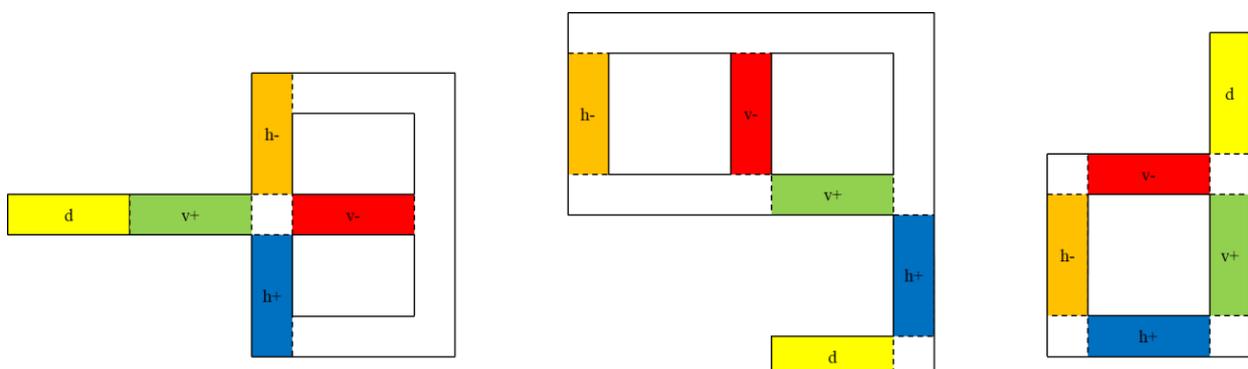
#### AP 3.1: Erstellung einer Simulationsumgebung

##### *Durchgeführte Arbeiten*

Für die Simulation des MKS und der Indoor-Umgebung wurde die Middleware ROS mit der dazugehörigen Entwicklungsumgebung für Simulationen Gazebo ausgewählt. ROS und Gazebo sind Open Source-Anwendungen, zu denen bereits eine Vielzahl von Bibliotheken, wie z. B. zu Sensoren und UAS, vorliegen. Die Bibliotheken können modular eingesetzt werden, um mit verringertem Implementierungsaufwand eine Simulation umzusetzen. Im Gegensatz zu den Annahmen im Antrag, in dem die Simulationsumgebung RotorS vorgeschlagen wird, wurde Gazebo verwendet, weil Gazebo eine höhere Kompatibilität zu ROS aufweist und umfangreichere Bibliotheken zu Sensoren enthält.

##### *Erzielte Ergebnisse*

Zur Erfüllung der angestrebten Projektziele wurden drei virtuelle Indoor-Umgebungen entwickelt (vgl. Bild 3).



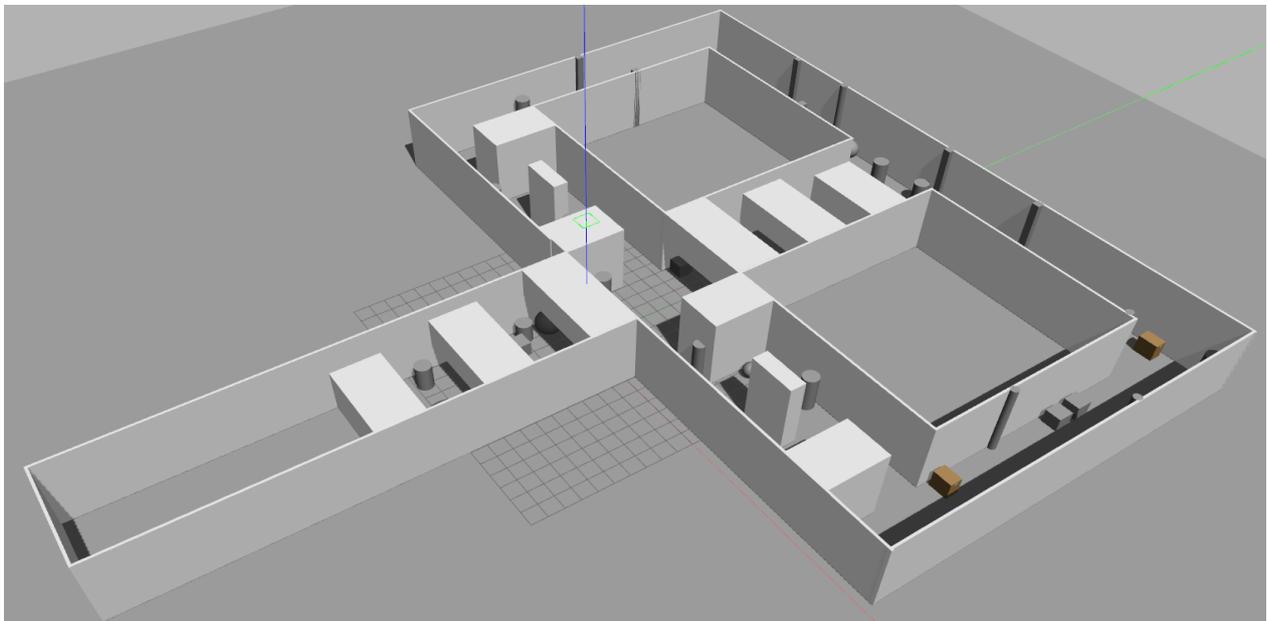
**Bild 3: Umgesetzte Simulationsumgebungen mit den fünf Elementen zum Training und Test des Agenten**

Jeder dieser Umgebungen besteht aus den fünf Elementen

- h+ horizontales Ausweichen,
- h- horizontales Ausweichen (nicht passierbar),
- v+ vertikales Ausweichen,
- v- vertikales Ausweichen (nicht passierbar) und
- dSackgasse,

die bestimmte vom Agenten zu erlernenden Fähigkeiten erfordern. Diese virtuellen Umgebungen sollen das Training und den Test des Agenten und dessen erlernten Fähigkeiten in Bezug auf die automatisierte Exploration bzw. Layouterfassung ermöglichen.

Außerdem wurden auf Basis der ROS-Bibliotheken eine Flugplattform und Sensoren, wie z. B. LiDAR, IMU und Kamera) simulativ umgesetzt. Um einen späteren Vergleich (AP 3.3) zu ermöglichen, wurden für die Layouterfassung mehrere Aufnahmesensoren implementiert. Eine derartige virtuelle Indoor-Umgebung mit Sensoren, Flugplattform und Hindernissen ist beispielhaft in Bild 4 dargestellt.



**Bild 4: Virtuelle Indoor-Umgebung mit MKS und Hindernissen (ROS/Gazebo)**

## **AP 3.2: Implementierung des MKS-Konzepts**

### ***Durchgeführte Arbeiten***

Zur Steuerung bzw. zur Flugregelung des MKS wurden verschiedene Flugregler und die dazugehörige Firmware miteinander verglichen und im Hinblick auf Kompatibilität, Funktionalität, und Implementierungsaufwand bewertet. Die ausgewählten Elemente zur Steuerung des MKS wurden anschließend in die Simulationsumgebung implementiert. Trotz der hohen Kompatibilität der ausgewählten Elemente war der Implementierungsaufwand nicht unerheblich, da die Vielzahl an einzelnen Elementen die Simulation fehleranfällig machte.

### ***Erzielte Ergebnisse***

Nach dem Vergleich wurde der Flugregler Pixhawk4 ausgewählt [Px422a]. Dieser Flugregler wurde speziell für die Verwendung in Multikoptern und anderen unbemannten Luftfahrtsystemen konzipiert und weist dementsprechend einen geringeren Implementierungsaufwand bei hoher Funktionalität auf. Für den Betrieb dieser Hardware wurde die Firmware PX4 ausgewählt [Px422b], da sie für den Betrieb mit dem ausgewählten Flugregler entworfen wurde und dadurch sehr einfach zu implementieren ist. Sowohl der Flugregler als auch die Firmware konnten realitätsnah in der Simulationsumgebung nachgebildet werden, sodass eine hohe Übertragbarkeit der Simulationsergebnisse in reale Flugexperimente erwartet werden kann.

## **AP 3.3 Verifizierung und iterative Optimierung des MKS-Konzepts**

### ***Durchgeführte Arbeiten***

In diesem AP wurden die Flugregelung und die Sensoren der Simulation getestet und optimiert. Zuerst wurden verschiedene Manöver, wie z. B. Starten, Landen, Geradeausflug und Kurvenflug für einen automatisierten und manuellen Flug erarbeitet. Anschließend wurden die Manöver automatisiert und manuell geflogen sowie die Funktionalität der Flugregelung überprüft.

Zur Verifikation der Sensoren wurden in der virtuellen Indoor-Umgebung (vgl. Bild 4) Testmessungen mit den verschiedenen Sensoren durchgeführt. Die Messungen konnten dabei in Quasi-Echtzeit mit dem Tool RViz [Ope22] visualisiert werden, um sie anschließend zu bewerten.

### ***Erzielte Ergebnisse***

Da die Flugregelung bereits etabliert ist und speziell für die Verwendung in MKS konzipiert wurde, ergab die Verifizierung wenig Optimierungsbedarf. Fehler traten lediglich durch eine ungenaue Positionierung der Sensoren und das dadurch veränderte Flächenträgheitsmoment auf. Diese Fehler konnten ohne großen Aufwand korrigiert werden.

Die Bewertung der Sensorsimulation ergab eine zufriedenstellende Messqualität, zeigte jedoch Schwächen in der erforderlichen Rechenleistung. Insbesondere die Messungen mit LiDAR-Sensoren, die große Punktwolken mit einer hohen Frequenz erzeugen, waren in der Simulation nur mit viel Rechenleistung abzubilden. Da die hohe Frequenz für die Explorationsaufgabe nicht unbedingt notwendig war und es absehbar war, dass die hohe Rechenleistung im Flugexperiment nicht zur Verfügung stehen würde, wurde die Frequenz und die Dichte der Punktwolke reduziert.

## **AP 4: Umsetzung und Validierung**

### **AP 4.1: Umsetzung des MKS-Konzepts**

#### ***Durchgeführte Arbeiten***

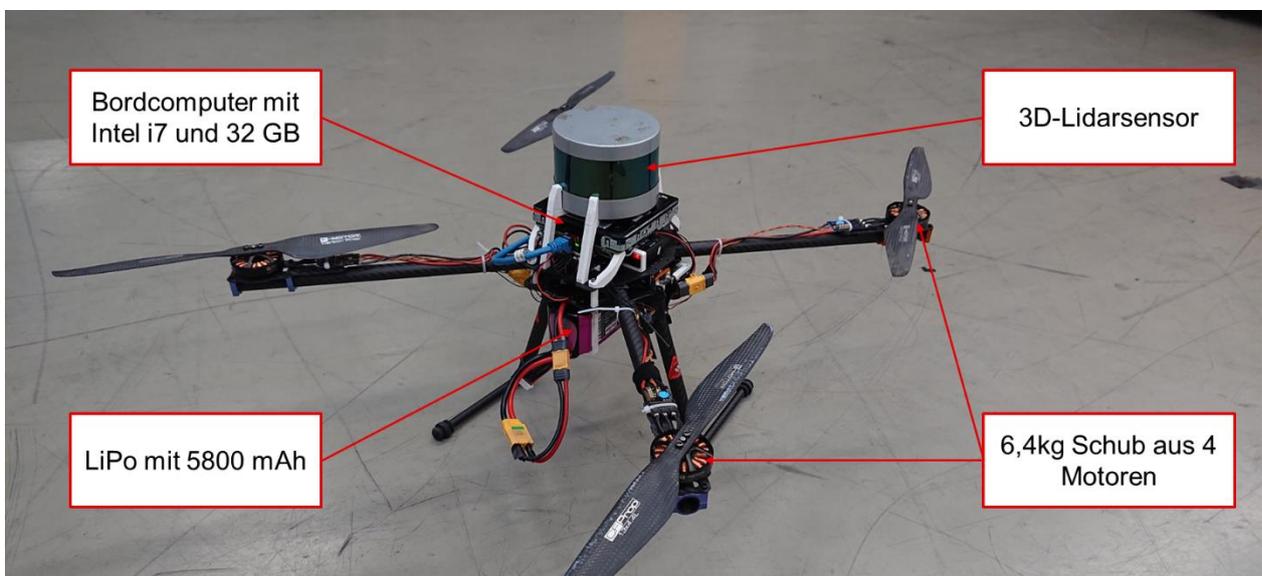
Für die Umsetzung des MKS wurden die in AP 3.3 ausgewählten Komponenten beschafft und zusammengebaut. Während der Flugversuche in AP 4.2 kam es immer wieder zu Abstürzen und Kollisionen, bei denen weniger die Sensoren und mehr die Strukturbauteile wie z. B. der Rahmen beschädigt wurden. Um eine einfache und schnelle Reparatur des MKS zu ermöglichen, wurden die Strukturbauteile durch die Mitarbeitenden im IPH konstruiert und mit einem Lasercutter aus

Plexiglas gefertigt. Neben der einfachen Reparatur konnten diese Komponenten außerdem individualisiert und damit das MKS weiter iterativ optimiert werden.

Für die Flugversuche wurde eine manuelle Steuerung per Fernsteuerung und eine automatisierte Steuerung durch einen intelligenten Algorithmus implementiert. Der ausgewählte Flugcontroller liefert diese Funktionalität bereits mit, sodass sie aufwandsarm an das umgesetzte MKS adaptiert werden konnte.

### ***Erzielte Ergebnisse***

Mit der Umsetzung wurde ein MKS zur Verfügung gestellt, das für die Flugversuche und als Demonstrator geeignet war (vgl. Bild 5). Die individuelle Konstruktion und Fertigung der Strukturbauteile ermöglichten darüber hinaus eine kostengünstige und schnelle Reparatur bei Unfällen. Auf diese Weise musste zwischen den Flugversuchen nicht lange auf die Beschaffung von Ersatzteilen gewartet und es konnten effizient Versuche durchgeführt werden.



**Bild 5: Umgesetztes MKS bestehend aus u. a. individuell gefertigten Strukturelementen, Sensoren und einem On-Board Computer**

Durch die Umsetzung sowohl einer manuellen als auch einer automatisierten Steuerung konnte die Flugfähigkeit des MKS zuerst im manuellen Flug und anschließend im automatisierten Flug getestet werden. Außerdem konnte das MKS vor dem Start des automatisierten Flugs manuell in eine geeignete Position geflogen werden. Bei kritischen Betriebssituationen wechselte das MKS automatisch zur manuellen Steuerung. Zusätzlich war es dem Fernpiloten jederzeit möglich den automatisierten Flug zu unterbrechen und manuell die Kontrolle über das MKS zu übernehmen. Auf diese Weise wurde die Sicherheit bei den Flugversuchen signifikant erhöht.

## **AP 4.2: Flugversuche im Testumfeld**

### ***Durchgeführte Arbeiten***

Es wurden Flugversuche in drei verschiedenen Testumfeldern durchgeführt. Das erste Testumfeld befand sich in einem sicheren, abgesperrten Bereich außerhalb von Gebäuden und auf freier Fläche. Dort wurden bei größeren Anpassungen am MKS jeweils die ersten

Flugversuche durchgeführt, da dort das Gefahrenpotenzial am geringsten war. Obwohl der Test außerhalb von Gebäuden durchgeführt wurde und somit ein ausreichend starkes GNSS-Signal zur Verfügung stand, wurde das Signal nicht für die Positionsbestimmung des MKS genutzt. Mit dieser Maßnahme wurde die Nähe zum Anwendungsfall und ein Einhalten der Anforderungen gewährleistet.

Zwei weitere Testumfelder befanden sich innerhalb von zwei Fabrikgebäuden des IPH mit jeweils einer Größe von ca. 300 m<sup>2</sup>. Diese Fabrikgebäude enthalten unterschiedliche Anlagen und Logistiksystem wie z. B. ein Hochregallager, diverse Schmiedeanlagen und einen Deckenkran. Wichtig für das Vorhaben war, dass die Fabrikgebäude eine typische Produktionsumgebung abbilden können und sich trotzdem entscheidend voneinander unterscheiden. In den beiden Fabrikgebäuden des IPH konnten diese Anforderungen erfüllt werden.

Getestet wurde die allgemeine Flugfähigkeit des MKS und die Algorithmen zur automatisierten Erkundung.

### ***Erzielte Ergebnisse***

Der Anwendungsfall eines Fabriklayoutsans sieht den Einsatz eines MKS innerhalb von Fabrikgebäuden vor. In Fabrikgebäuden steht kein GNSS-Signal ausreichender Qualität zur Verfügung, das MKS benötigt dieses Signal aber für die Navigation. Aus diesem Grund wurde als Alternative zum GNSS-Signal ein Optical-Flow-Modul eingesetzt (vgl. Bild 6). Ein Optical Flow Modul enthält eine nach unten gerichtete Kamera und misst den optischen Fluss in Bilddaten. Der optische Fluss wird von der Flugregelung verwendet, um die Abdrift aus anderen Sensordaten zu kompensieren und damit eine stabile Fluglage zu realisieren.



**Bild 6: Das Optical-Flow-Modul des MKS für den Einsatz innerhalb von Fabrikgebäuden**

Die Funktionsfähigkeit des Optical-Flow-Moduls und die allgemeine Flugfähigkeit des umgesetzten MKS konnten in verschiedenen Flugversuchen nachgewiesen werden. Dabei hat sich gezeigt, dass die Einstellungen der Flugregelung nicht gleichermaßen geeignet für den manuellen und automatisierten Flug waren. In einem iterativen Prozess mussten deshalb die

Parameter der Flugregelung so angepasst werden, dass sie für beide Steuerungsmodi gültig waren.

Das Optical-Flow-Modul erwies sich außerhalb von Gebäuden als besonders effektiv, da es von den Strukturen auf dem Boden abhängig war. Der Optical-Flow-Algorithmus funktionierte bei Bodenbelägen wie z. B. Pflaster oder einfachen Grasflächen besser als bei typischen (verschmutzten) Fabrikböden. Diesem Effekt könnte man auch mit einer höher aufgelösten Kamera für das Optical-Flow-Modul begegnen. Im Rahmen des Vorhabens wurde ein Malervlies genutzt, um an den nötigen Stellen innerhalb eines Fabrikgebäudes ausreichend Struktur sicherzustellen (vgl. Bild 7).



**Bild 7: Auslegung von Malervlies zur besseren Strukturierung des Fabrikbodens**

### **AP 4.3: Flugversuche bei PA-Mitgliedern**

#### ***Durchgeführte Arbeiten***

Bei der intensiven und umfangreichen Erarbeitung und Optimierung des Sicherheitskonzepts wurde deutlich, dass Flugversuche bei PA-Mitgliedern sicherheitstechnisch nicht zu rechtfertigen und deswegen organisatorisch bei produzierenden Unternehmen als Alternative zu den Flugversuchen in den Testumfeldern des IPH nicht umsetzbar waren. Aus diesem Grund wurde von den Flugversuchen bei PA-Mitgliedern abgesehen. Alternativ dazu wurde mehr Zeit in die Optimierung der Algorithmen zur Exploration und Kollisionsvermeidung verwendet (AP 3.3) verwendet.

#### ***Erzielte Ergebnisse***

Während die grundlegende Architektur des MKS allen hier im Vorhaben gestellten Anforderungen entspricht und im Vergleich zu den auf dem Markt erhältlichen Produkten an verschiedenen Stellen sicherheitstechnische Vorteile aufweist, konnte das MKS nicht bei PA-Mitgliedern

eingesetzt werden. Ursächlich dafür waren fehlende Einsatzgenehmigungen durch Sicherheitsgremien bzw. Sicherheitsbeauftragte bei den PA-Mitgliedern. Da das Vorhaben nur die Entwicklung eines Demonstrators vorsieht, waren einzelne Komponenten bzw. das MKS als Ganzes nicht für die Zertifizierung durch öffentliche Behörden vorgesehen. Aus diesem Grund wurden auch die Einsatzgenehmigungen verwehrt, obwohl das MKS technologisch einsatzfähig war.

Die ausgewählte Hardware war für den Einsatz eines herkömmlichen A\*-Algorithmus in einem 3D-Raum zwar ausreichend dimensioniert, der Algorithmus bot aber viel Spielraum für Verbesserungen. Durch die Implementierung und den Test von verbesserten Varianten des Algorithmus konnte der erforderlichen Leistungsbedarf signifikant reduziert werden. Auf diese Weise wurde der Algorithmus für den Einsatz auf leichteren Bordcomputern vorbereitet, was bei dem Fabriklayoutscan die Flugzeit erhöht und die Nutzbarkeit auf MKS erleichtert.

#### 4. Verwendung der Zuwendung

Ein wissenschaftlicher Mitarbeiter des IPH war im Umfang von 24 Personenmonaten für die Projektbearbeitung verantwortlich.

Im AP2, AP3 und AP 4 wurde der wissenschaftliche Mitarbeiter des IPH von einem wissenschaftlich-technischen Mitarbeiter (Softwareingenieur) in einem Umfang von insgesamt acht Personenmonaten bei den Implementierungsarbeiten unterstützt worden.

Während der Projektlaufzeit wurden der wiss. und wiss.-techn. Mitarbeiter durch studentische Hilfskräfte unterstützt. Die studentische Hilfskraft wurde bei der Implementierung, der Erstellung von Simulationen und der Datenauswertung sowie Literaturrecherchen eingebunden.

Im Vorhaben wurde der LiDAR Velodyne Puck Lite VLP 16 für 3.670,34 € netto beschafft [Vel22]. Dieser Sensor wurde in AP 2.2 ausgewählt und war Teil von TZ 2.

Die Verwendung der Zuwendung (Personenmonate) wird nachfolgend in Tabelle 2 getrennt nach Arbeitspaketen dargestellt.

Tabelle 2: Verwendung der Zuwendung im Berichtszeitraum

Arbeitspaket	Personalkategorie	PM
AP 1	Wissenschaftlicher Mitarbeiter (TV-L 13)	2
	Wissenschaftlich-technischer Mitarbeiter (TV-L 10)	0
AP 2.1	Wissenschaftlicher Mitarbeiter (TV-L 13)	4
	Wissenschaftlich-technischer Mitarbeiter (TV-L 10)	1
AP 2.2	Wissenschaftlicher Mitarbeiter (TV-L 13)	2
	Wissenschaftlich-technischer Mitarbeiter (TV-L 10)	1
AP 2.3	Wissenschaftlicher Mitarbeiter (TV-L 13)	3
	Wissenschaftlich-technischer Mitarbeiter (TV-L 10))	1
AP 3.1	Wissenschaftlicher Mitarbeiter (TV-L 13)	1
	Wissenschaftlich-technischer Mitarbeiter (TV-L 10)	0
AP 3.2	Wissenschaftlicher Mitarbeiter (TV-L 13)	2
	Wissenschaftlich-technischer Mitarbeiter (TV-L 10)	1
AP 3.3	Wissenschaftlicher Mitarbeiter (TV-L 13)	5
	Wissenschaftlich-technischer Mitarbeiter (TV-L 10)	1
AP 4.1	Wissenschaftlicher Mitarbeiter (TV-L 13)	3
	Wissenschaftlich-technischer Mitarbeiter (TV-L 10)	2

AP 4.2	Wissenschaftlicher Mitarbeiter (TV-L 13)	2
	Wissenschaftlich-technischer Mitarbeiter (TV-L 10)	1
AP 4.3	Wissenschaftlicher Mitarbeiter (TV-L 13)	0
	Wissenschaftlich-technischer Mitarbeiter (TV-L 10)	0
AP 5	Wissenschaftlicher Mitarbeiter (TV-L 13)	1
	Wissenschaftlich-technischer Mitarbeiter (TV-L 10)	0

## 5. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die in den Haushaltsjahren 2020, 2021 und 2022 durchgeführten Arbeiten entsprechen mit Ausnahme von AP 4.3 dem bewilligten Arbeitsplan und waren für die Erreichung der im Projekt angestrebten Ziele notwendig und angemessen. Da die Leistung in AP 4.3 aus sicherheitstechnischen Gründen nicht durchgeführt werden konnte (vgl. Beschreibung von AP 4.3), wurde mehr Zeit (2 PM TV- L 13) in die Optimierung des Algorithmus für Exploration und Kollisionsvermeidung investiert.

Inhaltlich wurde das Projekt ausführlich bearbeitet und die umfangreichen Ergebnisse, wie bspw. ein Demonstrator zur automatisierten Erkundung von Fabrikgebäuden, stehen den Projektpartnern sowie weiteren interessierten Unternehmen zur Verfügung.

## 6. Innovativer Beitrag und wirtschaftlicher Nutzen

### 6.1. Voraussichtliche Nutzung der Angestrebten Forschungsergebnisse

Im Rahmen der Entwicklung eines Sicherheitskonzepts wurde eine Gefährdungsbeurteilung und weitere zugehörige Dokumente für den MKS-Einsatz innerhalb von Gebäuden mit dem Zweck des Fabriklayoutscans erstellt. Obwohl dieses Sicherheitskonzept speziell für den Fabriklayoutscan entworfen wurde, eignet es sich als Muster für alle MKS-Einsätze innerhalb von Gebäuden. Über eine einfache Gefährdungsbeurteilung hinaus sind in dem Sicherheitskonzept zudem eine Vielzahl an wichtigen Richtlinien und Gesetzen zusammen mit den korrespondierenden Anwendungsfeldern aufgelistet. Der Nutzen liegt darin, dass mit Hilfe des Sicherheitskonzepts viel Zeit erspart, Hemmnisse überwunden und Fehler vermieden werden können.

Die Entwickelten Algorithmen zur Routenfindung und Navigation basieren vollständig auf frei verfügbarem Quellcode und sind bereits aufeinander abgestimmt. Insbesondere die innovative Kombination eines A\*-Algorithmus zusammen mit dem entwickelten Algorithmus zur Identifikation von Randbereichen erspart den KMU eine aufwändige Softwareentwicklung. Zusammen können die Algorithmen als Softwarepaket genutzt werden, um ähnliche Lösungen zur 3D-Navigation in unbekanntem Umgebungen umzusetzen.

Wichtige Erfahrungen bei der Umsetzung des MKS-Demonstrators können genutzt werden, um kostengünstig eigene Multikopter in Betrieb zu nehmen. Alle wichtigen Hardwarekomponenten wurden ausgewählt und deren Einsatzfähigkeit unter Beweis gestellt. Diese Erfahrungen erleichtern insbesondere den Prototypenbau und helfen dabei Fehler und Unfälle zu vermeiden.

### 6.2. Möglicher Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit von KMU

Allgemein besteht bei Unternehmen für verschiedene Anwendungsfälle wie z. B. dem Fabriklayoutscan ein großes Interesse für den MKS-Einsatz [Fri21]. Ein wesentliches Problem beim Einsatz von MKS ist heutzutage nicht mehr die Akzeptanz, sondern die Wirtschaftlichkeit.

Bisher konnten MKS die Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit von KMU nur in wenigen besonderen Anwendungsfällen steigern. Die Automatisierung von MKS wird dabei als entscheidender Faktor für die wirtschaftliche Darstellung von einer Vielzahl weiterer Anwendungsfelder gehandelt [Lev20].

In diesem Vorhaben wurde zukunftsweisende Pionierarbeit für die Automatisierung von MKS-Einsätzen innerhalb von Gebäuden geleistet. Insbesondere KMU profitieren von den Ergebnissen, da sie schneller agieren und dank des reduzierten monetären Aufwands und Risikos nun erschließbare marktwirtschaftliche Nischen besetzen können. Zukunftsorientierte KMU können so schneller und effizienter am Wettbewerb teilnehmen und sich gegenüber Konkurrenten damit durchsetzen.

Neben der technischen Hilfestellung für KMU leistet das Sicherheitskonzept eine organisatorische Hilfestellung. Mit dem Sicherheitskonzept entfällt für KMU die Notwendigkeit eines Sicherheitsingenieurs, sodass sie insbesondere in Vergleich zu großen Unternehmen einen Wettbewerbsvorteil erhalten.

## 7. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

In den beiden nachfolgenden Tabellen sind durchgeführte und geplante Transfermaßnahmen in die Wirtschaft dargestellt. Hierbei wird zwischen durchgeführten Transfermaßnahmen während der bisherigen Projektlaufzeit (Tabelle 3) und geplante Transfermaßnahmen (Tabelle 4) differenziert.

**Tabelle 3: Durchgeführte Transfermaßnahmen im Berichtszeitraum**

Maßnahmen	Ziel	Rahmen	Datum/Zeitraum
Gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	Unmittelbarer Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Vorstellungen der Projektergebnisse bei interessierten Unternehmen	kontinuierlich und auf Anfrage
		Vorstellung der Ergebnisse auf dem Netzwerktreffen „Koptertag“ in Hannover	18.05.2022
			15.09.2022
		Vorstellung und Integration der Ergebnisse im VDI Fachausschuss UAV	kontinuierlich
Vorträge und Präsentationen	Nationaler Ergebnistransfer	Drohnen und deren Einsatz in der Arbeitswelt (BGHW, AUVA, SUVA)	30.06.2021
		Web-Talk: Drohnen-Forschung (VDMA)	25.11.2021
		33. Sitzung des wissenschaftlichen Beirats der IFL	02.02.2022
		Trans4Log Kongress	07.07.2022

Schlussbericht zum IGF-Vorhaben Nr. 21395 N „Autodrohne in der Produktion“

Publikation der Projektergebnisse im Internet	Informationstransfer und Austausch mit Interessenten aus Industrie und Wissenschaft	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einrichtung einer Projekt-Homepage</li> <li>• IFL-Homepage</li> <li>• IFL-Blog</li> <li>• IPH-Pressemitteilung</li> <li>• IPH-Newsletter</li> <li>• Vorstellung der Projektergebnisse auf der UAS-Plattform „Flybots“</li> </ul>	kontinuierlich
		Publikation der Folge „ <a href="#">Autonome Drohne in der Fabrik</a> “ im IPH-Podcast „Praxisnah“	09.12.2020
Personaltransfer	Durchführung von Praktika und Abschlussarbeiten in branchenspezifischen Unternehmen	Praktikum „Entwicklung und Umsetzung virtuellen Umgebungen in ROS/Gazebo“	11.01.2021 – 15.04.2021
		Studienarbeit „Simulation of automated 2D navigation in an unknown indoor environment using deep reinforcement learning (DRL)“	07.05.2021 – 08.11.2021
		Masterarbeit „Simulative implementation and evaluation of a Deep Reinforcement Learning (DRL) agent for navigation in indoor environments“	10.01.2022 – 11.07.2022
		Studienarbeit „Evaluation der Positionsgenauigkeit von SLAM-Algorithmen im Einsatz mit einem UAS und einem LiDAR-Sensor“	19.01.2022 – 19.07.2022
		Masterarbeit „Methoden zur Navigation und Exploration von Fabriken mittels eines Unbemannten Luftfahrtsystems auf Basis von 3D-Punktwolken“	14.03.2022 – 14.09.2022
Information der Unternehmen des PA	Unmittelbarer Ergebnistransfer in die Wirtschaft, Fortschrittsbericht, Diskussion, Festlegungen, Abstimmung, Erfahrungsaustausch innerhalb des PA	1. PA-Treffen	21.01.2021
		Workshop „UAS-Konzeption“	15.07.2021
		2. PA-Treffen	17.11.2021
		Workshop „Weiterentwicklung des Sicherheitskonzepts“	21.02.2022
		3. PA-Treffen	14.04.2022
Wissenschaftliche Publikationen/Dissertation, in Fachzeitschriften oder sonstigen gedruckten Veröffentlichungen	Nationaler Ergebnistransfer	Arbinger, C.; Renz, F.; Georgiev, G.; Seel, A.; Bauer, F. W.: Unbemannte Flüge ohne Satellitenreferenzierung. In: Automobiltechnische Zeitschrift extra, Springer Vieweg Verlag, Jg. 0	19.03.2021

		(2021), H. 0, S. 12-13. ISSN: 2509-4610.	
		Seel, A.; Küster, B.; Heinrich, M.; Moryson, R.: Systemüberwachung – Sicherheitskritische Kontrolle. In: Drohnen Magazin – Das führende Fachjournal für unbemannte Systeme, Aeromedia Verlag GmbH & CO. KG, Berlin, 6. Jg. (2021), H. 3, S. 20-21.	17.07.2021
	Internationaler Ergebnistransfer	Seel, A.; Kreuzjans, F.; Küster, B.; Stonis, M.; Overmeyer, L.: Deep Reinforcement Learning Based UAV for Indoor Navigation and Exploration in Unknown Environments. In: 2022 8th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR), S. 388-393, DOI: 10.1109/ICCAR55106.2022.9782602	09.04.2022
Beratung	Nutzung der Ergebnisse für Transferprojekte	Beratungsangebote von IPH an interessierte KMU	Auf Anfrage
Integration in die Schulungen des: Mittelstand Digital Zentrums Hannover	Wissenstransfer an KMU	Mittelstand-Digital Zentrum Hannover	kontinuierlich

**Tabelle 4: Geplante Transfermaßnahmen im Berichtszeitraum**

Geplante spezifische Maßnahmen	Ziel	Rahmen	Datum/Zeitraum
Gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	Unmittelbarer Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Vorstellungen der Projektergebnisse bei interessierten Unternehmen	kontinuierlich und auf Anfrage
		Vorstellung der Ergebnisse auf dem Netzwerktreffen „Koptertag“ in Hannover	Frühjahr 2023
		Vorstellung und Integration der Ergebnisse im VDI Fachausschuss UAV	kontinuierlich
Publikation der Projektergebnisse im Internet	Informationstransfer und Austausch mit Interessenten aus Industrie und Wissenschaft	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einrichtung einer Projekt-Homepage</li> <li>• IFL-Homepage</li> <li>• IFL-Blog</li> <li>• IPH-Pressemitteilungen</li> <li>• IPH-Newsletter</li> </ul>	kontinuierlich

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorstellung der Projektergebnisse auf der UAS-Plattform „Flybots“</li> </ul>	
Wissenschaftliche Publikationen/Dissertation, in Fachzeitschriften oder sonstigen gedruckten Veröffentlichungen	Internationaler Ergebnistransfer	Publikation in auf der „2023 IEEE 6th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference“	25.02.2023
	Wissenschaftliche Qualifikation der Bearbeiter des Vorhabens	Publikation einer Dissertation	Sommer 2023
Weitergabe von ausführlichen Forschungsberichten	Nationaler Ergebnistransfer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Veröffentlichung des Schlussberichts auf der Homepage des IFL</li> <li>• Veröffentlichung über den PZH-Verlag</li> </ul>	Winter 2022
Beratung	Nutzung der Ergebnisse für Transferprojekte	Beratungsangebote von IPH an interessierte KMU	Auf Anfrage
Integration in die Schulungen des: Mittelstand Digital Zentrums Hannover	Wissenstransfer an KMU	Mittelstand-Digital Zentrum Hannover	kontinuierlich

## 8. Durchführende Forschungsstelle

Das IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH ist eine gemeinnützige Forschungseinrichtung, die eng mit der Universität Hannover kooperiert. Die Gesellschafter des IPH, Prof. Behrens, Prof. Overmeyer und Prof. Nyhuis, sind gleichermaßen Inhaber produktionstechnischer Lehrstühle an der Universität Hannover.

Die Gliederung des IPH in die drei Abteilungen „Prozesstechnik“, „Produktionsautomatisierung“ und „Logistik“ spiegelt die Ausrichtung dieser Lehrstühle wider.

Das IPH ist hauptsächlich in der anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung aktiv und wurde 1988 mit Unterstützung des niedersächsischen Wirtschaftsministeriums gegründet. Das IPH ist besonders der technologischen Förderung mittelständischer Industriebetriebe verpflichtet. Der Technologietransfer aus der Forschung in die Industrie erfolgt dabei hauptsächlich über gemeinsam mit der Industrie durchgeführte, öffentlich geförderte Verbundforschungsprojekte sowie über Fortbildungsseminare und Arbeitskreise für spezielle Zielgruppen aus Industrie und Handel. Darüber hinaus stellt das IPH laufend in einer Vielzahl ausschließlich industriefinanzierter Beratungsprojekte seine Praxisorientierung und Wettbewerbsfähigkeit unter Beweis.

### Leiter der Forschungsstelle:

#### Geschäftsführende Gesellschafter:

Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer  
 Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens  
 Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis

#### Koordinierender Geschäftsführer:

Dr.-Ing. Malte Stonis

#### Projektleiter:

M. Sc. Andreas Seel

**Anschrift:**

IPH - Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH  
Hollerithallee 6  
30419 Hannover

Telefon: +49 511 27976-0

Telefax: +49 511 27976-888

E-Mail: [info@iph-hannover.de](mailto:info@iph-hannover.de)

Internet: [www.iph-hannover.de](http://www.iph-hannover.de)

## 9. Literaturverzeichnis

- [Bau22] Baa: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2022: Technische Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung (TRLV). <https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRLV/TRLV.html>, 19.09.2022
- [Def22] Defi-Shop – by Dupp GmbH 2021: MedX5. <https://medx5.de>, 19.09.2022
- [DGU20] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V.: Hinweise zum betrieblichen Brandschutz bei der Lagerung und Verwendung von Lithium-Ionen-Akkus. In Fachbereich AKTUELL, 2020, S. 1-6.
- [Fri21] Friedrich, J.; Lieret, M.: Drone Readiness Analyse [online], 2021. März 2021 [Zugriff am: 24. Juni 2021]. Verfügbar unter: [https://ids.vdma.org/downloads\\_](https://ids.vdma.org/downloads_)
- [Git22] GitHub, Inc 2022: ethz-asl/voxblox. <https://github.com/ethz-asl/voxblox>, 19.09.2022
- [Gru13] Grundig, C. G.: Fabrikplanung: Planungssystematik-Methoden-Anwendungen. Carl Hanser Verlag, München, 2013.
- [Gue11] Günthner, W. A.; Borrmann, A. (Hrsg.): Digitale Baustelle – innovativer Planen, effizienter Ausführen: Werkzeuge und Methoden für das Bauen des 21. Jahrhunderts. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 2011, S. 50ff.
- [Hol19] Holybro 2014-2019: Pixhawk 4. <http://www.holybro.com/product/pixhawk-4/>, 19.09.2022
- [Lev20] Levitate Captical LLC. The Future of the Drone Economy [online]. A comprehensive analysis of the economic potential, market opportunities, and strategic considerations in the drone economy. A Report From Levitate Capital, 2020, [Zugriff am: 18. Oktober 2021]. Verfügbar unter: <https://levitatecap.com/levitate/wp-content/uploads/2020/12/Levitate-Capital-White-Paper.pdf>.
- [Mel18] Melcher, D. et al.: Dreidimensionale Fabrikplanung durch Drohneneinsatz. In ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 2018, 113; S. 267–271.
- [Mel20] Melcher, D.; Küster, B.; Overmeyer, L.: "Automated Data Acquisition and Processing for Factory Layout Planning," 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Singapore, Singapore, 2020, S. 91-95.
- [Ope22] Open Robotics: rviz. <http://wiki.ros.org/rviz>, 19.09.2022
- [Px422a] Px4 autopilot: PX4 user Guide Pixhawk 4. [https://docs.px4.io/main/en/flight\\_controller/pixhawk4.html](https://docs.px4.io/main/en/flight_controller/pixhawk4.html), 19.09.2022
- [Px422b] Px4 autopilot: Open Source Autopilot – For Drone Developers. <https://px4.io>, 19.09.2022

- [Tom10] Tompkins, J. A.; White, J. A.; Bozer, Y. A.; Tanchoco, J. M. A.: Facilities planning. John Wiley & Sons, 2010.
- [VdS22] VdS 3103: 2019-06 (03) Lithium-Batterien. <https://shop.vds.de/publikation/vds-3103>, 19.09.2022
- [Vel22] Velodyne Lidar, Inc. 2022: Puck LITE. <https://velodynelidar.com/products/puck-lite/>, 19.09.2022
- [Wie14] Wiendahl, H.-P.; Nyhuis, P.; Reichardt, J.: Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. 2. Aufl., Hanser Verlag, München, 2014

## 10. Richtlinien und Verordnungen

ASR A2.1 (Technische Regeln für Arbeitsstätten): Schutz vor Absturz und herabfallenden Gegenständen, Betreten von Gefahrenbereichen. Ausgabe: November 2012 (GMBI 2012, S. 1220, zuletzt geändert GMBI 2022, S. 245).

ASR A2.2 (Technische Regeln für Arbeitsstätten): Maßnahmen gegen Brände. Ausgabe: Mai 2018 (GMBI 2018, S. 446, zuletzt geändert GMBI 2022, S. 247).

Betriebssicherheitsverordnung vom 3. Februar 2015 (BGBl. I S. 49), die zuletzt durch Artikel 7 des Gesetzes vom 27. Juli 2021 (BGBl. I S. 3146) geändert worden ist.

Luftverkehrs-Ordnung vom 29. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1894), die zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 14. Juni 2021 (BGBl. I S. 1766) geändert worden ist.

Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG.

TRGS 800 (Technische Regeln für Gefahrstoffe): Brandschutzmaßnahmen. *Ausgabe: Dezember 2010*, GMBI 2011 Nr. 2, S. 33-42 (31.01.2011).

TRBS 2111 (Technische Regeln für Betriebssicherheit): Mechanische Gefährdungen - Allgemeine Anforderungen. Ausgabe: März 2014, GMBI. 2014 S. 594 [Nr. 28/29].

TRBS 2111 (Technische Regeln für Betriebssicherheit): Teil 1 Mechanische Gefährdungen - Maßnahmen zum Schutz vor Gefährdungen beim Verwenden von mobilen Arbeitsmitteln. Ausgabe: April 2015 GMBI. 2015 S. 468 [Nr. 24] geändert und ergänzt: GMBI 2019 S. 21 [Nr. 2/3] (11.02.2019) Änderung: GMBI 2020, S. 322 [Nr. 17] (06.05.2020).