



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology

## Diplomarbeit

# Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Implementierung einer drohnengestützten Layouterstellung für Analyse- und Planungsvorgänge im Lagerinnenbereich

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

## Master of Science (Dipl.-Ing.)

unter der Leitung von

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sebastian Schlund**

(E330 Institut für Managementwissenschaften,  
Bereich: Industrial Engineering und Mensch-Maschine-Interaktion)

**Dr.techn. Patrick Taschner**

(Fraunhofer Austria Research GmbH, Gruppenleiter Intralogistik und Materialflussplanung)

eingereicht an der TU Wien

**Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften**

von

**Michael Scsepka BSc**

01525858 (066 482)

Wien, im März 2025

---

Michael Scsepka



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

## Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre hiermit Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im März 2025

---

Michael Scsepka

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während meines gesamten Studiums und beruflichen Laufbahn begleitet, unterstützt und inspiriert haben.

Einen besonderen Dank möchte ich meinen Betreuern, Herrn Dr.techn. Patrick Taschner und Herrn Christian Karner MSc, aussprechen. Sie haben meine Diplomarbeit mit großer Expertise, hohem Engagement und Verlässlichkeit betreut. Durch den regelmäßigen konstruktiven Austausch konnten sie einen wesentlichen Beitrag zum erfolgreichen Verfassen dieser Diplomarbeit leisten.

Des Weiteren möchte ich all meinen geschätzten Kolleginnen und Kollegen bei Fraunhofer Austria Research GmbH meinen aufrichtigen Dank für ihre Expertise und insbesondere für die stets kollegiale Zusammenarbeit aussprechen.

Ich möchte an dieser Stelle meinen Freunden und Studienkollegen bedanken. Die gemeinsame Zeit während des Studiums war von einem aktiven Austausch und dem Sammeln wertvoller Erfahrungen geprägt.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen Eltern Hermann und Margit bedanken. Sie haben mir nicht nur die Möglichkeit gegeben, mein Studium zu realisieren, sondern sie haben mir auch in sämtlichen Phasen des Studiums stets Rückhalt gegeben. Ebenso möchte ich mich hier besonders bei meinem Bruder Philipp bedanken. Die enge Verbundenheit unserer Familie hat maßgeblich zu meiner persönlichen Entwicklung und dem erfolgreichen Studienabschluss beigetragen. Ich spreche euch meinen herzlichsten Dank aus!

## Kurzfassung

Die Entwicklung von Lagerstätten hat sich im Wandel der Zeit von einfachen Lagern hin zu komplexen Einrichtungen mit mehreren Lagerflächen geändert, was einen Anstieg des finanziellen Werts von Unternehmen mit sich zieht. Zur Steigerung der wirtschaftlichen Effizienz sind Unternehmen bestrebt, Lagerkosten zu senken und Lagersysteme intelligent zu entwickeln. Um eine bestehende Fabrik, deren Bestandteil das Lager ist, zu analysieren und gegebenenfalls effizient umzugestalten, gilt es die Grundlagen des Ist-Zustandes in Form von Daten und Analysen zu erheben. Dazu zählt die Erfassung des Ist-Layouts, welches eine zeitintensive Tätigkeit darstellt und aktuell manuell durch Fachpersonal abgewickelt wird. Ein weiterer ressourcenintensiver Vorgang im Lager stellt die Lagerinventur dar, welcher durch geeignete Ansätze automatisiert werden kann.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Lösung dieser zeit- und ressourcenintensiven Problemstellungen und zeigt eine praxisbezogene Vorgehensweise zur Aufnahme räumlicher Daten, Überführung in ein Layout, welches einem digitalen Modell entspricht, und der weiteren Durchführung von Analyse- und Planungsvorgängen anhand des Layouts. In der wissenschaftlichen Literatur lassen sich keine strukturierten Ansätze zur visuellen Rekonstruktion von Produktions- und Lagerbereichen finden, sodass in dieser Arbeit eine schrittweise Rekonstruktion unter besonderer Berücksichtigung des Einsatzes einer Drohne erarbeitet wird.

Das Ziel dieser wissenschaftlichen Arbeit ist es ein ganzheitliches Konzept zur Erstellung eines digitalen Modells von einem Lagerinnenbereich mittels geeigneter Modellierungstechnik zu entwickeln, welches in weiterer Folge für Analysen des Bereichs und für die Implementierung einer automatisierten Lagerinventur verwendet wird. Zur Erreichung dieses Ziels wird die Design-Science-Research Forschungsmethodik angewandt.

Das Ergebnis dieser Arbeit stellt ein entwickeltes Vorgehensmodell dar, mittels dessen die detailgetreue Abbildung eines Lagerinnenbereichs unter Zuhilfenahme einer adäquaten Modellierungsmethode und eines geeigneten Ressourcenmittels möglich ist. Das resultierende Layout findet Anwendung in weiteren Untersuchungen sowie der Konzeptionierung einer automatisierten Drohnen-basierten Lagerinventur. Die Praxistauglichkeit des entwickelten Vorgehensmodells wird anhand eines Use-Cases untersucht, wobei die Prüfung der Eignungsfähigkeit einer Drohne als Ressourcenmittel zur Datenaufnahme im Vordergrund steht.

## Abstract

The evolution of storage facilities has seen a transition from basic warehouses to complex structures with multiple storage areas, thereby increasing the financial value of companies. In pursuit of enhanced economic efficiency, companies are aiming to reduce storage costs and design more efficient storage systems. When analyzing an existing factory, where the warehouse is a vital component, and choosing a necessary redesign, it is essential to collect data and conduct analyses that clearly define the current situation. This involves the manual, time-consuming process of recording the current layout, which is currently performed by specialized personnel. Another resource-intensive process in the warehouse is stock taking, which can be automated using suitable approaches.

This thesis proposes a solution to the time- and resource-consuming problems associated with the recording and transfer of spatial data into a layout corresponding to a digital model. It further outlines the implementation of analyses and planning processes based on the layout. To the best of the author's knowledge, no structured approaches for the visual reconstruction of production and storage areas can be found in scientific literature. This work therefore develops a step-by-step reconstruction with special consideration of the use of a drone.

The objective of this scientific work is to formulate a comprehensive methodology for the conceptualization of a digital warehouse interior model, employing appropriate modeling technology. This model will subsequently be utilized for the analyses of the designated area and the implementation of an automated warehouse inventory. To this end, design science research methodology is applied.

The result of this thesis is a process model that has been developed to facilitate the detailed mapping of an internal warehouse area. This model utilizes an appropriate modeling method and a suitable resource. The resulting layout is employed in subsequent investigations and the conceptualization of an automated drone-based warehouse inventory. The practicability of the developed process model is analyzed based on a use case, with the focus being on testing a drone as suitable resource for data acquisition.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
1.1	Ausgangssituation: Problemstellung und Problemdefinition .....	1
1.2	Allgemeines Ziel dieser Arbeit .....	3
1.3	Forschungsmethodik und Aufbau der Arbeit .....	3
1.3.1	Angewandte Forschungsmethodik.....	3
1.3.2	Struktureller Aufbau der Arbeit.....	5
2	Theoretische Grundlagen und Eingrenzung des Forschungsbereichs.....	7
2.1	Grundlagen ausgewählter logistischer Begriffe und Kennzahlen .....	7
2.1.1	Lagerhaltungskosten.....	7
2.1.2	Flächennutzungsgrad .....	8
2.1.3	Höhennutzungsgrad.....	9
2.1.4	Lagerfüllgrad .....	9
2.1.5	Layoutplanung .....	9
2.1.6	Inventur.....	11
2.2	Methoden zur Erstellung eines digitalen Modells .....	12
2.2.1	Photogrammetrie .....	12
2.2.2	Stereovision .....	14
2.2.3	LiDAR .....	14
2.3	Digitaler Zwilling im Logistikbereich.....	15
2.3.1	Begriffserklärung und Definition vom digitalen Zwilling .....	15
2.3.2	Prozess der Erstellung eines digitalen Zwillings .....	17
2.4	Ressourcenmittel zum Transport von Sensoren.....	19
2.5	Allgemeines und Fakten zu Drohnen.....	21
2.5.1	Bezeichnungen von Drohnen.....	21
2.5.2	Markt von Drohnen .....	22
2.5.3	Entwicklung der Technologie „Drohne“ .....	24
2.5.4	Einsatzmöglichkeiten von Drohnen in der Industrie .....	26
2.5.5	Sustainable Development Goals und Drohnen .....	29
2.5.6	Ansatz einer Taxonomie für Drohnen .....	30
2.5.7	Grundlegender Aufbau einer Drohne .....	31

2.5.8	Energieversorgung einer Drohne .....	32
2.5.9	Navigation einer Drohne .....	33
2.5.10	Sensorik zur Datenaufnahme .....	36
2.5.11	Rechtliche Rahmenbedingungen eines Drohnenflugs im Innenbereich 37	
2.6	Eingrenzung des Forschungsbereichs .....	38
3	State-of-the-Art: Drohnen im Innenbereich .....	39
3.1	Digitales Modell .....	39
3.2	Drohnen-basierte Lagerinventur .....	42
3.2.1	Wissenschaftliche Literatur .....	43
3.2.2	Marktverfügbarkeit für eine Drohnen-basierte Lagerinventur .....	44
3.3	Zusammenfassung des Stands der Technik und Ableitung der Forschungsfragen .....	47
4	Vorgehensmodell zur Implementierung einer drohnengestützten Layouterstellung 50	
4.1	Anforderungen an das Vorgehensmodell .....	50
4.2	Systemgrenzen des Modells .....	50
4.2.1	Softwareseitige Rahmenbedingungen .....	51
4.2.2	Hardwareseitige Rahmenbedingungen .....	51
4.3	Entwicklung des Modells .....	51
4.3.1	Schritt 1: Definition des Use-Cases .....	54
4.3.2	Schritt 2: Auswahl der geeigneten Methode zur Erstellung eines digitalen Modells 54	
4.3.3	Schritt 3: Prüfung der Eignungsfähigkeit des Ressourcenmittels Drohne für den Transport eines Sensors .....	56
4.3.4	Schritt 4: Datenerfassung .....	58
4.3.5	Schritt 5: Datenuntersuchung und -bereinigung .....	60
4.3.6	Schritt 6: Modellierung des digitalen Modells .....	60
4.3.7	Schritt 7: Bewertung des digitalen Modells .....	61
4.3.8	Schritt 8: Durchführung von Analyse- und Planungsvorgängen anhand des digitalen Modells .....	62
4.3.9	Schritt 9: Bereitstellung der erhaltenen Ergebnisse .....	63
4.4	Erweiterung des Modells um die Planung einer automatisierten Drohnen- basierten Lagerinventur .....	63

4.4.1	Auswahl einer geeigneten Inventurdrohne.....	64
4.4.2	Vorgehensweise der Drohnen-basierten Lagerinventur.....	65
4.5	Zusammenfassung des Kapitels .....	67
5	Evaluierung des Vorgehensmodells.....	68
5.1	Ausgangssituation des Use-Cases.....	68
5.2	Problemstellung.....	68
5.3	Anwendung des entwickelten Vorgehensmodells .....	69
5.4	Ergebnisse und Fazit des Use-Cases .....	89
5.4.1	Ergebnisse des Use-Cases .....	89
5.4.2	Fazit.....	91
6	Diskussion und Ausblick .....	93
6.1	Zusammenfassende Resultate.....	93
6.2	Ergebnisse in Bezug auf die Forschungsfragen .....	94
6.3	Ausblick.....	96
7	Anhang.....	97
7.1	Experteninterview.....	97
7.2	Code für eine Drohnen-basierte Lagerinventur .....	100
8	Literaturverzeichnis.....	102
8.1	Verwendete Literatur .....	102
8.2	Experteninterview.....	111
8.3	Eigene unveröffentlichte Quellen.....	111
9	Abbildungsverzeichnis .....	112
10	Formelverzeichnis.....	114
11	Tabellenverzeichnis .....	115
12	Abkürzungsverzeichnis.....	116

# 1 Einleitung

Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit dem Einsatz einer industriellen Drohne und deren Möglichkeiten. Dabei liegt der Fokus auf der Aufnahme von räumlichen Daten mit der Drohne und einer nachgestellten Modellierung eines digitalen Modells eines Lagers. Darüber hinaus wird die Drohnen-basierte Lagerinventur zur Effizienzsteigerung im Lager als wichtiger Bestandteil betrachtet. Um Unternehmen wettbewerbsfähig zu halten, bedarf es an innovativen Lösungsansätzen und aktiver Gestaltung von zukunftssträchtigen Lösungen, wie es Drucker und Lincoln treffend sagten:

*"The best way to predict the future is to create it."* - Peter Drucker, Abraham Lincoln

## 1.1 Ausgangssituation: Problemstellung und Problemdefinition

Digitale Lagerverwaltungssysteme nehmen eine zentrale Rolle im industriellen Bereich der wirtschaftlichen Transformation ein. Sie sind von entscheidender Bedeutung für die Optimierung von betrieblichen Abläufen und der angestrebten Effizienzsteigerung. Derzeit bestehen mehrere Herausforderungen in verschiedenen Geschäftsebenen, welche die Auftragsverwaltung, mangelhafte Layouts, mangelnde Transparenz und fehlende technologische Maßnahmen umfassen.<sup>1</sup>

Das Lager hat sich im Laufe der Jahre von einer einfachen Lagerstätte zu einer komplexen Einrichtung mit mehreren Lagerflächen und Ebenen entwickelt. Diese Transformation führt dazu, dass Lagergebäude gegenwärtig einen erheblichen finanziellen Wert besitzen.<sup>2</sup> Zudem führt der Einsatz von Big Data-Analysen in der Industrie zunehmend zu einer intelligenten Entwicklung von Lagersystemen. Die Senkung der Lagerkosten zur Steigerung der wirtschaftlichen Effizienz wird dabei von vielen Unternehmen angestrebt.<sup>3</sup> Eine Reduzierung von Kosten kann durch eine effiziente Planung einer Fabrik, in der das Lager Bestandteil ist, erzielt werden. In einem produzierenden Unternehmen entfällt bis zur Hälfte der gesamten Betriebskosten auf den Materialtransport. Eine effiziente Raumplanung kann dazu beitragen diese Kosten, um bis zu 30 % zu reduzieren.<sup>4</sup>

Im Rahmen der Fabrikplanung ist die Grundlagenermittlung ein wesentlicher Aspekt, um den Ist-Zustand einer Fabrik abzubilden. Bis zu 50% werden für die Aufnahme und Analyse von Daten benötigt. Hierzu zählt unter anderem die Erhebung des Ist-

<sup>1</sup> vgl. Maheshwari et al., 2023, S. 1.

<sup>2</sup> vgl. Maheshwari et al., 2023, S. 2 ff.

<sup>3</sup> vgl. Leng et al., 2021, S. 783.

<sup>4</sup> vgl. Tompkins et al., 2010, S. 10.

Layouts.<sup>5</sup> Dieser Aufnahmeprozess erfolgt derzeit überwiegend manuell durch Fachpersonal vor Ort. Die zeit- und ressourcenintensive manuelle Datenaufnahme könnte in Zukunft durch den Einsatz von luftbasierten Einheiten wie Drohnen<sup>6</sup> oder bodengebundenen Scanfahrzeugen, wie fahrerlose Transportsysteme, optimiert werden.<sup>7</sup> <sup>8</sup> Eine weitere innovative Methode zur Datenerfassung stellt der Einsatz eines Roboterhundes dar.<sup>9</sup> Setzt man autonome Systeme, wie beispielsweise Drohnen, im Innenbereich ein, so ist vor allem die Navigation in Bereichen ohne Verwendung eines globalen Navigationssatelliten-Systems herausfordernd. Dies erfordert den Einsatz geeigneter Sensoren und die Gewährleistung eines Kollisionsschutzes.<sup>10</sup>

Durch den Einsatz moderner Technologien und die Durchführung von Simulationsmodellierungen kann ein digitaler Zwilling entwickelt werden. Ein digitaler Zwilling ist häufig ein hochentwickeltes Modell, das ein reales System in Echtzeit nachbildet. In Bezug auf die Planung eines 3D-Layouts erweist sich eine Echtzeitaktualisierung des digitalen Zwillings aus zeitlicher Sicht als obsolet. Das resultierende Modell kann als hybrider digitaler Zwilling betrachtet werden, der aus einer Kombination von 3D-Laserscandaten und CAD-Modellen besteht.<sup>11</sup> Physische Objekte in einem digitalen Zwilling können als digitale Repräsentation bezeichnet werden.<sup>12</sup> Die Analyse und Planung von Materialflüssen sowie Layouts kann auf Basis dieser erfassten physischen Objekte und funktionalen Flächen erfolgen, sodass Transportwege, Flächen<sup>13</sup> und somit das gesamte Layout optimiert wird.<sup>14</sup> In der Fabrikplanung bietet sich das erhaltene 3D-Modell zur Brownfield-Planung an, also der Umplanung, Erweiterung oder dem Rückbau von deren Räumlichkeiten.<sup>15</sup> Darüber hinaus kann das 3D-Modell zur Planung automatisierter Drohnenflüge<sup>16</sup> sowie zur Simulation von Transporten mittels fahrerloser Transportsysteme verwendet werden.<sup>17</sup>

Ein anspruchsvoller und ressourcenintensiver Prozess im Lager, für das eine genaue Planung notwendig ist, stellt die Lagerinventur dar. Dabei nutzen Mitarbeitende üblicherweise Handheld-Geräte, um gelagerte Produkte zu scannen. Alternativ erfolgt dabei die Bestandsaufnahme durch eine zeitaufwändige manuelle Zählung. Die von Mitarbeitenden durchgeführte Zählung von Beständen wird im Idealfall mit Beständen

---

<sup>5</sup> vgl. Wiendahl et al., 2014, S. 476.

<sup>6</sup> vgl. Melcher et al., 2018a, S. 267.

<sup>7</sup> vgl. Tang et al., 2014, S. 11805 ff.

<sup>8</sup> vgl. Park et al., 2018, S. 1–9.

<sup>9</sup> vgl. Kim et al., 2022, S. 1 ff.

<sup>10</sup> vgl. Seel et al., 2022, S. 388 f.

<sup>11</sup> vgl. Nafors et al., 2020, S. 1619 ff.

<sup>12</sup> vgl. ISO 23247-1:2021, 2021, S. 2–3.

<sup>13</sup> vgl. Melcher et al., 2018b, S. 1–2.

<sup>14</sup> vgl. Sodiya et al., 2024, S. 276 ff.

<sup>15</sup> vgl. Wiendahl et al., 2024, S. 235.

<sup>16</sup> vgl. Stöber et al., 2024, S. 120.

<sup>17</sup> vgl. Mahmood et al., 2021, S. 102 ff.

in einer Lagerverwaltungssystem-Software abgestimmt, um Ist- und Soll-Bestände von Produkten laufend zu evaluieren. Häufig treten jedoch Diskrepanzen auf, welche zu erhöhten Lagerhaltungskosten, Gewinneinbußen, kurzfristigen Lieferungen und Problemen bei der Rechnungsprüfung führen können. Regelmäßige Bestandsaufnahmen verursachen für Unternehmen erhebliche Kosten, was sie dazu veranlasst Bestände zu reduzieren. Kürzer werdende Vorlaufzeiten, welche durch den Wandel des menschlichen Lebensstils und dessen Konsumverhaltens bedingt sind, setzen Unternehmen zusätzlich unter Druck. Daher steigt die Nachfrage nach vernetzten und automatisierten Lösungen für regelmäßige Bestandsaufnahmen in Lagerhäusern kontinuierlich.<sup>18</sup>

Um die Vorteile neuer Technologien voll auszuschöpfen, sind weitere Untersuchungen erforderlich, die sich mit der Frage befassen, wie und wann sie eingesetzt werden können.<sup>19</sup> Vorhandene Ansätze eines Vorgehensmodells zur Erstellung eines digitalen Zwillings im Bereich Produktion und Logistik müssen weiterentwickelt und umgesetzt werden, um eine repräsentative Bewertung vornehmen zu können.<sup>20</sup>

## 1.2 Allgemeines Ziel dieser Arbeit

Durch die dargelegte Ausgangssituation ergibt sich als allgemeines Ziel dieser Arbeit, ein Vorgehensmodell zur Erstellung eines digitalen Modells von einem Lager im Innenbereich mittels geeigneter Methode zu erarbeiten. Dieses digitale Modell dient als Grundlage für Analyse- und Planungsvorgänge in der Logistik. Darüber hinaus soll dadurch die Basis für die Konzeptionierung einer automatisierten Lagerinventur geschaffen werden. Durch die Implementierung eines solchen Modells wird angestrebt, ein aktuelles Lagerlayout in einem Unternehmen zu erhalten, die Effizienz und Genauigkeit in der Lagerverwaltung zu verbessern.

## 1.3 Forschungsmethodik und Aufbau der Arbeit

Um die wissenschaftlichen Grundlagen und die systematische Vorgehensweise der durchgeführten Untersuchungen nachvollziehbar darzustellen, werden in diesem Kapitel die angewandte Forschungsmethodik und der strukturelle Aufbau der Arbeit beschrieben.

### 1.3.1 Angewandte Forschungsmethodik

In der vorliegenden Arbeit findet die Forschungsmethodik nach Peffers et al. Anwendung, welche die Design-Science-Research Methode darstellt. Gemäß dieser Methode wird ein Prozess definiert, welcher sich aus sechs Bausteinen

<sup>18</sup> vgl. Daios et al., 2024, S. 1437 f.

<sup>19</sup> vgl. Nafors et al., 2020, S. 1628–1629.

<sup>20</sup> vgl. Follath et al., 2022, S. 695.

zusammensetzt, dargestellt in Abbildung 1. Die Bausteine umfassen die Problemerkennung und Motivation, die Definition der Ziele für eine Lösung, dem Entwurf und Entwicklung, der Demonstration, der Auswertung und der Kommunikation. Der Prozess muss dabei nicht linear durchlaufen werden, da es mehrere Einstiegspunkte zur Problemannäherung entlang der jeweiligen Prozessschritte gibt. Der problemorientierte Lösungsansatz wird in der Regel verwendet, wenn bereits Beobachtungen aus dem Forschungsumfeld vorliegen oder in diesem Umfeld in früheren wissenschaftlichen Arbeiten ein weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt wurde.<sup>21</sup> Dieser Ansatz wurde für die Arbeit gewählt und ist in Abbildung 1 markiert.

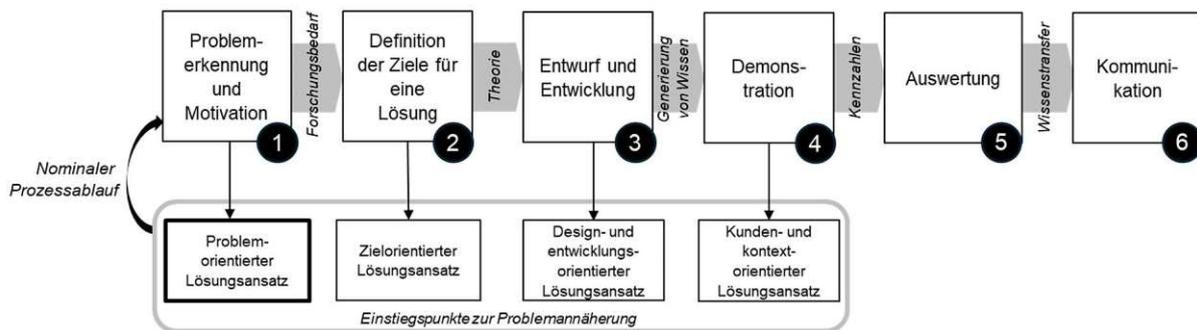


Abbildung 1: Design-Science-Research Modell nach Peffers et al.<sup>22</sup>

Bezugnehmend auf die Wahl des problemorientierten Lösungsansatz liegt in der vorliegenden Diplomarbeit der Startpunkt des Prozessmodells im Prozessschritt 1, der Problemerkennung und Motivation. Hier wird die Problemstellung resultierend aus Erkenntnissen der Forschung als auch Industrie erörtert. Aufbauend darauf erfolgt im Prozessschritt 2 die Definition der Forschungsziele für eine Lösung des definierten Problems. Basierend darauf werden notwendige theoretische Grundlagen aufbereitet und der Untersuchungsbereich eingegrenzt. Darüber hinaus erfolgt eine State-of-the-Art Recherche mit dem Fokus auf der Erstellung eines digitalen Modells und einer Drohnen-basierten Lagerinventur. Im Prozessschritt 3, dem Entwurf und Entwicklung, erfolgt die Konzeption des Artefakts, welches die Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Implementierung einer drohnengestützten Layouterstellung für Analyse- und Planungsvorgänge im Lagerinnenbereich ist. In Bezug darauf wird im Prozessschritt 4, der Demonstration, das konzipierte Artefakt anhand eines Use-Cases praktisch erprobt. Diesem Prozessschritt folgt der Prozessschritt 5, die Auswertung, wo Kennzahlen und Ergebnisse ausgewertet werden. Das Prozessmodell wird mit dem Prozessschritt 6, der Kommunikation, abgeschlossen. Hier wird auf das zu lösende Problem, die erzielten Ergebnisse und den zukünftigen Forschungsbedarf eingegangen.

<sup>21</sup> vgl. Peffers et al., 2007, S. 45 ff.

<sup>22</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Peffers et al., 2007, S. 54.

Die einzelnen Prozessschritte in Abbildung 1 sind zur Nachvollziehbarkeit mit fortlaufender Nummer versehen, sodass sie in Abbildung 2 den Kapiteln dieser Arbeit zugeordnet werden können.

### 1.3.2 Struktureller Aufbau der Arbeit

Zunächst wird in Kapitel 1 die vorliegende Ausgangssituation und Motivation beschrieben. Aufbauend darauf wird ein allgemeines Ziel dieser Arbeit formuliert. Danach wird die gewählte Forschungsmethodik für diese Arbeit definiert. Das Kapitel schließt mit einem Überblick über die Struktur der Arbeit.

In Kapitel 2 wird das Grundverständnis für die Bearbeitung der Inhalte dieser Arbeit gebildet. Dies umfasst die Grundlagen ausgewählter logistischer Begriffe und Kennzahlen. Weiterer Bestandteil des Kapitels sind Methoden zur Erstellung eines digitalen Modells und Grundlagen eines digitalen Zwillings im Logistikbereich. Darüber hinaus werden Ressourcenmittel zum Transport von Sensoren zur Datenaufnahme erörtert und Allgemeines und Fakten zu Drohnen behandelt. Das Kapitel wird mit einer Eingrenzung des Forschungsbereichs der vorliegenden Arbeit abgeschlossen.

Aufbauend auf der Eingrenzung aus Kapitel 2 wird in Kapitel 3 eine State-of-the-Art Recherche zu Drohnen im Innenbereich durchgeführt. Diese gliedert sich in Literatur eines digitalen Modells und in eine Drohnen-basierte Lagerinventur. Das Kapitel wird mit einer Zusammenfassung des Stands der Technik, spezifischer Problemstellung und spezifischer Zielsetzung beendet.

In Kapitel 4 wird das Vorgehensmodell zur Implementierung einer drohnengestützten Layouterstellung entwickelt. Das Vorgehensmodell ist aus mehreren Schritten aufgebaut, welche in diesem Kapitel detailliert beschrieben werden.

Das entwickelte Vorgehensmodell wird in Kapitel 5 anhand eines Use-Cases evaluiert, sodass es unter realen Bedingungen auf Praxisrelevanz geprüft werden kann. Dadurch wird die Anwendbarkeit demonstriert.

Die Arbeit schließt inhaltlich in Kapitel 6 mit zusammenfassenden Resultaten, der Ergebnisse in Bezug auf die Forschungsfragen und einem Ausblick ab. In Abbildung 2 ist die Struktur dieser Arbeit dargestellt, wobei anhand der Spalte des Design-Science-Research Modells dargestellt ist, welche Kapitel die jeweiligen Schritte adressieren.

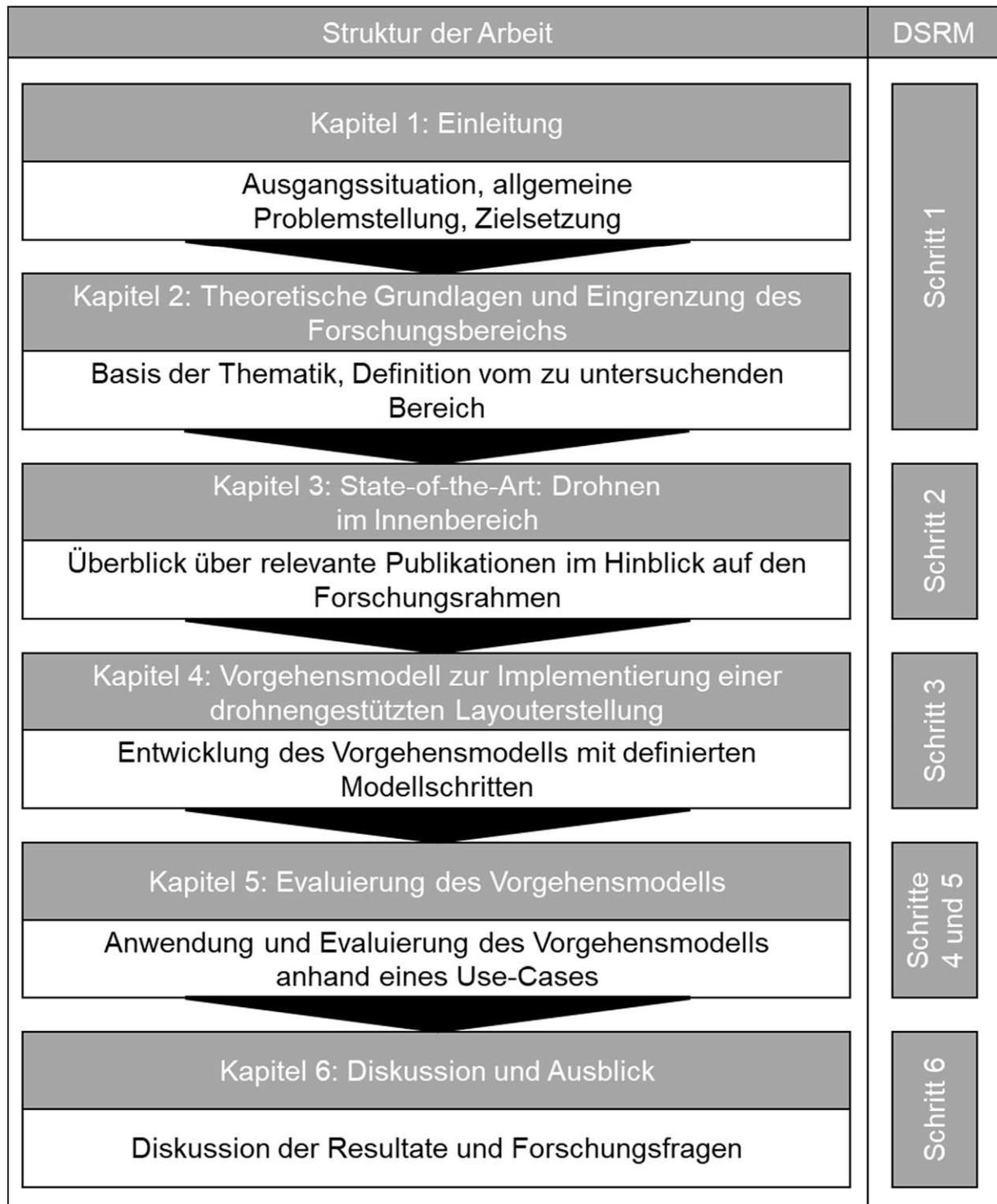


Abbildung 2: Aufbau der Arbeit<sup>23</sup>

<sup>23</sup> Eigene Darstellung

## 2 Theoretische Grundlagen und Eingrenzung des Forschungsbereichs

Im Folgenden werden zum Verständnisaufbau die theoretischen Grundlagen erörtert, auf deren Basis die Inhalte dieser Arbeit bearbeitet werden.

### 2.1 Grundlagen ausgewählter logistischer Begriffe und Kennzahlen

In diesem Abschnitt werden ausgewählte Begriffe und Kennzahlen näher erörtert, welche für die Analyse und Bewertungen in der Logistik relevant sind. Es werden auf Lagerhaltungskosten, den Flächennutzungsgrad, den Höhennutzungsgrad, den Lagerfüllgrad, die Layoutplanung und die Inventur eingegangen.

#### 2.1.1 Lagerhaltungskosten

In der Logistik gilt es diverse Aufgaben zu erfüllen, Ziele und Maßnahmen einzuhalten. Diese können in die drei Aufgaben von Leistungserbringung, Qualitätserfüllung und Kosten gegliedert werden. Dabei stehen Leistung und Kosten in direktem Zusammenhang und es gilt eine maximale logistische Leistung bei minimalem Kostenaufwand beziehungsweise bei begrenztem Kostenbudget eine maximale Leistung zu erbringen. Die Logistikkosten lassen sich hier in fünf Kostenblöcke gliedern, welche die Steuerungs- und Systemkosten, die Bestandskosten, die Lagerkosten, die Transportkosten und die Handlingskosten umfassen.<sup>24</sup>

Die Kosten eines Lagers bezeichnet man als Lagerhaltungskosten und setzen sich aus mehreren Kostenkategorien zusammen. Wie in Abbildung 3 dargestellt, fallen darunter die Bestandskosten, Personalkosten, Betriebskosten der Betriebsmittel, Gebäudekosten und sonstige Kosten. Jeder dieser Kostenkategorie können weitere detaillierte Komponenten an Kosten zugeordnet werden, welche ebenfalls in Abbildung 3 illustriert sind.<sup>25</sup>

<sup>24</sup> vgl. Wehking, 2020, S. 27 ff.

<sup>25</sup> vgl. Martin, 2021, S. 205 f.

Abbildung 3: Lagerhaltungskosten<sup>26</sup>

Lagerhaltungskosten können durch einige technische und organisatorische Maßnahmen verringert werden. Unter anderem können Personalkosten durch Erhöhung des Mechanisierungsgrades, Verringerung von Kommissionierung und Umpackung, Reduzierung von Lagerverwaltungssystem-Tätigkeiten wie die Inventur vermindert werden. Des Weiteren können Gebäudekosten durch die Optimierung vom Flächen-, Höhen-, und Raumnutzungsgrad gesenkt werden. Neben den genannten Maßnahmen gibt es noch weitere Möglichkeiten, um Lagerhaltungskosten zu vermindern.<sup>27</sup>

### 2.1.2 Flächennutzungsgrad

Eine wichtige logistische Kennzahl ist der Flächennutzungsgrad. Um die Kosten im Unternehmen zu minimieren, gilt es einen hohen Nutzungsgrad zu erzielen. Dabei spielen zwei Größen eine wesentliche Rolle. Die Lager-Bruttofläche stellt die Lagerfläche abzüglich der Flächen für Lagerbüros, Betriebsräume, Bereitstellung für Lagergut, Auf- und Abgabestationen sowie Be- und Entladeplätze dar. Hingegen ergibt sich die Lager-Nettofläche aus der Lager-Bruttofläche ohne der Verkehrs- und Manipulationsflächen für Lagerbediengeräte. Sie entspricht somit der Fläche, welche durch Regale belegbar ist. Das Verhältnis von der Lager-Nettofläche zu Lager-Bruttofläche ergibt den Flächennutzungsgrad<sup>28</sup> und ist in Formel 1 dargestellt.

<sup>26</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Martin, 2021, S. 205.

<sup>27</sup> vgl. Martin, 2021, S. 205–206.

<sup>28</sup> vgl. Martin, 2021, S. 207.

$$\text{Flächennutzungsgrad} = \frac{\text{Lager Nettofläche}}{\text{Lager Bruttofläche}} * 100 [\%]$$

**Formel 1: Flächennutzungsgrad<sup>29</sup>**

Eine Anwendung der Berechnung des Flächennutzungsgrads ist sowohl im Innen- als auch Außenbereich eines Lagers möglich.

### 2.1.3 Höhennutzungsgrad

Der Höhennutzungsgrad gibt Aufschluss darüber, wie gut ein Raum in dessen Höhe genutzt wird. Hierbei wird, wie in Formel 2 dargestellt, die genutzte Höhe der nutzbaren Höhe gegenübergestellt.<sup>30</sup>

$$\text{Höhennutzungsgrad} = \frac{\text{genutzte Höhe}}{\text{nutzbare Höhe}} * 100 [\%]$$

**Formel 2: Höhennutzungsgrad<sup>31</sup>**

### 2.1.4 Lagerfüllgrad

Der Lagerfüllgrad stellt die Auslastung des Lagers dar. Er setzt die Anzahl der belegten Lagerplätze ins Verhältnis zur Lagerkapazität, was die maximal belegbare Anzahl an unterzubringenden Lagereinheiten in einem Regal oder einem Bodenlager darstellt.<sup>32</sup> Dies ist in Formel 3 dargestellt.

$$\text{Lagerfüllgrad} = \frac{\text{Anzahl der belegten Lagerplätze}}{\text{Lagerkapazität}} \leq 1$$

**Formel 3: Lagerfüllgrad<sup>33</sup>**

### 2.1.5 Layoutplanung

Der Begriff Layout kann sowohl als 2-dimensionale Darstellung einer Räumlichkeit als auch als 3-dimensionale Darstellung angesehen werden. Letzteres berücksichtigt die Höhendimension vom 2-dimensionalen Layout.<sup>34 35</sup> In der vorliegenden Arbeit wird unter dem Begriff „Layout“ die 3-dimensionale Darstellung einer räumlichen Umgebung verstanden.

Der Grund für die Planung eines Lagers oder einer Fabrik ist vielfältig. Die Fabrik ist laut VDI-Norm ein „Ort, an dem Wertschöpfung durch arbeitsteilige Produktion

<sup>29</sup> vgl. Martin, 2021, S. 207.

<sup>30</sup> vgl. Martin, 2021, S. 208.

<sup>31</sup> vgl. Martin, 2021, S. 208.

<sup>32</sup> vgl. Hompel et al., 2018, S. 115.

<sup>33</sup> vgl. Hompel et al., 2018, S. 115.

<sup>34</sup> vgl. Wiendahl et al., 2024, S. 298.

<sup>35</sup> vgl. Barbosa-Póvoa et al., 2002, S. 1669 f.

industrieller Güter unter Einsatz von Produktionsfaktoren stattfindet.<sup>36</sup> Somit ist das Lager Bestandteil einer Fabrik. Wird ein Lager neu geplant, so wird im Normalfall ein neues Layout vom Betrieb erstellt, da die Entwicklung eines Layouts mit der Auswahl der Produktions-, Materialfluss- und Informationsflussmittel einhergeht. Dazu zählen unter anderem die Infrastruktur für Gebäude und Flächen.<sup>37</sup> Bei einer Brownfield-Planung, also einer Umgestaltung der Fabrik beziehungsweise eines Lagers wird in der Regel das vorhandene Layout herangezogen und Änderungen vorgenommen.<sup>38</sup> Die Aktualität des Layouts kann variieren und reicht von vollständigem Fehlen, einem veralteten Layout bis hin zu einem Layout, welches auf dem aktuellsten Stand ist.

Aufgrund dessen, dass es eine Vielzahl an Fabrikarten gibt, eignet sich eine Einteilung einer Fabrik in die Gestaltungsfelder Mittel, Organisation und Raum, wie es in Abbildung 4 dargestellt ist. Dabei umfassen die Mittel alle für die Produktion notwendigen physischen Elemente. Dazu zählen Fertigungs-, Montage-, Transport- und Lagermittel. Die Organisation deckt Bestandteile ab, wie die Aufbau- und Ablauforganisation, die Logistik der Fabrik und das Arbeitszeitmodell. Das Gestaltungsfeld Raum ist eng mit der Architektur gekoppelt und beinhaltet Aspekte wie das Grundstück, Gebäude, Layout und Außenanlagen der Fabrik. Der Mensch beeinflusst dabei selbst alle Komponenten der Gestaltungsfelder. Durch Verbindung aller Elemente erfolgen Flüsse von Energie, Information, Kapital, Kommunikation, Material, Medien und Personal über sämtliche Aspekte in der Fabrik hinweg.<sup>39</sup>

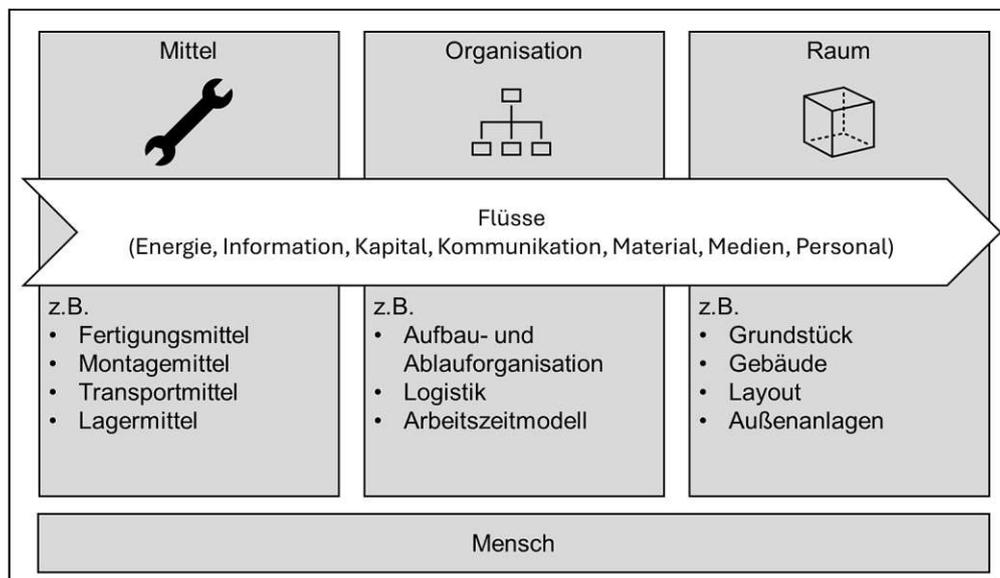


Abbildung 4: Gestaltungsfelder einer Fabrik<sup>40</sup>

<sup>36</sup> VDI 5200-Blatt 1, 2011, S. 3.

<sup>37</sup> vgl. Wehking, 2020, S. 31.

<sup>38</sup> vgl. Wiendahl et al., 2024, S. 235.

<sup>39</sup> vgl. Arnold et al., 2008, S. 307 f.

<sup>40</sup> Arnold et al., 2008, S. 308.

Layoutarten können in Abstraktionsniveaus mit unterschiedlichem Detailgrad kategorisiert werden. So stellt das Werkslayout einen Gesamtüberblick über die gesamten Struktureinheiten in einem Fabrikgelände auf Makroebene dar. Im Layout wird dargestellt, wie Gebäude und Straßen zueinander auf dem Werksgelände liegen. Im Groblayout werden einzelne Produktionsbereiche im Fabriksgebäude illustriert. Dabei liegt der Fokus auf interner Logistik, weshalb Haupttransport- und Hauptmaterialflusswege abgebildet werden. Das Feinlayout zeigt die genaue Position und Anordnung der Betriebsmittel. Die detailreichste Darstellung ist das Arbeitsstationslayout, welches auf Mikroebene die genaue Anordnung von Maschinen, Werkzeugen oder Materialien zeigt.<sup>41</sup>

### 2.1.6 Inventur

Die Inventur in Betrieben ist in Österreich nach dem Unternehmensgesetzbuch § 189, § 191 und § 192 gesetzlich festgelegt. Dabei sind rechnungslegungspflichtige Unternehmen dazu verpflichtet, zu Beginn der Unternehmenstätigkeit Vermögensgegenstände und Schulden, welche dem Unternehmen gewidmet sind, genau zu verzeichnen und deren Wert anzugeben. Das sogenannte Inventar bildet dabei ein Verzeichnis aller Vermögensgegenstände und Schulden von einem Stichtag ab. Dieses Inventar muss für den Schluss eines jeden Geschäftsjahrs neu ermittelt werden. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit die Inventur auf drei Arten durchzuführen. Die Vermögensgegenstände sind durch eine körperliche Bestandsaufnahme zeitnah zum Stichtag zu erfassen und kann entfallen, wenn stattdessen der Bestand nach Art, Menge und Wert durch eine laufende beziehungsweise permanente Inventur festgestellt wird. Hier wird der Bestand verteilt über das ganze Geschäftsjahr aufgenommen. Des Weiteren kann der Bestand im Unternehmen mit Hilfe von anerkannten mathematisch-statistischen Methoden auf Basis von Stichproben erfolgen, wenn die Methode den Grundsätzen ordnungsmäßiger Buchführung entspricht. Bei Anwendung dessen muss der Aussagewert, dem eines aufgrund einer körperlichen Bestandsaufnahme aufgestellten Inventars entsprechen. Eine weitere Möglichkeit stellt die vor- oder nachgelagerte Stichtagsinventur dar.<sup>42</sup> Bei modernen Lagern erfolgt häufig die permanente Inventur, hingegen wird bei älteren Lagern im Regelfall die Stichtagsinventur durchgeführt.<sup>43</sup>

In Abbildung 5 sind die drei Arten von möglichen Inventuren zur Übersicht zusammengefasst.

<sup>41</sup> vgl. Arnold et al., 2008, S. 317.

<sup>42</sup> vgl. Bundeskanzleramt Österreich, 2025.

<sup>43</sup> vgl. Arnold et al., 2008, S. 832.

Abbildung 5: Arten von Inventuren<sup>44</sup>

## 2.2 Methoden zur Erstellung eines digitalen Modells

Zur Erstellung eines digitalen Modells werden unterschiedliche Scantechnologien angewandt. Das digitale Modell oder digitale Repräsentation ist ein Datenelement, das einen Satz von Eigenschaften eines physischen Elements darstellt.<sup>45</sup> Diese Modelle kommen bei diversen Anwendungen zum Einsatz und basieren meist auf LiDAR-Sensoren. LiDAR ist die englische Abkürzung für light detection and ranging.<sup>46</sup> Diese Sensoren sind jedoch teuer und schwer, was beispielsweise eine drohnengestützte Vermessungslösung einschränkt. Neben LiDAR gibt es andere Möglichkeiten wie beispielsweise die Kamera-basierte Photogrammetrie und Stereovision zur 3D-Modellierung.<sup>47</sup> Nachfolgend wird auf diese Möglichkeiten genauer eingegangen.

### 2.2.1 Photogrammetrie

Unter Photogrammetrie wird die Wissenschaft und Technologie verstanden, die zur Gewinnung von zuverlässigen, 3-dimensionalen, geometrischen und thematischen Informationen über Objekte dient. Dazu werden häufig Bild- und Entfernungsdaten verwendet. Daraus resultierende Daten können für die Entwicklung von räumlichen Informationssystemen in digitaler, grafischer und bildlicher Form verwendet werden. Diese Technologie wird in unterschiedlichen Bereichen für die bildgestützte 3-dimensionale Messung verwendet. Dazu zählen unter anderem die Anwendung für die Kartographie, im Ingenieurwesen, in forensischen Analysen, bei der Erfassung von Kulturgütern, in der Robotik, bei Fahrerassistenzsystemen, in medizinischen Anwendungen und für Computerspiele. Es werden Virtual-Reality-Szenen mit realitätsnahen texturierten Modellen erstellt, wo geometrische und semantische Objektinformationen für die Erstellung bereitgestellt werden.<sup>48</sup>

Eine der bekanntesten Techniken für die 3D-Modellierung in diesem Feld ist Structure from Motion (SfM). Dieses Verfahren ermöglicht es auch unerfahrenen Personen, hochwertige Modelle aus unkalibrierten Bildern, die mit einer herkömmlichen Kamera aufgenommen wurden, zu generieren, ohne dass hierfür spezielle Ausrüstungen erforderlich wären. Es gibt diverse Softwares dazu, unter anderem Autodesk Recap

<sup>44</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an sevDesk GmbH, o.D.

<sup>45</sup> vgl. ISO 23247-1:2021, 2021, S. 2.

<sup>46</sup> vgl. Weitkamp, 2005, S. 1.

<sup>47</sup> vgl. Meiselwitz, 2021, S. 517.

<sup>48</sup> vgl. Chen et al., 2016, S. 4.

Pro, Get3D, Pix4Dcloud.<sup>49</sup> Die Vorgehensweise von SfM zur Erstellung eines 3D-Modells umfasst folgende Schritte:

1. Bilderfassung (Hinzufügen von Bildern)
2. Erkennung von Merkmalen, Verknüpfung, Triangulation (Ausrichten von Bildern)
3. Spärliche Rekonstruktion (Generierung einer Punktwolke)
4. Dichter Korrespondenzabgleich beziehungsweise Erzeugung einer dichten Wolke
5. Generierung von der Oberfläche (im Englischen meshen)
6. Erzeugung von Texturen<sup>50</sup>

In der vorliegenden Arbeit wird unter dem Begriff Photogrammetrie die Technik Structure from Motion verstanden, beschrieben wie oben.

Bei der Bildaufnahme aus der Luft ist es notwendig, dass der Winkel zwischen den überlagerten Aufnahmen etwa 5 bis 10 Grad beträgt und eine Überlappung von 70% vorliegt.<sup>51</sup> Dadurch wird sichergestellt, dass übereinstimmende Fotos gemeinsame Merkmale in Form von Punkten aufweisen. Dazu ist eine große Überlappung notwendig.<sup>52</sup> Die generierte Punktwolke kann danach vermascht werden, im Englischen mesh, um ein glattes oder texturiertes 3D Modell zu erstellen.<sup>53</sup> In Abbildung 6 ist die optimale Aufnahme vom Objekt dargestellt, wobei das Objekt in grau markiert ist und die roten Punkte die Bildaufnahmen darstellen. Wie aus der Abbildung hervorgeht, sind die Bildaufnahmen so durchzuführen, dass sowohl eine seitliche als auch eine frontale Überlappung zwischen zwei Aufnahmen bewerkstelligt wird. Die Anzahl der notwendigen Bildaufnahmen ist von der Größe des Objekts abhängig. Somit ist jeder Drohnenflug inklusive Datenaufnahme dem Objekt individuell anzupassen.

<sup>49</sup> vgl. Rahaman, 2021, S. 26–27.

<sup>50</sup> vgl. Rahaman und Champion, 2019, S. 1836.

<sup>51</sup> vgl. Santagati et al., 2013, S. 556.

<sup>52</sup> vgl. Spreitzer et al., 2020, S. 1 ff.

<sup>53</sup> vgl. Meiselwitz, 2021, S. 517.

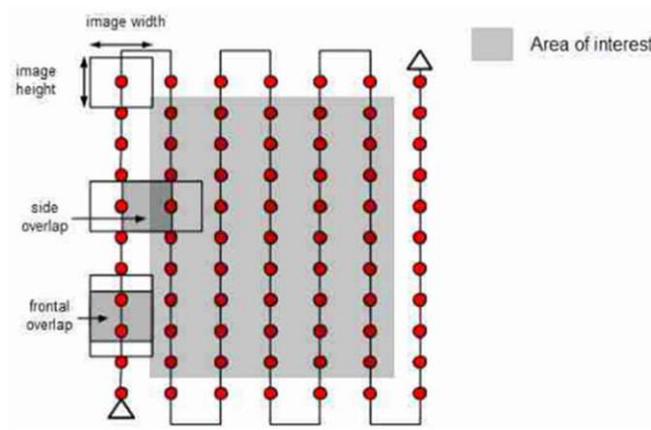


Abbildung 6: Optimale Aufnahme vom Objekt für Photogrammetrie<sup>54</sup>

## 2.2.2 Stereovision

Stereovision ist eine 3D-Scanmethode, die sich für kleinere Projekte oder Innenraumprojekte eignet, bei denen eine höhere Genauigkeit erforderlich ist. Sie verwendet Stereokameras, um die Tiefe im Sichtfeld der Kamera zu schätzen. Das System besteht aus zwei parallel montierten Kameras, vereinfacht dargestellt in Abbildung 7. Durch Kalibrierung wird die räumliche Beziehung zwischen den Kameras bestimmt. Die Disparität, also der Unterschied in der Position eines Objekts in den beiden Bildern, wird genutzt, um die Tiefe zu berechnen. Dies ermöglicht die Erstellung von 3D-Bildern und Punktwolken zur Visualisierung und Analyse von Objekten.<sup>55</sup>

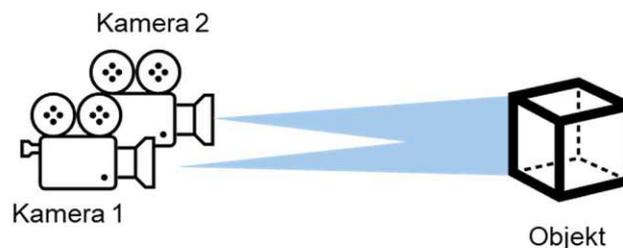


Abbildung 7: Funktionsprinzip Stereovision<sup>56</sup>

## 2.2.3 LiDAR

Lasermessungen bieten eine weitere Möglichkeit, Tiefeninformationen der Umgebung zu erhalten. Hier wird das Konzept der Laufzeit eines reflektierten Lichtsignals genutzt. Die dazu verwendeten LiDAR-Sensoren haben eine große Reichweite von 100 Metern und eine Genauigkeit im Millimeterbereich. In den letzten Jahren haben LiDAR-Sensoren viel Aufmerksamkeit erhalten, hauptsächlich aufgrund ihrer umfangreichen

<sup>54</sup> Pix4D SA, o.D., S.11.

<sup>55</sup> vgl. Dinesh, 2012.

<sup>56</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Hompel et al., 2020, S. 111.

Nutzung in autonomen Fahrtechnologien. Dies führte zu vielen verfügbaren LiDAR-Sensoren am Markt.<sup>57</sup>

LiDAR wird speziell für die 3D-Rekonstruktion in Kombination mit SLAM-Algorithmen verwendet. SLAM steht für simultaneous localization and mapping. Ein weit verbreitetes Echtzeit-Verfahren zur 3D-Kartierung, das einen LiDAR Sensor verwendet ist LOAM, was für lidar odometry and mapping steht. Diese Methode erreicht Echtzeit-Performance, indem das SLAM-Problem in einen Odometrie-Schätzalgorithmus und einen Kartierungsoptimierungsalgorithmus aufgeteilt wird. Der Odometrie-Schätzalgorithmus läuft mit hoher Frequenz und niedriger Genauigkeit, während der Kartierungsoptimierungsalgorithmus mit einer um eine Größenordnung niedrigeren Frequenz und hoher Genauigkeit für das Scan-Matching arbeitet.<sup>58 59</sup>

Die Erstellung von 3D-Abbildern erfordert viel Planung und Präzision. Wie aus diesem Kapitel hervorgeht, ist abhängig von der vorhandenen Hardware und Expertise, die geeignete Methodik zur Erlangung eines 3D-Modells zu wählen.

## 2.3 Digitaler Zwilling im Logistikbereich

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen eines digitalen Zwillings, speziell im Logistikbereich, erörtert. Dazu wird der Begriff zuerst erklärt und für diese Arbeit definiert. Anschließend wird der Prozess der Erstellung des digitalen Zwillings dargestellt.

### 2.3.1 Begriffserklärung und Definition vom digitalen Zwilling

Digitale Modelle sind längst ein etablierter Standard in der Industrie und werden bei der Produktentwicklung als CAD-File, bei der digitalen Absicherung als Simulation, innerhalb der Produktion als CAM-File oder im Marketing eingesetzt. CAD steht hierbei für computer aided desing und CAM für computer aided manufacturing. Mithilfe dessen sollen vor der eigentlichen Produktion oder Nutzung eines Produkts Untersuchungen und Analysen erfolgen. Die Nutzung eines digitalen Zwillings geht darüber hinaus. Er setzt sich in der Regel aus dem realen und digitalen Objekt zusammen, welche verknüpft sind.<sup>60</sup> Der Begriff „Digitaler Zwilling“ hat sich über mehrere Jahre hinweg in verschiedenen industriellen Kontexten entwickelt. Er wird durch Technologien, Werkzeuge und Simulationen unterstützt und reicht bis hin zu grafischen Darstellungen und Serviceplattformen. Es gibt diverse Definitionen des digitalen Zwillings. Dieser wird als kontextualisiertes Softwaremodell eines realen Objekts betrachtet, welches typischerweise ein physisches Objekt darstellt. Ein

<sup>57</sup> vgl. Meiselwitz, 2021, S. 518.

<sup>58</sup> vgl. Zhang und Singh, 2014, S. 1 ff.

<sup>59</sup> vgl. Meiselwitz, 2021, S. 518.

<sup>60</sup> vgl. Matysczok, 2023, S. 113–114.

kontextualisiertes Modell stellt ein Replikat vom Verhalten des physischen Objekts in einer Software dar. Die Komplexität eines digitalen Zwillinges kann stark variieren und schnell zunehmen, wenn sämtliche Komponenten des physischen Objekts berücksichtigt werden. Beziehungen und Abhängigkeiten müssen modelliert werden, weshalb die Komplexität vom digitalen Zwilling auch von dessen Umgebung abhängt.<sup>61</sup> In der Industrie 4.0 ist der digitale Zwilling ein wichtiger Bestandteil und ermöglicht Anwendungen wie virtuelles Prototyping, Predictive Maintenance oder die Steuerung von Produktions- und Logistikprozesse.<sup>62</sup>

Zur Verbesserung von realen Systemen mittels digitaler Modelle ist ein fundiertes Expertenwissen erforderlich, was meist im Bereich von Klein- und Mittelunternehmen nicht vorhanden ist. Es werden Analysen und Optimierungen in digitalen Planungstools durchgeführt, welche beispielsweise statische Layout- und Materialflussanalysen beinhalten.<sup>63</sup> Der digitale Zwilling findet weitere Anwendungsfälle. Beispiele dafür sind die Digitalisierung, Visualisierung, Simulation, Monitoring, Analytik und Steuerung. Bei der Visualisierung werden physische Assets digital dargestellt. So kann darunter das 3D-Modell einer Fabrik und das zugehörige 2D-Layout fallen.<sup>64</sup> Ebenso spielt der digitale Zwilling in der Baubranche eine wichtige Rolle. Er wird bei der Instandhaltung eingesetzt, wo als Grundlage von Informationen ein 3D-Modell dient.<sup>65</sup>

In Zusammenhang mit dem digitalen Zwilling werden ebenso die Begriffe vom digitalen Modell als auch vom digitalen Schatten verwendet. Die gegebenen Definitionen unterscheiden sich jedoch in Bezug auf den Grad der Integration der Daten zwischen dem physischen und dem digitalen Gegenstück. Der in Abbildung 8 dargestellte Zusammenhang zwischen physischem und digitalem Gegenstück stellt die Unterschiede der drei Begriffe dar. Ein digitales Modell ist eine Darstellung eines existierenden oder geplanten physischen Objekts, bei der kein automatisierter Datenaustausch stattfindet. Die Datenintegration erfolgt manuell, sodass Änderungen im physischen Objekt keine direkten Auswirkungen auf das digitale Modell haben. Ein digitaler Schatten liegt vor, wenn ein automatisierter, einseitiger Datenfluss vom physischen Objekt zum digitalen Objekt stattfindet. Ein digitaler Zwilling ist durch eine vollständig integrierte, bidirektionale Datenverbindung zwischen dem physischen und dem digitalen Objekt charakterisiert. Dies impliziert, dass Veränderungen im physischen Objekt unmittelbar Auswirkungen auf das digitale Objekt haben und umgekehrt.<sup>66</sup>

<sup>61</sup> vgl. Crespi et al., 2023, S. 4–5.

<sup>62</sup> vgl. Follath et al., 2022, S. 691.

<sup>63</sup> vgl. Schlecht et al., 2021, S. 54.

<sup>64</sup> vgl. Follath et al., 2022, S. 693.

<sup>65</sup> vgl. Wedel et al., 2022, S. 104.

<sup>66</sup> vgl. Kritzingler et al., 2018, S. 1017.

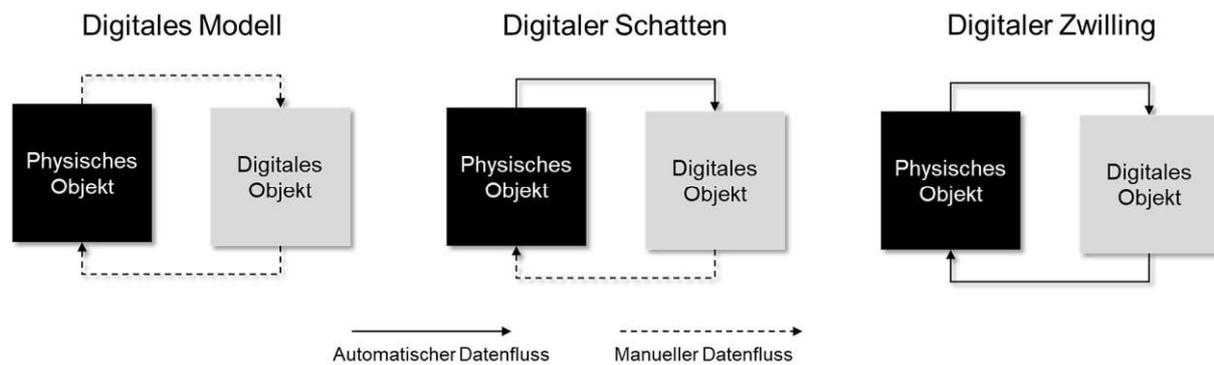


Abbildung 8: Datenintegration der drei Begrifflichkeiten<sup>67</sup>

Nach ISO-Norm 23247-1:2021 ist der digitale Zwilling eine digitale Darstellung eines physischen Elements mit Synchronisierung zwischen dem Element und seiner digitalen Darstellung, die für den jeweiligen Zweck geeignet ist.<sup>68</sup>

In der vorliegenden Arbeit werden Teile eines digitalen Zwillings, wie sie im nachfolgenden Kapitel dargelegt werden, übernommen. Der Fokus liegt auf dem digitalen Modell, welches gemäß Abbildung 8 eine Vorstufe zum digitalen Zwilling darstellt.

### 2.3.2 Prozess der Erstellung eines digitalen Zwillings

Der Prozess der Erstellung eines digitalen Zwillings ist nicht allgemeingültig aufgebaut. In der Literatur finden sich je nach Use-Case entsprechende Vorgehensmodelle. Eine dieser Möglichkeiten kann wie in Abbildung 9 illustriert, durchgeführt werden. Dabei wird ein System mit einem Scanner oder einer hochauflösenden Kamera aufgenommen und eine Punktwolke generiert. Diese Punktwolke wird im nächsten Schritt in ein CAD-Modell modelliert. Abschließend wird ein Simulationsmodell erarbeitet, welches in den digitalen Zwilling übergeführt wird. Hierbei fließen unternehmensspezifische Daten, welches beispielsweise durch Expertenwissen untermauert wird, mit ein. Für das Simulationsmodell und für die Punktwolken werden Datenbanken herangezogen, welche unterschiedlichste Parameter enthalten können, wie zum Beispiel Arbeitsstationen, Maschinentypen, Transportmittel, Transportrouten, et cetera.<sup>69</sup>

<sup>67</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Kritzinger et al., 2018, S. 1017.

<sup>68</sup> vgl. ISO 23247-1:2021, S. 3.

<sup>69</sup> vgl. Sommer et al., 2023, S. 6 ff.

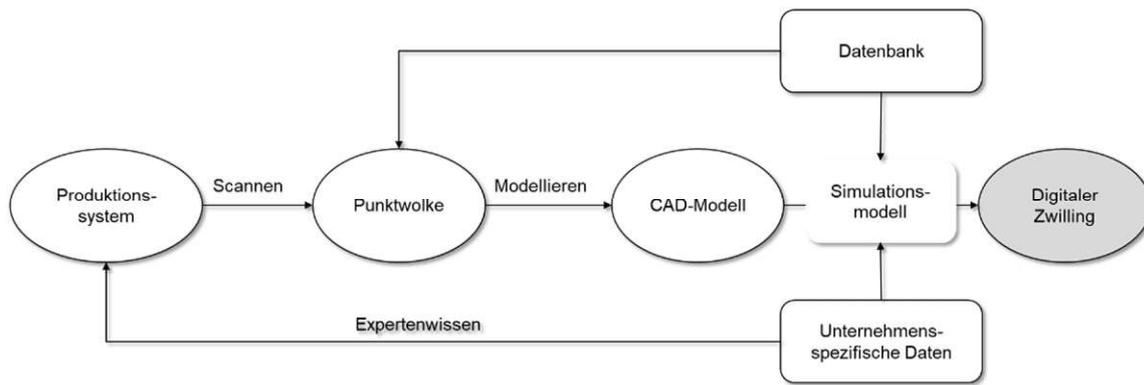


Abbildung 9: Prozess für den Aufbau eines digitalen Zwillings<sup>70</sup>

In Anlehnung an das CRISP-DM-Prozessdiagramm kann ein weiteres Vorgehensmodell zur Entwicklung digitaler Zwillinge in Produktion und Logistik etabliert werden, dargestellt in Abbildung 10. Der Prozess ist in sechs Phasen unterteilt, die zyklisch und flexibel durchlaufen werden können. Zunächst wird im Rahmen des Betriebsverständnisses der Anwendungsfall ermittelt und die Ist-Situation analysiert. In diesem Kontext wird die Problemstellung definiert, um das Verständnis für die Aufgabe zu erleichtern und die Projektdetaillierung zu bewerten. Aus der Kombination vom Anwendungsfall und der Ist-Situation werden die Ziele und Erfolgskriterien bestimmt. Mit der Erstellung eines Projektplans wird die Phase des Betriebsverständnisses abgeschlossen. Die zweite Phase, das Systemverständnis, ersetzt das ursprüngliche Datenverständnis. In dieser Phase erfolgt die Vorbereitung der Systemintegration durch Bereitstellung von Schnittstellen, Daten und Tools für den digitalen Zwilling. Die Modellierungsphase umfasst die Erfassung, Formatierung und Aggregation von Daten sowie die Beschreibung des digitalen Modells und erste Untersuchungen. Verschiedene Methoden und Tools werden getestet und dokumentiert, die gewonnenen Erkenntnisse werden bewertet und mögliche Probleme beschrieben. Die Systemvorbereitung beinhaltet die Analyse von Daten und die Behebung von Problemen hinsichtlich der Datenqualität. Im Anschluss werden alle relevanten Daten, Tools, Schnittstellen und Übertragungsformate ausgewählt, die Modellierungstechniken festgelegt und die Komponenten des digitalen Zwillings modelliert und getestet. Nach erfolgreicher Modellierung wird der digitale Zwilling durch Verbindung aller Komponenten entwickelt. Abschließend erfolgt die Evaluierung des digitalen Zwillings durch Tests. Der Prozess ist iterativ, sodass frühere Phasen bei Bedarf erneut durchlaufen werden können. Ziel ist die Entwicklung und Anwendung eines vollumfänglichen digitalen Zwillings.<sup>71</sup>

<sup>70</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Sommer et al., 2023, S. 7.

<sup>71</sup> vgl. Follath et al., 2022, S. 693 ff.

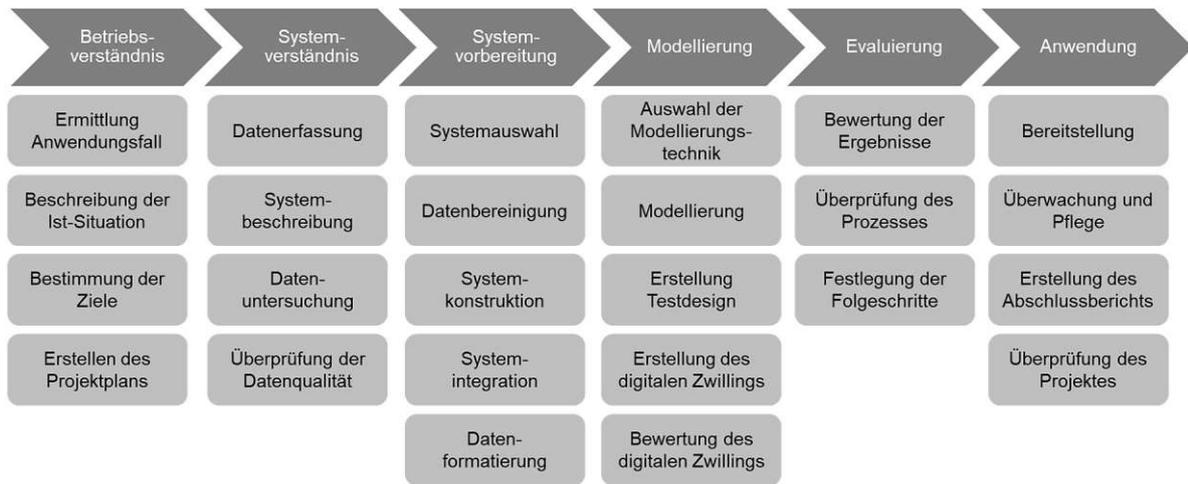


Abbildung 10: Vorgehensmodell zur Entwicklung digitaler Zwillinge in Produktion und Logistik<sup>72</sup>

## 2.4 Ressourcenmittel zum Transport von Sensoren

Für die Erfassung von räumlichen Daten und weiteren Verarbeitung zu einem digitalen Modell gibt es verschiedene Lösungen. Neben Ressourcenmitteln zum Transport der Sensoren zur Datenaufnahme wie manuelle Möglichkeiten, können auch fahrerlose Transportsysteme, Drohnen oder Roboterhunde eingesetzt werden. Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, gibt es mehrere Möglichkeiten, ein digitales Modell zu erstellen. In diesem Kapitel werden ausschließlich die möglichen Arten der Fortbewegung des Datenerfassungstools erläutert. Auf diese Fortbewegungsmittel beziehungsweise Ressourcenmittel können im Regelfall Sensoren angebracht werden oder diese sind fix verbaut.

Zur Datenaufnahme für eine 3D Rekonstruktion einer Umgebung können in erster Linie alle möglichen handlichen Geräte und Sensoren eingesetzt werden, welche von einer Person getragen werden können. Eine Option stellt ein Rucksack vom Hersteller Leica dar, welcher mit LiDAR ausgestattet ist. Der Leica Pegasus:Backpack, dargestellt in Abbildung 11, ist ein tragbares Mobile-Mapping-System, das für den Innen- und Außeneinsatz konzipiert ist. Das System kombiniert einen 200-Meter-Langstrecken-3D-Laserscanner mit fünf Kameras, die eine 360-Grad-Ansicht bieten. Das System nutzt Simultaneous Localization and Mapping Technologie und eine inertielle Messeinheit, um auch bei Satelliten-abgeschirmten Bereichen eine genaue Positionierung zu gewährleisten. Der Rucksack ist ergonomisch gestaltet und leicht, was ein einfaches Tragen und gleichzeitige Datenaufnahme ermöglicht.<sup>73</sup>

<sup>72</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Follath et al., 2022, S. 694.

<sup>73</sup> vgl. Leica, o.D.



Abbildung 11: Leica Pegasus Rucksack<sup>74</sup>

Neben der oben genannten Möglichkeit können Roboterhunde eingesetzt werden. Sie sind vielseitige, vierbeinige Roboter, welche speziell für die Forschung und Entwicklung autonomer Systeme konzipiert wurden. Einer dieser ist der A1 Unitree Robot, dargestellt in Abbildung 12. Er zeichnet sich durch seine hohe Beweglichkeit und Stabilität aus, die durch 12 Freiheitsgrade und fortschrittliche dynamische Balancieralgorithmen erreicht werden. Der Roboter ist mit verschiedenen Sensoren ausgestattet, darunter ein IMU- und ein LiDAR-Sensor, die eine präzise Datenerfassung und Hindernisvermeidung ermöglichen. IMU steht hierbei für Inertial Measurement Unit. Darüber hinaus ist der Roboter mit verschiedenen Erweiterungsmodulen kompatibel, wie beispielsweise Tiefenkameras, Ultraschallsensoren und Mikrofone, wodurch er seine Funktionalität erweitert. Mit einer maximalen Geschwindigkeit von rund 3 Metern pro Sekunde zeichnet sich der Roboter durch eine hohe Bewegungsgeschwindigkeit aus, die annähernd der Geschwindigkeit eines joggenden Erwachsenen entspricht. Des Weiteren ist der Roboter in der Lage, eine Nutzlast von bis zu 5 Kilogramm zu tragen, und weist eine Betriebsdauer von 1 bis 2,5 Stunden auf.<sup>75</sup>

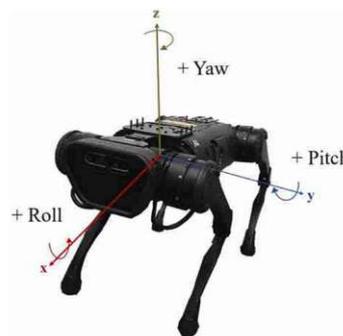


Abbildung 12: Robo-Hund<sup>76</sup>

Neben dem Roboterhund können fahrerlose Transportsysteme eingesetzt werden, auf denen Sensoren zur Datenaufnahme platziert werden. Eine weitere Kategorie stellen Drohnen dar, deren Möglichkeiten vielfältig sind. Diese können entweder mit externen

<sup>74</sup> Leica, o.D.

<sup>75</sup> vgl. Unitree Robotics o.D.

<sup>76</sup> Kim et al., 2022, S. 3.

Sensoren bestückt werden oder sind damit von Grund auf ausgestattet. Im nachfolgenden Kapitel wird auf diese Technologie näher eingegangen.

## 2.5 Allgemeines und Fakten zu Drohnen

Drohnen haben in den letzten Jahren eine bemerkenswerte Entwicklung durchlaufen und sind aus vielen Bereichen des modernen Alltags nicht mehr wegzudenken. Neben der ursprünglichen Entwicklung für militärische Zwecke, haben Drohnen mittlerweile eine Vielzahl von zivilen Anwendungen gefunden.

### 2.5.1 Bezeichnungen von Drohnen

Um einen Überblick über gängige Kurzbezeichnungen von Drohnen zu erhalten, werden in diesem Unterkapitel wesentliche Kurzformen dargestellt.

Die Bezeichnung von Drohnen findet sich durch diverse Abkürzungen und Bezeichnungen in der Literatur wieder. Das unbemannte Luftfahrzeug wird in der englischen Sprache vermehrt als UAS oder UAV bezeichnet. Dabei steht UAS für unmanned aircraft system<sup>77</sup> und UAV für unmanned aerial vehicle.<sup>78</sup> Ferner werden weitere Begriffe und Abkürzungen verwendet, welche durch den Verein Deutscher Ingenieure zusammengefasst wurden.<sup>79</sup> Diese finden sich in Tabelle 1 wieder.

Abkürzung	Bezeichnung
MAV	Micro/Mini Aerial Vehicle
NEMS	Micro Electro-Mechanical System
NAV	Nano Air Vehicle
OAV	Organic Aerial Vehicle
RPAS	Remote Piloted Aerial System
RPV	Remote Piloted Vehicle
STUAV	Small Tactical UAV
TUAV	Tactical Unmanned Aerial Vehicle
AUS	Unmanned Aerial/Aircrat System
UAV	Unmanned/Uninhabited Aerial Vehicle Unmanned Aerial Vehicle(s) Unmanned Aerospace Vehicle(s) Uninhabited Aircraft Vehicle Unmanned Air Vehicle Unmanned Airborne Vehicle Unmanned Autonomous Vehicle Unmanned Vehicle Upper Atmosphere Vehicle
VTUAV/VTOL UAV	Vertical Take-off and Landing Unmanned Aerial Vehicle

**Tabelle 1: Abkürzungen und Bezeichnungen des Begriffs Drohne<sup>80</sup>**

<sup>77</sup> vgl. (EU) 2019/947 II 1.

<sup>78</sup> vgl. Seel et al., 2022, S. 388ff.

<sup>79</sup> vgl. VDI 2879, 2018, S. 5.

<sup>80</sup> vgl. VDI 2879, S. 5.

In weiterer Folge wird in dieser Arbeit in Anlehnung an die Durchführungsverordnung der Europäischen Kommission unter dem Begriff Drohne ein unbemanntes Luftfahrzeug oder Luftfahrzeugsystem verstanden.<sup>81</sup> Der Begriff umfasst dabei jegliche in der Literatur recherchierten Abkürzungen, wie in Tabelle 1 aufgelistet.

## 2.5.2 Markt von Drohnen

Durch den Einsatz der Drohne ergeben sich aktuell vermehrt Einsatzgebiete in den Bereichen von Landwirtschaft, Militär, Transportsystemen, Stadtplanung, Luftraumüberwachung, Rettungseinsätzen, industriellen Inspektionen und weiteren Teilen. Dies zeigt, dass die Drohne eine vermehrt wichtige Position in der Industrie, Forschung und Entwicklung einnimmt.<sup>82</sup>

Die globale Entwicklung des kommerziellen Drohnenmarktes zeigt einen Wandel in den vergangenen Jahren. Der Einsatz von Drohnen, insbesondere für Überwachungszwecke, ist aufgrund mangelnder langlebiger Energiequellen zuletzt zurückgegangen. Trotz dieser Herausforderung expandieren die Drohnen-Industrien weiterhin und zeigen seither eine konstante Entwicklung.<sup>83</sup> Laut einer Analyse von Drone Industry Insights wird der Umsatz des Drohnenmarkts bis zum Jahr 2030 steigen. Ausgehend von einem weltweiten Umsatz von 26,6 Milliarden US-Dollar im Jahr 2021 stieg dieser auf 36,7 Milliarden US-Dollar im Jahr 2024. Der Verlauf weist laut der Statistik in Zukunft eine kontinuierliche Steigung pro Jahr auf. So sollen im Jahr 2030 insgesamt 55,8 Milliarden US-Dollar am Drohnenmarkt umgesetzt werden, was zwischen den Jahren 2024 bis 2030 einer jährlichen Wachstumsrate von 7,23% entspricht.<sup>84</sup> Der prognostizierte Umsatz ist in Abbildung 13 dargestellt.

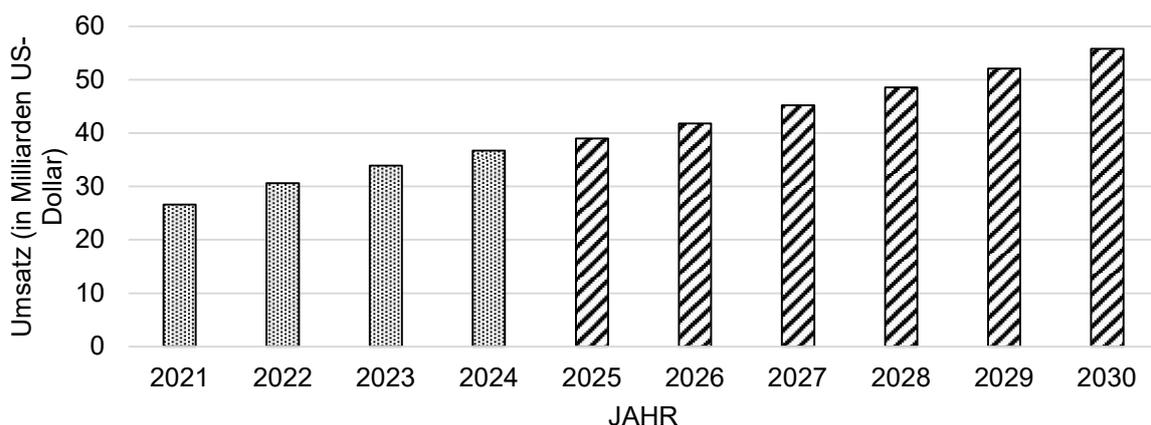


Abbildung 13: Prognostizierter Umsatz der industriellen Drohnenindustrie<sup>85</sup>

<sup>81</sup> vgl. (EU) 2019/947 II 1.

<sup>82</sup> vgl. Chhikara et al., 2021, S. 4448.

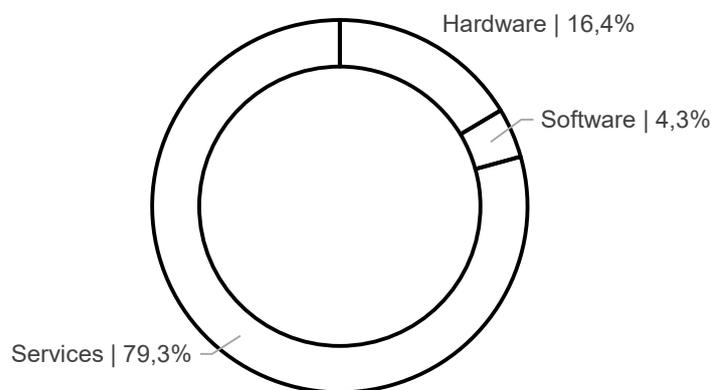
<sup>83</sup> vgl. Edulakanti und Ganguly, 2023, S. 4.

<sup>84</sup> vgl. Drone Industry Insights, 2022.

<sup>85</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Drone Industry Insights, 2022.

Die kontinuierliche technologische Innovation und die steigende Nachfrage in verschiedenen Anwendungsbereichen haben das Wachstum des Drohnenmarktes in den letzten Jahren signifikant vorangetrieben. Einer weiteren Statistik von Drone Industry Insights aus dem Jahr 2021 zufolge, kann der Marktanteil von Drohnenanbietern nach Segmenten unterteilt werden. Dazu zählen die Segmente Hardware, Software und Services. Hardware-Anbieter umfassen dabei Unternehmen, die mit unbemannten Luftfahrtsystemen und zusätzliche Komponenten beziehungsweise Systemen Einnahmen erzielen. Darunter fallen nicht Hersteller von Anti-Drohnen-Systemen und Passagierdrohnen. Software-Anbieter stellen Unternehmen dar, welche die Software für Arbeitsabläufe, Datenanalysen, Flotten- und Betriebsmanagement, Flugplanung, Navigation und Computer Vision zur Verfügung stellen. Zu den Services beziehungsweise Dienstleistenden zählen Unternehmen, welche Umsätze durch geschäftsinterne Drohnenoperationen erzielen. Im Übrigen sind diesem Sektor Drohnenoperationen für Dritte, Systemintegrationen, Engineering sowie Beratung, Ausbildung, Simulation und Schulung zugeordnet.<sup>86</sup>

Wie aus Abbildung 14 hervorgeht, nimmt das Segment Hardware 16,4% des gesamten Marktanteils für Drohnen ein. Das Segment Software nimmt 4,3% ein und der größte Anteil fällt auf Services, mit insgesamt 79,3%.



**Abbildung 14: Anteile von Anbietern des Drohnenmarkts nach Segmenten<sup>87</sup>**

Insgesamt kann aus den obigen Statistiken festgehalten werden, dass das Wachstum des Markts der Drohne eine positive Zukunft aufweist. Sowohl Anbieter von Hardware und Software als auch Dienstleistende sind gefordert, sämtliche Aspekte der Drohne weiterzuentwickeln.

<sup>86</sup> vgl. Drone Industry Insights, 2021.

<sup>87</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Drone Industry Insights, 2021.

### 2.5.3 Entwicklung der Technologie „Drohne“

In einer Umfrage von MHI und Deloitte wurden Befragte gebeten, den Einsatz bestimmter innovativer Technologien in deren Unternehmen als "Aktuell im Einsatz", "Einsatz in den nächsten 5 Jahren" oder "Unwahrscheinliche Implementierung" zu kategorisieren. Die Umfrage wurde 2023 durchgeführt und es wurden dabei 1675 Supply-Chain-Fachpersonen aus einem breiten Spektrum von Unternehmenstypen und -branchen global befragt. Die Hälfte der Teilnehmenden sind Führungskräfte mit der Funktion als CEO, Vizepräsident:in, Geschäftsführende oder Abteilungsleitende. Die Größe der befragten Unternehmen umfassen Klein- und Großunternehmen. 57% der Teilnehmenden weisen einen Jahresumsatz von mehr als 100 Millionen US-Dollar auf und 6% von 10 Milliarden US-Dollar oder mehr. Wie aus Abbildung 15 hervorgeht, wurden dabei die interviewten Personen nach den Technologien industrielles IoT, 3D/4D-Druck, erweiterte Analytik, Cloud-Computing und Speicherung, Bestands- und Netzwerkoptimierung, tragbare und mobile Technologie, Robotik und Automatisierung, autonome Fahrzeuge und Drohnen, Sensoren und automatische Identifikation, Blockchain und distributed Ledger-Technologien und KI-Technologien befragt. Dabei stellt sich heraus, dass autonome Fahrzeuge und Drohnen bei 27% der Befragten aktuell im Einsatz sind. 49% geben an, dass sie einen Einsatz der Technologie in den nächsten 5 Jahren erwarten. 24% der Befragten geben an, diese Technologie im Unternehmen nicht einzuführen.<sup>88</sup>

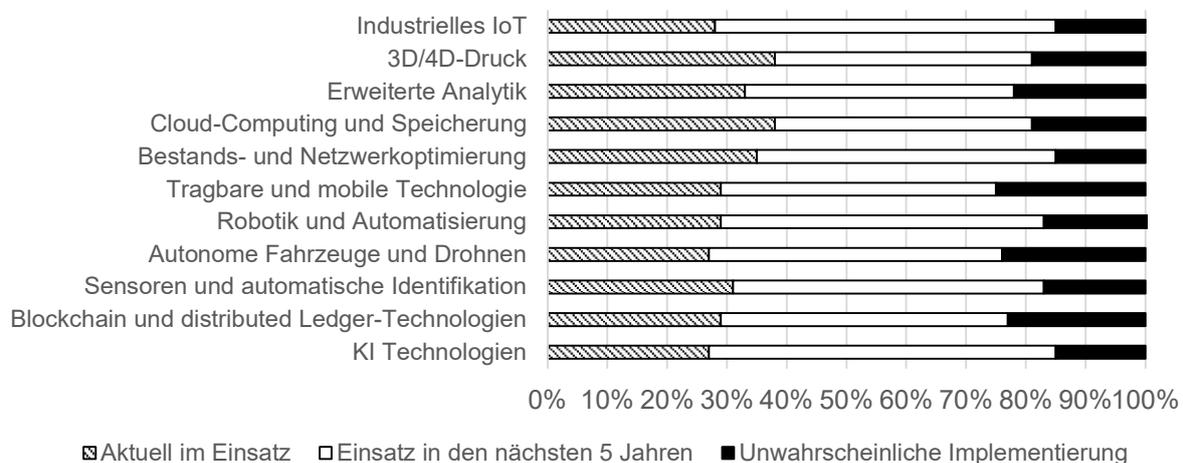


Abbildung 15: Umfrageergebnisse - Einführung von Technologien<sup>89</sup>

Die durchgeführte Umfrage zeigt, dass Unternehmen für neue Technologien offen sind und dies auch zwischen den Technologien ausgeglichen ist. Zu beachten ist jedenfalls, dass eine mögliche Implementierung von der Branche des Unternehmens abhängt.

<sup>88</sup> vgl. MHI und Deloitte, 2024, S. 46.

<sup>89</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an MHI und Deloitte, 2024, S. 21.

Die Vorhersage, wie erfolgreich eine neu eingesetzte Technologie am Markt ist, stellt sich als komplex dar, da sie von zahlreichen Faktoren wie Markttrends, Kundenakzeptanz, technologischen Fortschritten und dem Wettbewerb beeinflusst wird. Der Gartner Hype Cycle stellt den Reifegrad und die Akzeptanz von neuen Technologien und Anwendungen für die Lösung von Geschäftsproblemen dar. Dabei werden Erwartungen der verstrichenen Zeit gegenübergestellt und in fünf Phasen unterteilt, welche den Innovationsauslöser, den Gipfel der überhöhten Erwartungen, das Tal der Enttäuschungen, den Pfad der Erleuchtung und das Plateau der Produktivität umfassen.<sup>90</sup>

Das Phänomen der Gartner Hype Logik findet sich in sämtlichen Technologiebranchen wieder und ist in Abbildung 16 illustriert. Der Start der Kurve beginnt dabei mit dem Innovationsauslöser, welcher durch ein Ereignis Aufmerksamkeit und Interesse an einer Technologie erzeugt. Danach folgt der Gipfel der überhöhten Erwartungen, wo Unternehmen, welche technologisch innovativ sind, die neu konzipierte Technologie anwenden, um einen Vorsprung gegenüber Konkurrenten zu haben. Dabei setzt ein so genannter Mitläufereffekt ein und die Innovation wird an ihre Grenzen ausgereizt. Nach dem Gipfel der überhöhten Erwartungen setzt das Tal der Ernüchterung ein. Probleme mit der Leistung, eine langsamere als erwartete Einführung oder das Versäumnis, in der erwarteten Zeit finanzielle Erträge zu liefern, führen zu enttäuschten Erwartungen. Im Pfad der Erleuchtung überwinden frühe Anwender die anfänglichen Hürden und erzielen dabei erste Erfolge. Aus Basis dessen Erfahrungen wächst das Verständnis in der Branche, in welchen Bereichen die Innovation sinnvoll eingesetzt werden kann. Die innovative Technologie reift aufgrund kontinuierlicher Verbesserung im Laufe der Zeit. Im Plateau der Produktivität steigt die Akzeptanz, da nachgewiesene Vorteile in der realen Umgebung aufgezeigt werden. Die Produktivität steigt.<sup>91</sup>

<sup>90</sup> vgl. Gartner, Inc. o.D.

<sup>91</sup> vgl. Fenn und Raskino, 2008, S. 7 ff.

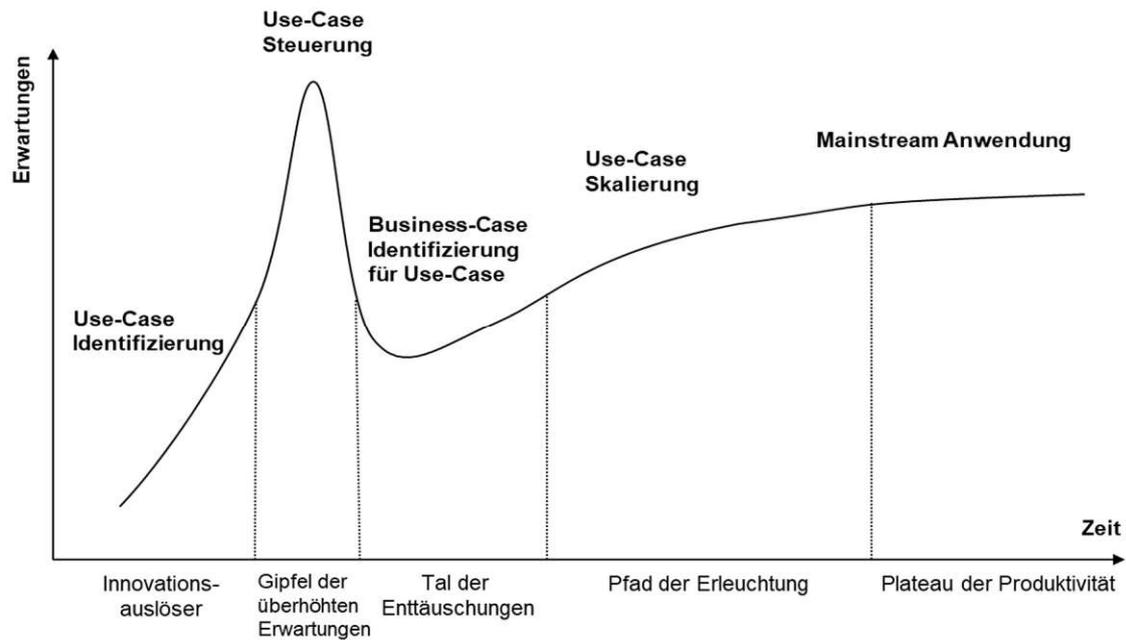


Abbildung 16: Gartner Hype Kurve angewandt auf die Entwicklung neuer Technologien<sup>92</sup>

Bei der Entwicklung und Anwendung des innovativen Einsatzes einer Drohne in der Industrie, kann letztendlich der oben beschriebene Zyklus angewandt werden. In welcher Phase sich die Innovation des Einsatzes der Drohne aktuell befindet ist schwer einzuschätzen. So gab es im Jahr 2018 noch wenige etablierte Anwendungen von Drohnen in der Fertigung zu finden<sup>93</sup>, was sich jedoch nach dem erwarteten Umsatz der industriellen Drohnenindustrie in Abbildung 13 in Zukunft ändern wird. Unter der Berücksichtigung der Umfrageergebnisse aus Abbildung 15 kann man ebenfalls schließen, dass es zukunftssträchtige Use-Cases für Drohnen geben wird und diese womöglich von einer Business-Case Identifizierung bis hin zu Mainstream Anwendungen übergehen wird.

## 2.5.4 Einsatzmöglichkeiten von Drohnen in der Industrie

Die Einsatzmöglichkeiten von Drohnen in der Industrie sind vielfältig und können in Kategorien eingeteilt werden. Wie aus Abbildung 17 hervorgeht, sind diese von den analytischen und physischen Fähigkeiten der Drohne abhängig. Dabei wird jede Fähigkeit als gering oder hoch gewichtet. Aus Kombination beider Fähigkeiten ergeben sich somit Anwendungen, welche das Erkennen, Transformieren, Sehen oder Bewegen beschreiben. Wird die Drohne zum Sehen eingesetzt, so werden sowohl geringe analytische als auch physische Fähigkeiten gefordert. Ein Beispiel dafür ist die visuelle Inspektion. Standardmäßige Drohnen entsprechen im Normalfall diesen Anforderungen. Dabei sei zu erwähnen, dass dies auch den Umständen entspricht und abhängig davon ist, ob zusätzliche Sensoren für Innenflüge angebracht werden

<sup>92</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Maghazei et al., 2022, S. 575.

<sup>93</sup> vgl. Maghazei und Netland, 2020, S. 1249.

müssen. Für das Bewegen von Gütern durch eine Drohne, beispielsweise in der Intralogistik, werden hohe physische und geringe analytische Fähigkeiten gefordert. Beim Einsatz der Drohne zum Erkennen, sind anders als beim Fall des Bewegens, hohe analytische und geringe physische Fähigkeiten gefordert. Anwendungsfälle sind hier zum Beispiel 3D-Mapping oder eine Zykluszahl. Die vierte Kategorie, das Transformieren, erfordert sowohl hohe analytische als auch physische Fähigkeiten. Ein möglicher Use-Case ist die Kommissionierung im Lager.<sup>94</sup>

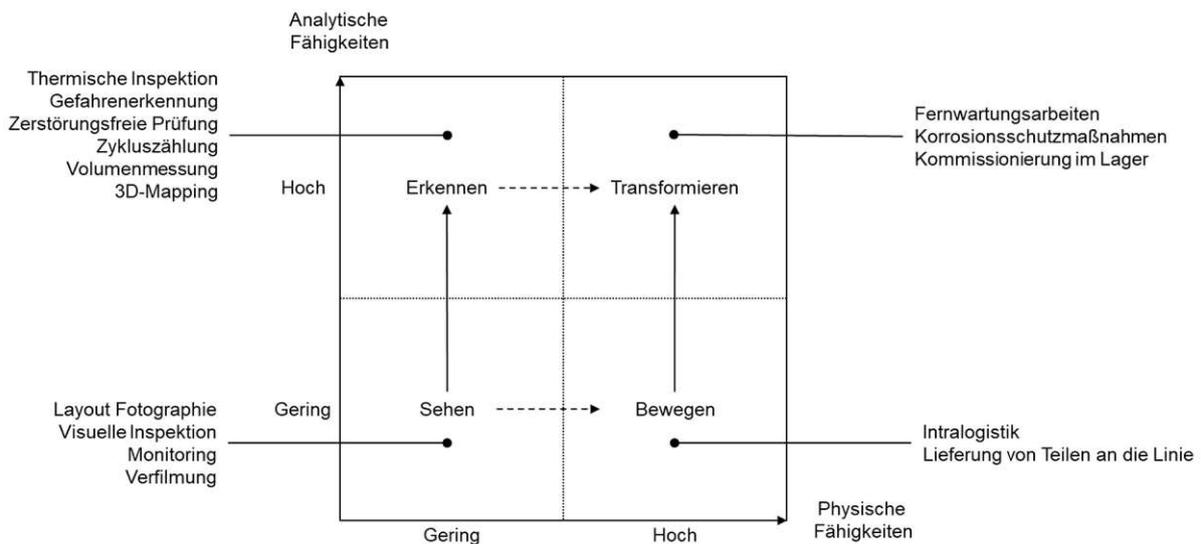


Abbildung 17: Anwendungsfälle einer Drohne in der Industrie<sup>95</sup>

Durch Weiterentwicklungen der Hardwarekomponenten und Softwares von Drohnen, zeigen sich fortlaufend weitere mögliche Anwendungsfälle. Der Markt passt sich an Bedürfnisse von Kunden an und es ergeben sich weitere Forschungsfelder.

Einer Umfrage von den Jahren 2016 bis 2018 im Operations Management zufolge, konnten zehn potenzielle Use-Cases für Drohnen in der Industrie erhoben werden. Am öftesten wurde dabei angeführt, dass eine Inspektion mit einer Drohne ein Use-Case ist, was insgesamt 50% der Befragten erwähnten. 14% der Befragten geben externe Logistik an, 12% wiederum erwähnen Zahlungen in der Bestandsverwaltung als potenziellen Use-Case. 6% der Befragten geben sowohl die Erkennung von Gaslecks und Aufgaben in der Intralogistik an. 4% geben jeweils den Einsatz im Bauprojektmanagement, als auch in der Kommissionierung und Sortierung an. 2% erwähnen Notfalllieferungen. 1% der interviewten Personen geben Layout-Mapping an. Weitere 1% geben Überwachungs- und Kontrollsysteme an.<sup>96</sup> Die Aufteilung der Ergebnisse ist in Abbildung 18 dargestellt.

<sup>94</sup> vgl. Maghazei und Netland, 2020, S. 1243 ff.

<sup>95</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Maghazei und Netland, 2020, S.1250.

<sup>96</sup> vgl. Maghazei et al., 2022, S. 569 f.

Für die dargestellten Use-Cases lassen sich mögliche Beispiele anführen. Die Inspektion kann dabei eine Inspektion einer Gasfackel umfassen. Für externe Logistikzwecke kann eine Drohne als Liefersystem eingesetzt werden, um Teile auf Offshore Ölplattformen zu transportieren. Unter der Zählung in der Lagerverwaltung fällt die Lagerinventur. Bei der Erkennung von Gaslecks können gefährliche Austritte von Stoffen in petrochemischen Anlagen aufgedeckt werden. Unter dem Use-Case Intralogistik wird ein Transport innerhalb eines Werks verstanden. Für das Bauprojektmanagement kann ein 3D-Scanner in Form von einer Kamera oder einem LiDAR-Scanner eingesetzt werden, um Gebäude zu scannen oder den Projektfortschritt zu beobachten. Kommissionierung und Sortierung kann durch Drohnen im E-Commerce erfolgen. Mittels Notfalllieferungen können Ersatzteile bei Überholungsarbeiten rasch übermittelt werden. Beim Layout-Mapping kann eine Drohne Fabriklayouts erfassen und bewerten, welche oftmals nicht vorliegen. Als Use-Case Überwachungs- und Kontrollsysteme können Drohnen unterstützend für Polizeistreifen und Sicherheitsteams eingesetzt werden.<sup>97</sup>

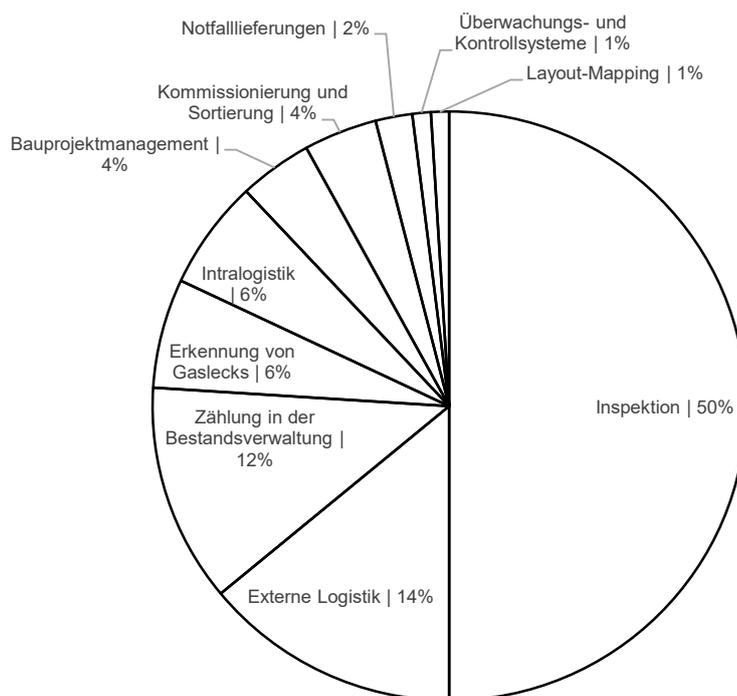


Abbildung 18: Top 10 Use-Cases für Drohnen aus dem Jahr 2018<sup>98</sup>

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Drohne eine wesentliche Rolle in der Industrie spielt. Aus den obigen Inhalten geht hervor, dass dem Einsatz der Drohne kaum Grenzen gesetzt sind.

<sup>97</sup> vgl. Maghazei et al., 2022, S. 569.

<sup>98</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Maghazei et al., 2022, S. 569.

### 2.5.5 Sustainable Development Goals und Drohnen

Die Sustainable Development Goals, kurz als SDGs bezeichnet, sind 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung, welche durch die Vereinten Nationen von allen 193 Mitgliedsstaaten im Jahr 2015 verabschiedet wurden. Diese zielen darauf ab, in 169 Unterzielen bis 2030 eine nachhaltige Entwicklung weltweit zu fördern. Sie beinhalten Themen wie Armut, Bildung, Gesundheit, Gleichstellung der Geschlechter, Klimaschutz, nachhaltige Wirtschaftsentwicklung als auch Industrie, Innovation und Infrastruktur.<sup>99</sup> Durch den Einsatz von Drohnen kann das Potenzial ausgeschöpft werden, effizienter und nachhaltiger der Erreichung der Ziele von den SDGs beizutragen.<sup>100</sup> Die Anwendung findet sich dabei in mehreren SDGs wieder, welche in Abbildung 19 zusammengestellt sind. Diese umfassen die SDGs 3, 8, 9, 11, 13 und 15.



Abbildung 19: Adressierte SDGs und durch den Einsatz von Drohnen<sup>101</sup>

Dabei können Drohnen einen Beitrag zum Ziel von SDG3 leisten, bei dem Gesundheit und Wohlergehen im Fokus stehen. Durch den Einsatz von autonomen Drohnen, die über weite Strecken fliegen, können zeitaufwändige Transporte von Patientenproben zwischen Gesundheitseinrichtungen mittels einer Drohne durchgeführt werden. Somit werden Transporte beschleunigt. Drohnen können dem Ziel von SDG8 - menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum - beitragen, indem die Produktivität durch Innovation und Entwicklung neuer Technologien verbessert wird. Damit hängt auch das SDG9 zusammen - Industrie, Innovation und Infrastruktur. Der Einsatz von Drohnen in der Industrie und Gesellschaft wird in verschiedenen nationalen Strategien hervorgehoben, um technologische Fortschritte und wirtschaftliche Entwicklung zu fördern. Drohnen werden hier als Schlüsseltechnologie betrachtet, um die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit zu steigern und innovative Lösungen für industrielle Anwendungen zu entwickeln. Insgesamt zeigen diese Beispiele, wie Drohnen als transformative Technologie in nationalen Innovationsstrategien integriert werden, um sowohl wirtschaftliche als auch

<sup>99</sup> vgl. SDG Watch Austria, o.D.

<sup>100</sup> vgl. Solís und Zeballos, 2023, S. 169.

<sup>101</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an SDG Watch Austria, o.D.

gesellschaftliche Herausforderungen zu adressieren.<sup>102</sup> Drohnen stellen eine nachhaltige und energieeffiziente Alternative für Aufgaben des Transports dar und können bei der Entwicklung neuer Innovationen und Inspektion von Infrastruktur helfen. Dem SDG11 - nachhaltige Städte und Gemeinden - kann ebenso wie bei SDG3 und SDG9, eine umweltfreundliche Transportlösung der Transport von Patientenproben zugeordnet werden. Dem SDG 13 - Maßnahmen zum Klimaschutz - kann die Überwachung der arktischen Regionen zugeteilt werden. Drohnen werden von Schiffen aus gestartet, um Eisberge zu überwachen. Dies liefert wertvolle Echtzeitinformationen über den Klimawandel. SDG15 - Leben an Land - beinhaltet die Überwachung von Tieren und Pflanzen per Drohne. Des Weiteren können Mechanismen zur Düngung in landwirtschaftlichen Betrieben eingesetzt werden.<sup>103</sup>

Die oben dargestellten SDGs zeigen, dass der Einsatz einer Drohne einen wesentlichen Beitrag zur Erlangung nachhaltiger Entwicklung leisten kann.

### 2.5.6 Ansatz einer Taxonomie für Drohnen

Die Drohne ist ein Quadro-, Hexa- oder Octacopter, der je nach Bezeichnung mit 4, 6 oder 8 Motoren ausgerüstet ist. Drohnen zeichnen sich vor allem dadurch aus, dass sie die Möglichkeit besitzen, vertikal zu starten als auch zu landen. Dabei erfolgt der Auftrieb ausschließlich durch den Schub der Motoren. Energiequellen variieren für Drohnen. Diese reichen von klassischen Verbrennungsmotoren über Lithium-Polymer-Batterien bis hin zu wasserstoffbasierten Ansätzen.<sup>104</sup>

Drohnen werden für unterschiedliche Einsätze und Zwecke gebaut, wobei diese konkreten Anforderungen gerecht werden sollen. Landrock und Baumgärtel haben einen Ansatz für die Taxonomie für Drohnen erstellt, welcher abgewandelt in Abbildung 2 dargestellt ist. Durch den raschen Wandel der Technologie kann sich der Ansatz jederzeit erweitern oder ändern. Am Anfang ist in die Notwendigkeit des Einsatzes einer Drohne zu kategorisieren, was Militär-, Hobby-, Industrie-, Gewerbe- und Behörden-UAVs umfasst. Ausgehend von dem Anwendungsfall resultieren weitere Aspekte, die wie folgt beschrieben werden. Die Bauform von Drohnen kann in unterschiedliche Formen kategorisiert werden, welche jedoch in dieser Arbeit nicht näher erörtert werden, da es mittlerweile diverse Konzepte entsprechend dem Nutzen der Drohne in der Forschung und am Markt gibt. Bei den technischen Spezifikationen kommen mehrere Aspekte zur Geltung. Diese umfassen unter anderem die Reichweite, Kommunikationseinrichtung, Nutzlast, Eigengewicht, Startgewicht, Steuerung, Flugstabilität und Energieversorgung. Hier gibt es je nach Anbieter und Nutzungszweck diverse Modelle beziehungsweise Anforderungen, die

<sup>102</sup> vgl. UNESCO, 2021, S. 10.

<sup>103</sup> vgl. University of Southern Denmark, o.D.

<sup>104</sup> vgl. Hompel et al., 2020, S. 478.

diesen Punkten gerecht werden. Die Nutzlast umfasst die Möglichkeiten, die die Drohne durch interne oder externe Module mit sich bringt. Dazu zählen eine Kamera, Mess- und Prüftechnik, Werkzeug oder Vorrichtung, Personen, Waren oder Produkte. Wie bei den technischen Spezifikationen hängt hier die Auswahl der Nutzlast vom jeweiligen Use-Case ab. Durch den voranschreitenden technologischen Wandel gibt es vermehrt Drohnen, die mehr als nur eine Art von Nutzlast mit sich führen können.<sup>105</sup>

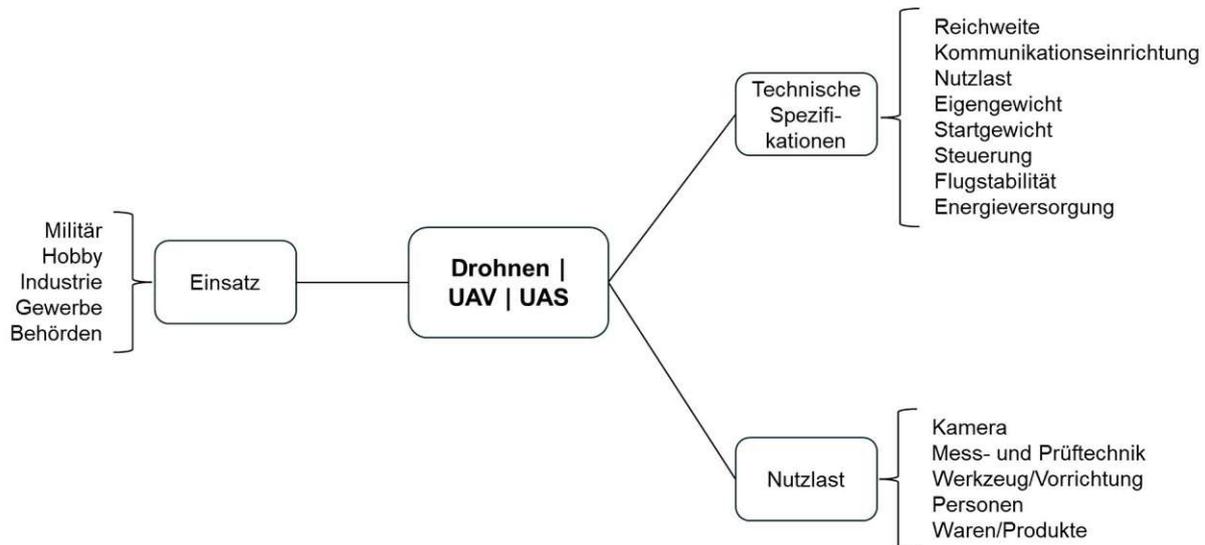


Abbildung 20: Versuch einer Taxonomie für Drohnen<sup>106</sup>

### 2.5.7 Grundlegender Aufbau einer Drohne

Um einen sicheren Flug mit einer Drohne zu gewährleisten, sind Drohnen mit notwendigen Komponenten auszustatten. Aufgrund dessen sind diverse Sensoren verbaut, welche Signale empfangen als auch senden. Sind weitere Komponenten im Flugobjekt notwendig, so sind zusätzliche Verbindungen zwischen Software und Hardware relevant.

Um einen Überblick von dem Aufbau einer Drohne zu erlangen, wird nachfolgend die grundlegende Struktur des Flugobjekts erörtert. Die Ausstattung einer Drohne ist stets ähnlich, unabhängig vom Modell. Zu den Komponenten zählen:

- **Fluggerät:** Dies beinhaltet den Rumpf inklusive Flügel und Leitwerk. Des Weiteren wird darunter die Tragstruktur, bestehend aus Pylonen für die Propellereinheiten bei Multikoptern verstanden.
- **Flugregelsystem:** Dies dient zum Flug und zur Stabilisierung der Drohne. Es beinhaltet ein Navigationsmodul, welches je nach Region auf unterschiedliche Navigationssysteme zurückgreift.

<sup>105</sup> vgl. Landrock und Baumgärtel, 2018, S. 4 ff.

<sup>106</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Landrock und Baumgärtel, 2018, S. 4.

- Fluginformationssystem: Dies ist zur Überwachung der wichtigsten Parameter der Drohne während des Flugs notwendig. Wichtige Parameter sind dabei die verbleibende Restflugzeit oder der Ladezustand der Batterien. Zusätzlich zählen dazu die Position, Bewegungsrichtung und die aktuelle Flughöhe und -lage zum Piloten.
- Bodenkontrolleinheit: Diese liegt in Form einer Fernsteuerung vor, welche für den Flug beziehungsweise zur Überwachung der Drohne dient. Mit der Einheit kann in einen gegebenenfalls automatisierten Flug eingegriffen werden. Zudem können gegebenenfalls Sensoren während des Flugs geregelt werden.
- Batterieeinheit: Die Ausführung variiert je Modell.
- Festmontierte oder einziehbare Fahrwerke oder Landegestelle: Die Ausführung variiert je Modell.
- Sensoren: Diese sind teilweise fest installiert oder teilweise zweckmäßig fest verbaut.
- Sensoreinheit: Diese dient gegebenenfalls zur Aufzeichnung von Daten der Drohne.
- Schnittstellen. Diese dienen zur Stabilisierung und zum Ausrichten der Sensoren.
- Datenübertragungssystem: Dies dient zur Auswertung und Kontrolle von erfassten Daten zur Bodenkontrolleinheit.
- Rettungssysteme: Je nach Ausführung der Drohne können diverse Rettungsmechanismen, beispielsweise Fallschirme, verbaut sein.<sup>107</sup>

Bei der Wahl der geeigneten Komponenten sind die technischen Merkmale aufeinander abzustimmen, um ein optimales Preis-Leistungs-Verhältnis zu erreichen.<sup>108</sup> Nachfolgend wird auf weitere ausgewählte Komponenten näher eingegangen.

### 2.5.8 Energieversorgung einer Drohne

Zur Energieversorgung einer Drohne werden überwiegend wiederaufladbare Lithium-Polymer- und Lithium-Ionen-Batterien eingesetzt. Die Leistungsdichte der Batterien hat dabei eine gewisse Grenze erreicht, konnte jedoch durch technologische Entwicklung der Kommunikationsindustrie verbessert werden. Neben den Lithium-basierten Batterien werden weitere Technologien erprobt, wie zum Beispiel Benzin, weitere chemische Stoffe, Wasserstoffbrennzellen, Solarenergie, Laser-Energie und Hybridmodelle. Dadurch, dass Lithium-Polymer-Akkus gut zu transportieren, rasch einsetzbar sowie wiederaufladbar sind, führen diese die Energieversorgung bei Industriedrohnen an. Nachteilig bei dieser Energietechnologie ist jedoch, dass die

<sup>107</sup> vgl. VDI 2879, 2018, S. 5–7.

<sup>108</sup> vgl. Landrock und Baumgärtel, 2018, S. 7.

Akkus temperaturempfindlich sind, weshalb bei Kälte eine steile Entladekurve entsteht. Bei Überhitzung können die Akkus hingegen entflammen. Neben der mobilen Akkubetriebenen Drohne können auch gefesselte Drohnen eingesetzt werden. Dabei werden diese mittels Kabel mit Strom versorgt, worunter die Flugreichweite leidet.<sup>109</sup>

Es spielen mehrere Aspekte einen wesentlichen Faktor, wie hoch der Energieverbrauch einer Drohne ist. Dazu zählen das Nutzlastgewicht, das Batteriegewicht, das Drohnengewicht und die Fluggeschwindigkeit. Der Verbrauch der Energie ist von den genannten Aspekten abhängig und hat somit einen direkten Einfluss auf die mögliche zurückzulegende Flugdistanz und somit auch auf die Flugdauer.<sup>110</sup>

### 2.5.9 Navigation einer Drohne

Für die Navigation einer Drohne wird ein globales Navigationssatellitensystem, abgekürzt als GNSS - global navigation satellite system – herangezogen. Zur Mithilfe dessen wird die Position auf der Erde bestimmt und vor allem für autonomes Fliegen eingesetzt. Allgemeinverständlich wird das System als GPS, global positioning system, ausgedrückt. Hierbei handelt es sich jedoch um eine Unterkategorie des GNSS. Neben dem GPS gibt es das GLONASS, Galileo und Beidou. Zur Verbesserung der Position werden weitere Systeme wie SBAS, RTK oder DGPS eingesetzt.<sup>111</sup> Dabei stehen SBAS für satellite based augmentation, RTK für real time kinematic und DGPS für differential global positioning system. Die Kategorien sind in Abbildung 21 dargestellt, wobei jedes dieser ein eigenes Navigationsmodul darstellt.

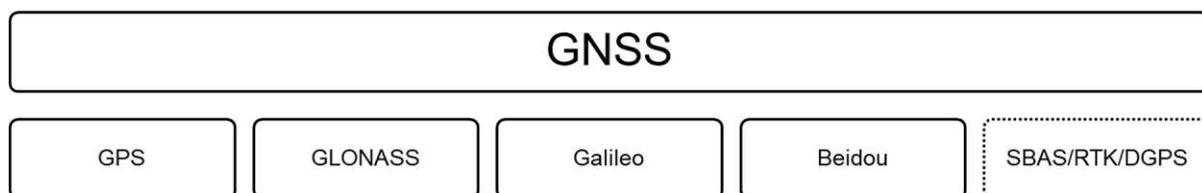


Abbildung 21: Globale Navigationssysteme<sup>112</sup>

Die Module bestehen aus einer Antenne und einem Mikrocontroller. Ersteres dient dazu, um ausgestrahlte Satelliten-Signale zu empfangen. Der Mikrocontroller dient zur Verarbeitung der empfangenen Signale und zur weiteren Ausgabe über eine Schnittstelle. Daten werden hierbei meist über eine UART Schnittstelle ausgegeben.<sup>113</sup> UART steht für universal asynchronous receiver/transmitter, also dem universellen

<sup>109</sup> vgl. Landrock und Baumgärtel, 2018, S. 10 f.

<sup>110</sup> vgl. Zhang et al., 2021, S. 3.

<sup>111</sup> vgl. Weber, 2021, S. 10 ff.

<sup>112</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Weber, 2021, S.13.

<sup>113</sup> vgl. Weber, 2021, S. 10 ff.

asynchronen Empfänger/Sender. Dieser sendet und empfängt asynchrone serielle Daten.<sup>114</sup>

### **NAVSTAR GPS**

Das bekannteste Navigationssatellitensystem ist das NAVSTAR GPS, was für navigational satellite timing and ranging - global positioning system steht. Das aus dem Militär der USA stammende System wurde 1970 entwickelt. Die Genauigkeit des Systems liegt je nach Position von Empfänger und Umgebungsbedingungen bei einigen Metern. Im Jahr 2000 betrug die Genauigkeit ungefähr 100 Meter. Das Militär verfügt bei diesem System über eine höhere Genauigkeit, bedingt durch das zusätzliche Senden von verschlüsselten Signalen.<sup>115</sup>

### **GLONASS**

Im Jahr 1970 wurde ebenfalls das russische System GLONASS für Militärzwecke entwickelt. Die Abkürzung steht für globalnaja nawigazionnaja sputnikowaja sistema und entspricht der Funktion vom GPS.<sup>116</sup>

### **Galileo**

Im Gegensatz zu GPS und GLONASS ist das europäisch entwickelte Galileo ein ziviles System, welches erst seit Ende 2016 nutzbar ist.<sup>117</sup>

### **Beidou**

Das Beidou System stammt aus China ab, welches ein weltweit nutzbares Satellitensystem ist. Dieses war anfangs für lokale Zwecke gedacht.<sup>118</sup>

### **SBAS/RTK/DGPS**

Um die Positionsbestimmung von Navigationssystemen in schlechten Umgebungsbedingungen zu verbessern, werden weitere Systeme eingesetzt. Dazu zählen das SBAS, welches ein deutsches Satelliten-basiertes Ergänzungssystem ist. Diese Systeme sind lokal, bestehend aus einer Bodenstation und einem geostationären Satelliten. Hier werden Abweichungen der tatsächlichen GPS-Satelliten bestimmt und unter Zuhilfenahme der SBAS Satelliten zum Empfänger übermittelt. Die dadurch erzielte Position kann die Abweichung deutlich verbessern und beträgt wenige Meter. Wird hingegen RTK oder DGPS eingesetzt, so wird eine Referenzstation benötigt. Vorteilhaft ist die einhergehende Genauigkeit im Zentimeterbereich. Aufwand und Kosten sind hier deutlich höher, weshalb diese

---

<sup>114</sup> vgl. Gibson, 2012, S. 27.

<sup>115</sup> vgl. Weber, 2021, S. 13.

<sup>116</sup> vgl. Weber, 2021, S. 13.

<sup>117</sup> vgl. Weber, 2021, S. 13.

<sup>118</sup> vgl. Weber, 2021, S. 13

Systeme nur bei notwendigen Verfahren eingesetzt werden, wie zum Beispiel bei einer Vermessung.<sup>119</sup>

Die Technologie von GPS wird intensiv zur Ermittlung von Standortinformationen genutzt, funktioniert jedoch hauptsächlich in Außenbereichen.<sup>120</sup> Je nach Abschirmung ist es möglich, dass GPS-Signale in Innenbereiche eindringen und eine exakte Positionierung von einer Drohne möglich ist. Neben GPS werden weitere fortschrittliche Technologien wie Ultra-Wideband, Bluetooth und SLAM zunehmend für die präzise Navigation und Steuerung von Drohnen eingesetzt, um deren Effizienz und Genauigkeit in Anwendungsbereichen zu verbessern. Nachfolgend werden diese Technologien erläutert.

## UWB

Das Prinzip von Ultra-Wideband, abgekürzt als UWB, basiert auf dem Senden ultrakurzer Impulse von  $< 1$  ns. Dies erfolgt mit einem niedrigen Tastverhältnis und nutzt ein breites Frequenzband. Dadurch wird wenig Energie benötigt und bietet sich für hochpräzise 2D- und 3D-Standortbestimmungen an. UWB-Signale können Wände durchdringen und sind leicht zu filtern. Eine 3D-Lokalisierung erfolgt dabei nach den zwei Messmethoden: die Zeitdifferenzmessung und die Winkelmessung.<sup>121 122</sup>

In UWB-basierten Lokalisierungssystemen kann die Position eines UWB-Tags, beispielsweise angebracht auf einer Drohne, anhand von Entfernungsmessungen zu fest platzierten UWB-Anker an bekannten Positionen berechnet werden.<sup>123</sup> Das Prinzip dieser Lokalisierung ist in Abbildung 22 illustriert.

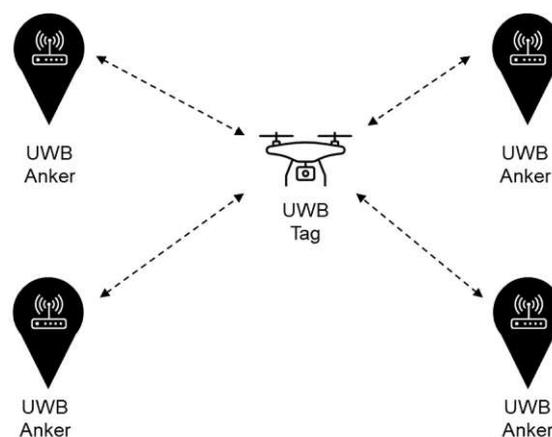


Abbildung 22: UWB-Anker und UWB-Tag<sup>124</sup>

<sup>119</sup> vgl. Weber, 2021, S. 14.

<sup>120</sup> vgl. Harder et al., 2005, S. 1.

<sup>121</sup> vgl. Liu et al., 2007, S. 1074.

<sup>122</sup> vgl. Gezici et al., 2005, S. 70 ff.

<sup>123</sup> vgl. Shule et al., 2020, S. 358.

<sup>124</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Shule et al., 2020, S. 358.

## Bluetooth

Der Einsatz von Bluetooth zur Positionsbestimmung ist eine weitere Möglichkeit, um eine Drohne im Innenbereich zu lokalisieren beziehungsweise zu steuern. Dazu gibt es unterschiedliche Ansätze. Einer davon ist die Entwicklung von Bluetooth 4.0, welches im Vergleich zum klassischen Bluetooth die Kosten und den Energieverbrauch reduzieren. Hier wird ähnlich wie bei Wi-Fi im 2,4-GHz-Band gearbeitet und eine Indoor-Positionierung mittels received signal strength indicator-Technik durchgeführt. Bei dieser Technik werden Beacons verwendet, ähnlich wie bei der Funktionsweise der Anker beim Prinzip von UWB. Auf der Drohne befindet sich kein UWB-Tag, sondern ein Onboard-Empfänger. Anhand einer Filterung von empfangenen Daten auf einem PC und einer Trilaterationsmethode werden die Koordinaten des Flugobjekts berechnet.<sup>125</sup>

## SLAM

Die Methode von SLAM, gilt in den meisten Bereichen als gute Lösung für die Lokalisierung als auch Navigation autonom fahrender Fahrzeuge. Hierbei kann die Position des Fahrzeuges beziehungsweise der Drohne in Echtzeit geschätzt und zugleich eine Karte der Umgebung erstellt werden.<sup>126</sup> Das Prinzip dazu gestaltet sich wie folgt. Die Position der Drohne wird mittels Daten, aufgenommen durch Sensoren wie eine Kamera, mit einer Gleichung vorhergesagt. Die sogenannten errechneten Merkmale werden mit einer vorhandenen Karte der Umgebung abgeglichen. Übereinstimmungen ermöglichen eine Aktualisierung der aktuellen Position und der Karte. Sind errechnete Merkmale nicht in dieser Karte vorhanden, so werden diese ihr hinzugefügt. Dieser Prozess wird laufend rekursiv durchgeführt. Dabei kann grob in LiDAR SLAM und visuellen SLAM unterschieden werden. Letzterer arbeitet mit Kamerasensoren.<sup>127</sup>

### 2.5.10 Sensorik zur Datenaufnahme

Zur Nutzung von Bild- oder Videodaten für die Erstellung eines digitalen Modells wird unter anderem die Technologie der Photogrammetrie angewandt, wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben.

Für die Industriephotogrammetrie werden meist Kameras eingesetzt, welche CCD- oder CMOS-Flächensensoren verbaut haben. CCD steht für Charged-Coupled Device und CMOS für Complementary Metal-Oxide Semiconductor.<sup>128</sup> CCD-Bildsensoren arbeiten nach dem Prinzip des Ladungstransports. Hier erzeugt jedes Sensorelement proportional zur Anzahl der einfallenden Photonen Ladungen, die durch eine geeignete

<sup>125</sup> vgl. Ariante et al., 2022, S. 112 ff.

<sup>126</sup> vgl. Durrant-Whyte und Bailey, 2006, S. 99 ff.

<sup>127</sup> vgl. Debeunne und Vivet, 2020, S. 1 ff.

<sup>128</sup> vgl. Heipke et al., 2017, S. 47.

Taktung in benachbarte Elemente verschoben werden. Diese Ladungen gelangen schließlich über ein serielles Ausleseregister zu einem Analog-Digital-Wandler. CCD-Sensoren haben aufgrund der dichten Anordnung der Sensorelemente einen hohen Füllfaktor, was bedeutet, dass der Anteil von lichtempfindlichen Flächen im Vergleich zu den nicht-sensitiven Bereichen hoch ist. CMOS-Sensoren besitzen hingegen eine Anordnung von lichtempfindlichen Photodioden. Diese werden über eine Prozessoreinheit ausgelesen, wo direkt das Sensorelement gekoppelt ist. Verglichen zu CCD weisen CMOS-Sensoren ein sehr geringes Rauschen auf, erlauben eine sehr hohe Bildfrequenz und wenig Stromverbrauch. Resultierend daraus, eignen sich diese Sensoren für Hochgeschwindigkeitskameras. Dagegen ist der Füllfaktor deutlich geringer. Ein weiteres System arbeitet nach dem Time-of-Flight Prinzip, wo für jedes Pixel neben einem Intensitätswert eine Distanz bestimmt wird.<sup>129</sup>

In diesem Kapitel wurde auf ausgewählte Bestandteile der Ausstattung einer Drohne eingegangen. Diese Bestandteile sind dem angestrebten Use-Case anzupassen und gegebenenfalls zu erweitern.

### **2.5.11 Rechtliche Rahmenbedingungen eines Drohnenflugs im Innenbereich**

Um in einer Lagerstätte mit einer industriellen Drohne zu fliegen, gilt es diverse Voraussetzungen zu klären und zu erfüllen. Insbesondere im Innenbereich gelten andere Anforderungen als im Außenbereich. Im folgenden Unterkapitel werden rechtliche Rahmenbedingungen erläutert, um einen Flug im Innenbereich durchführen zu können.

Rechtliche Regulierungen für Drohnenflüge greifen im Außenbereich des öffentlichen Luftraums und sind gesetzlich durch die Durchführungsverordnung (EU) 2019/47 der Kommission für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge geregelt. Dazu zählen beispielsweise Flüge auf einem Werksgelände oder Privatflüge im Garten. Im Außenbereich obliegen Drohnen unterschiedlicher Einsatzkategorien, welche den Kategorien Open, Specific und Certified eingeordnet werden und sich in der Drohnenart und deren Verwendung unterscheiden.<sup>130</sup> Werden Flüge innerhalb von Gebäuden durchgeführt, so gelten diese Regelungen nicht. Die Verantwortung obliegt hier den Betreibenden.<sup>131</sup>

Die Tatsache, dass beim Einsatz von Drohnen im Innenbereich keine rechtlichen Regelungen gelten, bestätigt sich durch E-Mail-Korrespondenz mit einem Experten der Abteilung für Drohnen beim ÖAMTC. Der Drohnenflug in Innenräumen sei sicher zu

<sup>129</sup> vgl. Heipke et al., 2017, S. 106–113.

<sup>130</sup> vgl. Taschner, 2023, S. 27 ff.

<sup>131</sup> vgl. Hompel et al., 2020, S. 479.

gestalten und es gelten keine spezifischen luftfahrtrechtlichen Bestimmungen<sup>132</sup>, was ebenso aus der VDI 2879 hervorgeht.<sup>133</sup>

Friedrich et al. haben ein Whitepaper veröffentlicht, welches Regelungen auf den in Deutschland gültigen staatlichen und unfallversicherungsrechtlichen Vorschriften basiert, welche ebenfalls in Österreich anwendbar sind. Dabei ist darauf zu achten, dass eingesetzte Produkte, in dem Fall Drohnen, über eine CE-Kennzeichnung verfügen. Neben dieser sind auch die Betriebssicherheit, der Versicherungsschutz und der Datenschutz einzuhalten.<sup>134</sup> Auf eine genauere Erörterung dieser Begrifflichkeiten und Inhalte wird verzichtet, da dies über den Rahmen von dieser Arbeit hinaus geht.

## 2.6 Eingrenzung des Forschungsbereichs

Das Forschungsfeld dieser wissenschaftlichen Arbeit konzentriert sich auf die Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Implementierung einer drohnengestützten Layouterstellung für Analyse- und Planungsvorgänge im Lagerinnenbereich.

Insbesondere erfolgt die Einschränkung auf folgende Teilbereiche. Das Ressourcenmittel zur Datenaufnahme stellt eine Drohne dar. Mit Hilfe der aufgenommenen räumlichen Daten wird Photogrammetrie als Methode zur Erstellung eines digitalen Modells angewandt. Für eine automatisierte Lagerinventur wird ebenso die Technologie Drohne als Forschungsbereich eingegrenzt. Die geografische Lage wird auf Österreich in einer branchenunabhängigen Industrie im Innenbereich eines Trockenlagers eingegrenzt.

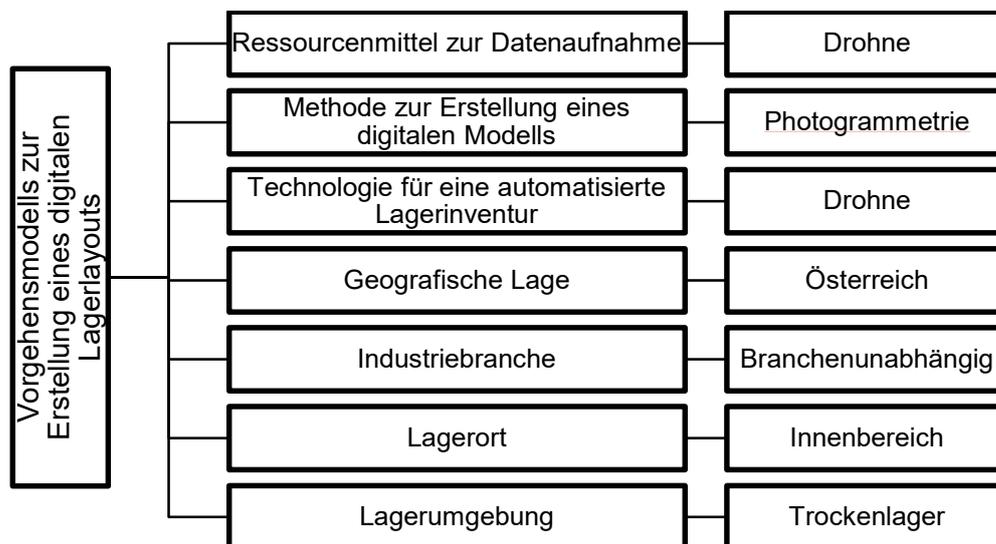


Abbildung 23: Eingrenzung des Forschungsbereichs<sup>135</sup>

<sup>132</sup> vgl. E-Mail-Korrespondenz mit ÖAMTC, 2024.

<sup>133</sup> vgl. VDI 2879, 2018, S. 9.

<sup>134</sup> vgl. Friedrich et al., 2021, S. 5 ff.

<sup>135</sup> Eigene Darstellung

### 3 State-of-the-Art: Drohnen im Innenbereich

Aufbauend auf den erörterten theoretischen Grundlagen wird in diesem Kapitel der State-of-the-Art von Drohnen im Innenbereich durchgeführt. Hier wird in die beiden Kategorien digitales Modell und Drohnen-basierte Lagerinventur gegliedert. Abschließend wird eine Zusammenfassung des Stands der Technik und die Forschungsfragen abgeleitet.

#### 3.1 Digitales Modell

Dieses Kapitel beinhaltet neben wissenschaftlicher Literatur, welche Drohnen als Aufnahmetool verwendet auch Literatur, welche relevant für die Thematik der Erstellung eines digitalen Zwillings beziehungsweise für die Erstellung eines digitalen Modells ist.

##### **Automated generation of digital twin for a built environment using scan and object detection as input for production planning**

Sommer et al. beschreiben in deren wissenschaftlicher Arbeit eine automatisierte Erstellung eines digitalen Zwillings in komplexen Umgebungen, wie zum Beispiel Innenräumen. Es wird ein Prozess, wie in Abbildung 9 dargestellt, entwickelt. Dabei wird aufgezeigt, welche Daten und Informationen für den erfolgreichen Prozess der Erstellung vom digitalen Zwillings benötigt werden. Ebenso wird erwähnt, dass zukünftige Forschung im Bereich der Untersuchung von kostengünstigen Alternativen zum teuren Laserscanning, beispielsweise Photogrammetrie, untersucht werden sollen. Darüber hinaus ist eine Optimierung der Prozesskette hinsichtlich der Leistung und Stabilität für die Entwicklung des digitalen Zwillings von großer Bedeutung.<sup>136</sup>

##### **Fabrik- und Produktionsplanung im digitalen Modell durch automatisierte Punktwolkenverarbeitung**

Melcher et al. untersuchen die Fabrik- und Produktionsplanung durch die automatisierte Verarbeitung von Punktwolken. Sie stellen eine Methode vor, bei der das Layout einer Fabrik direkt in einer 3D-Punktwolke geplant wird. Zusätzlich wird eine automatische Analyse der Bodenflächen des Fabriklayouts durchgeführt. Die Methodik umfasst die Generierung der Punktwolke des Fabriklayouts und deren Segmentierung, um ein Voxel-Modell zu erstellen, das volumetrische Pixel beschreibt. Diese Segmentierung ermöglicht das Verschieben von Objekten in der Punktwolke mittels eines region growing-watershed-Algorithmus. Anschließend wird die Fläche des Layouts analysiert und die Fabrikplanung in der Punktwolke durchgeführt. Das

<sup>136</sup> vgl. Sommer et al., 2023, S. 1 ff.

vorgestellte Konzept erlaubt es, Layoutvarianten schnell und effizient zu planen und zu vergleichen.<sup>137</sup>

### **Fixed camera drone based photogrammetry for indoor mapping**

Malhotra und Soderstrom untersuchen in deren wissenschaftlicher Arbeit die Technik der Photogrammetrie im Innenbereich mithilfe einer auf der Drohne fixierten Kamera. Dabei wird eine kostengünstige Drohne vom Hersteller DJI mit einem Time-of-Flight Sensor versehen, welcher die Distanz zu Oberflächen misst und somit der LiDAR-Methode ähnelt. Dabei wird ein Raum mit Objekten mit dem Sensor aufgenommen und eine Punktwolke erstellt. Das Ergebnis zeigt, dass es relevant ist, ausreichend Bilddaten aufzunehmen, um eine dichte Punktwolke zu generieren. Diese ist notwendig, um eine genaue Kartierung zu erhalten. Eine Erkenntnis von deren Analyse ist, dass Aufnahmen, wenn möglich ohne Einfall von Sonnenlicht auf reflektierende Oberflächen aufgenommen werden sollte, sodass der Abgleich zwischen den Bildern ohne Fehler erfolgen kann. Laut Malhotra und Soderstrom ersetzt deren Methode nicht die Genauigkeit eines LiDAR-basierten digitalen Modells, jedoch stellt sie eine kostengünstige und zuverlässige Methode dar.<sup>138</sup>

### **Optimierung von Fabrikplanungsprozessen durch Drohneneinsatz und automatisierte Layoutdigitalisierung**

Ein Paper von Melcher et al. zeigt die automatisierte Datenverarbeitung von Aufnahmen mittels einer Drohne, welche zu einer Punktwolke weiterverarbeitet werden. Es wird die Methodik der Photogrammetrie eingesetzt, wofür 2 Action-Cams verwendet werden und während des Flugs mithilfe der Serienbildfunktion 2 Bilder pro Sekunde aufgenommen werden. Anhand eines manuellen Flugs wird so eine Fabrikhalle durchflogen und Objekte in der Halle aus möglichst vielen Perspektiven von unterschiedlichen Seiten festgehalten. Die, für die Punktwolkenauswertung, verwendete Software ist Agisoft. Es wird eine ungefähr 250m<sup>2</sup> große Halle innerhalb von fünf Minuten abgeflogen. Das aufgenommene Objekt wird in ein 3D-Modell übergeführt, die Wand- und Bodenflächen weggeschnitten und ein Knickarmroboter im digitalen Layout neu platziert. Als Ausblick wird eine automatisierte Auswertung vom digitalisierten Layout in Form von einer Flächenerkennung genannt, mit der Förderwege oder Lagerplätze erkannt und gekennzeichnet werden sollen. Somit kann anhand dessen ein Flächennutzungsgrad errechnet werden.<sup>139</sup>

<sup>137</sup> vgl. Melcher et al., 2019, S. 1 ff.

<sup>138</sup> vgl. Malhotra und Soderstrom, 2022, S. 1 ff.

<sup>139</sup> vgl. Melcher et al., 2018b, S. 1 ff.

## Point clouds as a geometric data basis for factory planning - Comparison of several mapping techniques

Stöber et al. vergleichen in ihrer Arbeit die Qualität von generierten Punktwolken, durchgeführt durch unterschiedliche Mapping-Techniken. Es werden die drei Techniken Photogrammetrie, LiDAR und Stereo-Mapping analysiert, wie in Kapitel 2.2 erörtert. Darüber hinaus werden zwei Möglichkeiten der Datenaufnahme verglichen, welche Boden-basierte und Drohnen-basierte Aufnahmen beinhalten. Auf Basis von LiDAR wurde eine DJI Phantom 4 mit einem Sensor bestückt und es wird ebenso eine boden-basierte Aufnahme durchgeführt. Für Photogrammetrie wurden mit der DJI Phantom 4 und DJI Air 2S Daten aufgenommen. Für Stereoskopie wurde eine boden-basierte Variante gewählt. Die Ergebnisse wurden analysiert und den Parametern Vollständigkeit, Aufnahmezeit, Erkennungspotenzial, technische Anwendbarkeit und geometrische Toleranz gegenübergestellt beziehungsweise bewertet. Wie aus Tabelle 2 hervorgeht, können durch Photogrammetrie gute Ergebnisse erzielt werden. Das Ergebnis von LiDAR ist vollständig und genau. Das Ergebnis von Stereoskopie zeigt Schwäche in der Auswertung der Punktwolke.<sup>140</sup>

	LiDAR	Photo-grammetrie	Photo-grammetrie (DJI Phantom 4)	Photo-grammetrie (DJI Air 2S)	Stereo-skopie
Boden-basiert	✓	✓	-	-	✓
Drohnen-basiert	✓	-	✓	✓	-
Vollständigkeit	●	◐	◐	◐	◐
Aufnahmezeit	●	◐	●	●	○
Erkennbarkeit	◐	◐	◐	●	◐
Technische Anwendbarkeit	◐	◐	◐	◐	◐
Geometrische Intoleranz	●	◐	◐	◐	◐
● Gut / Hoch			○ Schlecht / Gering		

Tabelle 2: Überblick über unterschiedliche Modellierungstechniken und deren Parameter<sup>141</sup>

## Simulation in hybrid digital twins for factory layout planning

Nafors et al. untersuchen die Simulation von hybriden digitalen Zwillingen für die Layoutplanung einer Fabrik. Zu diesem Zweck werden 3D-Laserscanning, CAD-Modelle und Simulationsmodellierung in einem digitalen Zwilling detailliert betrachtet, um den Planungsprozess in der Industrie zu verbessern. Die vorliegende Untersuchung befasst sich mit der Datenerhebung und -verarbeitung, der Modellierung

<sup>140</sup> vgl. Stöber et al., 2024, S. 121 ff.

<sup>141</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Stöber et al., 2024, S. 127.

eines hybriden digitalen Zwillings sowie der Präsentation des Modells in einem Workshop, in dem die einbezogenen Stakeholder involviert werden. Sie adressieren, dass Layoutplanung anhand aufgenommener 3D-Modelle in Zukunft in weiteren industriellen Umfeldern getestet werden soll.<sup>142</sup>

### **The Evaluation of Photogrammetry-Based DSM from Low-Cost UAV by LiDAR-Based DSM**

Gašparović et al. untersuchen die Genauigkeit von digitalen Modellen auf Basis von Photogrammetrie im Außenbereich mittels kostengünstiger Drohnen und LiDAR-basierten Modellen. Die Studie zeigt darüber hinaus, dass digitale Modelle, welche auf Basis von Photogrammetrie aufgebaut werden, eine höhere Genauigkeit aufweisen, wenn Referenzpunkte zur Ausrichtung des Modells verwendet werden.<sup>143</sup>

### **Vorgehensmodell zur Erstellung Digitaler Zwillinge für Produktion und Logistik**

Follath et al. stellen in deren Arbeit ein Vorgehensmodell zur Erstellung von digitalen Zwillingen vor, um Anwendungen wie Produktions- und Logistikprozesse zu steuern. Das zentrale Element ist dabei das bekannte Vorgehensmodell CRISP-DM. Das Vorgehensmodell beinhaltet die Schritte Betriebsverständnis, Systemverständnis, Systemvorbereitung, Modellierung, Evaluierung und Anwendung für die Entwicklung vom digitalen Zwilling in der Produktion und Logistik. Zum Betriebsverständnis zählen dabei unter anderem die Ermittlung des Anwendungsfalls, Beschreibung der Ist-Situation und Bestimmung der Ziele. Das Systemverständnis bildet die Datenerfassung, Systembeschreibung, Datenuntersuchung und Überprüfung der Datenqualität ab. Die Systemvorbereitung umfasst die Systemauswahl, Datenbereinigung und -formatierung. Zur Modellierung zählen die Auswahl der Modellierungstechnik, Erstellung und Bewertung des digitalen Zwillings. Die Evaluierung bildet die Bewertung der Ergebnisse ab und die Anwendung stellt die Bereitstellung der Ergebnisse dar. Durch das von Follath et al. erweiterte CRISP-DM beziehungsweise entwickelte Vorgehensmodell soll Potenzial für Anwendende in der Produktion und Logistik als Hilfestellung zur Verfügung stehen. Es wird darauf hingewiesen, dass das Vorgehensmodell weiterentwickelt und validiert werden sollte.<sup>144</sup>

## **3.2 Drohnen-basierte Lagerinventur**

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der Technik hinsichtlich der Drohnen-basierte Lagerinventur erörtert, um das Ziel einer automatisierten Lagerinventur zu erreichen. Darüber hinaus werden in diesem Abschnitt Drohnen und Lösungen von

<sup>142</sup> vgl. Nafors et al., 2020, S. 1619 ff.

<sup>143</sup> vgl. Gašparović et al., 2017, S. 117 ff.

<sup>144</sup> vgl. Follath et al., 2022, S. 691 ff.

Dienstleistenden vorgestellt, die derzeit auf dem europäischen Markt verfügbar sind und sich für eine Lagerinventur eignen.

### 3.2.1 Wissenschaftliche Literatur

#### **A Machine Learning based Framework for Optimizing Drone Use in Advanced Warehouse Cycle Counting Process Solutions**

Markovic et al. bieten in ihrem wissenschaftlichen Artikel einen umfassenden Überblick über den effizienten und sicheren Einsatz von Drohnen für die Lagerinventur. Sie identifizieren drei wesentliche Elemente, die für eine drohnenbasierte Inventur erforderlich sind. Erstens muss die Drohnenhardware zuverlässig, stabil, skalierbar und kostengünstig sein. Zweitens betonen sie die Notwendigkeit einer Softwareintegration, die einen vollständig autonomen Innenflug und das automatische Scannen von Barcodes oder QR-Codes ermöglicht. Drittens heben sie die Bedeutung der operativen, kommerziellen und strategischen Integration von drohnenbasierten Inventurlösungen in die Lagerbestandsverwaltung hervor. In ihrem Artikel wird die DJI Mavic Serie als Beispiel für eine möglich einsetzbare Drohne betrachtet.<sup>145</sup>

#### **Inventory Management through Mini-Drones: Architecture and Proof-of-Concept Implementation**

Cristiani et al. widmen sich der Architektur einer drohnenbasierten Lagerinventur. Diese umfasst die Flugroute der Drohne, die Identifikation der Produkte mittels QR-Codes, die Datenvalidierung und das drahtlose Laden des Akkus. Darüber hinaus werden optimale Drohnenparameter wie Geschwindigkeit und Anzahl der registrierten Regaleinheiten erörtert.<sup>146</sup>

#### **Investigation of Operational Parameters that Affect the Use of Drones in Goods' Stock Count Process: Evidence from Experimental Results**

Thomaidis und Zeimpekis widmen sich in ihrem wissenschaftlichen Artikel den experimentellen Ergebnissen einer Lagerinventur mit RFID-basierten Drohnen. Sie führten Tests durch, die in vier verschiedene Parameter unterteilt wurden: Fluggeschwindigkeit, Flughöhe beziehungsweise Auslese-Distanz, Position des Tags und Anzahl der Regalebenen. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl im Normal- als auch im Kühlbereich eines Lagers eine 100%-ige Genauigkeit der Inventur durch den Einsatz von RFID-Tags erreicht werden kann. Darüber hinaus wird erwähnt, dass eine gerade Flugroute zu schnellerem Ergebnis bei der Inventur als einem S-förmigen Flug führt.<sup>147</sup>

<sup>145</sup> vgl. Markovic et al., 2024, S. 69–78.

<sup>146</sup> vgl. Cristiani et al., 2020, S. 317–322.

<sup>147</sup> vgl. Thomaidis und Zeimpekis, 2024, S. 115–130.

### **Optimised path planning of a UAV for inventory management applications**

Maweni et al. präsentieren in ihrer Arbeit eine Untersuchung, in der sie zwei verschiedene Flugrouten einer Drohne im Innenbereich zur Lagerinventur gegenüberstellen, um die Flugroute mit der kürzesten Flugzeit zu ermitteln. Die Simulationen wurden im Rahmen dieser Untersuchung in der Simulationsumgebung Gazebo durchgeführt. Die beiden Flugrouten beinhalten ein "Zickzack"-Flugmuster und ein "Up-Down"-Flugmuster. Die Ergebnisse zeigen, dass das "Zickzack"-Flugmuster eine um 27,25 % kürzere Flugzeit im Vergleich zum anderen Muster aufweist.<sup>148</sup>

### **Smart counting of unboxed stocks in the warehouse 4.0 ecosystem**

Balaska et al. stellen in deren Arbeit eine neuartige Technik zur Inventurzählung vor. Es wird ein Architekturmodell vorgestellt, welches die automatisierte Lagerinventur darstellt. Dabei werden auf Basis eines 3D-/CAD-Modells eines Lagers und Bildern eine Deep Learning Methode angewandt, sodass Vektoren aus dessen Daten gematcht werden. Dadurch wird eine Datenbank mit gezähltem Inventar aufgebaut. Als Vorschlag zur Bildaufnahme wird in dieser Arbeit der Einsatz von Boden- oder Drohnen-basierten Robotern erwähnt. Die Herausforderung bei deren Arbeit ist vor allem die ausreichende Belichtung im Lager.<sup>149</sup>

### **Towards automating stocktaking in warehouses: Challenges, trends, and reliable approaches**

Daios et al. stellen in ihrer Publikation das Konzept i-Count Air zur automatischen Lagerinventur vor. Dabei wird, wie aus dem Namen hervorgeht, eine Drohne als Tool zur Zählung eingesetzt. Die Drohne führt dabei eine automatische Bestandsaufnahme durch, indem sie Waren auf Regalen, aufgenommen durch kognitive Sensoren, mit 3D-Modellen vom Lager vergleichen. Hierzu werden unterschiedlichste Technologien verwendet für Hardware und Software. Daios et al. geben mit ihrem Konzept Raum für künftige Forschungen im Bereich der Lagerautomatisierung, sodass der Mangel an Arbeitskräften und die Nachfrage nach optimalen Anwendungen von kontinuierlichen Abläufen im Arbeitsalltag durch innovative Lösungen verbessert werden.<sup>150</sup>

## **3.2.2 Marktverfügbarkeit für eine Drohnen-basierte Lagerinventur**

Um eine automatisierte Lagerinventur mit einer Drohne durchzuführen, können Dienstleistende herangezogen werden, welche über die notwendige Hardware und Expertise verfügen. Andererseits kann ein eigenes Konzept mit am Markt erhältlichen

<sup>148</sup> vgl. Maweni et al., 2023, S. 1–9.

<sup>149</sup> vgl. Balaska et al., 2022, S. 1 ff.

<sup>150</sup> vgl. Daios et al., 2024, S. 1437 ff.

Drohnen entwickelt werden, sodass man in der Anwendung der automatisierten Drohne möglichst flexibel bleibt.

### Dienstleistende zur automatisierten Lagerinventur mittels einer Drohne

Aktuelle Anbieter von Lösungen zur automatisierten Lagerinventur unter dem Einsatz einer industriellen Drohne sind Verity oder doks.solution.

Verity ist ein führender Anbieter von autonomen Indoor-Drohnensystemen, die speziell für die Bestandsverwaltung im Lager entwickelt wurden. Durch das Scannen von Lagerbeständen und deren datengesteuerter Technologie sollen Effizienz und Genauigkeit der Bestandsaufnahme verbessert werden. Dazu werden selbstfliegende Drohnen eingesetzt, welche einzeln oder im Schwarm fliegen. Verity hat seine Systeme erfolgreich in Europa und Nordamerika eingeführt und arbeitet mit führenden Unternehmen wie DSV, Maersk und Samsung SDS zusammen.<sup>151</sup>

Doks.inventAIRy ist eine innovative Lösung von doks.solution für die automatisierte Bestandsaufnahme in Hochregallagern. Es wird ein fahrerloses Transportsystem mit einer Drohne per Kabel gekoppelt, mit Sensoren ausgestattet und eine automatisierte Inventur durchgeführt. Dabei wird kein Personal benötigt und es kann rund um die Uhr ein autonomer Betrieb mit höchster Datenqualität erfolgen. Somit werden Kosten, Zeit und Aufwand für die Lagerinventur minimiert.<sup>152</sup>

In Abbildung 24 sind die beiden Lösungen der vorgestellten Anbieter dargestellt.



Abbildung 24: Darstellung der Drohnen von Verity<sup>153</sup> und doks.solution<sup>154</sup>

### Marktübliche Drohnen für eine eigenständige Lösung einer automatisierten Lagerinventur

Der Markt von industriellen Drohnen wächst stetig und ist auch je nach Region, wo man eine Drohne beziehen möchte, unterschiedlich. Da Drohnen im Handel fast

<sup>151</sup> vgl. Verity, o.D.

<sup>152</sup> vgl. doks.solution, o.D.

<sup>153</sup> vgl. Verity, o.D.

<sup>154</sup> vgl. doks.solution, o.D.

ausschließlich als Hobbydrohnen für das Fliegen und das zusätzliche Aufnehmen von Bildern und Videos angeboten werden, gestaltet sich die Recherche nach einer programmierbaren Drohne für einen sicheren automatisierten Flug aufwendig. Wie aus Kapitel 2.5.4 hervorgeht, gibt es unterschiedliche Formen der Anwendung von Drohnen. Dementsprechend ist eine Drohne je nach Zielnutzen nach Kapitel 2.5.7 auszustatten.

Für einen automatisierten Drohnenflug im Innenbereich und einer durchzuführenden Lagerinventur ist eine Drohne zu wählen, welche programmierbar ist. Weiterhin soll die Drohne über eine Kamera und ausreichend Akkulaufzeit verfügen.

Im Zuge dieser Arbeit wurden Drohnen recherchiert, welche aktuell in der DACH-Region erhältlich sind und diese Anforderungen erfüllen. Mögliche Drohnen sind: DJI Tello, DJI Mini 3 Pro, Bitcraze Crazyflie 2.1 und eine Do-It-Yourself-Variante.

DJI ist ein bekannter Vertreter im Bereich von Hobbydrohnen. Ausgewählte Modelle sind hier programmierbar, wie die DJI Tello. Diese bietet eine Flugzeit von etwa 13 Minuten, ist mit einer Kamera ausgestattet und lässt sich mittels Python Code automatisiert steuern. Sie ist verglichen zu anderen Drohnen sehr klein und wiegt 80 Gramm. Die DJI Mini 3 Pro hingegen wiegt rund 249 Gramm, verfügt über eine leistungsstarke 48 Megapixel-Kamera und kann bis zu 34 Minuten fliegen.<sup>155</sup> Die beiden DJI-Modelle sind in Abbildung 25 dargestellt.



Abbildung 25: Darstellung der DJI-Drohnen Tello<sup>156</sup> und Mini 3 Pro<sup>157</sup>

Die Crazyflie 2.1 ist eine vielseitige Open-Source-Drohne, welche lediglich 27 Gramm wiegt und von den Maßen her in etwa einer Handfläche gleicht. Sie unterstützt dabei eine drahtlose Steuerung per Funk und Bluetooth und ist somit geeignet für Forschung und Bildung. Durch die offene Programmierbarkeit wird eine umfangreiche Anpassung des Flugverhaltens und Forschung ermöglicht. Eine Kamera ist dabei nicht in der Drohne verbaut und erfordert somit ein weiteres Modul zur Bildaufnahme. Auf der

<sup>155</sup> vgl. DJI, o.D.

<sup>156</sup> DJI, o.D.

<sup>157</sup> DJI, o.D.

offiziellen Homepage des Herstellers werden per 07.11.2024 insgesamt 326 wissenschaftliche Veröffentlichungen zur Drohne angeführt.<sup>158</sup>

Eine weitere Möglichkeit für eine programmierbare Drohne stellt eine Do-It-Yourself-Variante dar, wo ein Flugcontroller an einem Rahmen angebracht wird. Auf dem Rahmen befinden sich die Motoren und Rotorblätter. Angesteuert wird die Drohne mit einem Minicomputer, wie beispielsweise einem Raspberry Pi. Diese Variante bietet sehr viel Spielraum für Individualität und kann in unterschiedlichsten Formen am Markt erworben werden.

Die beiden Drohnen von Bitcraze und die DIY-Variante sind in Abbildung 26 dargestellt.



Abbildung 26: Darstellung der Drohnen Bitcraze Crazyflie 2.1<sup>159</sup> und DIY-Variante<sup>160</sup>

### 3.3 Zusammenfassung des Stands der Technik und Ableitung der Forschungsfragen

In diesem Kapitel wurde der Stand der Technik vorgestellt, welcher die Inhalte dieser Arbeit behandelt. Im ersten Schritt wurde aufgezeigt, welche wissenschaftlichen Arbeiten es im Bereich eines digitalen Modells mit Hilfe einer Drohne gibt. Im zweiten Schritt wurde der Stand der Technik von Drohnen-basierter Lagerinventur erörtert. Dies wurde in die Teile von wissenschaftlichen Arbeiten und am Markt erhältlichen Lösungen gegliedert.

In Tabelle 3 wird die in diesem Kapitel gesammelte Literatur zusammengefasst, nach relevanten Themenbereichen gegliedert und der Berücksichtigungsgrad der Thematik bewertet. Die Hauptkategorie digitales Modell wird in den Prozess der Erstellung eines digitalen Zwillings und in die Datenaufnahme für ein digitales Modell anhand einer Drohne eingeteilt. Die Drohnen-basierte Lagerinventur wird in die Unterkategorien von RFID, QR-Code oder Barcode, Abgleich eines 3D-Modells und die Flugroute gegliedert. Die Flugroute steht dabei für wissenschaftliche Paper, die untersucht

<sup>158</sup> vgl. Bitcraze, o.D.

<sup>159</sup> Bitcraze, o.D.

<sup>160</sup> Eigene Darstellung

haben, was der optimale Weg ist, den die Drohne abfliegt, um eine effiziente Lagerinventur durchzuführen.

Berücksichtigungsgrad	Symbol	Digitales Modell		Drohnen-basierte Lagerinventur			
		Prozess der Erstellung eines digitalen Zwillings	Datenaufnahme mittels Drohnen für ein digitales Modell	RFID	QR-Code/Barcode	Abgleich mit 3D-Modell	Flugroute
Nicht berücksichtigt	○						
Teilweise berücksichtigt	◐						
Berücksichtigt	●						
Autor	Jahr						
Balaska et al.	2022	○	○	○	○	●	○
Cristiani et al.	2020	○	○	○	●	○	●
Daio et al.	2024	○	○	○	○	●	○
Follath et al.	2022	●	○	○	○	○	○
Gasparovic	2017	○	●	○	○	○	○
Malhotra und Soderstrom	2022	◐	●	○	○	○	○
Markovic et al.	2024	○	◐	○	●	○	○
Maweni et al.	2023	○	○	○	●	○	●
Melcher et al.	2019	◐	●	○	○	○	○
Melcher et al.	2018	◐	●	○	○	○	○
Nafors et al.	2020	●	○	○	○	○	○
Sommer et al.	2023	●	◐	○	○	○	○
Stöber et al.	2024	○	●	○	○	○	○
Thomaidis und Zeimpekis	2024	○	○	●	○	○	◐

Tabelle 3: Zusammenfassung der State-of-the-Art<sup>161</sup>

Durch die in diesem Kapitel vorgestellten wissenschaftlichen Arbeiten und deren Ausblicke für weitere Forschung ergibt sich eine Forschungslücke eines Modells für die Erstellung eines digitalen Lagerlayouts durch den Einsatz einer kostengünstigen industriellen Drohne, welches weiterführend für eine automatisierte Lagerinventur verwendet wird. Ausgehend von den recherchierten Inhalten wird nachfolgend eine Forschungshypothese aufgestellt.

### Forschungshypothese

Der Einsatz von Drohnen und geeigneten Methoden zur 3D-Rekonstruktion des Lagerinnenbereichs ermöglicht eine effektive Ausgangsbasis für Analyse- und Planungsvorgänge. Durch die 3D-Modellierung wird die Grundlage für die Planung einer Drohnen-basierten Lagerinventur geschaffen, um den Flug effizient und präzise

<sup>161</sup> Eigene Darstellung

gestalten zu können. Dazu ist ein Vorgehensmodell zu entwickeln, sodass dieses von Fachpersonal im Logistikbereich angewandt werden kann.

### **Forschungsfragen**

Ausgehend von der dargelegten Forschungshypothese, der aufgezeigten Problemstellung in Kapitel 1.1 und dem Forschungsbedarf nach Follath et al. (2022) und Nafors et al. (2020) resultieren die Forschungsfragen, welche im Zuge dieser Arbeit beantwortet werden sollen:

- Welche Methoden zur visuellen Rekonstruktion des Layouts eines Indoorlagers sind durch den Einsatz einer Drohne praxisrelevant?
- Wie kann ein Ansatz für eine automatisierte Drohnen-basierte Lagerinventur auf Basis des Layouts realisiert werden?
- Welche Barrieren sind beim Einsatz einer indoor-fähigen Drohne für eine Datenaufnahme zu beachten?

Das Hauptziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Vorgehensmodells für die drohnengestützte Layouterstellung unter der Berücksichtigung praxisrelevanter Rahmenbedingungen, welches zur weiteren Analyse und Planung von betrieblichen Layouts verwendet werden kann. Zur Erreichung des Hauptziels ist es von wesentlicher Bedeutung die oben genannten Forschungsfragen zu beantworten.

Zur Erarbeitung der Inhalte dieser Arbeit wird auf Basis von den vorangegangenen theoretischen Kapiteln der Praxisteil in den nachfolgenden Kapiteln umgesetzt.

## 4 Vorgehensmodell zur Implementierung einer drohnengestützten Layouterstellung

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die theoretischen Grundlagen erörtert und der neueste Stand der Technik zusammengefasst. Im vorliegenden Kapitel wird auf Basis dessen ein Vorgehensmodell zur Erstellung eines digitalen 3-dimensionalen Lagerlayouts mit Hilfe einer industriellen Drohne konzipiert. Das entwickelte Modell wird im nächsten Schritt um ein Konzept für die Planung einer automatisierten Drohnen-basierten Lagerinventur erweitert. Durch das entwickelte Modell soll Anwendenden ein nutzbares Konzept für Analyse- und Planungsprozesse zur Verfügung gestellt werden.

### 4.1 Anforderungen an das Vorgehensmodell

In Bezugnahme auf die in Kapitel 3 identifizierten Herangehensweisen des gegenwärtigen Stands der Wissenschaft und Technik sowie der definierten Zielsetzung besteht ein Forschungsbedarf für die Erstellung und Bewertung der erhaltenen Ergebnisse eines geeigneten Vorgehensmodells für die Erstellung eines digitalen 3D-Layouts eines Lagers im Innenbereich, welches im weiteren Schritt für die Planung einer automatisierten Drohnen-basierten Lagerinventur verwendet wird. Es gibt Ansätze dafür, jedoch sollen diese erweitert und auf Praxisrelevanz geprüft werden. Das angestrebte Vorgehensmodell soll dabei die Anforderungen erfüllen, dass es richtig, relevant, wirtschaftlich, klar gestaltet, vergleichbar und systematisch ist.<sup>162</sup>

### 4.2 Systemgrenzen des Modells

Ein Vorgehensmodell bietet eine strukturierte Herangehensweise, um Systeme zu analysieren und abzubilden. Um das effiziente Abarbeiten des Modells zu gewährleisten, ist es wesentlich Systemgrenzen vom Modell zu definieren.<sup>163</sup> Die Grenzen bestimmen, welche Prozesse, Elemente und Systeme in das Modell einbezogen werden und welche für weitere Schritte nicht berücksichtigt werden. Dadurch wird die Modellierung effizient und zielgerichtet gestaltet. Im ersten Schritt werden softwareseitige Rahmenbedingungen festgelegt. Danach erfolgt die Festlegung der hardwareseitigen Rahmenbedingungen.

<sup>162</sup> vgl. Gadatsch, 2022, S. 43–44.

<sup>163</sup> vgl. Rabe et al., 2008, S. 62 ff.

### 4.2.1 Softwareseitige Rahmenbedingungen

Zur Erstellung eines digitalen Modells eines Lagers ist es notwendig zu definieren, welche Methode dafür verwendet wird, wie in Kapitel 2.2 erörtert. Die softwareseitigen Rahmenbedingungen, also die Wahl der geeigneten Methode, sind essenziell, um Nutzeranforderungen zu erfüllen. Darüber hinaus sind Lizenzierung und Nutzung von Open-Source-Komponenten als wesentliche Aspekte zu betrachten.

### 4.2.2 Hardwareseitige Rahmenbedingungen

Die hardwareseitigen Rahmenbedingungen spielen eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung und Implementierung eines Vorgehensmodells zur Erstellung eines Layouts. Diese bestimmen die technischen Möglichkeiten und Grenzen, sodass das Modell verfahren kann.

Für die Erhebung von Daten sowie die Klärung der relevanten Technologielösungen für einen spezifischen Use-Case existieren diverse hardwareseitige Ansätze. Zunächst ist eine präzise Definition der Anforderungen und Ziele des Use-Cases erforderlich. Darauf aufbauend können unterschiedliche Technologien evaluiert werden, um die optimale Lösung zu ermitteln. Mögliche Ressourcenmittel sind in den Kapiteln 2.4 und 2.5 erörtert. Es ist von essenzieller Bedeutung, die jeweiligen Vor- und Nachteile der einzelnen Ansätze sorgfältig abzuwägen, um eine fundierte Entscheidung zu treffen. Die Grundlage für die Bewertung erfolgt in Kapitel 4.3.3, wo das Ressourcenmittel geprüft wird, mit dem Sensoren für die Aufnahme räumlicher Daten mitgeführt werden kann.

## 4.3 Entwicklung des Modells

Wie in Kapitel 3 erörtert, gibt es Ansätze für den Prozess zur Erstellung eines digitalen Zwillings, wozu ein digitales Modell zählt (siehe Kapitel 2.3.1). Die Grundlagen für den Prozess sind in Kapitel 2.3.2 erläutert. Basierend darauf und auf allen bis zu diesem Abschnitt gesammelten Informationen wird das Vorgehensmodell entwickelt. Die wesentlichen Schritte der Vorgehensweise gestalten sich wie folgt:

- Schritt 1: Definition des Use-Cases
- Schritt 2: Auswahl der geeigneten Methode zur Erstellung eines digitalen Modells
- Schritt 3: Prüfung der Eignungsfähigkeit des Ressourcenmittels Drohne für den Transport eines Sensors
- Schritt 4: Datenerfassung
- Schritt 5: Datenuntersuchung und -bereinigung
- Schritt 6: Modellierung des digitalen Modells
- Schritt 7: Bewertung des digitalen Modells

- Schritt 8: Durchführung von Analyse- und Planungsvorgängen anhand des digitalen Modells
- Schritt 9: Bereitstellung der erhaltenen Ergebnisse

Die in Abbildung 27 mit Rechtecken umrandeten Schritte adressieren teilweise die definierten Schritte nach Follath et al. eines Vorgehensmodells zur Entwicklung digitaler Zwillinge in Produktion und Logistik, wie sie in Abbildung 10 dargestellt sind. Wie aus dem Bild hervorgeht, wird Schritt 3 neu eingeführt.

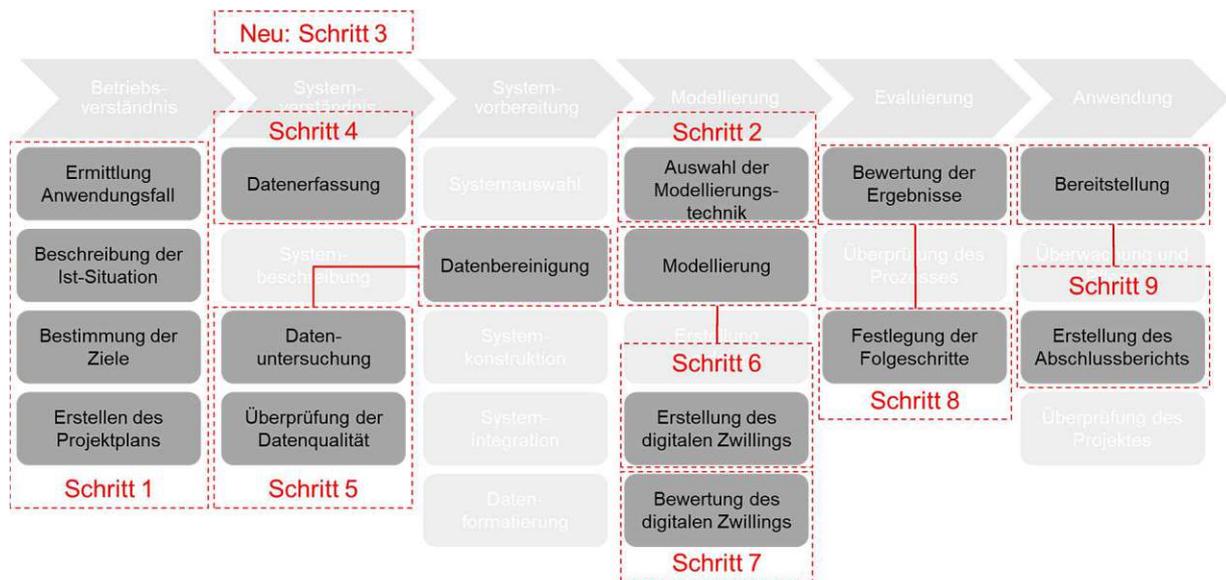


Abbildung 27: Adressierte Schritte im Vorgehensmodell nach Follath et al.<sup>164</sup>

Das, in dieser Arbeit, entwickelte Vorgehensmodells für eine drohnengestützten Layouterstellung für Analyse- und Planungsvorgänge ist in Abbildung 28 dargestellt und beruht auf den definierten Schritten 1 bis 9. Die detailliertere Beschreibung der Schritte erfolgt in den Kapiteln 4.3.1 bis 4.3.9. Dabei resultiert aus jedem Schritt ein Ergebnis, welches eindeutig beschrieben ist.

<sup>164</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Follath et al., 2022, S. 694.

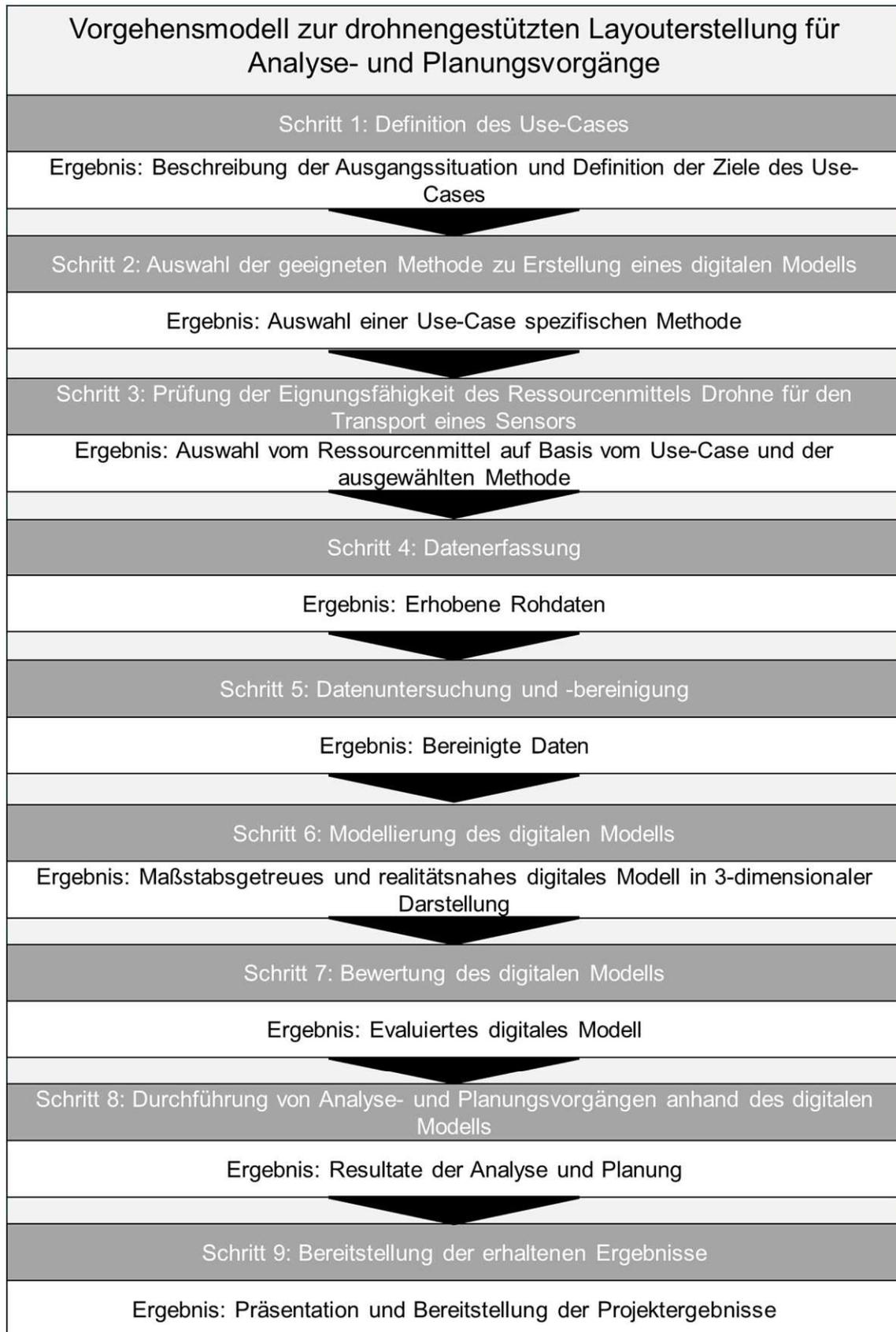


Abbildung 28: Entwickeltes Vorgehensmodell<sup>165</sup>

<sup>165</sup> Eigene Darstellung

### 4.3.1 Schritt 1: Definition des Use-Cases

Die Definition des Use-Cases, also Schritt 1, umfasst die Ermittlung des Anwendungsfalls mit einer detaillierten Beschreibung der Ist-Situation. Im Rahmen der Analyse des aktuellen Zustands werden die bestehenden Prozesse und Herausforderungen identifiziert und es wird ein Verständnis für diese gewonnen. Dies umfasst die Identifikation der beteiligten Akteure und gegebenenfalls der bisher genutzten Technologien. Anschließend werden die Ziele des Projekts bestimmt, die als Leitfaden für die gesamte Projektplanung und -durchführung dienen. Die Darstellung der Projektschritte erfolgt in einer strukturierten und nachvollziehbaren Weise. Diese Aspekte werden für Schritt 1 aus dem Vorgehensmodell nach Follath et al. herangezogen.

Das Ergebnis dieses Schrittes ist eine Beschreibung der Ausgangssituation und Definition der Ziele des Use-Cases

### 4.3.2 Schritt 2: Auswahl der geeigneten Methode zur Erstellung eines digitalen Modells

Schritt 2 basiert auf der Phase der Modellierung eines digitalen Zwillings auf Basis des Vorgehensmodells von Follath et al. Mögliche Technologien sind in Kapitel 2.2 erörtert. Um eine Entscheidung für eine geeignete Methode zu treffen, können Bewertungsmethoden angewandt werden, welche verbale Methoden, Punktwertmethoden und Kennzahlmethoden umfassen.

Verbale Methoden stellen die einfachste Art einer Bewertung dar, wo zu bewertende Kriterien aufgelistet und verbal beantwortet werden. Das Gesamturteil resultiert aus einer intuitiven Beurteilung Abwägung der Einzelurteile zu den aufgelisteten Merkmalen. Bei Punktwertmethoden werden zu bewertenden Kriterien mittels einer Punkteskala quantifiziert und summiert, wobei die Möglichkeit einer Gewichtung besteht. Dazu zählen die Methoden der Nutzwertanalyse und der einfachen Punktbewertung. Bei der Kennzahlenmethode erfolgt eine Bewertung auf Basis von betriebswirtschaftlichen Kennzahlen.<sup>166</sup>

In Schritt 2 wird die einfache Punktbewertung angewandt, um Merkmale von digitalen Modellen auf Basis ausgewählter Methoden zu quantifizieren.

#### Einfache Punktbewertung

In diesem Verfahren werden Lösungsalternativen anhand einer Auswahl an Kriterien bewertet, wobei eine Punktevergabe und anschließende Addition erfolgen. Diese Methode zeichnet sich durch ihre Einfachheit und universelle Einsetzbarkeit aus. Eine

---

<sup>166</sup> vgl. Schlattmann und Seibel, 2017, S. 101 f.

Gewichtung der Kriterien, ähnlich bei einer Nutzwertanalyse, muss nicht zwangsmäßig erfolgen. Entfällt diese, so sind alle Kriterien als gleich wichtig anzusehen.<sup>167</sup>

Als Bewertungskriterien werden die Parameter entsprechend Tabelle 2 herangezogen, wie aus der Punktbewertung zur Ermittlung der geeigneten Methode zur Erstellung eines digitalen Modells, dargestellt in Tabelle 4, hervorgeht. Jedes festgelegte Kriterium wird zur Nachvollziehbarkeit nummeriert. Die gegenübergestellten Methoden werden anschließend mit Punkten je Kriterium bewertet. Es werden Punkte von 0 (unbefriedigend) bis 4 (sehr gut) vergeben. Die vergebenen Punkte werden anschließend je Methode summiert. Die Wertigkeit wird errechnet, indem die Summe der Punkte je Methode durch die maximal erreichbaren Punkte dividiert wird.<sup>168</sup> Dadurch kann die Wertigkeit der jeweiligen Methoden beurteilt werden, was jedoch nur als Anhaltswerte zu verstehen ist. Die Methode ist unzureichend, wenn die Wertigkeit unter 0,6 liegt. Eine Wertigkeit zwischen 0,6 und 0,7 zeigt eine brauchbare Methode, eine Wertigkeit zwischen 0,7 und 0,8 eine Gute. Liegt die Wertigkeit über 0,8 zeigt die Methode ein sehr gutes Ergebnis der Punktbewertung.<sup>169</sup>

		Methoden zur Erstellung eines digitalen Modells		
		A	B	C
Nr.	Bewertungskriterium	Punkte	Punkte	Punkte
1	Vollständigkeit			
2	Aufnahmezeit			
3	Wiedererkennbarkeit			
4	Technische Anwendbarkeit			
5	Geometrische Intoleranz			
Summe				
Wertigkeit W				

Tabelle 4: Schema der Punktbewertung zur Erstellung eines digitalen Modells<sup>170</sup>

### Bewertungskriterien

Die Bewertungskriterien sind auf Basis von Ergebnissen von wissenschaftlicher Literatur, Recherche und Eigenerfahrung zu bewerten. Wie oben beschrieben, werden die Bewertungskriterien 1 bis 5 auf Basis von Stöber et al. herangezogen. Vollständigkeit, Aufnahmezeit, Erkennbarkeit, technische Anwendbarkeit und geometrische Intoleranz beziehen sich hierbei auf die Qualität von aufgenommenen Punktwolken.

<sup>167</sup> vgl. Schlattmann und Seibel, 2017, S. 102 ff.

<sup>168</sup> vgl. VDI 2225-Blatt 3, 1998, S. 4.

<sup>169</sup> vgl. Schlattmann und Seibel, 2017, S. 103.

<sup>170</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Schlattmann und Seibel, 2017, S. 104.

Nr.1 – Vollständigkeit: Das Kriterium gibt die Vollständigkeit der Darstellung des digitalen Modells an. Unvollständige Datenaufnahmen führen zu fehlenden Objekten, was zu weiterem Aufwand in der Planungsphase führt.

Nr.2 – Aufnahmezeit: Die Dauer für die Aufnahme der Daten, sodass gegebenenfalls Daten während Produktionspausen aufgenommen werden können.

Nr.3 – Wiedererkennbarkeit: Die Wiedererkennbarkeit des Fabriklayouts nimmt eine zentrale Stellung ein, insbesondere wenn Personen eingebunden werden, die nicht am Planungsprozess involviert sind. Durch Implementierung von Farben und Texturen kann die Wiedererkennbarkeit gesteigert werden.

Nr.4 – Technische Anwendbarkeit: Die technische Anwendbarkeit ist abhängig von der Art der Ziele vom zu nutzenden Modell. Die Methode soll sicherstellen, dass Datenformate generiert werden, welche eine weitere Verwendung, beispielsweise in CAD-Software, ermöglichen.

Nr.5 – Geometrische Intoleranz: Die geometrische Toleranz beschreibt die zulässige Maßabweichung des erzeugten Modells im Vergleich zum realen Bild und hängt von der Anwendung ab.<sup>171</sup>

Das Ergebnis dieses Schrittes ist eine ausgewählte Methode zur Erstellung eines digitalen Modells, welche für den Use-Case geeignet ist.

### **4.3.3 Schritt 3: Prüfung der Eignungsfähigkeit des Ressourcenmittels Drohne für den Transport eines Sensors**

Für die Auswahl eines geeigneten Ressourcenmittels, welches für den Transport des Sensors zur Datenaufnahme verwendet wird, bietet sich an auf die VDI 2710-Blatt 1 zurückzugreifen und entsprechend der Anforderung des Vorgehensmodells zu adaptieren. Hier liegt vor allem der Fokus auf der Prüfung der Eignungsfähigkeit des Drohneneinsatzes. Die VDI 2710-Blatt 1 stellt eine Richtlinie dar, welche sich mit der ganzheitlichen Planung von fahrerlosen Transportsystemen befasst. Die VDI-Norm fungiert als Orientierungshilfe bei der technischen Auswahl und ermöglicht durch ein Ausschlussverfahren die Identifizierung geeigneter Fördersysteme.<sup>172</sup>

#### **Bewertungsmuster in Anlehnung an VDI 2710-Blatt 1**

Die Adaptierung des Bewertungsmusters in Anlehnung an VDI 2710-Blatt 1 erfolgt wie nachfolgend beschrieben. Die VDI-Norm stellt mögliche Fördersysteme gegenüber und bewertet die Eignung von dessen auf Basis von Anforderungskriterien. Wird für ein Transportmittel bei einem Anforderungskriterium eine gute Eignung festgestellt, so

<sup>171</sup> vgl. Stöber et al., 2024, S. 127–128.

<sup>172</sup> vgl. VDI 2710-Blatt 1, 2007, S. 2 ff.

wird dieses Ressourcenmittel mit 5 bewertet. Bei mittlerer Eignung erfolgt die Bewertung mit 3 Punkten, bei schlechter Eignung mit 1 Punkt. Diese Punkte werden nach den entsprechenden Ressourcenmitteln summiert, um das geeignete Ressourcenmittel mit der höchsten Summe am Ende festzulegen. Mögliche Ressourcenmittel, welche die Sensoren für die räumliche Datenaufnahme transportieren, können Menschen, Drohnen, Wagen<sup>173</sup> oder fahrerlose Transportsysteme<sup>174</sup> sein.

Die Anforderungskriterien werden parallel nach Ausschlusskriterien bewertet. Ist ein Anforderungskriterium ein Ausschlusskriterium für ein Ressourcenmittel, so entfällt dieses für die weitere Vorgehensweise im Modell. Die Kennzeichnung, ob ein Anforderungskriterium zum Ausschluss führt oder nicht, erfolgt mit einem „Ja“ oder „Nein“. Das allgemeine Bewertungsmuster der Ressourcenmittel in Anlehnung an VDI 2710-Blatt 1 findet sich in Tabelle 5 wieder.

		Möglichkeiten zum Transport eines Sensors			Ausschlusskriterium
		Ressourcenmittel			
Nr. des Ressourcenmittels		1	2	3	
Eignung		Bezeichnung	Bezeichnung	Bezeichnung	
5	Gut				
3	Mittel				
1	Schlecht				
Nr.	Anforderungskriterium				
1	Tragfähigkeit von 0,2 Kilogramm				
2	Tragfähigkeit von 2 Kilogramm				
3	Möglichkeit der Bewegung in die z-Achse				
4	Lärmpegel				
5	Bodenbeschaffenheit				
Summe von Eignung					

Tabelle 5: Schema der Bewertung der möglichen Ressourcenmittel<sup>175</sup>

### Beschreibung der Anforderungskriterien

Die angeführten Anforderungskriterien sind sowohl auf Basis von Recherche als auch subjektiv zu bewerten. Diese können gegebenenfalls in Anbetracht der kontinuierlichen Entwicklung des Standes der Technik angepasst werden. Sie werden wie folgt beschrieben.

<sup>173</sup> vgl. Sommer et al., 2023, S. 3.

<sup>174</sup> vgl. Stöber et al., 2024, S. 123–124.

<sup>175</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an VDI 2710-Blatt 1, 2007, S. 12.

Nr.1 – Tragfähigkeit von 0,2 Kilogramm: Die maximale Last, die das Ressourcenmittel sicher transportieren kann, beträgt 200 Gramm. Dies ist besonders relevant für leichte Kameras oder Sensoren. Eine GoPro wiegt in etwa 150 Gramm.<sup>176</sup>

Nr.2 – Tragfähigkeit von 2 Kilogramm: Die maximale Last, die das Ressourcenmittel sicher transportieren kann, beträgt 2 Kilogramm. Dies ermöglicht den Transport von schweren Sensoren oder zusätzlicher Ausrüstung. Ein LiDAR-Scanner wie beispielsweise von Hovermap, welcher für sämtliche Ressourcenmittel geeignet ist, wiegt in etwa 1,8 Kilogramm.<sup>177</sup>

Nr.3 – Möglichkeit der Bewegung in z-Achse: Die Fähigkeit des Ressourcenmittels sich in der z-Achse zu bewegen, also in der vertikalen Richtung, um räumliche Daten zu erfassen. In gewissen Fällen kann es notwendig sein, die Ressourcenmittel über Schutzzäune, Maschinen<sup>178</sup> oder abgesperrte Bereiche<sup>179</sup> zu bewegen.

Nr.4 – Lärmpegel: Der Lärmpegel, den das Ressourcenmittel während des Betriebs erzeugt. Eine geringere Lärmbelastung ist vorteilhaft für eine angenehmere Arbeitsumgebung. Ein hoher Lärmpegel hemmt die soziale Akzeptanz, was aus Studien von Drohnen in der letzten Meile hervorgeht.<sup>180</sup>

Nr.5 – Bodenbeschaffenheit: Die Eignung bei unebenem Boden zu operieren, in Anlehnung an VDI 2710-Blatt 1.<sup>181</sup>

Wird festgestellt, dass die Drohne nicht das geeignetste Ressourcenmittel ist, so kann mit jenem Ressourcenmittel, welches das beste Ergebnis in diesem Schritt erbringt, im Vorgehensmodell weiter verfahren werden. Das Ergebnis dieses Schrittes ist die Auswahl eines Ressourcenmittels auf Basis vom Use-Case und der ausgewählten Methode.

#### **4.3.4 Schritt 4: Datenerfassung**

In diesem Schritt erfolgt die Erfassung von räumlichen Daten, welche notwendig sind, um ein digitales Modell zu erstellen. In der ersten Phase werden sämtliche Maßnahmen vorbereitet. Danach folgt die Erhebung der räumlichen Daten.

##### **Vorbereitende Maßnahmen**

Dieser Schritt beinhaltet als ersten Schritt, die Vorbereitung von Maßnahmen, in dem Referenzmarker vorgedruckt und vor Ort im Werk angebracht werden. Diese Marker

---

<sup>176</sup> vgl. GoPro, Inc., o.D.

<sup>177</sup> vgl. Alsayed et al., 2021, S. 6.

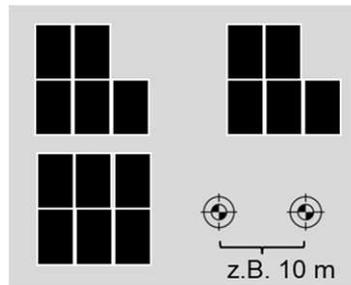
<sup>178</sup> vgl. Melcher et al., 2018a, S. 268.

<sup>179</sup> vgl. Experteninterview Taschner, geführt am 21.01.2025.

<sup>180</sup> vgl. Fehling und Saraceni, 2023, S. 7.

<sup>181</sup> vgl. VDI 2710-Blatt 1, 2007, S. 11.

dienen als Referenzpunkte oder Bodenkontrollpunkte und werden in einem eigens definierten Abstand zueinander befestigt. Dies kann am Boden oder in der Höhe auf einem Regal erfolgen. Der definierte Abstand der beiden Marker dient dazu, um das modellierte digitale Modell zu skalieren.<sup>182</sup> In Abbildung 29 ist beispielhaft ein Grundriss mit zwei Markern dargestellt, welche mit 10 Metern Distanz zueinander am Boden angebracht werden. Die Referenzmarker können nach Belieben gewählt werden, weshalb auch ein einfaches Kreuz als Marker fungieren kann. Die schwarz dargestellten Rechtecke stellen einen Lagerbereich in der Draufsicht dar.



**Abbildung 29: Beispielhafter Grundriss eines Lagers mit 2 Referenzmarkern<sup>183</sup>**

Bei der Datenerhebung ist es notwendig, dass weitere Maßnahmen vor Ort erfolgen.. Fällt die Wahl auf eine Drohne als Ressourcenmittel, so ist der Drohnenflug mit Sicherheit zu gewährleisten, wobei spezifische luftfahrtrechtliche Bestimmungen nicht zur Anwendung kommen, wie aus Kapitel 2.5.11 hervorgeht. Die Abklärung, dass Daten aufgenommen werden dürfen, erfolgt betriebsintern und ist gegebenenfalls mit Mitarbeitenden abzuklären. Hier sei zu erwähnen, dass keine personenbezogenen Daten aufgenommen werden. Generell ist auf die regelrechte Einhaltung der Datenschutz-Grundverordnung (EU) 2016/679 und Regelungen des Anlagenbetreibers zu achten.<sup>184</sup>

Um mögliche Unfälle, als auch Unregelmäßigkeiten in der Datenerhebung und folglich im digitalen Modell zu vermeiden, ist es notwendig den aufzunehmenden Bereich, wenn möglich, zu sperren. Beim Einsatz von automatisierten Ressourcenmitteln, als auch manuell geflogenen Drohnen, ist es sinnvoll einen Kollisionsschutz anzubringen. Darüber hinaus empfiehlt es sich, die Datenerhebung in Betriebspausen<sup>185</sup>, außerhalb der Betriebszeiten oder in abgesperrten Bereichen durchzuführen. Die Absperrung kann mittels Markierung durch Pylonen oder Kommunikation an das Personal erfolgen.

### Erhebung der räumlichen Daten

Bei der Datenerhebung ist es essenziell, dass sämtliche Objekte im abzubildenden Bereich von unterschiedlichen Perspektiven aufgenommen werden. Auf diese Weise

<sup>182</sup> vgl. Dering et al., 2019, S. 152.

<sup>183</sup> Eigene Darstellung

<sup>184</sup> vgl. VDI 2879, 2018, S. 10.

<sup>185</sup> vgl. Stöber et al., 2024, S. 128.

können Merkmale der physischen Objekte mit den jeweiligen Technologien zur Modellierung eines digitalen Modells erkannt werden. Entsprechend dem Ressourcenmittel ist ein geeigneter Fortbewegungspfad zu wählen beziehungsweise zu gewährleisten. Im Rahmen des Aufnahmeprozesses ist die Beachtung geeigneter Aufnahmewinkel aus unterschiedlichen Höhen zu berücksichtigen. Des Weiteren ist es, wie beschrieben von Malhotra und Soderstrom, von Vorteil, wenn die aufzunehmenden Räumlichkeiten eine ausreichende Belichtung aufweisen, sodass ein lückenloses digitales Modell modelliert werden kann.<sup>186</sup> Die erfassten räumlichen Daten werden im entsprechenden Format gespeichert und sind somit bereit für den nachfolgenden Schritt.

Das Ergebnis dieses Schrittes ist die Erfassung von Rohdaten, welche in geeigneter Form gespeichert wurden.

#### **4.3.5 Schritt 5: Datenuntersuchung und -bereinigung**

Nachdem die räumlichen Daten im Schritt 4 erfasst wurden, gilt es nun diese zu untersuchen und zu bereinigen. Um die Datenmenge gering zu halten, werden beispielsweise bei aufgenommenen Bilddaten jene Bilder für das weitere Prozedere entfernt, welche Duplikate aufweisen beziehungsweise sehr ähnlich zueinander sind. Wurden Videodaten aufgenommen, so kann es je nach nutzender Methode und Software zur Erstellung des digitalen Modells notwendig sein, dieses in einzelne Bildsequenzen zu schneiden. Dass ein Schnitt eines Videos zu Bildsequenzen und eine Weiterverarbeitung in einer Photogrammetrie-Software möglich ist zeigen Gao et al.<sup>187</sup>

Das Ergebnis dieses Schrittes sind bereinigte Daten.

#### **4.3.6 Schritt 6: Modellierung des digitalen Modells**

Bei der Modellierung des digitalen Modells ist eine entsprechende Software auszuwählen, welche mit der geeigneten Methode und dem Ressourcenmittel das digitale Modell erstellt. Hierfür gibt es unterschiedlichste Möglichkeiten am Markt. Neben Open-Source Lösungen, gibt es kostenpflichtige Softwares, mit denen gute Ergebnisse erzielt werden und zugleich intuitiv sind. Im Vorgehensmodell dieser Arbeit ist die Software nach dem Use-Case spezifisch zu wählen. Mögliche Softwares wurden in Kapitel 2.2.1 erwähnt.

Der grundlegende Ablauf bei der Modellierung besteht daraus, dass die aufgenommenen und aussortierten Daten in die Software eingespielt werden. Je nach Software wird im nächsten Schritt eine Referenzdistanz, entsprechend Kapitel 4.3.4,

<sup>186</sup> vgl. Malhotra und Soderstrom, 2022, S. 4.

<sup>187</sup> vgl. Gao et al., 2021, S. 11858 ff.

definiert. Auf Basis dieser Distanz wird im Regelfall das erhaltene digitale Modell skaliert, woraus ein maßstabsgetreues digitales Modell resultiert. Das erhaltene Ergebnis ist ein genaueres Modell.<sup>188</sup> Dieses digitale Modell kann für weitere Zwecke in ein CAD-Datenformat umgewandelt werden, wie beispielsweise in eine .obj-Datei.

Das Ergebnis dieses Schrittes ist ein modelliertes maßstabsgetreues und realitätsnahes digitales Modell in 3-dimensionaler Darstellung.

#### 4.3.7 Schritt 7: Bewertung des digitalen Modells

In diesem Schritt wird das erhaltene digitale Modell bewertet. Hierfür wird ebenso, wie in Schritt 2, siehe Kapitel 4.3.2, eine Punktbewertung von Bewertungskriterien durchgeführt. Die Bewertung ist in Tabelle 6 dargestellt. In diesem Schritt werden ähnliche digitale Modelle miteinander verglichen und bewertet. Ähnliche Abbilder können entstehen, indem die gleichen Daten verwendet werden, jedoch bei der Modellierung andere Parametereinstellungen in der Software festgelegt werden und somit zwei oder mehr Outputs in Form eines digitalen Modells resultieren. Ebenso können ähnliche Abbilder entstehen, wenn die Datenaufnahme auf zwei oder mehr Möglichkeiten erfolgt, beispielsweise eine reine Aufnahme aus Bilddaten und eine Aufnahme auf Basis eines Videos, und ebenso zwei oder mehr Outputs entwickelt werden.

		Digitales Modell		
		1	2	3
Nr.	Bewertungskriterium	Punkte	Punkte	Punkte
1	Vollständigkeit			
2	Erkennbarkeit			
3	Abweichung zur Realität			
Summe				
Wertigkeit W				

Tabelle 6: Schema der Punktbewertung der digitalen Abbilder<sup>189</sup>

Die Bewertungskriterien 1 und 2<sup>190</sup> werden analog als jene in Schritt 2, siehe Kapitel 4.3.2, verstanden und entsprechen jenen von Stöber et al.

Das Bewertungskriterium 3 stellt die Abweichung zur Realität dar. Dieses wird ebenso mit den Punkten 0 bis 4 entsprechend Tabelle 7 bewertet. Die Abweichung des Modells zur Realität wird so ermittelt, indem die Distanz von zwei Merkmalen im digitalen Modell einer in der Realität gemessenen Distanz von diesen zwei Merkmalen gegenübergestellt wird. Das Ergebnis ist eine prozentuale Abweichung vom

<sup>188</sup> vgl. Gašparović et al., 2017, S. 119.

<sup>189</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Schlattmann und Seibel, 2017, S. 104.

<sup>190</sup> vgl. Stöber et al., 2024, S. 127–128.

tatsächlichen Wert. Die Distanz von zwei Merkmalen kann beispielsweise der Abstand zwischen zwei Traversen sein.

	Abweichung zur Realität = $\left(1 - \frac{\text{Distanz im digitalen Modell}}{\text{Distanz in der Realität}}\right) * 100[\%]$				
Abweichung zur Realität	0% ≤ x ≤ 1%	1% < x ≤ 5%	5% < x ≤ 10%	10% < x ≤ 15%	15% < x ≤ 100%
Punkte	4	3	2	1	0

**Tabelle 7: Umrechnung der Abweichung zur Realität in Punkte<sup>191</sup>**

Das Ergebnis dieses Schrittes ist ein evaluiertes digitales Modell, welches für die weiteren Schritte verwendet wird.

#### 4.3.8 Schritt 8: Durchführung von Analyse- und Planungsvorgängen anhand des digitalen Modells

Auf Basis des final gewählten digitalen Modells erfolgt in diesem Schritt die Durchführung der definierten Analyse- und Planungsvorgänge, welche anhand eines 3D-Modells möglich sind.<sup>192</sup> Das digitale Modell kann in erster Linie dazu genutzt werden, um den aktuellen Stand in einem Lager zu bewerten. Hierfür wurden logistische Kennzahlen in den Kapiteln 2.1.2, 2.1.3 und 2.1.4 erläutert.

##### Analysevorgänge

Anhand des digitalen Modells kann die Fläche analysiert werden, welche aktuell verbaut ist, um somit auf den Flächennutzungsgrad<sup>193</sup> zu schließen. Durch die zusätzliche Information der Höhe in die z-Komponente, was aus dem erhaltenen digitalen Modell beziehungsweise 3D-Layout hervorgeht, kann auf den Höhennutzungsgrad und Volumennutzungsgrad<sup>194</sup> geschlossen werden.

##### Planungsvorgänge

Wie in Kapitel 2.1.5 beschrieben, kann das 3D-Layout für eine Brownfield-Planung<sup>195</sup> genutzt werden.<sup>196</sup> Hierfür können Ansätze, wie von Melcher et al. beschrieben, verwendet werden, um Objekte im 3D-Modell freizuschneiden und zu verschieben.<sup>197</sup>

Das Ergebnis dieses Schrittes sind die Resultate der abgezielten Analyse- und Planungsvorgänge anhand des digitalen Modells.

<sup>191</sup> Eigene Darstellung

<sup>192</sup> vgl. Melcher et al., 2018b, S. 1 ff.

<sup>193</sup> vgl. Melcher et al., 2018b, S. 3.

<sup>194</sup> vgl. Experteninterview Taschner, geführt am 21.01.2025.

<sup>195</sup> vgl. Wiendahl et al., 2024, S. 235.

<sup>196</sup> vgl. Nafors et al., 2020, S. 1619 ff.

<sup>197</sup> vgl. Melcher et al., 2019, S. 1 ff.

### **4.3.9 Schritt 9: Bereitstellung der erhaltenen Ergebnisse**

Auf Basis aller vorangegangenen Schritte wird in Schritt 9 das gesamte Ergebnis des Vorgehensmodells, welches ein Projekt darstellt, zusammengefasst, dokumentiert und präsentiert. Die Ergebnisse können am Ende gegebenenfalls dem Kunden in geeigneten Datenformaten zur Verfügung gestellt werden.

Das Ergebnis dieses Schrittes ist die Präsentation und Bereitstellung der Resultate der Analyse und Planung.

## **4.4 Erweiterung des Modells um die Planung einer automatisierten Drohnen-basierten Lagerinventur**

Das Vorgehensmodell zur Erstellung eines digitalen Lagerlayouts dient als Basis für weitere Schritte und Analysen in der Optimierung. Wie aus der Ausgangssituation und der Motivation aus Kapitel 1.1 hervorgeht, wird eine automatisierte Lagerinventur, welche mittels Drohnen erfolgt, in der Industrie angestrebt. Das entwickelte Vorgehensmodell wird nun um die Planung einer automatisierten Lagerinventur mit Hilfe einer Drohne erweitert. Somit folgt ein weiterer Planungsschritt nach den in Kapitel 4.3 beschriebenen Schritten. Es findet sich zusätzlich in Schritt 8 - Planungsvorgänge, siehe Kapitel 4.3.8, nun auch die Implementierung einer automatisierten Drohnen-basierten Lagerinventur wieder.

Entschließt sich ein Unternehmen dazu eine Drohnen-basierte Lagerinventur durchzuführen, so ist zuerst zu entscheiden, ob Dienstleistende zur automatisierten Lagerinventur mittels einer Drohne oder marktübliche Drohnen für eine eigenständige Lösung herangezogen werden. Jene Möglichkeiten dazu sind in Kapitel 3.2.2 zusammengefasst.

Das Konzept einer automatisierten Lagerinventur mit einer Drohne findet in der Industrie noch keine überwiegende Anwendung, jedoch entwickelt sich diese Technologie stetig weiter. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass die Lösung einen Mehrwert aufweist und die Nachfrage steigt, wie in den Kapiteln 2.5.2, 2.5.3 und 2.5.4 erörtert ist. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Konzeption einer Eigenlösung für eine Drohnen-basierte Lagerinventur.

Um eine Bestandsaufnahme mit Hilfe einer Drohne durchführen zu können, muss zunächst ein geeignetes Modell eines Drohnenherstellers ausgewählt werden. Dies wird in Kapitel 4.4.1 erörtert. Anschließend wird in Kapitel 4.4.2 die Vorgehensweise der Drohnen-basierten Lagerinventur vorgestellt.

#### 4.4.1 Auswahl einer geeigneten Inventurdrohne

Für die Auswahl der Drohne, welche für die automatisierte Lagerinventur eingesetzt werden soll, ist es relevant Drohnen hinsichtlich deren Merkmale gegenüberzustellen. Die Merkmale sind in Anlehnung an den Ansatz einer Taxonomie für Drohnen in Kapitel 2.5.6 gewählt und um die Programmiersprache erweitert. Die Gegenüberstellung ist in Tabelle 8 schematisch dargestellt. Im Gegensatz zu den Bewertungen in den vorherigen Schritten, erfolgt hier keine Punktbewertung. Es erfolgt eine Aufzählung der Merkmale einzelner Modelle, sodass sich die zu planende Person einen Überblick über gängige Drohnenmodelle verschaffen kann. Auf Basis der Anforderungen an die Unternehmensumgebung sowie des eigenen Programmier-Know-hows kann eine subjektive Entscheidung ähnlich einer verbalen Bewertung<sup>198</sup> getroffen werden.

Eigenschaft	Hersteller / Modell		
	1	2	3
Programmiersprache			
Gewicht			
Akkulaufzeit			
Kameraauflösung			

Tabelle 8: Schema der Merkmale für eine Inventurdrohne<sup>199</sup>

Im Folgenden werden die einzelnen Merkmale in Kürze dargelegt.

**Programmiersprache:** Auf dem europäischen Markt gibt es wenige Drohnenmodelle, welche programmierbar sind. Hierfür wird teilweise auf Programmbibliotheken, sogenannte Software Development Kits, abgekürzt als SDKs, zurückgegriffen. Die dabei verwendeten Programmiersprachen für Drohnen sind in der Regel Python<sup>200</sup> oder C++.

**Gewicht:** Das Gewicht einer automatisiert fliegenden Drohne spielt eine wesentliche Rolle, da schwere Modelle eine größere Gefahr im Betrieb darstellen, falls diese kollidieren.<sup>201</sup>

**Akkulaufzeit:** Eine Lagerinventur beansprucht im Regelfall einige Minuten. Hier unterscheiden sich Modelle. Die Batteriekapazität beziehungsweise Akkulaufzeit ist ein relevantes Kriterium.<sup>202 203</sup>

<sup>198</sup> vgl. Schlattmann und Seibel, 2017, S. 101 f.

<sup>199</sup> Eigene Darstellung

<sup>200</sup> vgl. Cañas et al., 2020, S. 1 ff.

<sup>201</sup> vgl. Thomaidis und Zeimpekis, 2024, S. 118.

<sup>202</sup> vgl. Rakhade et al., 2021, S. 3.

<sup>203</sup> vgl. Thomaidis und Zeimpekis, 2024, S. 119.

**Kameraauflösung:** Bei einer Kamera-basierten Lagerinventur ist es essenziell eine ausreichend gute Kamera mit sich zu führen, welche genügend Megapixel aufweist. Die Möglichkeit einer Mitführung einer ausreichend guten Kamera ist abhängig vom Drohnenmodell.<sup>204</sup>

#### 4.4.2 Vorgehensweise der Drohnen-basierten Lagerinventur

In Kapitel 3.2.1 wurden wissenschaftliche Arbeiten zur Drohnen-basierten Lagerinventur zusammengefasst. Hierfür gibt es unterschiedliche Ansätze und verwendete Sensoren. Neben dem Einsatz von RFID-Sensoren<sup>205</sup>, werden Bilder aufgenommen und der Barcode oder QR-Code<sup>206 207 208</sup> ausgelesen. Des Weiteren gibt es Ansätze, wo Bildaufnahmen von Lagerplätzen gemacht und mit einem 3D-Modell<sup>209 210</sup> verglichen werden. Die Vorgehensweise in dieser Arbeit unterscheidet sich von den Genannten und wird nachfolgend beschrieben.

Nachdem eine programmierbare Drohne gemäß Kapitel 4.4.1 ausgewählt wurde, erfolgt die Programmierung der Drohne in der entsprechenden Programmiersprache mit dem passenden Software Development Kit. Hier werden die Flugroute und die Aufnahmezeitpunkte einer Datenaufnahme programmiert. Diese beiden Schritte gehören der Vorbereitung der Lagerinventur an und sind dementsprechend in Abbildung 30 strichliert dargestellt. Strichliert dargestellte Schritte sind in der Vorabplanung durchzuführen, was Inhalt dieses Vorgehensmodells ist. Durchgängig markierte Schritte sind vor Ort durchzuführen und stellen den Drohnenflug dar. Grau markierte Schritte werden durch Kunden durchgeführt.

Sich wiederholende Prozesse folgen danach und beginnen mit dem Flug, der ebenso die Datenaufnahme beinhaltet. Der Flug soll planmäßig automatisiert erfolgen und nach geeignetem Flugmuster abgewickelt werden. Maweni et al. haben beispielsweise ein "Zickzack"- und ein "Up-Down" Flugmuster gegenübergestellt.<sup>211</sup> Hier ist auf eine sichere Stabilität der Drohne während des Flugs zu achten, weshalb es gegebenenfalls notwendig ist, dass GPS-Signale, siehe Kapitel 2.5.9, empfangen werden können. Drohnen können im Regelfall auch ohne GPS-Signalen manövrieren, jedoch mit einer gewissen Instabilität. Dieser Schritt des Flugs erfolgt vor Ort.

Nachdem die Daten aufgenommen und gespeichert wurden, liegen diese in Video- oder Bildformat vor. Bei einem Videoformat kann es notwendig sein, dass dieses in

<sup>204</sup> vgl. Gašparović et al., 2017, S. 117.

<sup>205</sup> vgl. Thomaidis und Zeimpekis, 2024, S. 115 ff.

<sup>206</sup> vgl. Maweni et al., 2023, S. 1 ff.

<sup>207</sup> vgl. Cristiani et al., 2020, S. 317 ff.

<sup>208</sup> vgl. Markovic et al., 2024, S. 69 ff.

<sup>209</sup> vgl. Balaska et al., 2022, S. 1 ff.

<sup>210</sup> vgl. Daios et al., 2024, S. 1437 ff.

<sup>211</sup> vgl. Maweni et al., 2023, S. 1 ff.

einzelne Bildsequenzen für die nachgelagerte Auswertung geschnitten wird. Liegen aufgenommene Daten im Bilddatenformat vor, so entfällt der Schritt des Schneidens. Danach folgt OCR-Texterkennung anhand der Bilder, sodass der Ladungsträger, wo die Inventur gemacht wird, und der Lagerplatz als textuelle Information vorliegen. OCR steht für Optical Character Recognition und bezeichnet eine Technik, welche dazu dient Text und Bilddateien in eine Form umzuwandeln, sodass diese von Maschinen verarbeitet werden können.<sup>212</sup> Als finalen Schritt erfolgt eine Verknüpfung vom textuell erkannten Ladungsträger und dem Lagerplatz. Dies kann sowohl im Warehouse Management System, kurz WMS, oder in einem Enterprise Resource Planning System, kurz ERP, erfolgen.<sup>213</sup>

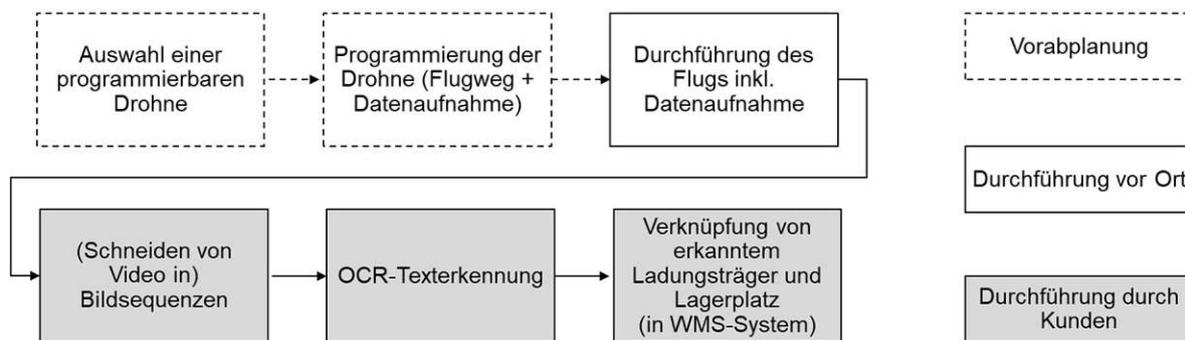


Abbildung 30: Vorgehensweise einer Drohnen-basierten Lagerinventur<sup>214</sup>

Die Systemarchitektur bei der Durchführung des Flugs inklusive Datenaufnahme entspricht der Darstellung in Abbildung 31, und wurde ähnlich jener von Cristiani et al. aufgebaut.<sup>215</sup> Das Personal bereitet die Drohne und einen PC mit dem entsprechenden Programmcode im Pilotbereich vor. Nachdem die Drohne mit dem PC verbunden ist, kann das Personal den Drohnenflug auslösen. Durch das Senden der Befehle vom PC an die Drohne in Form von Signalen, wird der Flug automatisiert durchgeführt. Durch die Anwesenheit des Personals, welches parallel andere Tätigkeiten in der Nähe ausführen kann, kann jederzeit bei Problemen gehandelt werden. Die Drohne kann so automatisiert in der dargestellten Lagergasse operieren.

<sup>212</sup> vgl. Noman et al., 2017, S. 1.

<sup>213</sup> vgl. Woźniakowski et al., 2018, S. 141 ff.

<sup>214</sup> Eigene Darstellung

<sup>215</sup> vgl. Cristiani et al., 2020, S. 318.

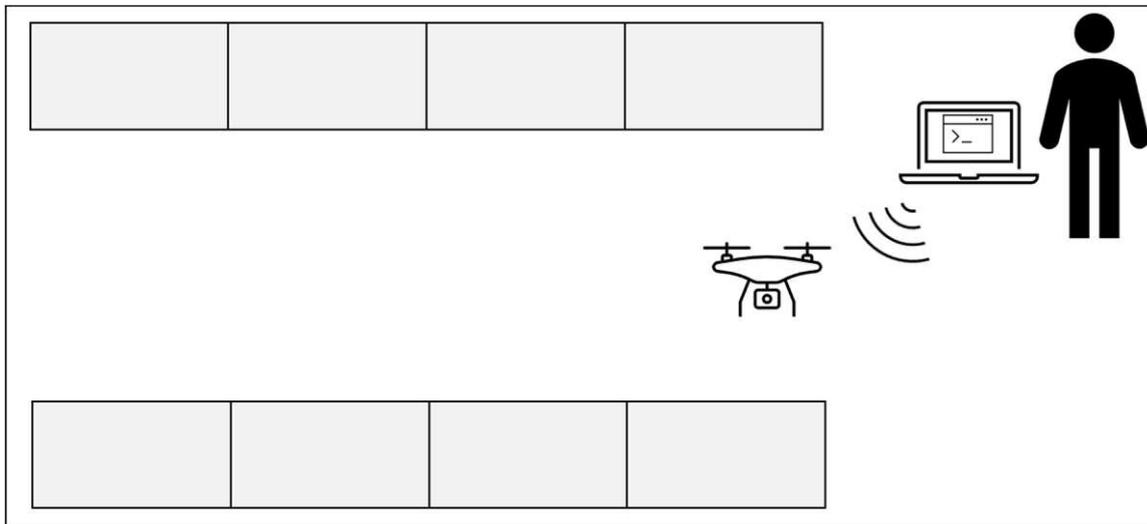


Abbildung 31: Systemarchitektur der Drohnen-basierten Lagerinventur<sup>216</sup>

## 4.5 Zusammenfassung des Kapitels

In diesem Kapitel wurde ein Vorgehensmodell zur Implementierung einer drohnengestützten Layouterstellung für Analyse- und Planungsvorgänge durch den im Innenbereich entwickelt und ist in Abbildung 28 dargestellt. Das Vorgehensmodell wurde durch insgesamt 9 Schritte aufgebaut, welche detailliert in den Kapiteln 4.3 und 4.4 beschrieben wurden. Das Resultat jedes Schrittes ist ein eigenes Ergebnis. Durch die Verwendung eines digitalen Modells eines Layouts erhält ein Unternehmen ein Tool zur Analyse eines Lagers, der Brownfield-Planung und Planung einer effizienten Lagerinventur. Das Vorgehensmodell soll nachfolgend anhand eines Use-Cases in der Industrie evaluiert werden.

<sup>216</sup> Eigene Darstellung

## 5 Evaluierung des Vorgehensmodells

Aufbauend auf Kapitel 4 wird das entwickelte Konzept in einem Unternehmen in Form eines Use-Cases angewandt. Einleitend wird die Aufgabenstellung beschrieben und relevante Kennzahlen des Unternehmens erhoben. Das in Abbildung 28 dargestellte Vorgehensmodell findet nachfolgend Anwendung.

### 5.1 Ausgangssituation des Use-Cases

Das mittelständische Unternehmen, welches sich auf die Lagerung und den Vertrieb von diversen Produkten spezialisiert hat, verfügt über ein Lager mit mehreren Lagergassen, wo rund 500 unterschiedliche Artikel gelagert werden. Das Unternehmen ist bestrebt am Markt konkurrenzfähig und folglich am aktuellsten Stand der Technik zu bleiben. Um die Machbarkeit einer Digitalisierung des Lagerbereichs aufzuzeigen, möchte das Unternehmen einen Teil des Lagers als Layout modellieren. Zugleich soll die Auslastung des betreffenden Bereichs analysiert werden. Aufgrund der zunehmenden Komplexität der Lagerverwaltung, hat die Geschäftsführung beschlossen, zusätzlich die Möglichkeit der Implementierung einer Drohnen-basierten Lagerinventur zu prüfen.

### 5.2 Problemstellung

Für die angestrebte Digitalisierung und Analyse des Lagerbereichs fehlt dem Unternehmen das erforderliche Expertenwissen. Die gängigen Modellierungsmethoden für ein digitales Modell eines Lagerlayouts sind nicht bekannt. Weiters fehlt das Wissen über die Möglichkeiten der Datenerhebung und der weiteren Verwendung dieser Daten für eine Modellierung. Das Unternehmen möchte ein dreidimensionales Layout eines definierten Bereichs des Lagers vorliegen haben.

Darüber hinaus erfordert der Wunsch nach einer Machbarkeitsstudie zur Umsetzung einer Drohnen-basierten Lagerinventur weiteres Expertenwissen. Der gegenwärtige Prozess der Inventur sieht vor, dass das Personal im Lager mittels eines Smartphones Aufnahmen vom Lagerstellplatz mit Ladungsträger erstellt. Die erzeugten Bilder werden manuell auf einen Unternehmensserver übertragen. Mittels einer Software wird der Text der jeweiligen Bezeichnungen des Ladungsträgers und des Lagerplatzes ausgelesen und in einem WMS-System verknüpft. Das Unternehmen plant, die Datenaufnahme in einem Pilotbereich mit einer programmierbaren Drohne und Fachpersonal zu testen. Diese Datenaufnahme soll anschließend unternehmensintern über den Pilotbereich hinaus erweitert werden. Das Personal im Unternehmen ist in der Programmiersprache Python spezialisiert.

Das Ziel des Unternehmens besteht darin, den gesamten Prozess der Auswahl geeigneter Mittel zur Datenaufnahme, Modellierung, Analyse und Planung der automatisierten Lagerinventur in einem Pilotbereich an Fachpersonal auszulagern. In diesem Zusammenhang wird gefordert, dass sämtliche Anforderungen für einen Drohnenflug im Innenbereich berücksichtigt werden. Es soll aufgezeigt werden, welche Barrieren bei der Implementierung auftreten können. Die Ziele werden wie folgt zusammengefasst:

- **Modellierung und Bereitstellung eines digitalen Modells des Lagerlayouts in einem ausgewählten Innenbereich:** Es soll ein spezifischer Bereich im Innenlager des Unternehmens mit geeigneten Methoden in Form von räumlichen Daten erfasst werden. Zu diesem Zweck ist die Auswahl eines geeigneten Ressourcensmittels erforderlich. Die Objekte im Lagerbereich weisen eine Höhe von rund 7 Metern auf. Die erfassten Daten werden genutzt, um ein digitales Modell zu erstellen. Dieses Modell dient zugleich als Grundlage für weitere Analyse- und Planungsvorgänge.
- **Analyse des Nutzungsgrades des Lagerbereichs:** Der vorliegende Datensatz dient der Analyse des aktuellen Nutzungsgrads des Lagers.
- **Integration einer Drohnen-basierten Lagerinventur im Pilotbereich:** Der manuelle Aufnahmeprozess von Daten bezüglich Ladungsträger und Lagerplatz soll durch die Machbarkeitsprüfung einer Drohnen-basierten Lagerinventur in jenem Pilotbereich erfolgen, der für eine Layouterstellung ausgewählt wird. Die Schnittstelle der aufgenommenen Daten zu den weiteren Schritten im Prozess, wird durch eine unternehmenseigene Lösung übernommen. Des Weiteren ist die Auswahl einer adäquaten Drohne zu treffen, welche den spezifischen Anforderungen des Use-Cases gerecht wird. Die Programmierung des Flugverhaltens der Drohne soll durch den Einsatz von Python erfolgen, wodurch eine Erweiterung der Lösung durch Personal des Unternehmens nach einem Wissensaustausch über den Pilotbereich hinaus gewährleistet wird.

### 5.3 Anwendung des entwickelten Vorgehensmodells

Das entwickelte Vorgehensmodell zur Erstellung eines digitalen Modells eines Lagerlayouts für Analyse- und Planungsvorgänge, dargestellt in Abbildung 28, findet in diesem Abschnitt Anwendung.

#### Definition des Use-Cases

In Kapitel 5.2 wurde die Ausgangssituation des Use-Cases sowie dessen Ziele definiert. Dies bildet gemäß Kapitel 4.3.1 Schritt 1 ab und ist folglich abgeschlossen. Das entwickelte Vorgehensmodell wird in Bezug darauf zielgerichtet abgewickelt.

### Auswahl der geeigneten Methode zur Erstellung des digitalen Modells

In der zweiten Stufe des Vorgehensmodells wird, wie in Kapitel 4.3.2 dargelegt, eine dem Use-Case entsprechende Methode ausgewählt, um das digitale Modell des Bereichs im Innenlager zu erstellen. Wie in Kapitel 2.2 erörtert, existieren hierfür mehrere Möglichkeiten, die in Betracht gezogen werden können. Auf Basis von Tabelle 4 werden diese Möglichkeiten gegenübergestellt und die Eignung der Methoden in Form der Wertigkeit beurteilt. Für den Use-Case werden die Methoden Photogrammetrie und LiDAR in Betracht gezogen. Da bisher noch keine Wahl eines geeigneten Ressourcenmittels getroffen wurde, mit dem Sensoren transportiert werden, die die notwendigen Daten für die in diesem Schritt gewählte Methode aufnehmen, wird in Anlehnung an Stöber et al. bei den Methoden zwischen Bodenbasiert und Drohnen-basiert<sup>217</sup> unterschieden.

Um die Bewertung nach Stöber et al., dargestellt in Tabelle 2, in Form einer Punktbewertung quantifizierbar zu machen, werden die Ergebnisse entsprechend Abbildung 32 in ein Punktsystem umgewandelt.



**Abbildung 32: Umwandlung der Ergebnisse in Punkte<sup>218</sup>**

Die Gegenüberstellung und Bewertung der Methoden sind in Tabelle 9 dargestellt. Gemäß Stöber et al. und der Umwandlung von deren Bewertung in Punkte, schneidet LiDAR in Summe mit 16 Punkten ab. Dabei stellt diese Methode bei der Vollständigkeit, Aufnahmezeit und geometrischer Intoleranz mit jeweils 4 Punkten ein sehr gutes Ergebnis dar. Dabei erzielt die technische Anwendbarkeit 3 Punkte, die Erkennbarkeit erzielt 1 Punkt.

Die Boden-basierte Photogrammetrie erzielt in Summe 13 Punkte. Die Summe setzt sich dabei aus jeweils 3 Punkten aus den Kriterien Aufnahmezeit, Erkennbarkeit und technische Anwendbarkeit zusammen. Die Vollständigkeit und die geometrische Intoleranz erzielen jeweils 2 Punkte.

Bei der Photogrammetrie auf Basis von Aufnahmen mit der DJI Phantom 4 werden insgesamt 14 Punkte erzielt. Diese setzen sich aus 4 Punkten entsprechend dem Kriterium Aufnahmezeit, jeweils 3 Punkten bei den Kriterien Erkennbarkeit und technische Anwendbarkeit und 2 Punkten jeweils nach der Vollständigkeit und geometrischer Intoleranz zusammen.

Die Methode der Photogrammetrie mit Aufnahmen mittels einer DJI Air 2S weist mit 17 Punkten die höchste Summe auf. Dieses Ergebnis setzt sich aus jeweils 4 Punkten

<sup>217</sup> vgl. Stöber et al., 2024, S. 121 ff.

<sup>218</sup> Eigene Darstellung

aus den Kriterien Aufnahmezeit und Erkennbarkeit zusammen und jeweils 3 Punkten aus den Kriterien Vollständigkeit, technische Anwendbarkeit und geometrische Intoleranz.

Gemäß der Beschreibung der Wertigkeiten in Kapitel 4.3.2, welche für die Bewertung der Methoden herangezogen werden, erzielt die Boden-basierte Photogrammetrie ein brauchbares Ergebnis mit einer Wertigkeit von 0,65. Photogrammetrie mit der DJI Phantom 4 weist ein brauchbares bis gutes Ergebnis mit einer Wertigkeit von 0,7 auf. LiDAR erzielt ein gutes Ergebnis mit einer Wertigkeit von 0,8 und Photogrammetrie auf Basis der Drohne DJI Air 2S weist ein sehr gutes und somit das beste Ergebnis mit einer Wertigkeit von 0,85 auf.

		Methoden zur Erstellung eines digitalen Abbilds											
		LiDAR			Photogrammetrie			Photogrammetrie (DJI Phantom 4)			Photogrammetrie (DJI Air 2S)		
Boden-basiert		✓			✓			-			-		
Drohnen-basiert		✓			-			✓			✓		
Nr.	Bewertungs-kriterium	Stöber et al.	=	Punkte	Stöber et al.	=	Punkte	Stöber et al.	=	Punkte	Stöber et al.	=	Punkte
1	Vollständigkeit	●	=	4	○	=	2	○	=	2	●	=	3
2	Aufnahmezeit	●	=	4	●	=	3	●	=	4	●	=	4
3	Erkennbarkeit	○	=	1	●	=	3	●	=	3	●	=	4
4	Technische Anwendbarkeit	●	=	3	●	=	3	●	=	3	●	=	3
5	Geometrische Intoleranz	●	=	4	○	=	2	○	=	2	●	=	3
Summe		16			13			14			17		
Wertigkeit W		0,8			0,65			0,7			0,85		

Tabelle 9: Punktbewertung zur Auswahl der geeigneten Methode zur Erstellung des digitalen Modells<sup>219</sup>

Für die weitere Vorgehensweise im Modell werden nur Wertigkeiten mit einem Ergebnis von mindestens 0,8 in Betracht gezogen. Dementsprechend werden für die nächsten Schritte die Boden-basierte Photogrammetrie und Photogrammetrie mit Aufnahmen mittels der Drohne DJI Phantom 4 ausgeschlossen.

Für den dritten Schritt kommen somit Boden- und Drohnen-basierte LiDAR als auch Photogrammetrie in Kombination mit einem geeigneten Drohnenmodell, wie der DJI Air 2S oder einem ähnlichen, in Frage, sofern dieses mindestens eine gleichwertige Qualität der Kamera aufweist.

<sup>219</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Stöber et al., 2024, S. 127.

### Prüfung der Eignungsfähigkeit des Ressourcenmittels Drohne für den Transport eines Sensors

Im dritten Schritt des Vorgehensmodells wird gemäß Kapitel 4.3.3 geprüft, ob die Drohne das geeignete Ressourcenmittel darstellt, mit dem die Sensorik der Datenaufnahmetechnologie transportiert werden soll. Es erfolgt eine Gegenüberstellung von möglichen Ressourcenmitteln, entsprechend der schematischen Darstellung in Tabelle 5.

Es werden die Möglichkeiten der Ressourcenmittel entsprechend Kapitel 2.4 und 2.5 in Betracht gezogen:

- Nr.1 – Mensch: Eine Person kann Sensoren, wie LiDAR-Scanner, Kameras oder LiDAR-Rucksäcke, wie in Kapitel 2.4 erörtert, mit sich führen.
- Drohne: Drohnen können teilweise LiDAR-Sensoren oder externe Kameras mit sich führen. Je nach Modell sind Kameras vorab intern verbaut, sodass es nicht notwendig ist eine externe Sensorik für Photogrammetrie zu montieren.
  - Nr.2 – DJI Air 2S: Auf Basis der Bewertung in Tabelle 9 wird die DJI Air 2S in Erwägung gezogen.
  - Nr.3 – DJI Mini 3 Pro: Es wird ebenso eine DJI Mini 3 Pro in Betracht gezogen, da diese laut Hersteller über dieselbe Sensorgröße verfügt und eine gleichbleibende Bildqualität bietet. Die DJI Mini 3 Pro ist hingegen kleiner und leichter, als die DJI Air 2S.<sup>220</sup>
- Nr.4 – Roboterhund: Ein Roboterhund ist vielseitig nutzbar und eine Möglichkeit, als Ressourcenmittel eingesetzt zu werden. Eine Erörterung erfolgte in Kapitel 2.4. Als Produkt wird der A1 Unitree Robot herangezogen. Laut Hersteller weist ein Roboterhund eine Tragfähigkeit von bis zu 5 Kilogramm auf.<sup>221</sup>

Die Anforderungskriterien je Ressourcenmittel sind in Tabelle 10 bewertet. Eine Person kann im Normalfall sowohl 0,2 Kilogramm als auch 2 Kilogramm tragen und somit gegebenenfalls einen LiDAR-Scanner oder eine Kamera mit sich führen. Dementsprechend werden bei diesen Kriterien jeweils 5 Punkte vergeben. Ebenso verursacht eine Person wenig Lärm und kann sich in der Regel bei unebenem Boden fortbewegen, weswegen jeweils 5 Punkte erzielt werden. Lediglich bei der Möglichkeit der Fortbewegung in die vertikale Richtung, also z-Achse, ist ein Mensch verhindert, weswegen eine schlechte Eignung mit 1 Punkt resultiert.

Die Drohne DJI Air 2S weist eine Tragfähigkeit von bis zu 0,2 Kilogramm auf, weshalb 5 Punkte mit diesem Anforderungskriterium erzielt wird. Jedoch ist ein Transport von einem LiDAR-Scanner, der bis etwa 2 Kilogramm wiegen kann, nicht möglich, weshalb

---

<sup>220</sup> vgl. DJI, o.D.

<sup>221</sup> vgl. Kim et al., 2022, S. 1 ff.

eine schlechte Eignung mit 1 Punkt resultiert. Eine Drohne kann sich ohne Probleme in der z-Achse fortbewegen, weshalb hier eine gute Eignung mit 5 Punkten bewertet wird. Die DJI Air 2S weist in etwa 88 Dezibel in 5 Meter Flughöhe auf<sup>222</sup>, weshalb nur 1 Punkt entsprechend dem Anforderungskriterium Lärmpegel vergeben wird. Da eine Drohne beim Flug vom Boden entkoppelt ist, wird das Anforderungskriterium der Bodenbeschaffenheit mit 5 Punkten bewertet.

Die Bewertung der Drohne DJI Mini 3 Pro erfolgt analog zu jener der Drohne DJI Air 2S. Lediglich der Lärmpegel wird mit einer mittleren Eignung, also 3 Punkten, bewertet, da diese laut Test 58 Dezibel aus 2 Metern Entfernung misst.<sup>223</sup>

Der Roboterhund erhält sowohl beim Kriterium der Tragfähigkeit von 0,2 Kilogramm als auch von 2 Kilogramm jeweils 5 Punkte, da dieser laut Hersteller bis zu 5 Kilogramm mit sich führen kann. Da sich der Roboterhund bodengebunden fortbewegt, ist er schlecht geeignet für das Kriterium der Möglichkeit der Bewegung in die z-Achse, weshalb hier nur 1 Punkt erzielt wird. Aufgrund der Tatsache, dass bei der Bewegung des Roboterhundes kaum Lärm entsteht und er auch auf unebenem stabil bleibt, werden bei den Kriterien Lärmpegel und Bodenbeschaffenheit jeweils 5 Punkte erzielt.

Die höchste Eignung wird mit jeweils 21 Punkten sowohl vom Menschen als auch vom Roboterhund erzielt. Das Drohnenmodell DJI Mini 3 Pro erreicht 19 Punkte, das Drohnenmodell DJI Air 2S 17 Punkte. In Anbetracht der Tatsache, dass das zu modellierende Lager eine Höhe von rund 7 Metern aufweist, ist eine Bewegung des Ressourcenmittels in der vertikalen Achse, also in die z-Achse, erforderlich. Dieses Kriterium wird folglich als Ausschlusskriterium für Ressourcenmittel betrachtet und schließt jene Ressourcenmittel aus, welche hier nicht geeignet sind. Aufgrund dessen werden die Ressourcenmittel 1 und 4 nicht weiter in Betracht gezogen.

Die DJI Mini 3 Pro erzielt 19 Punkte und übertrifft damit die DJI Air 2S um 2 Punkte. Aufgrund der höheren Punktzahl wird die DJI Mini 3 Pro für die weitere Vorgehensweise herangezogen.

---

<sup>222</sup> vgl. Drohnen-Lexikon, 2024.

<sup>223</sup> vgl. Drohnen-Lexikon, 2024.

		Möglichkeiten zum Transport eines Sensors				Ausschlusskriterium	
		Ressourcenmittel					
Nr. des Ressourcenmittels		1	2	3	4		
Eignung		Mensch	Drohne (DJI Air 2S)	Drohne (DJI Mini 3 Pro)	Roboterhund		
5	Gut						
3	Mittel						
1	Schlecht						
Nr.	Anforderungskriterium						
1	Tragfähigkeit von 0,2 Kilogramm	5	5	5	5	Nein	
2	Tragfähigkeit von 2 Kilogramm	5	1	1	5	Nein	
3	Möglichkeit der Bewegung in die z-Achse	1	5	5	1	Ja	
4	Lärmpegel	5	1	3	5	Nein	
5	Bodenbeschaffenheit	5	5	5	5	Nein	
Summe von Eignung		21	17	19	21		

Tabelle 10: Bewertung für die Auswahl eines geeigneten Ressourcenmittels<sup>224</sup>

Das Ergebnis dieses Schrittes ist das ausgewählte Ressourcenmittel, welches für die Datenaufnahme eingesetzt wird. Auf Basis der Ergebnisse aus Tabelle 9 und Tabelle 10 wird eine Drohne in Kombination mit Photogrammetrie für die Erstellung des digitalen Modells eingesetzt. Das dafür genutzte Drohnenmodell ist die DJI Mini 3 Pro, die eine Kamera für die räumliche Datenerhebung integriert hat.

### Datenerfassung

Es erfolgt gemäß Kapitel 4.3.4 die Datenerfassung, die vor Ort beim Unternehmen in einem definierten Bereich durchgeführt wird.

Im ersten Schritt werden vorbereitete Referenzmarker vor Ort entsprechend einer vordefinierten Distanz in geeigneter Position angebracht, um in späteren Schritten eine erhaltene Punktwolke zu skalieren. Die Referenzmarker werden, wie in Abbildung 33 dargestellt, mit einer Distanz von 1 Meter am Boden platziert.

<sup>224</sup> Eigene Darstellung

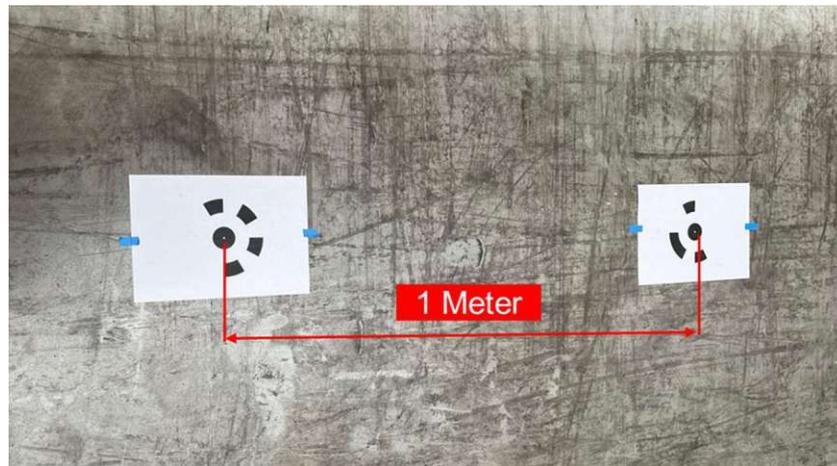


Abbildung 33: Platzierte Referenzmarker<sup>225</sup>

Die Durchführung dieses Schrittes erfolgt nach dem Schichtende an einem Freitagnachmittag, um die Maßnahmen, wie in Kapitel 4.3.4 beschrieben, einzuhalten.

Im nächsten Schritt wird die DJI Mini 3 Pro mit einem Kollisionsschutz vorbereitet, um mögliche Gefahren eines Zusammenpralls der Propeller mit umliegenden Objekten zu minimieren. Die eingesetzte Drohne ist in Abbildung 34 dargestellt. Die integrierte Kamera, mit einem Gimbal ausgestattet, ist ebenso gekennzeichnet. Mit Hilfe des Kamerasystems kann aus unterschiedlichen Winkeln eine Aufnahme von Bildern oder Videos erfolgen.



Abbildung 34: Eingesetzte DJI Mini 3 Pro für die Datenaufnahme inklusive Kollisionsschutz<sup>226</sup>

Insgesamt werden vier Flüge mit unterschiedlicher Aufnahmewinkel der Kamera für die Erfassung der räumlichen Daten durchgeführt, sodass die erhaltenen Daten und nachgereihten Modellierungen gegenübergestellt werden. Die untersuchten Aufnahmewinkel sind in Abbildung 35 dargestellt und sind wie folgt beschrieben:

<sup>225</sup> Eigene Darstellung

<sup>226</sup> Eigene Darstellung

- Modell 1: Bildaufnahme der Lagergasse mit einem Kamerawinkel von  $0^\circ$
- Modell 2: Bildaufnahme der Lagergasse mit einem Kamerawinkel von  $30^\circ$
- Modell 3: Videoaufnahme der Lagergasse mit einem Kamerawinkel von  $30^\circ$ 
  - Das aufgenommene Video wird vor der Modellierung in Bildsequenzen gekürzt. Diese Vorgehensweise ist möglich, wie es Gao et al.<sup>227</sup> zeigen.
- Modell 4: Aufnahme der Lagergasse mit einem Kamerawinkel von  $90^\circ$ , also aus der Vogelperspektive oder Draufsicht

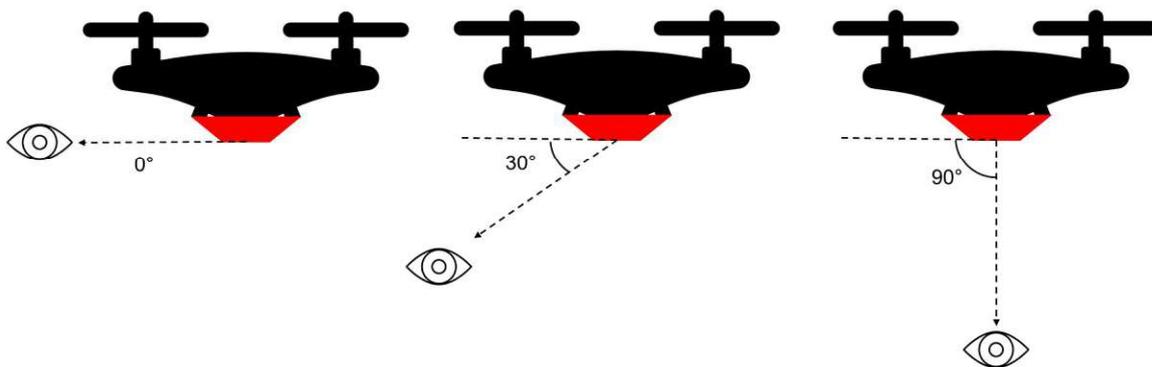


Abbildung 35: Aufnahmewinkel der intern verbauten Kamera während des Drohnenflugs<sup>228</sup>

Entsprechend den Kamerawinkeln der Aufnahme werden unterschiedliche Flugmuster ausgewählt, sodass die Lagergasse entsprechend Abbildung 6 optimal und überlappend aufgenommen wird. Die Lagergasse wird entsprechend der Draufsicht in Abbildung 36 abgeflogen und es wird an jedem Punkt eine räumliche Datenaufnahme gemacht. Am Ende der Lagergasse erfolgt eine Wende und es wird beim Rückflug an jeder Stelle ebenso eine Datenaufnahme gemacht. Dies ist notwendig, um beide Seiten der Regale abzubilden.

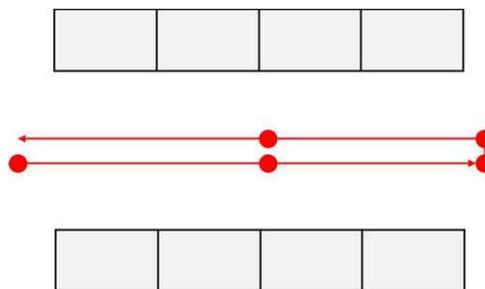


Abbildung 36: Lagergasse in der Draufsicht<sup>229</sup>

Die Flugroute wird in Abhängigkeit des Kamerawinkels angepasst. Bei den Modellen 1 und 2, einem Kamerawinkel von  $0^\circ$  beziehungsweise  $30^\circ$ , erfolgt der Flug gemäß

<sup>227</sup> vgl. Gao et al., 2021, S. 11858 ff.

<sup>228</sup> Eigene Darstellung

<sup>229</sup> Eigene Darstellung

Seitenansicht in Abbildung 37, wobei hier ein Teil des Regals in der Lagergasse dargestellt ist. Der Start erfolgt in der Mitte der Höhe des Regals in der Lagergasse. Im darauffolgenden Schritt steigt die Drohne auf und nimmt am oberen Ende des Regals eine Aufnahme auf, um anschließend zur nächsten Regalreihe zu fliegen und eine weitere Aufnahme zu machen. In der Folge senkt sich die Drohne auf die Mitte des Regals, um eine Aufnahme zu fertigen, und fliegt vorwärts zur nächsten Reihe. Dieser Prozess wiederholt sich bis zum Ende der Lagergasse. Bei der Videoaufnahme gemäß Modell 3 wird die gleiche Flugroute konstant abgeflogen und durchgehend ein Video aufgezeichnet.

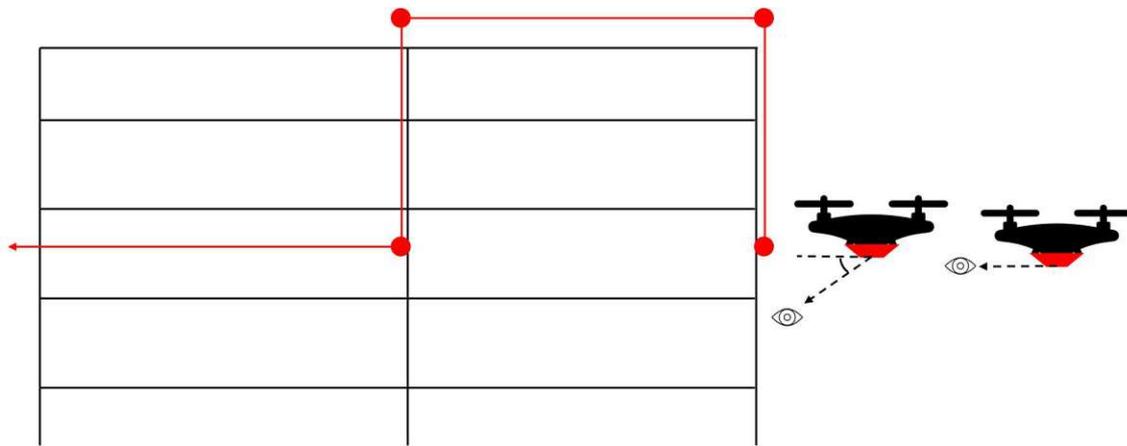


Abbildung 37: Flugroute für den Drohnenflug mit dem Kamerawinkel  $0^\circ$  bzw.  $30^\circ$  in der Seitenansicht<sup>230</sup>

Beim Drohnenflug für das Modell 4 mit einem Kamerawinkel von  $90^\circ$  ändert sich die Flugroute entsprechend Abbildung 38. Wie in der Seitenansicht dargestellt, fliegt die Drohne einen konstant horizontalen Weg. Es wird an jeder Stelle in einer Reihe eine Bildaufnahme aufgenommen, um ausreichend Überlappung der Bilder sicherzustellen.

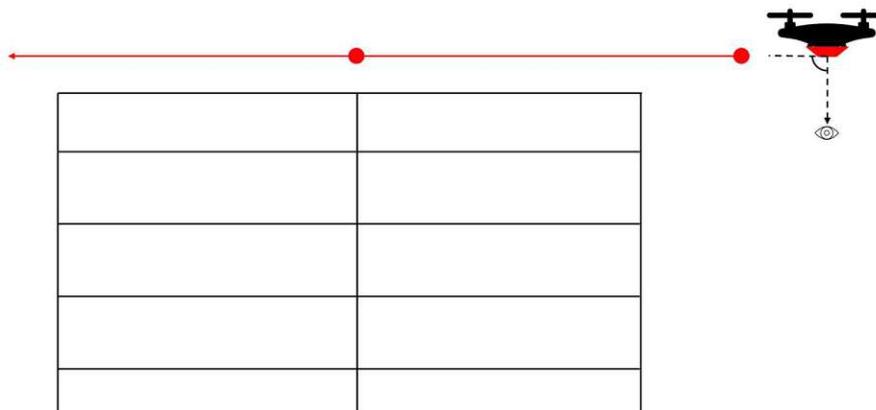


Abbildung 38: Flugroute für den Drohnenflug mit dem Kamerawinkel  $90^\circ$  in der Seitenansicht<sup>231</sup>

<sup>230</sup> Eigene Darstellung

<sup>231</sup> Eigene Darstellung

Bei Modell 1, einem Flug mit einem Kamerawinkel von  $0^\circ$ , werden insgesamt 68 Bildaufnahmen gemacht.

Bei Modell 2, einem Flug mit einem Kamerawinkel von  $30^\circ$ , werden insgesamt 71 Bildaufnahmen gemacht.

Bei der Videoaufnahme, dem Modell 3, wird ein Video von insgesamt 201 Sekunden aufgezeichnet.

Bei einem Kamerawinkel von  $90^\circ$ , sprich Modell 4, werden insgesamt 31 Bildaufnahmen aufgezeichnet. Im Vergleich zu einem Kamerawinkel von  $0^\circ$  beziehungsweise  $30^\circ$  erfolgen weniger Bildaufnahmen, da die Drohne keine vertikalen Bewegungen ausführt.

Bei allen Flügen wurden sowohl sämtliche Bereiche in der Lagergasse aufgezeichnet als auch die vorbereiteten Referenzmarker. Es wurde auf eine ausreichende Belichtung in der Halle geachtet. Darüber hinaus konnten, während dem Flug 11 GPS-Signale empfangen werden. Nachdem die Drohnenflüge mit der Datenaufnahme erfolgt sind, wurden die Referenzmarker entfernt.

Das Ergebnis sind gespeicherte Rohdaten für die weiteren Schritte.

### Datenuntersuchung und -bereinigung

In diesem Schritt werden die erhobenen Rohdaten hinsichtlich Nutzbarkeit untersucht. Im ersten Schritt werden die Daten in geeignete Ordner sortiert, wie es in Abbildung 39 dargestellt ist. Die Untersuchung der Daten basiert auf Erfahrungswerten und der Zuhilfenahme von gesammeltem Wissen in den theoretischen Grundlagen und der Recherche wissenschaftlicher Literatur.

 Aufnahme_0_Bild	Dateiordner
 Aufnahme_30_Bild	Dateiordner
 Aufnahme_30_Video	Dateiordner
 Aufnahme_90_Bild	Dateiordner

Abbildung 39: Sortierung der aufgenommenen Daten<sup>232</sup>

Die Anzahl der Bilder, aufgenommen mit einem Kamerawinkel von  $0^\circ$ , werden auf insgesamt 62 Stück reduziert. Der Grund dafür ist, dass insgesamt 6 Bilder vorliegen, die eine starke Verzerrung oder schlechte Belichtung aufweisen.

Um die Ergebnisse zu vergleichen, werden die Bildaufnahmen des Drohnenflugs mit einem Kamerawinkel von  $30^\circ$  auf 62 Stück reduziert.

<sup>232</sup> Eigene Darstellung

Die Videoaufnahme mit einem Kamerawinkel von 30° wird mit Hilfe eines Python Skripts in einzelne Bildsequenzen geschnitten. Das 201 Sekunden lange Video wird in 201 Bildsequenzen geteilt.

Bei den Bildaufnahmen mit einem Kamerawinkel von 90° wurde die Anzahl von 31 Bildaufnahmen auf 27 reduziert, da insgesamt 4 Bilder minimal verzerrt waren, sodass eine mögliche fehlerhafte Modellierung ausgeschlossen werden kann.

Das Ergebnis dieses Schrittes sind insgesamt 4 Datensätze, welche für die weitere Modellierung zur Verfügung stehen.

### Modellierung des digitalen Modells

Für die Modellierung der digitalen Modelle stehen einige Softwares zur Verfügung. Diese sind in Kapitel 2.2.1 aufgelistet. Aufgrund der Tatsache, dass Photogrammetrie rechenintensiv ist und Autodesk mit der Software Recap eine Cloud-basierte Lösung anbietet, wird diese für die Umsetzung des Use-Cases gewählt.

Die vier erhaltenen Datensätze aus dem vorherigen Schritt werden einzeln als eigenes Projekt in der Software angelegt und für die Modellierung verwendet. Anhand der definierten Distanz der Referenzmarker werden die Modelle skaliert. Die erhaltenen Ergebnisse werden nachfolgend abgebildet.

#### **Modell 1**

In Abbildung 40 ist erkenntlich, dass das erhaltene Modell durch Bildaufnahmen mit einem Kamerawinkel von 0° unvollständig und verzerrt ist. In der Draufsicht erkennt man, dass ein Teil der Lagergasse fehlt.



**Abbildung 40: Digitales Modell auf Basis von Bildaufnahmen mit einem Kamerawinkel von 0°<sup>233</sup>**

<sup>233</sup> Eigene Darstellung

## Modell 2

In Abbildung 41 ist das Ergebnis von Modell 2 dargestellt, wo Bildaufnahmen mit einem Kamerawinkel von  $30^\circ$  aufgezeichnet wurden. Das Modell bildet die gesamte Lagergasse ab, wie es in der Draufsicht ersichtlich ist. Der Detailgrad ist ebenso sehr hoch, wie aus der Abbildung hervorgeht.

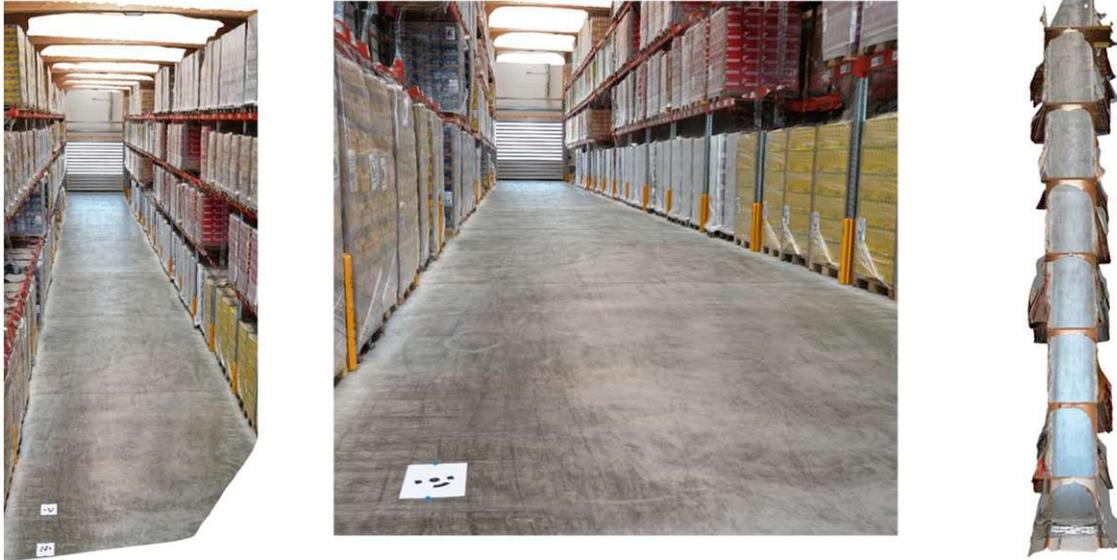


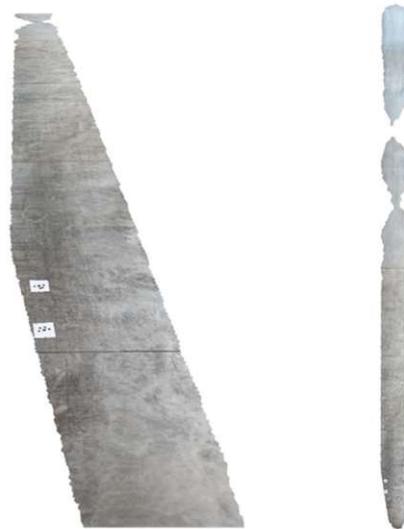
Abbildung 41: Digitales Modell auf Basis von Bildaufnahmen mit einem Kamerawinkel von  $30^\circ$ <sup>234</sup>

## Modell 3

Bei der Modellierung auf Basis den Bildsequenzen, welche aus einer Videoaufnahme mit einem Kamerawinkel von  $30^\circ$  geschnitten wurden, erfolgen Fehlermeldungen. Es kann kein digitales Modell erstellt werden.

## Modell 4

Das Ergebnis von Modell 4, einem Flug mit Bildaufnahmen mit einem Kamerawinkel von  $90^\circ$  zeigt, dass nur der Boden der Lagergasse modelliert werden kann. Sämtliche Regale sind nicht darstellbar, wie aus Abbildung 42 hervorgeht.



**Abbildung 42: Digitales Modell auf Basis von Bildaufnahmen mit einem Kamerawinkel von  $90^{\circ 235}$**

Das Ergebnis sind insgesamt 4 digitale Modelle, die für die nächsten Schritte zur Verfügung stehen.

### Bewertung des digitalen Modells

In diesem Schritt werden die erhaltenen Modelle gegenübergestellt und gemäß der Vorgehensweise, wie in Kapitel 4.3.7 beschrieben, bewertet.

Für die Ermittlung der Abweichung zur Realität wurde vor Ort die Lagergassenbreite vermessen, welche einer Distanz von 3,8 Meter entspricht. Bei keinem der Modelle, bis auf Modell 2, kann die Lagergasse aufgrund von Unvollständigkeit gemessen werden. In Modell 2 weist die Lagergasse im digitalen Modell eine Breite von 3,77 Meter auf, was einer prozentualen Abweichung zur Realität von 0,79% entspricht.

Die Bewertung der digitalen Modelle ist in Tabelle 11 dargestellt und wird nachfolgend beschrieben. Das Modell 1 ist zum Teil unvollständig und wird dementsprechend beim Kriterium Vollständigkeit mit 1 Punkt bewertet. Im erhaltenen Modell sind die Objekte teilweise erkennbar, weshalb in dieser Rubrik 2 Punkte vergeben werden. Da die Breite der Lagergasse im Modell nicht messbar ist, wird hier mit 0 Punkten bewertet. In Summe erzielt das Modell 3 Punkte mit einer Wertigkeit von 0,25.

Modell 2 ist nahezu fehlerhaft. Es weist in den Regalen teilweise Lücken auf, weshalb das Kriterium Vollständigkeit mit 3 Punkten bewertet wird. Objekte sind im Modell sehr gut erkennbar, weshalb bei diesem Kriterium 4 Punkte vergeben werden. Da die Abweichung zur Realität 0,79% entspricht, werden gemäß Tabelle 7 für dieses Modell 4 Punkte erzielt. Insgesamt erzielt Modell 2 11 Punkte mit einer Wertigkeit von 0,92.

<sup>235</sup> Eigene Darstellung

Da das Modell 3 nicht erstellt werden konnte, werden hier 0 Punkte vergeben.

Das Modell 4 zeigt, dass nur der Boden der Lagergasse erkennbar ist. Dieser ist gut ersichtlich, weshalb lediglich beim Kriterium Erkennbarkeit Punkte vergeben werden können. Insgesamt wird dieses Modell mit 2 Punkten bewertet, was einer Wertigkeit von 0,17 entspricht.

Nr.	Bewertungskriterium	Digitales Modell			
		1	2	3	4
1	Vollständigkeit	1	3	0	0
2	Erkennbarkeit	2	4	0	2
3	Abweichung zur Realität	0	4	0	0
Summe		3	11	0	2
Wertigkeit W		0,25	0,92	0	0,17

Tabelle 11: Bewertung der digitalen Modelle 1 bis 4<sup>236</sup>

Die Wertigkeiten zeigen, dass Modell 2 mit Abstand das nutzbarste Modell mit einem sehr guten Ergebnis von 0,92 ist. Die anderen Modelle sind unvollständig oder nicht darstellbar, weshalb die Modelle 1, 3 und 4 ausscheiden.

Das Ergebnis dieses Schrittes ist das ausgewählte Modell 2, anhand dessen die weiteren Analyse- und Planungsvorgänge durchgeführt werden.

### Analyse- und Planungsvorgänge anhand des digitalen Modells

In diesem Schritt erfolgen die angestrebten Analysen und Planungen anhand des digitalen Modells. Wie in Kapitel 5.2 beschrieben, sind die Ziele des Use-Cases die Analyse des Nutzungsgrades des Lagerbereichs und die Integration einer Drohnen-basierten Lagerinventur im Pilotbereich.

Zuerst erfolgt die Analyse, welche die Berechnung des Höhennutzungsgrads und einer Berechnung des Lagerfüllgrads beinhaltet. Der Höhennutzungsgrad wird gemäß Kapitel 2.1.3 errechnet. Wie in Abbildung 43 dargestellt, weist der Raum nach Messung im digitalen Modell eine Höhe von 7 Metern auf. Die gelagerten Produkte sind bis auf 6,75 Meter gelagert. Wie in Formel 4 berechnet ergibt diese einen Höhennutzungsgrad von 96,4%.

$$\text{Höhennutzungsgrad} = \frac{\text{genutzte Höhe}}{\text{nutzbare Höhe}} * 100 [\%] = \frac{6,75 \text{ Meter}}{7 \text{ Meter}} * 100 [\%] = 96,4\%$$

Formel 4: Höhennutzungsgrad des Use-Cases<sup>237</sup>

<sup>236</sup> Eigene Darstellung

<sup>237</sup> vgl. Martin, 2021, S. 208.



**Abbildung 43: Höhenanalyse des Lagers anhand des digitalen Modells<sup>238</sup>**

Als nächstes wird der Lagerfüllgrad berechnet, wie in Kapitel 2.1.4 beschrieben. Die Zählung der Plätze erfolgt manuell anhand des digitalen Modells, entsprechend der Darstellung in Abbildung 44. Die unbelegten Lagerplätze sind rot markiert und werden summiert. In Summe sind im zu analysierenden Bereich 360 belegbare Lagerplätze vorhanden, was der Lagerkapazität entspricht. Nach manueller Zählung im digitalen Modell sind 109 Lagerstellplätze nicht belegt. Wie aus der Berechnung in Formel 5 hervorgeht, sind 69,7% des Lagers, entsprechend dem Zeitpunkt der Daten für das digitale Modell, belegt.

$$\text{Lagerfüllgrad} = \frac{\text{Anzahl der belegten Lagerplätze}}{\text{Lagerkapazität}} * 100 [\%] = \frac{360 - 109}{360} * 100 [\%] = 69,7\%$$

**Formel 5: Lagerfüllgrad des Use-Cases<sup>239</sup>**

<sup>238</sup> Eigene Darstellung

<sup>239</sup> vgl. Hompel et al., 2018, S. 115.



Abbildung 44: Darstellung unbelegter Lagerplätze<sup>240</sup>

Nachdem die abgezielten Analysen anhand der Definition des Use-Cases erfolgt sind, wird die Integration einer Drohnen-basierten Lagerinventur im Pilotbereich durchgeführt. Die Vorgehensweise erfolgt gemäß Kapitel 4.4.

Für die Drohnen-basierte Inventur werden programmierbare Drohnen in Betracht gezogen, welche über eine Kamera verfügen. Darüber hinaus stehen Drohnen im Fokus, welche ein geringes Gewicht aufweisen. Auf Basis der Recherche von Drohnen in Kapitel 3.2.2 werden die Drohne DJI Tello, DJI Mini 3 Pro und Bitcraze Crazyflie gegenübergestellt.

Die DJI Tello ist laut Hersteller mittels Python programmierbar, wiegt 80 Gramm, weist eine Akkulaufzeit von 13 Minuten auf und hat eine 5 Megapixel-Kamera integriert.<sup>241</sup>

Die DJI Mini 3 Pro ist beispielsweise über ein SDK Tool von GitHub mittels Java<sup>242</sup> programmierbar, hat ein Gewicht von 249 Gramm, verfügt über eine Akkulaufzeit von 34 Minuten und hat eine 48 Megapixel-Kamera verbaut.<sup>243</sup>

Die Drohne Crazyflie 2.1 von Bitcraze ist über ein SDK Tool mit der Programmiersprache Python programmierbar und weist ein Gewicht von 27 Gramm auf. Die Akkulaufzeit beträgt 7 Minuten und es ist ein Kameramodul mit 0,1 Megapixel optional verfügbar.<sup>244</sup>

<sup>240</sup> Eigene Darstellung

<sup>241</sup> vgl. DJI, o.D.

<sup>242</sup> vgl. DJI-SDK, o.D.

<sup>243</sup> vgl. DJI, o.D.

<sup>244</sup> vgl. Bitcraze, o.D.

Eigenschaft	Hersteller / Modell		
	DJI Tello	DJI Mini 3 Pro	Bitcraze Crazyflie 2.1
Programmiersprache	Python	Java	Python
Gewicht	80g	249g	27g
Akkulaufzeit	13 min	34 min	7 min
Kameraauflösung	5 MP	48 MP	0,1 MP

Tabelle 12: Gegenüberstellung von möglichen programmierbaren Inventurdrohnen<sup>245</sup>

Aufgrund der Tatsache, dass für den Use-Case Python als Programmiersprache gewählt werden soll, wird die DJI Mini 3 Pro für die Implementierung ausgeschlossen. Bei der Gegenüberstellung der DJI Tello und der Crazyflie 2.1 ist ersichtlich, dass die DJI Tello mit den Eigenschaften der Akkulaufzeit und Kameraauflösung bessere Spezifikationen aufweist. Lediglich das Gewicht der DJI Tello ist höher als das der Crazyflie 2.1, was jedoch zu keinem Ausschluss führt. Auf Basis dieser Erkenntnisse fällt die Wahl auf die DJI Tello für die Implementierung der Drohne im Pilotbereich für eine Lagerinventur.

Nachdem die geeignete Drohne für den Use-Case gewählt wurde, erfolgt gemäß Kapitel 4.4.2 die Programmierung des Drohnenflugs inklusive Datenaufnahme. Aufgrund einer Akkulaufzeit von 13 Minuten wird festgelegt, dass eine Videoaufnahme aufgezeichnet wird, sodass die Drohne Daten effizient in der Lagergasse aufnimmt. Die Programmierung erfolgt auf Basis vermessener Distanzen aus dem digitalen Modell und wird in einem Python Skript gespeichert. Zur Programmierung wird die Bibliothek DJITellopy auf GitHub von Damià Fuentes Escoté<sup>246</sup> herangezogen. Die Bibliothek DJITellopy unterliegt der MIT Lizenz, was bedeutet, dass die Software beziehungsweise der Code kostenlos und ohne Einschränkung der Rechte gehandelt, zusammengeführt und veröffentlicht werden kann.<sup>247</sup>

Bei der Drohnen-basierten Lagerinventur gilt es in erster Linie eine geeignete Flugroute zu wählen. In Anlehnung an Maweni et al. wird aufgrund von Einsparung der Flugzeit ein „Zickzack“-Flugmuster<sup>248</sup> gewählt. Die Lagergasse ist laut Vermessung im Layout rund 40 Meter lang. Während des Flugs ist die Drohne so ausgerichtet, dass Videoaufnahmen wie in Abbildung 45 erfolgen.

<sup>245</sup> Eigene Darstellung

<sup>246</sup> vgl. Fuentes Escoté, 2023.

<sup>247</sup> vgl. Fuentes Escoté, 2018.

<sup>248</sup> vgl. Maweni et al., 2023, S. 1–9.



Abbildung 45: Ausrichtung der Drohne während des Flugs<sup>249</sup>

Die zu programmierende Flugroute ist in Abbildung 46 dargestellt. Die Drohne steigt auf eine Höhe von rund 1,8 Metern auf und fliegt entsprechend dem Muster bis ans Ende der Lagergasse. Sie steigt anschließend um 1,8 Meter und fliegt denselben Weg zurück, nur auf einer Ebene höher. Danach steigt die Drohne um 1,8 Meter und fliegt ans Ende der Lagergasse. Abschließend landet die Drohne. Mit dieser Flugroute ist ein Teil der Lagergasse aufgezeichnet. Die dargestellten Knoten in der Abbildung sind jene Punkte, wo die Drohne kurz verharrt. Dies ist der Fall, da die Drohne entsprechend dem Hersteller durch Senden eines Befehls maximal 5 Meter fliegen kann. Danach muss ein neuer Befehl, sprich weitere 5 Meter, gesendet werden.

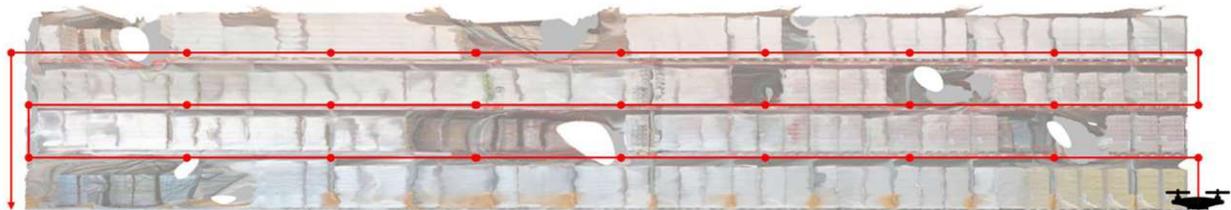


Abbildung 46: Flugroute im Use-Case<sup>250</sup>

Die Programmierung der Drohne entsprechend der oben angeführten Planung wird wie folgt beschrieben. Der Ausschnitt des Programmcodes für Python, dargestellt in Abbildung 47, bildet die Flugroute für eine Seite der Lagergasse ab. Im ersten Schritt wird von der Python-Bibliothek `djite1lopy` die Funktion `Tello()` zum Ansteuern der DJI Tello abgerufen. Nachdem die Drohne mit dem PC, mit welchem der Code ausgeführt wird, mittels `connect()` verbunden ist, startet die Drohne und steigt um 180 Zentimeter in die Höhe. Um eine stabile Videoaufnahme zu gewährleisten, wird

<sup>249</sup> Eigene Darstellung

<sup>250</sup> Eigene Darstellung

die Geschwindigkeit der Drohne auf 30 Zentimeter pro Sekunde gedrosselt. Danach erfolgt der automatisierte Flug der Drohne, indem jeweils 8 Schleifen durchlaufen werden und die Drohne in jeder Schleife sich seitlich um 500 Zentimeter fortbewegt. Die Drohne steigt nach jeder Schleife um 180 Zentimeter auf. Abschließend landet die Drohne.

```
from djitellopy import Tello
tello = Tello()
tello.connect()

tello.takeoff()
tello.move_up(180)
tello.set_speed(30)
for _ in range(8):
    tello.move_left(500)
tello.move_up(180)
for _ in range(8):
    tello.move_right(500)
tello.move_up(180)
for _ in range(8):
    tello.move_left(500)
tello.land()
```

Abbildung 47: Programmierte Flugroute<sup>251</sup>

Aufgrund von Sicherheitsmaßnahmen wird eine Notfalllandung als Funktion programmiert. Diese kann manuell durch das Personal ausgelöst werden, welches die Drohne startet. Durch eine Tastenkombination von Strg und C wird die Notfalllandung eingeleitet.

<sup>251</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Fuentes Escoté, 2023.

```
def emergency_land():  
    print("Notfall-Landung wird eingeleitet...")  
    tello.land()  
    tello.reboot()  
    tello.streamoff()
```

**Abbildung 48: Programmierte Notfalllandung<sup>252</sup>**

Während des gesamten Fluges findet eine automatische Videoaufnahme statt, im Zuge derer das Video im Datenformat .mp4 lokal auf dem PC gespeichert wird. Das gespeicherte Video kann im nächsten Schritt unternehmensintern mittels OCR-Texterkennung ausgelesen werden, wie es in Kapitel 4.4.2 erörtert ist. Der gesamte Programmcode befindet sich im Anhang, dargestellt in Abbildung 49 und Abbildung 50. Aufgrund des Umfangs wird nicht explizit auf alle Teile dieses Codes in dieser Arbeit eingegangen. Der Ablauf des Flugprozesses erfolgt gemäß der Systemarchitektur in Abbildung 31.

Wie aus der programmierten Flugroute, dargestellt in Abbildung 47, hervorgeht, wird die Geschwindigkeit der Drohne auf 30 Zentimeter pro Sekunde festgelegt. Die Drohne legt insgesamt 13080 Zentimeter zurück. Die Berechnung dazu ist in Formel 6 dargestellt und setzt sich aus den 3 Steigflügen zu jeweils 180 Zentimeter, den seitlichen Flügen der Drohne, wo in insgesamt 3 Schleifen 8 Knotenpunkte mit einem Abstand von jeweils 500 Zentimeter angefliegen werden und dem entsprechenden Landeflug von 540 Zentimeter.

$$\text{Zurückgelegte Distanz} = 3 * 180 \text{ cm} + (3 * 8 * 500 \text{ cm}) + 540 \text{ cm} = 13080 \text{ cm}$$

**Formel 6: Berechnung der zurückgelegten Distanz<sup>253</sup>**

Auf Basis der Geschwindigkeit und der zurückgelegten Distanz errechnet sich somit eine Flugdauer von 436 Sekunden. Die Drohne ist auf maximal 500 Zentimeter Bewegung je gesendetem Befehl begrenzt, wie oben beschrieben. Somit werden insgesamt 27 Knotenpunkte angefliegen. Die Verweildauer je Knoten entspricht in etwa 2 Sekunden, bis der nächste Befehl ausgeführt wird. Dementsprechend werden zur Flugdauer von 436 Sekunden weitere 54 Sekunden addiert, was einer Gesamtdauer des Flugs von 490 Sekunden beziehungsweise 8,2 Minuten entspricht. Die Berechnung ist in Tabelle 13 dargestellt.

<sup>252</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Fuentes Escoté, 2023.

<sup>253</sup> Eigene Darstellung

	Wert	Einheit
Geschwindigkeit	30	cm/s
Zurückgelegte Distanz	13080	cm
Dauer Distanz	436	s
Anzahl Knoten	27	-
Pause je Knoten	2	s
Dauer Pausen	54	s
Gesamtdauer in Sekunden	490	s
Gesamtdauer in Minuten	8,2	min

Tabelle 13: Berechnung der Flugdauer<sup>254</sup>

Da die Drohne laut Hersteller eine Akkulaufzeit von 13 Minuten aufweist, werden zur Aufzeichnung der gesamten Lagergasse 2 Akkus benötigt.

### Bereitstellung der erhaltenen Ergebnisse

Nachdem die Modellierungen des Layouts der Lagergasse erfolgreich durchgeführt wurden, werden die digitalen Modelle dem Unternehmen in Form einer .obj-Datei zur Verfügung gestellt. Des Weiteren wird festgehalten, dass das abgebildete Lager einen Höhennutzungsgrad von 96,4% und einen Lagerfüllgrad von 69,7% aufweist. Für eine Drohnen-basierte Lagerinventur kann die DJI Tello eingesetzt werden, wo für die Aufzeichnung einer ganzen Lagergasse insgesamt 2 Akkuladungen benötigt werden.

## 5.4 Ergebnisse und Fazit des Use-Cases

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Use-Cases erörtert. Aufbauend darauf wird das Fazit beschrieben, wo Vor- und Nachteile, sowie Verbesserungspotenziale für das Vorgehensmodell aufgezeigt werden.

### 5.4.1 Ergebnisse des Use-Cases

Anhand der Umsetzung des entwickelten Vorgehensmodells einer drohnengestützten Layouterstellung in Form eines Use-Cases können folgende Ergebnisse zusammengefasst werden.

Das entwickelte Vorgehensmodell dient der konsistenten Durchführung der Prozessschritte, die in sequenzieller Abfolge zur Erstellung eines Layouts durchlaufen werden können. Die praktische Anwendung erfolgte im Innenbereich eines Lagers.

Durch die Auswahl einer geeigneten Methode wird die Basis geschaffen, um ein qualitativ hochwertiges digitales Modell zu entwickeln und dementsprechend ein Ressourcenmittel auszuwählen. Es werden die Methoden LiDAR auf Basis von Bodenals auch Drohnenaufnahmen und Photogrammetrie auf Basis von Drohnenaufnahmen

<sup>254</sup> Eigene Darstellung

in Betracht gezogen, da diese nach einer Punktbewertung eine gute bis sehr gute Wertigkeit aufweisen. Die Bewertung wird anhand von Erkenntnissen nach Stöber et al. durchgeführt. Für die Prüfung der Eignungsfähigkeit des Ressourcenmittels Drohne zum Transport der Sensorik für die Datenaufnahme wird eine Gegenüberstellung in Anlehnung an VDI 2710-Blatt 1 ausgeführt. Aufgrund dessen, dass im Use-Case Objekte mit großer Höhe aufgenommen werden sollen und somit die Möglichkeit der Bewegung des Ressourcenmittels in vertikaler Achse Voraussetzung ist, werden alle Ressourcenmittel bis auf die Drohne ausgeschlossen. Die DJI Mini 3 Pro erweist sich aufgrund von geringem Lärm und guter Kameraqualität als geeignet. Da bei der Auswahl der geeigneten Methode die Drohne-basierte Photogrammetrie besser als LiDAR Drohnen-basiert abschneidet, wird für die weitere Vorgehensweise die DJI Mini 3 Pro für Photogrammetrie herangezogen.

Anhand geeigneter Vorkehrungen, wie die Absperrung des Flugbereichs, dem Einsatz eines Drohnenkäfigs, der Einholung der Erlaubnis zum Betrieb des Drohnenflugs und Durchführung außerhalb der Betriebszeiten können Barrieren überwunden werden, welche zu möglichen Kollisionen mit Personen oder Störungen im modellierten Layout führen. Die Datenerfassung erfolgt auf 4 unterschiedliche Varianten, um die Flugparameter und die erzielten Ergebnisse zu untersuchen. Anhand einer Untersuchung der Daten, werden diese strukturiert für eine nachfolgende Modellierung vorbereitet.

Auf Basis der 4 vorbereiteten Datensätze wird eine Modellierung des abgezielten Pilotbereichs durchgeführt, die Ergebnisse gegenübergestellt und nach ausgewählten Merkmalen auf Basis von Stöber et al. bewertet. Das Ergebnis zeigt, dass von 4 Modellen nur eines ein sehr gutes Ergebnis liefert. Dieses sehr gute Ergebnis wird durch Bildaufnahmen mit einem Kamerawinkel von 30° und einem „Zickzack“-Flugmuster erzielt. Die anderen Modelle liefern keine brauchbaren Ergebnisse. Es ist schwer abzuwiegen, wieso diese kein zufriedenstellendes Ergebnis liefern. Beim Modell auf Basis von Bildsequenzen, welche aus einem Video geschnitten worden sind, kann das Problem darin liegen, dass die geschnittenen Sequenzen Verzerrungen aufweisen, da kein stabilisieren der Drohne und Kamera wie im Augenblick einer Bildaufnahme erfolgt, oder dass die Fluggeschwindigkeit zu hoch war. Bei den anderen beiden misslungenen Modellen kann der Grund sein, dass es zu wenig überschneidende Merkmale der Bilder gibt.

Mittels des ausgewählten modellierten Layouts erfolgen Analysen bezüglich dem Höhennutzungsgrad und dem Lagerfüllgrad. Anhand des abgeleiteten Layouts kann festgestellt werden, dass das Lager einen Höhennutzungsgrad von 96,4% und einen Lagerfüllgrad zum Zeitpunkt der Bildaufnahmen von 69,7% aufweist.

Für die Implementierung einer Drohnen-basierten Lagerinventur wird im ersten Schritt eine geeignete Drohne ausgewählt, welche programmierbar ist, um den Flug inklusive

Datenaufnahme zu automatisieren. Da vorgesehen ist, dass eine Drohne mit ausreichender Akkulaufzeit, guter Kameraauflösung und einer Python-basierten gewählt werden soll, fällt die Wahl auf die DJI Tello. Ausgehend von der Erkenntnis einer effizienten Flugroute, welche laut Maweni et al. einem „Zickzack“-Muster entspricht, wird dieses anhand des Layouts vorprogrammiert. Es werden direkt aus dem digitalen Modell die notwendig abzufliegenden Distanzen vermessen und vorprogrammiert. Durch die Berechnung der Flugzeit wird ermittelt, dass insgesamt 2 Akkuladungen notwendig sind, um im Pilotbereich die gesamte Lagergasse aufzuzeichnen.

Die Erkenntnisse der Analyse, das Layout beziehungsweise digitale Modell und die geplante Flugroute für die Lagerinventur inklusive Programmcode werden dem Unternehmen präsentiert und übergeben.

### 5.4.2 Fazit

Das Fazit bezüglich des entwickelten Vorgehensmodells zur drohnengestützten Layouterstellung ist überwiegend positiv. Es wurde das Vorgehensmodell zur Erstellung eines digitalen Zwillings in Produktion und Logistik nach Follath et al. herangezogen und Bausteine davon ausgewählt und als neues Vorgehensmodell aufgesetzt. Das entwickelte Vorgehensmodell wurde auf Praxistauglichkeit getestet. Der Test erfolgte im Innenbereich des Lagers, wo die Empfangsrate von GPS-Daten gering ist und die Wahrscheinlichkeit einer Kollision mit anderen Objekten signifikant höher ist.

Durch das entwickelte Vorgehensmodell wird Fachpersonal ein strukturiertes Tool zur Verfügung gestellt, mit Hilfe dessen effizient gearbeitet werden kann. Durch den Einsatz von Drohnen-basierter Photogrammetrie werden vor Ort Bilddaten im Innenbereich gesammelt, welche im Nachgang im Büro verarbeitet werden. Mittels des erhaltenen Layouts kann das Fachpersonal am eigenen Arbeitsplatz nachfolgende Analysen und Planungen durchführen. Dadurch wird eine erhebliche Zeitersparnis erzielt, da die Informationsaufnahme vor Ort einmalig erfolgt und ein Lager detailreich vorliegt. Bei Bedarf besteht zudem die Möglichkeit, in das Layout immersiv einzutauchen.

Der Flug der Drohne für die räumliche Datenaufnahme und photogrammetrische Auswertung erfolgt manuell und wird teilweise nach eigenen Erfahrungswerten durchgeführt. Hier besteht Handlungsbedarf, sodass an exakt definierten Positionen automatisch von der Drohne eine Bildaufnahme aufgezeichnet wird. Des Weiteren kann eine Videoaufnahme effizienter sein als ein Bild-basierter Flug, da weniger Punkte angeflogen werden müssen und somit konstant geflogen werden kann. Hier fehlt die vorhandene Erfahrung, wie ausreichend gut ein Video mit zugehöriger

Fluggeschwindigkeit gestaltet werden soll. Das Finden optimaler Flugparameter stellt eine Herausforderung dar.

Im Rahmen der nachträglichen Modellierung des Layouts in der Photogrammetrie-Software wurde mit einem Datensatz ein exzellentes Ergebnis erzielt. Das Modell zeichnet sich durch eine hohe Detailtreue aus und konnte von der Software effizient modelliert werden. Durch die Auswertung der anderen Modelle konnte kein nennenswertes Ergebnis erzielt werden. Die in dieser Arbeit genutzte Software lässt nur einen begrenzten Spielraum für die initiale Erstellung der Punktwolke zu. Daher ist es schwierig, eine zuverlässige Aussage darüber zu treffen, warum drei von vier Modellen kein brauchbares Ergebnis erzielten.

Die Analyse des Lagers kann durch die Berechnung logistischer Kennzahlen erfolgen.

Im Rahmen der Planung einer Drohnen-basierten Lagerinventur mittels des Layouts kann festgehalten werden, dass es eine positive Bereicherung ist, dass die Planung am Arbeitsplatz vom Fachpersonal erfolgen kann. Dadurch wird eine Plug-and-Play-Lösung geschaffen und Zeit erspart, da eine explorative Vorgehensweise durch eine Reihe von Drohnenflügen, die daraus resultierenden Erkenntnisse und die Anpassungen des Programmcodes vor Ort nicht notwendig sind. Zusätzlich kann die Flugzeit abgeschätzt und somit auf die Anzahl notwendiger Akkuladungen geschlossen werden. Zukünftig kann die Simulation virtuell in einer Simulationsumgebung wie Gazebo getestet werden.

## 6 Diskussion und Ausblick

Zusammenfassend werden in diesem Kapitel die Resultate dieser Diplomarbeit bezüglich der definierten Problemstellung und der abgeleiteten Forschungsfragen diskutiert. Abschließend wird ein Ausblick für potenziell zukünftige Forschungsvorhaben gegeben.

### 6.1 Zusammenfassende Resultate

Anhand der State-of-the-Art Literaturrecherche konnte aufgezeigt werden, dass es Ansätze für Vorgehensmodelle zur Entwicklung eines digitalen Zwillings gibt. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Erstellung eines Layouts beziehungsweise eines digitalen Modells, welches als Vorstufe eines digitalen Zwillings verstanden wird. Das resultierende Layout wird für Analyse- und Planungsvorgänge verwendet. Mögliche Analysen sind beispielsweise die Ermittlung des Flächennutzungsgrades<sup>255</sup>, Höhennutzungsgrades und des Lagerfüllgrades. Für die Erstellung des digitalen Modells mittels räumlicher Daten gibt es zielführende Methoden wie LiDAR oder Photogrammetrie. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit der Aufnahme dieser Daten mit diversen Ressourcenmitteln, wie einer Drohne. In der Industrie besteht die Nachfrage nach automatisierten Lösungen zu Inventur im Innenbereich. Für die Durchführung gibt es wissenschaftliche Ansätze für den Einsatz einer Drohne. Die Lagerinventur kann dabei basierend auf RFID-Tags, Auslesen von QR-Codes oder Barcodes auf Basis von Bilddaten oder durch Abgleich mit einem 3D-Modell abgewickelt werden. In Hinblick auf eine effiziente Durchführung der Datenaufnahme ist die Auswahl einer optimalen Flugroute von zentraler Bedeutung.

Durch die Umsetzung des Use-Cases konnte gezeigt werden, dass das in dieser Diplomarbeit entwickelte Vorgehensmodell zur drohnengestützten Layouterstellung, welches in Anlehnung an jenes Vorgehensmodell von Follath et al.<sup>256</sup> erstellt wurde, praxisrelevant ist. Auf Basis der Ergebnisse von Stöber et al.<sup>257</sup> wurden die Methoden LiDAR und Photogrammetrie zur Erstellung des Layouts bewertet und entsprechend deren Wertigkeit für weitere Schritte im Vorgehensmodell eingegrenzt. Es wurden mögliche Ressourcenmittel zum Transport der Sensorik für die Datenaufnahme, welche beispielsweise eine Drohne, Mensch<sup>258</sup> oder Roboterhund<sup>259</sup> sein können, gegenübergestellt. Da auf Basis von Ausschlusskriterien in der Bewertung des Einsatzes des Ressourcenmittels in Anlehnung an VDI 2710-Blatt 1<sup>260</sup> alle Ressourcenmittel, bis auf die Drohne ausgeschlossen wurden und deren Tragfähigkeit

<sup>255</sup> vgl. Melcher et al., 2018b, S. 1 ff.

<sup>256</sup> vgl. Follath et al., 2022, S. 691 ff.

<sup>257</sup> vgl. Stöber et al., 2024, S. 121 ff.

<sup>258</sup> vgl. Sommer et al., 2023, S. 1 ff.

<sup>259</sup> vgl. Kim et al., 2022, S. 1 ff.

<sup>260</sup> vgl. VDI 2710-Blatt 1, 2007, S. 1 ff.

von schweren LiDAR-Scannern begrenzt ist, erweist sich eine Datenaufnahme mit der Drohne mit nachgelagerter Photogrammetrie-Modellierung als geeignete Vorgehensweise für die Layouterstellung. Durch eine geeignete Wahl von Flugparametern wie Flugroute und Bildaufnahmewinkel der Kamera von 30° konnte ein Pilotbereich eines Innenlagers aufgenommen und realitätsnah als Layout abgebildet werden. Dabei ist auf eine ausreichende Belichtung der abzubildenden Objekte zu achten.<sup>261</sup> Durch dieses Layout konnte die Grundlage für eine Analyse des Höhengnutzungsgrades und des Lagerfüllgrades geschaffen werden.

Abschließend wurde anhand des Layouts des Pilotbereichs die Planung einer Drohnen-basierten Lagerinventur durchgeführt. Durch die Programmierung einer ausgewählten Drohne wurde eine Plug-and-Play-Lösung für eine automatisierte Inventur geschaffen und es konnte anhand einer effizienten Flugroute zur Datenaufnahme in Anlehnung an Maweni et al.<sup>262</sup> aufgezeigt werden, wie viele Akkuladen zur Abwicklung der Inventur mit einer Drohne im Pilotbereich benötigt werden. Darüber hinaus wird Planenden der automatisierten Drohnen-basierte Lagerinventur eine Übersicht über eine mögliche Systemarchitektur gegeben.

## 6.2 Ergebnisse in Bezug auf die Forschungsfragen

Die Forschungshypothese, dass der Einsatz von Drohnen und eine geeignete Methode zur 3D-Modellierung eines Innenlagers eine effektive Ausgangsbasis für Analyse- und Planungsvorgänge ermöglicht, bestätigt sich durch die Ergebnisse dieser Diplomarbeit. Das entwickelte Vorgehensmodell kann von Fachpersonal unter Zuhilfenahme dieser Arbeit genutzt werden. Die Bestätigung der Forschungshypothese wird durch die Beantwortung der Forschungsfragen untermauert.

### **Forschungsfrage: Welche Methoden zur visuellen Rekonstruktion des Layouts eines Indoorlagers sind durch den Einsatz einer Drohne praxisrelevant?**

Die Beantwortung der Forschungsfrage kann anhand der Ergebnisse aus Kapitel 5.3 und 5.4 dargestellt werden. Es wird ersichtlich, dass die Methode der Photogrammetrie eine praxisrelevante Möglichkeit zur visuellen Rekonstruktion des Lagerlayouts im Innenbereich darstellt. Dies wird anhand einer Umrechnung der Forschungsergebnisse von Stöber et al. in eine Punktbewertung veranschaulicht, wo die Methode der Drohnen-basierten Photogrammetrie am besten abschneidet.

In Kapitel 2.6 wurde der Forschungsbereich dieser Diplomarbeit auf den Einsatz einer Drohne im Innenbereich eines Trockenlagers eingeschränkt. Das entwickelte Vorgehensmodell ist branchenunabhängig anwendbar. Im Rahmen der Untersuchung

<sup>261</sup> vgl. Malhotra und Soderstrom, 2022, S. 1 ff.

<sup>262</sup> vgl. Maweni et al., 2023, S. 1 ff.

wurde die Eignungsfähigkeit des Ressourcenmittels Drohne für die notwendige räumliche Datenaufnahme geprüft.

Für die Erzielung eines optimalen Ergebnisses des Layouts ist die Auswahl geeigneter Flugparameter für den Flug von essenzieller Bedeutung, wie die resultierenden digitalen Modelle belegen. Das Modell mit dem besten Ergebnis wurde bei einem Kamerawinkel von 30° und mit Bildaufnahmen erzielt. Die geringe Abweichung zur Realität des Modells und die Vollständigkeit dieser Methode bestätigen dies. Die Ergebnisse des Use-Cases zeigen somit, dass die Drohne in Kombination mit Photogrammetrie eine praxisrelevante Möglichkeit darstellt.

### **Forschungsfrage: Wie kann ein Ansatz für eine automatisierte Drohnen-basierte Lagerinventur auf Basis des Layouts realisiert werden?**

Im Zuge der Entwicklung einer Methode der Vorgehensweise einer Drohnen-basierten Lagerinventur und deren benötigter Systemarchitektur gemäß Kapitel 4.4.2, konnte im Use-Case in Kapitel 5.3 und 5.4 gezeigt werden, dass die angestrebte Lagerinventur mit einer Drohne realisiert werden kann.

Durch die Bereitstellung des Layouts kann anhand dessen eine Plug-and-Play-Lösung entwickelt und vorab berechnet werden, wie lange der Flug inklusive Datenaufnahme für die Lagerinventur in Anspruch nimmt. Zu diesem Zweck werden die im Rahmen der Literaturrecherche gewonnenen Erkenntnisse über programmierbare Drohnen und effiziente Flugrouten herangezogen. Die so ermittelte Flugdauer in Kombination mit der vom Hersteller angegebenen Akkulaufzeit ermöglicht eine Abschätzung der erforderlichen Anzahl an Akkuladungen je Lagergasse.

### **Forschungsfrage: Welche Barrieren sind beim Einsatz einer indoor-fähigen Drohne für eine Datenaufnahme zu beachten?**

Im Rahmen der Bearbeitung der Diplomarbeit und auf Basis des Experteninterviews konnten Barrieren aufgezeigt werden, die bei einem Einsatz von Drohnen im Innenbereich zu berücksichtigen sind. Neben der geeigneten Flugroutenplanung, der Verwendung von Kollisionsschutz, ausreichender Belichtung bei der Datenaufnahme und genügend Akkukapazität sind Maßnahmen wie das Absperren des Pilotbereichs vor Ort von Relevanz. Wie in Kapitel 2.5.11 dargelegt, ist ebenso hervorzuheben, dass im Innenbereich im Gegensatz zum Einsatz im Außenbereich, keine luftfahrtrechtlichen Rahmenbedingungen gelten.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das in dieser Diplomarbeit entwickelte Vorgehensmodell zur Implementierung einer drohengestützten Layouterstellung in der Praxis anwendbar ist und die in der Literaturrecherche identifizierten Forschungslücken schließt. Die in der Literaturanalyse ermittelten Kategorien "Prozess der Erstellung eines digitalen Zwillings", "Datenaufnahme mittels

Drohnen für ein digitales Modell", "Drohnen-basierte Lagerinventur" und die zugehörige „Flugroute" konnten in einem ganzheitlichen Modell zusammengeführt werden.

Darüber hinaus ergeben sich im entwickelten Vorgehensmodell Möglichkeiten, an denen in Zukunft geforscht werden können. Diese werden im nachfolgenden Kapitel erörtert.

### 6.3 Ausblick

Zukünftige Forschungsvorhaben für die Anwendung digitaler Modelle und die Drohnen-basierte Lagerinventur können eine Vielzahl von Entwicklungen umfassen.

Eines dieser möglichen Forschungsvorhaben kann die Anwendung des entwickelten Vorgehensmodells im gesamten Lagerbereich anstelle eines begrenzten Pilotbereichs darstellen. Von Relevanz wäre in diesem Zusammenhang die Entwicklung von Methoden zur Skalierung der digitalen Modellierung auf größere Lagerhäuser. Durch den Einsatz von Künstlicher Intelligenz könnte ebenso anhand des digitalen Modells die logistische Kennzahl Lagerfüllgrad, was in dieser Arbeit durch manuelles Zählen erfolgte, automatisiert werden.

Ein weiterer möglicher Forschungsansatz könnte darin bestehen, die aufgezeichneten Daten zu verwenden, um das digitale Modell täglich zu reproduzieren, was einem digitalen Schatten ähnelt. Ebenso kann in Zukunft erforscht werden, dass durch Bild- und Videoaufnahmen, welche während der Drohnen-basierten Lagerinventur aufgezeichnet werden, das digitale Modell oder ein digitaler Schatten auf Basis dessen erneuert wird. In dem Fall würden ein Abgleich und Aktualisierung zwischen einem bestehenden und neuem 3D-Modell erfolgen.

Ein wichtiger Bereich ist die Erweiterung der Kapazität von Drohnenakkus. Im Vordergrund der Forschung kann der Bereich neuer Batterietechnologien für kleine Drohnen stehen. Aktuell liegt der Fokus auf der Erweiterung der Technologie Drohne im Außenbereich, jedoch ergeben sich essenzielle Anwendungsfälle im Innenbereich, wo aufgrund von Lärm und möglichen Kollisionen kleine Drohne gegenüber großen Drohnen zu bevorzugen sind. Zudem könnten energieeffiziente Antriebssysteme entwickelt werden, um den Energieverbrauch der Drohnen zu senken oder kabelgebundene Drohnen eingesetzt werden, um unabhängig von Akkus zu operieren.

Ein potenzielles Forschungsvorhaben stellt die Erweiterung der Planung der automatisierten Lagerinventur durch einen Drohnenschwarm dar. Die Realisierung dieses Vorhabens bedingt die Entwicklung von Algorithmen, welche eine koordinierte Zusammenarbeit mehrerer Drohnen ermöglichen.

## 7 Anhang

### 7.1 Experteninterview

Es wurde am 21.01.2025 ein Experteninterview mit Dr.techn. Patrick Taschner von Fraunhofer Austria Research GmbH bezüglich des industriellen Einsatzes einer Drohne durchgeführt.

#### Einleitung

Hallo und vielen Dank, dass Sie sich die Zeit für dieses Experteninterview nehmen. Sie haben im Bereich des industriellen Drohneneinsatzes promoviert und verfügen somit über eine umfassende Expertise im Bereich dieser Technologie. Im Rahmen dieses Interviews möchte ich Sie zum Einsatz von Industriedrohnen zur Datenerfassung für die Erstellung von digitalen Modellen eines Lagers befragen. Das Interview wird auch die Thematik der Drohnen-basierten Lagerinventur umfassen.

#### Zeitraumen

Das Interview dauert etwa 30 Minuten.

#### Fragen und Antworten

- Welche zukunftssträchtigen Entwicklungen sehen Sie beim Einsatz der Drohnentechnologie in der Industrie?

*Prinzipiell ist es sinnvoll hier in die Entwicklungen im Außenbereich und Innenbereich zu unterscheiden.*

*Hinsichtlich des Außenbereichs ist aus meiner Sicht in Zukunft mit einem vermehrten Einsatz von Drohnen in der Landwirtschaft zu rechnen, um die Effizienz der dort ausgeführten Arbeiten zu steigern. Darüber hinaus ist eine verstärkte Nutzung in ruralen Gebieten, nicht jedoch in urbanen Räumen, zu erwarten. Ein weiterer wichtiger Bereich ist die Mobilität von Personen, insbesondere Lufttaxis, die zwischen 2027 und 2030 Realität werden könnten. Auch im Vermessungswesen werden Drohnen eine wesentliche Rolle spielen, indem sie genaue und schnelle Daten liefern. Während automatisierte Drohneneinsätze immer häufiger werden, besteht im Bereich der autonomen Drohnen noch erheblicher Entwicklungsbedarf. Auf Werksgeländen könnten Drohnen für den Materialtransport eingesetzt werden, allerdings eher im Außenbereich als in Innenräumen.*

*Im Innenbereich sehe ich den Einsatz von Drohnen vor allem für Überwachungstätigkeiten und Bestandsaufnahmen. Die Technologie entwickelt sich sehr schnell. Meiner Meinung nach wird es eher maßgeschneiderte Lösungen für Use-*

Cases geben. Ein digitales Bild, das erlaubt, eine räumliche Situation schnell zu visualisieren, wird dabei eine zentrale Rolle spielen.

- Welche Analysen und Kennzahlen sind Ihrer Meinung nach praxisrelevant bei der Optimierung eines Lagers, welche anhand eines vorliegenden digitalen Modells eines Lagers erfolgen können?

Die Verfügbarkeit eines digitalen Modells eines Lagers erlaubt die Durchführung verschiedener Analysen und die Ableitung von Kennzahlen, die für die Optimierung von Relevanz sind. Einerseits kann aus dem digitalen Modell der Flächennutzungsgrad und andererseits auf den Volumennutzungsgrad geschlossen werden. Für die oberen Geschäftsebenen in Unternehmen kann die virtuelle Verfügbarkeit des Lagers von Bedeutung sein, da dies eine verbesserte Entscheidungsfindung ermöglicht. Diese digitalen Modelle können auch für Planungsgruppen von Relevanz sein, um zukünftige Lagerlayouts und -prozesse zu optimieren.

- Was sind Ihrer Meinung nach Vorteile, wenn Drohnen für die Datenaufnahme von Bereichen im Lager eingesetzt werden, aus denen ein digitales Modell modelliert wird?

Der Einsatz von Drohnen zur Datenaufnahme in der Industrie bietet gegenüber manuellen Methoden mehrere Vorteile. Erstens ist die z-Komponente, also die Höhe, bei manuellen Methoden oft schwierig zu erfassen. Zudem sind Drohnen vom Boden oder Personen entkoppelt, was die Stabilität und Präzision der Aufnahmen erhöhen kann. Ein weiterer Vorteil ist die erhebliche Zeitersparnis, die sich aus dem Einsatz von Drohnen ergibt. In Zukunft könnten Drohnenschwärme automatisiert fliegen und Daten erfassen, was die Effizienz weiter steigern würde. Ein Drohnenschwarm könnte zudem mehr Bilder aus unterschiedlichen Perspektiven aufnehmen und diese zu einem umfassenden Gesamtbild zusammenfügen. Diese Vorteile machen Drohnen zu einem äußerst effektiven Werkzeug für die industrielle Datenaufnahme.

- Welche Barrieren sind Ihrer Meinung nach beim Einsatz einer Drohne im Innenbereich zu beachten?

Derzeit stellt die Akkulaufzeit von Drohnen eine Herausforderung dar, jedoch erwarte ich eine erhebliche Verbesserung dieses Faktors bis zum Jahr 2027. Eine mögliche Alternative könnten kabelgebundene Drohnen darstellen, die die Energieversorgung sicherstellen, jedoch die Bewegungsfreiheit einschränken. Sicherheitsaspekte sind ebenfalls von signifikanter Relevanz, insbesondere während des Betriebs in Bereichen, in denen sich Personen aufhalten. Kollisionen können gefährlich sein und müssen durch geeignete Sicherheitsmaßnahmen, wie beispielsweise Schutzkäfige, vermieden werden. Ein weiteres Problem stellt die Lärmbelästigung durch die Drohne

*dar, welche den Betrieb stören kann. Ferner kann die Navigationsfähigkeit durch fehlende Navigationssignale beeinträchtigt werden, was die Präzision der Drohnen einschränkt.*

## 7.2 Code für eine Drohnen-basierte Lagerinventur

```

import time, cv2
from threading import Thread
from djitellopy import Tello
from datetime import datetime

tello = Tello()

def flight_video():

    timestamp = datetime.now().strftime("%Y%m%d_%H%M%S")
    tello = Tello()
    tello.connect()

    keepRecording = True
    tello.streamon()
    frame_read = tello.get_frame_read()

    def videoRecorder():

        height, width, _ = frame_read.frame.shape
        video = cv2.VideoWriter(f'{timestamp}_tello_recording.mp4',
            cv2.VideoWriter_fourcc(*'XVID'), 30, (width,height))

        while keepRecording:

            video.write(frame_read.frame)
            time.sleep(1 / 30)

        video.release()

    recorder = Thread(target=videoRecorder)
    recorder.start()

    tello = Tello()
    tello.connect()

    tello.takeoff()
    tello.move_up(180)
    tello.set_speed(30)

    for _ in range(8):

        tello.move_left(500)

    tello.move_up(180)

    for _ in range(8):

        tello.move_right(500)

    for _ in range(8):

        tello.move_left(500)

    tello.land()

##### Ab hier Teil 2 #####

```

Abbildung 49: Programmcode Teil 1 für die DJI Tello<sup>263</sup>

<sup>263</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Fuentes Escoté, 2018.

```
##### Teil 2 #####

keepRecording = False
recorder.join()
cv2.destroyAllWindows()
tello.streamoff()
tello.reboot()
time.sleep(2)

def emergency_land():

    print("Notfall-Landung wird eingeleitet...")
    tello.land()
    tello.reboot()
    tello.streamoff()

if __name__ == "__main__":

    try:
        flight_video()
    except KeyboardInterrupt:
        # Mit Strg + C eine Notfalllandung einleiten
        keepRecording = False
        emergency_land()
```

Abbildung 50: Programmcode Teil 2 für die DJI Tello<sup>264</sup>

<sup>264</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Fuentes Escoté, 2023.

## 8 Literaturverzeichnis

### 8.1 Verwendete Literatur

Alsayed, Ahmad; Yunusa-Kaltungo, Akilu; Quinn, Mark K.; Arvin, Farshad; Nabawy, Mostafa R. A. (2021): Drone-Assisted Confined Space Inspection and Stockpile Volume Estimation. In: *Remote Sensing* 13 (17), S. 1–37. DOI: 10.3390/rs13173356.

Ariante, Gennaro; Ponte, Salvatore; Del Core, Giuseppe (2022): Bluetooth Low Energy based Technology for Small UAS Indoor Positioning. In: *IEEE 9th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*, S. 113–118. DOI: 10.1109/MetroAeroSpace54187.2022.9856321.

Arnold, Dieter; Isermann, Heinz; Kuhn, Axel; Tempelmeier, Horst; Furmans, Kai (2008): Handbuch Logistik. DOI: 10.1007/978-3-540-72929-7.

Balaska, Vasiliki; Folinas, Dimitris; Konstantinidis, Fotios K.; Gasteratos, Antonios (2022): Smart counting of unboxed stocks in the Warehouse 4.0 ecosystem. In: *IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST)*, S. 1–6. DOI: 10.1109/IST55454.2022.9827758.

Barbosa-Póvoa, Ana Paula; Mateus, Ricardo; Novais, Augusto Q. (2002): Optimal 3D layout of industrial facilities. In: *International Journal of Production Research* 40 (7), S. 1669–1698. DOI: 10.1080/00207540110118622.

Bitcraze: Crazyflie 2.1+. Online verfügbar unter <https://www.bitcraze.io/products/crazyflie-2-1-plus/>, zuletzt geprüft am 07.11.2024.

Bitcraze: Crazyflie 2.1+. Online verfügbar unter [https://www.bitcraze.io/images/crazyflie2-1-plus/CF21\\_plus\\_585px.jpg](https://www.bitcraze.io/images/crazyflie2-1-plus/CF21_plus_585px.jpg), zuletzt geprüft am 07.11.2024.

Bundeskanzleramt Österreich (Hg.) (2025): Bilanz und GuV. Inventar. Online verfügbar unter <https://www.usp.gv.at/steuern-finanzen/steuerliche-gewinnermittlung/bilanz-und-guv.html>, zuletzt aktualisiert am 01.01.2025, zuletzt geprüft am 16.01.2025.

Cañas, José M.; Martín-Martín, Diego; Arias, Pedro; Vega, Julio; Roldán-Álvarez, David; García-Pérez, Lía; Fernández-Conde, Jesús (2020): Open-Source Drone Programming Course for Distance Engineering Education. In: *Electronics* 9 (12), S. 1–18. DOI: 10.3390/electronics9122163.

Chen, Jun; Dowman, Ian; Li, Songnian; Li, Zhilin; Madden, Marguerite; Mills, Jon et al. (2016): Information from imagery: ISPRS scientific vision and research agenda. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 115, S. 3–21. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.09.008.

Chhikara, Prateek; Tekchandani, Rajkumar; Kumar, Neeraj; Chamola, Vinay; Guizani, Mohsen (2021): DCNN-GA: A Deep Neural Net Architecture for Navigation of UAV in Indoor Environment. In: *IEEE Internet Things J.* 8 (6), S. 4448–4460. DOI: 10.1109/JIOT.2020.3027095.

Crespi, Noel; Drobot, Adam T.; Minerva, Roberto (2023): The digital twin. DOI: 10.1007/978-3-031-21343-4.

Cristiani, Davide; Bottonelli, Filippo; Trotta, Angelo; Di Felice, Marco (2020): Inventory Management through Mini-Drones: Architecture and Proof-of-Concept Implementation. In: *IEEE 21st International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks" (WoWMoM)*, S. 317–322. DOI: 10.1109/WoWMoM49955.2020.00060.

Daios, Adamos; Xanthopoulos, Alexandros; Folinis, Dimitrios; Kostavelis, Ioannis (2024): Towards automating stocktaking in warehouses: Challenges, trends, and reliable approaches. In: *Procedia Computer Science* 232, S. 1437–1445. DOI: 10.1016/j.procs.2024.01.142.

Debeunne, César; Vivet, Damien (2020): A Review of Visual-LiDAR Fusion based Simultaneous Localization and Mapping. In: *Sensors* 20 (7), S. 1–20. DOI: 10.3390/s20072068.

Dering, Gregory M.; Micklethwaite, Steven; Thiele, Samuel T.; Vollgger, Stefan A.; Cruden, Alexander R. (2019): Review of drones, photogrammetry and emerging sensor technology for the study of dykes: Best practises and future potential. In: *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 373, S. 148–166. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2019.01.018.

Dinesh, Nair (2012): A Guide to Stereovision and 3D Imaging. Online verfügbar unter <https://www.techbriefs.com/component/content/article/14925-a-guide-to-stereovision-and-3d-imaging?start=1>, zuletzt geprüft am 29.10.2024.

DJI: DJI Air 2S vs. DJI Mini 3 Pro. Online verfügbar unter <https://store.dji.com/at/content/air-3-vs-mini-3-pro-vs-air-2s>, zuletzt geprüft am 20.01.2025.

DJI: DJI Mini 3 Pro. Online verfügbar unter [https://www-cdn.djiits.com/cms/uploads/04ca2f7feb8446c0c96c9ef68d3f35e9@374\\*374.png](https://www-cdn.djiits.com/cms/uploads/04ca2f7feb8446c0c96c9ef68d3f35e9@374*374.png), zuletzt geprüft am 07.11.2024.

DJI: DJI Mini 3 Pro. Online verfügbar unter <https://www.dji.com/at/>, zuletzt geprüft am 07.11.2024.

DJI: DJI Tello. Online verfügbar unter <https://se-cdn.djiits.com/tpc/uploads/carousel/image/439d96cb12ed44ba2332f9720c1c9b90@ultra.jpg>, zuletzt geprüft am 07.11.2024.

DJI: DJI Tello. Online verfügbar unter <https://store.dji.com/at/product/tello?vid=38421>, zuletzt geprüft am 20.01.2025.

DJI-SDK: Mobile-SDK-Android-V5. Online verfügbar unter <https://github.com/dji-sdk/Mobile-SDK-Android-V5?tab=readme-ov-file>, zuletzt geprüft am 10.01.2025.

doks.solution: doks.inventairy. Online verfügbar unter <https://doks-solution.com/doks-inventairy-drohne-inventur-lager-indoor/>, zuletzt geprüft am 07.11.2024.

Drohnen-Lexikon (2024): Leise Drohnen: Empfehlungen & geräuschlose Alternativen. Online verfügbar unter <https://drohnen-lexikon.de/drohnen-typen/leise-drohnen/>, zuletzt aktualisiert am 31.12.2024, zuletzt geprüft am 20.01.2025.

Drone Industry Insights (2021): Drone Market Size and Forecast 2021-2026. Online verfügbar unter <https://droneii.com/wp-content/uploads/2021/08/drone-market-in-2021-2026.pdf>, zuletzt geprüft am 27.08.2024.

Drone Industry Insights (2022): Drone Market Growth by Region. Online verfügbar unter <https://droneii.com/wp-content/uploads/2022/09/drone-market-analysis-2022-2030.pdf>, zuletzt geprüft am 27.08.2024.

Durrant-Whyte, H.; Bailey, T. (2006): Simultaneous localization and mapping: part I. In: *IEEE Robot. Automat. Mag.* 13 (2), S. 99–110. DOI: 10.1109/MRA.2006.1638022.

Edulakanti, Srinivas Reddy; Ganguly, Sanjeev (2023): Review article: The emerging drone technology and the advancement of the Indian drone business industry. In: *The Journal of High Technology Management Research* 34 (2), S. 1–15. DOI: 10.1016/j.hitech.2023.100464.

Europäische Union (24.05.2019): Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 der Kommission. (EU) 2019/947.

Fehling, Christian; Saraceni, Adriana (2023): Technical and legal critical success factors: Feasibility of drones & AGV in the last-mile-delivery. In: *Research in Transportation Business & Management* 50, S. 1–13. DOI: 10.1016/j.rtbm.2023.101029.

Fenn, Jackie; Raskino, Mark (2008): Mastering the Hype Cycle: How to Choose the Right Innovation at the Right Time.

Follath, Alexander; Bross, Florian; Galka, Stefan (2022): Vorgehensmodell zur Erstellung Digitaler Zwillinge für Produktion und Logistik. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 117 (10), S. 691–696. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1515/zwf-2022-1127>.

Friedrich, J.; Lieret, M.; Reich-Rohrwig, L.; Seel, A.; Uslar, W. (2021): UAS im Indoorbereich - Rechtliche und technische Einführung in die Nutzung von Indoor-UAS.

Fuentes Escoté, Damià (2018): MIT License DJITelloPy. Online verfügbar unter <https://github.com/damiafuentes/DJITelloPy/blob/master/LICENSE.txt>, zuletzt geprüft am 18.01.2025.

Fuentes Escoté, Damià (2023): DJITelloPy SDK. Online verfügbar unter <https://github.com/damiafuentes/DJITelloPy>, zuletzt geprüft am 18.01.2025.

Gadatsch, Andreas (2022): Geschäftsprozesse analysieren und optimieren. Praxistools zur Analyse, Optimierung und Controlling von Arbeitsabläufen. 2. Auflage. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg.

Gao, Xiang; Zhu, Lingjie; Cui, Hainan; Hu, Zhanyi; Liu, Hongmin; Shen, Shuhan (2021): Complete and Accurate Indoor Scene Capturing and Reconstruction Using a Drone and a Robot. In: *IEEE Sensors J.* 21 (10), S. 11858–11869. DOI: 10.1109/JSEN.2020.3024702.

Gartner, Inc.: Gartner Hype Cycle. Online verfügbar unter <https://www.gartner.com/en/research/methodologies/gartner-hype-cycle>, zuletzt geprüft am 27.08.2024.

Gašparović, Mateo; Seletković, Ante; Berta, Alen; Balenović, Ivan (2017): The Evaluation of Photogrammetry-Based DSM from Low-Cost UAV by LiDAR-Based DSM. In: *SEEFOR* 8 (2), S. 117–125. DOI: 10.15177/seeфор.17-16.

Gezici, S.; Tian, Zhi; Giannakis, G. B.; Kobayashi, H.; Molisch, A. F.; Poor, H. V.; Sahinoglu, Z. (2005): Localization via ultra-wideband radios: a look at positioning aspects for future sensor networks. In: *IEEE Signal Process. Mag.* 22 (4), S. 70–84. DOI: 10.1109/MSP.2005.1458289.

Gibson, Jerry D. (Hg.) (2012): Mobile communications handbook. 3rd ed (Online-Ausg.). Boca Raton, FL: CRC Press (Electrical Engineering Handbook Ser). Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/Doc?id=10587630>.

GoPro, Inc.: GoPro. Online verfügbar unter <https://gopro.com/>, zuletzt geprüft am 10.01.2025.

Harder, A.; Song, L.; Wang, Y. (2005): Towards an Indoor Location System Using RF Signal Strength in IEEE 802.11 Networks. In: *International Conference on Information Technology: Coding and Computing (ITCC'05)* (2), 228-233. DOI: 10.1109/ITCC.2005.278.

Heipke, Christian; Freeden, Willi; Rummel, Reinhard (Hg.) (2017): Photogrammetrie und Fernerkundung. 1. Auflage. Berlin: Springer Spektrum.

Hompel, Michael ten; Bauernhansl, Thomas; Vogel-Heuser, Birgit (Hg.) (2020): Handbuch Industrie 4.0. Band 3: Logistik. Unter Mitarbeit von Felix Feldmann. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.

- Hompel, Michael ten; Schmidt, Thorsten; Dregger, Johannes (2018): Materialflusssysteme. Förder- und Lagertechnik. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (VDI-Buch).
- ISO 23247-1:2021, 2021: ISO 23247-1:2021: Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing.
- Kim, Juhyeon; Chung, Duho; Kim, Yohan; Kim, Hyoungkwan (2022): Deep learning-based 3D reconstruction of scaffolds using a robot dog. In: *Automation in Construction* 134, S. 1–10. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.104092.
- Kritzinger, Werner; Karner, Matthias; Traar, Georg; Henjes, Jan; Sihn, Wilfried (2018): Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. In: *IFAC-PapersOnLine* 51 (11), S. 1016–1022. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
- Landrock, Holm; Baumgärtel, Anne (2018): Die Industriedrohne – der fliegende Roboter. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Leica: Leica Pegasus. Online verfügbar unter [https://leica-geosystems.com/-/media/images/leicageosystems/products/mobile-mapping/thumbnailportletcallout/leica\\_pegasus\\_backpack\\_web\\_thumbnail\\_800x428.ashx?sc\\_lang=de-de&hash=1C41DC43F517E0AE46A03CFC858D2580](https://leica-geosystems.com/-/media/images/leicageosystems/products/mobile-mapping/thumbnailportletcallout/leica_pegasus_backpack_web_thumbnail_800x428.ashx?sc_lang=de-de&hash=1C41DC43F517E0AE46A03CFC858D2580), zuletzt geprüft am 02.01.2025.
- Leica: Leica Pegasus: Backpack tragbare mobile Kartierungslösung. Online verfügbar unter <https://leica-geosystems.com/de-at/products/mobile-mapping-systems/capture-platforms/leica-pegasus-backpack>, zuletzt geprüft am 02.01.2025.
- Leng, Jiewu; Yan, Douxi; Liu, Qiang; Zhang, Hao; Zhao, Gege; Wei, Lijun et al. (2021): Digital twin-driven joint optimisation of packing and storage assignment in large-scale automated high-rise warehouse product-service system. In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 34 (7-8), S. 783–800. DOI: 10.1080/0951192X.2019.1667032.
- Liu, Hui; Darabi, Houshang; Banerjee, Pat; Liu, Jing (2007): Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems. In: *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. C* 37 (6), S. 1067–1080. DOI: 10.1109/TSMCC.2007.905750.
- Maghazei, Omid; Lewis, Michael A.; Netland, Torbjørn H. (2022): Emerging technologies and the use case: A multi-year study of drone adoption. In: *J of Ops Management* 68 (6-7), S. 560–591. DOI: 10.1002/joom.1196.
- Maghazei, Omid; Netland, Torbjørn (2020): Drones in manufacturing: exploring opportunities for research and practice. In: *JMTM* 31 (6), S. 1237–1259. DOI: 10.1108/JMTM-03-2019-0099.

- Maheshwari, Pratik; Kamble, Sachin; Kumar, Satish; Belhadi, Amine; Gupta, Shivam (2023): Digital twin-based warehouse management system: a theoretical toolbox for future research and applications. In: *IJLM*. DOI: 10.1108/IJLM-01-2023-0030.
- Mahmood, Kashif; Karjust, Kristo; Raamets, Tõnis (2021): Production Intralogistics Automation Based on 3D Simulation Analysis. In: *Journal of Machine Engineering*, S. 101–115. DOI: 10.36897/jme/137081.
- Malhotra, Aman; Soderstrom, Ulrik (2022): Fixed camera drone based photogrammetry for indoor mapping. In: *IEEE 9th Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)*, S. 1–5. DOI: 10.1109/UPCON56432.2022.9986428.
- Markovic, Nemanja; Cojbasic, Zarko; Petrovic, Goran; Milic, Predrag; Milosevic, Masa; Ivacko, Nikola (2024): A machine learning based framework for optimizing drone use in advanced warehouse cycle counting process solutions. In: *Innovative Mechanical Engineering 2024*, S. 69–78. Online verfügbar unter <http://ime.masfak.ni.ac.rs/index.php/IME/article/view/88/74>.
- Martin, Heinrich (2021): Technische Transport- und Lagerlogistik. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Matysczok, Carsten (2023): Digital Twin – Einsatzbereiche des Digitalen Zwillings im Bereich Produktion und Logistik. In: *20. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik 2023*. DOI: 10.22032/DBT.57802.
- Maweni, Thabisa; Setati, Tiro; Botha, Natasha (2023): Optimised path planning of a UAV for inventory management applications. In: *MATEC Web Conf.* 388, S. 1–9. DOI: 10.1051/mateconf/202338804021.
- Meiselwitz, Gabriele H. (Hg.) (2021): Social computing and social media. 13th International Conference, SCSM 2021, held as part of the 23rd HCI International Conference, HCII 2021, virtual event, July 24-29, 2021 : proceedings. HCI International. Cham: Springer (Lecture notes in computer science, 12774).
- Melcher, Dominik; Küster, Benjamin; Stonis, Malte; Overmeyer, Ludger (2018a): Dreidimensionale Fabrikplanung durch Drohneneinsatz. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* (113), S. 267–271. DOI: 10.3139/104.111906.
- Melcher, Dominik; Küster, Benjamin; Stonis, Malte; Overmeyer, Ludger (2018b): Optimierung von Fabrikplanungsprozessen durch Drohneneinsatz und automatisierte Layoutdigitalisierung. In: *Logistics Journal: Proceedings*, S. 1–7. DOI: 10.2195/LJ\_PROC\_MELCHER\_DE\_201811\_01.
- Melcher, Dominik; Küster, Benjamin; Stonis, Malte; Overmeyer, Ludger (2019): Fabrik- und Produktionsplanung im digitalen Modell durch automatisierte Punktwolkenverarbeitung. In: *Logistics Journal: Proceedings*, S. 1–7. DOI: 10.2195/LJ\_PROC\_MELCHER\_DE\_201912\_01.

MHI; Deloitte (2024): 2024 MHI Annual Industry Report 2024, S. 1–49. Online verfügbar unter <https://locusrobotics.com/wp-content/uploads/2024/05/MHI-Industry-Report-2024.pdf>, zuletzt geprüft am 10.10.2024.

Nafors, Daniel; Johansson, Bjorn; Gullander, Per; Erixon, Sven (2020): Simulation in Hybrid Digital Twins for Factory Layout Planning. In: *Winter Simulation Conference WSC*, S. 1619–1630. DOI: 10.1109/WSC48552.2020.9384075.

Noman, Islam; Zeeshan, Islam; Nazia, Noor (2017): A Survey on Optical Character Recognition System. In: *ArXiv abs/1710.05703*. Online verfügbar unter <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:1040908>.

Park, Jisoo; Kim, Pileun; Cho, Yong K. (Hg.) (2018): Automated collaboration framework of UAV and UGV for 3D visualization of construction sites. 18th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality.

Peppers, Ken; Tuunanen, Tuure; Rothenberger, Marcus A.; Chatterjee, Samir (2007): A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. In: *Journal of Management Information Systems* 24 (3), S. 45–77. DOI: 10.2753/MIS0742-1222240302.

Pix4D SA: Pix4Dmapper 4.1: User Manual. Online verfügbar unter [https://data.pix4d.com/misc/manual\\_pdf/manual\\_4\\_1.pdf](https://data.pix4d.com/misc/manual_pdf/manual_4_1.pdf), zuletzt geprüft am 10.04.2024.

Rabe, Markus; Spieckermann, Sven; Wenzel, Sigrid (2008): Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.

Rahaman, Hafizur (2021): Photogrammetry: What, How, and Where. In: *Virtual Heritage: A Concise Guide*.

Rahaman, Hafizur; Champion, Erik (2019): To 3D or Not 3D: Choosing a Photogrammetry Workflow for Cultural Heritage Groups. In: *Heritage* 2 (3), S. 1835–1851. DOI: 10.3390/heritage2030112.

Rakhade, R. D.; Patil, N. V.; Pardeshi, M. R. (2021): Optimal Choice of Agricultural Drone using MADM Methods. In: *IJTIMES* 7 (4), S. 1–7. Online verfügbar unter <https://www.ijtimes.com/index.php/ijtimes/article/view/20>.

Santagati, C.; Inzerillo, L.; Di Paola, F. (2013): Image-based modeling techniques for architectural heritage 3D digitalization: limits and potentialities. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (40), S. 555–560. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W2-555-2013.

Schlattmann, Josef; Seibel, Arthur (2017): Aufbau und Organisation von Entwicklungsprojekten. Berlin, Heidelberg: Springer (MatWerk).

Schlecht, Michael; Köbler, Jürgen; Guio, Roland de (2021): Flexibles Referenzmodell zur Planung und Optimierung der Produktion – Generierung digitaler Fabrikmodelle mit dem digitalen Zwilling. In: *I40M 2021* (5), S. 53–56. DOI: 10.30844/I40M\_21-5\_S53-56.

SDG Watch Austria: Sustainable Development Goals. Online verfügbar unter <https://www.sdgwatch.at/de/ueber-sdgs/>, zuletzt geprüft am 03.09.2024.

Seel, Andreas; Kreuzjans, Florian; Kuster, Benjamin; Stonis, Malte; Overmeyer, Ludger (2022): Deep Reinforcement Learning Based UAV for Indoor Navigation and Exploration in Unknown Environments. In: *8th International Conference 2022*, S. 388–393. DOI: 10.1109/ICCAR55106.2022.9782602.

sevDesk GmbH: Inventur. Online verfügbar unter <https://sevdesk.at/lexikon/inventur/>, zuletzt geprüft am 29.09.2024.

Shule, Wang; Almansa, Carmen Martínez; Queralta, Jorge Peña; Zou, Zhuo; Westerlund, Tomi (2020): UWB-Based Localization for Multi-UAV Systems and Collaborative Heterogeneous Multi-Robot Systems. In: *Procedia Computer Science* 175, S. 357–364. DOI: 10.1016/j.procs.2020.07.051.

Sodiya, Enoch Oluwademilade; Umoga, Uchenna Joseph; Amoo, Olukunle Oladipupo; Atadoga, Akoh (2024): AI-driven warehouse automation: A comprehensive review of systems. In: *GSC Adv. Res. Rev.* 18 (2), S. 272–282. DOI: 10.30574/gscarr.2024.18.2.0063.

Solís, Patricia; Zeballos, Marcela (2023): Open Mapping Towards Sustainable Development Goals. Voices of YouthMappers on Community Engaged Scholarship. Unter Mitarbeit von Marcela Zeballos: Springer. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=7148648>.

Sommer, Markus; Stjepandić, Josip; Stobrawa, Sebastian; Soden, Moritz von (2023): Automated generation of digital twin for a built environment using scan and object detection as input for production planning. In: *Journal of Industrial Information Integration* 33, S. 1–14. DOI: 10.1016/j.jii.2023.100462.

Spreitzer, Gabriel; Tunncliffe, Jon; Friedrich, Heide (2020): Large wood (LW) 3D accumulation mapping and assessment using structure from Motion photogrammetry in the laboratory. In: *Journal of Hydrology*, S. 1–15. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124430.

Stöber, Robin; Sönmez, Can; Janson, Niels; Kumpe, Hendrik; Stonis, Malte; Nyhuis, Peter (2024): Point Clouds As A Geometric Data Basis For Factory Planning - Comparison Of Several Mapping Techniques. In: *6th Conference on Production Systems and Logistics*, S. 121–132. DOI: 10.15488/17706.

Tang, Jian; Chen, Yuwei; Jaakkola, Anttoni; Liu, Jinbing; Hyypä, Juha; Hyypä, Hannu (2014): NAVIS-An UGV indoor positioning system using laser scan matching

for large-area real-time applications. In: *Sensors* 14 (7), S. 11805–11824. DOI: 10.3390/s140711805.

Taschner, Patrick (2023): Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Einführung industriell genutzter Drohnen für den intralogistischen Materialtransport in Österreich. DOI: 10.34726/hss.2023.111434.

Thomaidis, Nikolaos Christoforos; Zeimpekis, Vasileios (2024): Investigation of operational parameters that affect the use of drones in goods' stock count process: Evidence from experimental results. In: *JJEM* 17 (1), S. 115–132. DOI: 10.3926/jjem.6446.

Tompkins, James A.; White, John A.; Bozer, Yavuz A.; Tanchoco, Jose Mario Azaña (2010): *Facilities planning*: John Wiley & Sons.

UNESCO (2021): SDG 9: Industry, Innovation & Infrastructure. Policy Brief On SDG9. In: *UNESCO Science Report*. Online verfügbar unter [https://www.unesco.org/reports/science/2021/sites/default/files/medias/fichiers/2022/08/USR21\\_policy-brief\\_SDG-9.pdf](https://www.unesco.org/reports/science/2021/sites/default/files/medias/fichiers/2022/08/USR21_policy-brief_SDG-9.pdf), zuletzt geprüft am 10.09.2024.

Unitree Robotics: Unitree A1. Online verfügbar unter <https://www.unitree.com/a1>, zuletzt geprüft am 03.01.2025.

University of Southern Denmark: Sustainable Development Goals at SDU UAS Center. Online verfügbar unter <https://www.sdu.dk/en/forskning/sduuascener/sdg>, zuletzt geprüft am 03.09.2024.

VDI 2225-Blatt 3, 1998: VDI 2225-Blatt 3: Technisch-wirtschaftliches Konstruieren.

VDI 2710-Blatt 1, 2007: VDI 2710-Blatt 1: Ganzheitliche Planung von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS).

VDI 2879, 2018: VDI 2879: Inspektion von Anlagen und Gebäuden mit UAV (Flugdrohnen).

VDI 5200-Blatt 1, 2011: VDI 5200-Blatt 1: Fabrikplanung.

Verity: Verity. Online verfügbar unter <https://verity.net/>, zuletzt geprüft am 07.11.2024.

Weber, Christoph (2021): *Die Technik der Starrflügler-Drohnen*. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Wedel, Frederik; Opitz, Daniel; Tiedemann, Christoph; Meyer-Westphal, Markus (2022): Das 3-D-Modell als Grundlage des digitalen Zwillings. In: *Bautechnik* 99 (2), S. 104–113. DOI: 10.1002/bate.202100092.

Wehking, Karl-Heinz (2020): *Technisches Handbuch Logistik 1*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.

Weitkamp, Claus (Hg.) (2005): Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere. New York, NY: Springer New York.

Wiendahl, Hans-Peter; Reichardt, Jürgen; Nyhuis, Peter (2014): Handbuch Fabrikplanung : Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. In: *Handbuch FabrikplanungMmN* (ISBN 3446438920). Online verfügbar unter <https://permalink.catalogplus.tuwien.at/AC11650415>.

Wiendahl, Hans-Peter; Reichardt, Jürgen; Nyhuis, Peter (2024): Handbuch Fabrikplanung. München: Carl Hansler Verlag München.

Woźniakowski, Tomasz; Jałowiecki, Piotr; Zmarzłowski, Krzysztof (2018): ERP systems and warehouse management by WMS. In: *Information systems in management* 7, S. 141–151. DOI: 10.22630/ISIM.2018.7.2.6.

Zhang, J.; Singh, S. (2014): LOAM: Lidar odometry and mapping in real-time. In: *Robotics: Science and systems*, S. 1–9. DOI: 10.15607/RSS.2014.X.007.

Zhang, Juan; Campbell, James F.; Sweeney II, Donald C.; Hupman, Andrea C. (2021): Energy consumption models for delivery drones: A comparison and assessment. In: *Transportation Research Part D* 90, S. 1–23. DOI: 10.1016/j.trd.2020.102668.

## 8.2 Experteninterview

Interview wurde geführt mit:

Dr.techn. Patrick Taschner

Gruppenleiter bei Fraunhofer Austria Research GmbH

Theresianumgasse 7, 1040 Wien

21.Jänner 2025

## 8.3 Eigene unveröffentlichte Quellen

Drohnenbeauftragter der ÖAMTC Fahrtechnik GmbH: E-Mail-Korrespondenz, ÖAMTC Fahrtechnik GmbH, 08.11.2024.

## 9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Design-Science-Research Modell nach Peffers et al.....	4
Abbildung 2: Aufbau der Arbeit.....	6
Abbildung 3: Lagerhaltungskosten .....	8
Abbildung 4: Gestaltungsfelder einer Fabrik.....	10
Abbildung 5: Arten von Inventuren .....	12
Abbildung 6: Optimale Aufnahme vom Objekt für Photogrammetrie .....	14
Abbildung 7: Funktionsprinzip Stereovision .....	14
Abbildung 8: Datenintegration der drei Begrifflichkeiten .....	17
Abbildung 9: Prozess für den Aufbau eines digitalen Zwillings.....	18
Abbildung 10: Vorgehensmodell zur Entwicklung digitaler Zwillinge in Produktion und Logistik .....	19
Abbildung 11: Leica Pegasus Rucksack.....	20
Abbildung 12: Robo-Hund .....	20
Abbildung 13: Prognostizierter Umsatz der industriellen Drohnenindustrie .....	22
Abbildung 14: Anteile von Anbietern des Drohnenmarkts nach Segmenten .....	23
Abbildung 15: Umfrageergebnisse - Einführung von Technologien.....	24
Abbildung 16: Gartner Hype Kurve angewandt auf die Entwicklung neuer Technologien .....	26
Abbildung 17: Anwendungsfälle einer Drohne in der Industrie .....	27
Abbildung 18: Top 10 Use-Cases für Drohnen aus dem Jahr 2018 .....	28
Abbildung 19: Adressierte SDGs und durch den Einsatz von Drohnen .....	29
Abbildung 20: Versuch einer Taxonomie für Drohnen .....	31
Abbildung 21: Globale Navigationssysteme .....	33
Abbildung 22: UWB-Anker und UWB-Tag .....	35
Abbildung 23: Eingrenzung des Forschungsbereichs.....	38
Abbildung 24: Darstellung der Drohnen von Verity und doks.solution .....	45
Abbildung 25: Darstellung der DJI-Drohnen Tello und Mini 3 Pro .....	46
Abbildung 26: Darstellung der Drohnen Bitcraze Crazyflie 2.1 und DIY-Variante.....	47
Abbildung 27: Adressierte Schritte im Vorgehensmodell nach Follath et al.....	52
Abbildung 28: Entwickeltes Vorgehensmodell.....	53
Abbildung 29: Beispielhafter Grundriss eines Lagers mit 2 Referenzmarkern.....	59
Abbildung 30: Vorgehensweise einer Drohnen-basierten Lagerinventur.....	66
Abbildung 31: Systemarchitektur der Drohnen-basierten Lagerinventur .....	67
Abbildung 32: Umwandlung der Ergebnisse in Punkte.....	70
Abbildung 33: Platzierte Referenzmarker .....	75
Abbildung 34: Eingesetzte DJI Mini 3 Pro für die Datenaufnahme inklusive Kollisionsschutz.....	75
Abbildung 35: Aufnahmewinkel der intern verbauten Kamera während des Drohnenflugs .....	76

Abbildung 36: Lagergasse in der Draufsicht.....	76
Abbildung 37: Flugroute für den Drohnenflug mit dem Kamerawinkel 0° bzw. 30° in der Seitenansicht.....	77
Abbildung 38: Flugroute für den Drohnenflug mit dem Kamerawinkel 90° in der Seitenansicht.....	77
Abbildung 39: Sortierung der aufgenommenen Daten.....	78
Abbildung 40: Digitales Modell auf Basis von Bildaufnahmen mit einem Kamerawinkel von 0° .....	79
Abbildung 41: Digitales Modell auf Basis von Bildaufnahmen mit einem Kamerawinkel von 30° .....	80
Abbildung 42: Digitales Modell auf Basis von Bildaufnahmen mit einem Kamerawinkel von 90° .....	81
Abbildung 43: Höhenanalyse des Lagers anhand des digitalen Modells.....	83
Abbildung 44: Darstellung unbelegter Lagerplätze .....	84
Abbildung 45: Ausrichtung der Drohne während des Flugs.....	86
Abbildung 46: Flugroute im Use-Case.....	86
Abbildung 47: Programmierte Flugroute.....	87
Abbildung 48: Programmierte Notfalllandung .....	88
Abbildung 49: Programmcode Teil 1 für die DJI Tello .....	100
Abbildung 50: Programmcode Teil 2 für die DJI Tello .....	101

## 10 Formelverzeichnis

Formel 1: Flächennutzungsgrad .....	9
Formel 2: Höhennutzungsgrad .....	9
Formel 3: Lagerfüllgrad .....	9
Formel 4: Höhennutzungsgrad des Use-Cases.....	82
Formel 5: Lagerfüllgrad des Use-Cases .....	83
Formel 6: Berechnung der zurückgelegten Distanz.....	88

# 11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abkürzungen und Bezeichnungen des Begriffs Drohne.....	21
Tabelle 2: Überblick über unterschiedliche Modellierungstechniken und deren Parameter.....	41
Tabelle 3: Zusammenfassung der State-of-the-Art.....	48
Tabelle 4: Schema der Punktbewertung zur Erstellung eines digitalen Modells.....	55
Tabelle 5: Schema der Bewertung der möglichen Ressourcenmittel .....	57
Tabelle 6: Schema der Punktbewertung der digitalen Abbilder .....	61
Tabelle 7: Umrechnung der Abweichung zur Realität in Punkte.....	62
Tabelle 8: Schema der Merkmale für eine Inventurdrohne.....	64
Tabelle 9: Punktbewertung zur Auswahl der geeigneten Methode zur Erstellung des digitalen Modells.....	71
Tabelle 10: Bewertung für die Auswahl eines geeigneten Ressourcenmittels.....	74
Tabelle 11: Bewertung der digitalen Modelle 1 bis 4 .....	82
Tabelle 12: Gegenüberstellung von möglichen programmierbaren Inventurdrohnen	85
Tabelle 13: Berechnung der Flugdauer .....	89

## 12 Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
.obj	Object File Format
€	Euro
§	Paragraph
°	Grad
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
BSc	Bachelor of Science
bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer-Aided Design
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CCD	Charge-Coupled Device
CE	Conformité Européenne
CEO	Chief Executive Officer
cm	Zentimeter
cm/s	Zentimeter pro Sekunde
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
CRISP-DM	Cross-Industry Standard Process for Data Mining
d.h.	das heißt
DACH	Deutschland, Österreich, Schweiz
DGPS	Differential Global Positioning System
Dipl.-Ing.	Diplom-Ingenieur
DIY	Do It Yourself
DJI	Da-Jiang Innovations
DOI	Digital Object Identifier
Dr.	Doktor
Dr.techn.	Doktor der technischen Wissenschaften
DSM	Digital Surface Model
et al.	et alii (und andere)
etc.	et cetera
EU	European Union
f.	folgende Seite
ff.	fortfolgende Seiten
g	Gramm
GHz	Gigahertz
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GNSS	Global Navigation Satellite System
h	Stunde
Hg.	Herausgeber
IMU	Inertial Measurement Unit
IoT	Internet of Things
ISO	International Organization for Standardization
KI	Künstliche Intelligenz
LIDAR	Light Detection and Ranging
LOAM	Lidar Odometry and Mapping
m	Meter
m <sup>2</sup>	Quadratmeter
max.	maximal
MHI	Material Handling Industry
min	Minute
MP	Megapixel

NAVSTAR	Navigation System with Timing and Ranging
ns	Nanosekunde
o.D.	ohne Datum
ÖAMTC	Österreichischer Automobil-, Motorrad- und Touring Club
OCR	Optical Character Recognition
PC	Personal Computer
QR	Quick Response
RFID	Radio-Frequency Identification
RTK	Real-Time Kinematic
s	Sekunde
S.	Seite
SBAS	Satellite-Based Augmentation System
SDG	Sustainable Development Goal
SDK	Software Development Kit
SfM	Structure from Motion
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
Strg	Steuerung (PC Taste)
TU	Technische Universität
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
UAS	Unmanned Aircraft System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
Univ.-Prof.	Universitätsprofessor
US	United States
UWB	Ultra-Wideband
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	Vergleiche
Wi-Fi	Wireless Fidelity
z.B.	zum Beispiel
bzw.	beziehungsweise
d.h.	das heißt
€	Euro
EFQM	European Foundation for Quality Management
etc.	et cetera
h	Stunde
ISO	International Organization for Standardization
max.	maximal
sh.	siehe
u./o.Ä.	und/oder Ähnliche/s
www	World Wide Web
z.B.	zum Beispiel