



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

DISSERTATION

Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Einführung industriell genutzter Drohnen für den intralogistischen Materialtransport in Österreich

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der technischen Wissenschaften, eingereicht an der TU Wien, Fakultät für
Maschinenwesen und Betriebswissenschaften, von

Dipl.-Ing. Patrick Taschner

Matrikelnummer: 01225374

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl. Wirt.-Ing. Prof. eh. Dr. h.c. Wilfried Sihm
Technische Universität Wien, Institut für Managementwissenschaften

Wien, Juni 2023

Begutachtet von

Univ.-Prof. Mag. Dr.

Helmut Zsifkovits

Montanuniversität Leoben

Lehrstuhl für Industrielogistik

Univ.-Prof. Dr.-Ing.

Dominik Matt

Universität Bozen

Lehrstuhl für Produktionssysteme
und -technologien



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

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

Dissertation

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die vorgelegte Arbeit mit geeigneten und dem derzeitigen Stand der Technik entsprechenden Mitteln (Plagiat-Erkennungssoftware) elektronisch-technisch überprüft wird. Dies stellt einerseits sicher, dass bei der Erstellung der vorgelegten Arbeit die hohen Qualitätsvorgaben im Rahmen der geltenden Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis „Code of Conduct“ an der TU Wien eingehalten wurden. Zum anderen werden durch einen Abgleich mit anderen studentischen Abschlussarbeiten Verletzungen meines persönlichen Urheberrechts vermieden.

Wien, Juni 2023

Dipl.-Ing. Patrick Taschner

Kurzfassung

Der innerbetriebliche Warentransport ist wesentlich für die Effizienz und Leistungsfähigkeit innerhalb eines Unternehmens verantwortlich. Leerfahrten und ineffiziente Fahrrouten aufgrund starrer Routenführungen stellen wesentliche Kostentreiber innerhalb der Logistik dar, wodurch Bestrebungen zur Prozessoptimierung für einen beschleunigten Warentransport am Werksgelände im Betrachtungsbereich der Unternehmensführung liegen. Diese Optimierungsszenarien umfassen jedoch ausschließlich konventionelle Flurfördermittel und berücksichtigen den Einsatz von Drohnen zur Materialbereitstellung nur unzureichend.

Gründe für die geringe Bereitschaft zur Drohnenimplementierung im industriellen Umfeld sind Studien zufolge die fehlenden Gegenüberstellungen, Referenzprojekte und die vorherrschende Wahrnehmung, dass Drohnen kein valides Industriewerkzeug darstellen. Die identifizierbaren wissenschaftlichen Veröffentlichungen im Bereich des innerbetrieblichen Materialtransports mittels Drohnen beziehen sich vorzugsweise auf geschlossene Räume und lassen den Außenbereich häufig außen vor. Zusätzlich wird auf methodische Ansätze zur Technologiebewertung der notwendigen Drohne, Sensorik und Sicherheitskomponenten verzichtet. Ein grundlegendes Vorgehensmodell, welches sowohl rechtliche Restriktionen, Betriebsbewilligungsverfahren als auch unternehmensspezifische Anforderungen zur Einführung von Drohnen im Außenbereich eines industriellen Umfelds berücksichtigt, konnte nicht identifiziert werden.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit liegt in der Entwicklung eines strukturierten Vorgehensmodells inklusive nötiger Maßnahmenschritte, um einen Beitrag zur Etablierung der Drohnentechnologie in Unternehmen zu leisten. Neben der Berücksichtigung unternehmensspezifischer Anforderungen, welche in die Bereitstellung von spezifischen Auswahlkriterien zur Technologiebewertung einfließen, werden praxistaugliche Durchführungsschritte in Bezug auf das notwendige Betriebsbewilligungsverfahren definiert. Weiters werden rechtliche Anforderungen an die Drohnentechnologie und den Betreiber aufgezeigt, um Handlungsempfehlungen abzuleiten.

Zur Zielerreichung wird aufbauend auf dem Stand der Wissenschaft und Technik ein Vorgehensmodell mit definierten Schritten entwickelt, welches sowohl die technologische und wirtschaftliche Bewertung des Drohneneinsatzes, Unternehmensanforderungen, Drohnenspezifikationen als auch die rechtlichen Rahmenbedingungen infolge des Betriebsbewilligungsverfahrens berücksichtigt. Die praxisbezogene Anwendbarkeit des entwickelten Vorgehensmodells wird in vorliegender Arbeit anhand eines industrienahen Anwendungsfalls validiert.

Schlagworte: Drohnen, Materialtransport, Intralogistik, Vorgehensmodell

Abstract

The internal transport of goods is essentially responsible for the efficiency and performance within a company. Empty trips and inefficient routes due to rigid routing are major cost drivers within logistics, which means that efforts to optimise processes for accelerated goods transport on the factory yard are within the management's sphere of consideration. These optimisation scenarios, however, only include conventional industrial trucks and do not sufficiently consider the use of drones for material provision.

According to studies, the main reasons for the low willingness to implement drones in the industrial environment are the lack of comparisons, reference projects and the prevailing perception that drones do not represent a valid industrial tool. The identifiable scientific publications in the field of internal material transport by means of drones preferably refer to enclosed spaces and often leave out the outdoor area. In addition, methodological approaches for the technology assessment of the necessary drone, sensor technology and safety components are omitted. A basic procedure model, which considers legal restrictions, operating permit procedures as well as company-specific requirements for the introduction of drones in the outdoor area of an industrial environment could not be identified.

The aim of the present work is to develop a structured process model including the necessary steps to contribute to the establishment of drone technology in companies. In addition to the consideration of company-specific requirements, which are included in the provision of various selection criteria for adequate technology assessment, practical implementation steps are defined regarding the necessary operating licence procedure. Furthermore, legal requirements for the implemented drone and operators are presented in order to derive recommendations for a successful course of action.

Based on the state of the art in technology and science, a process model with defined steps will be developed to achieve the objectives, which considers the company requirements, drone specifications as well as the legal framework following the operating permit procedure. The practical applicability of the developed process model will be validated in this thesis with the support of an industrial case study.

Keywords: drones, material handling, intralogistics, procedural model

Vorwort und Danksagung des Autors

Im Zuge meiner Anstellung als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Projektleiter im Bereich der digitalen Logistik und Automatisierung bei der Fraunhofer Austria Research GmbH (FhA) entstand die vorliegende wissenschaftliche Arbeit im Bereich der Drohnentechnologie.

Diesbezüglich möchte ich mich bei allen Personen, die mich auf diesem Entwicklungsweg in meiner beruflichen Laufbahn begleitet haben, für die wertvollen fachlichen Inputs bedanken.

Meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Prof. e.h. Dr.-Ing. Dr. h.c. Dipl. Wirtsch.-Ing. Wilfried Sihm, Geschäftsführer FhA, danke ich für den intensiven fachlichen Austausch während des Entwicklungsprozesses dieser Arbeit sowie das entgegengebrachte Vertrauen für die Weiterentwicklung des Themenbereichs der Drohnentechnologie im Unternehmen.

Des Weiteren bedanke ich mich bei meinen beiden Gutachtern Herrn Univ.-Prof. Mag. Dr. Helmut Zsifkovits und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dominik Matt für die aufgebrachte Zeit und hilfreichen Anmerkungen, die wesentlich zur Verbesserung dieser Arbeit beigetragen haben.

Ebenfalls gilt mein Dank Dr. Rainer Pascher, Dr. Karl Ott und Dr. Martin Riester, die mich sowohl bei der Themenfindung maßgebend unterstützt haben als auch durch ihre Ratschläge und fachlichen Austausch einen wesentlichen Anteil am Entstehen dieser Arbeit tragen.

Ich danke außerdem Herrn Dipl.-Ing. Andreas Lehner für die zahlreichen Gespräche während der Entwicklungsarbeit bei der Bauteilentwicklung und für seine unermüdliche Tatkraft beim Bau der Plattformen. Durch diese Leistung hat er wesentlich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen.

Meinem Freundeskreis danke ich für die motivierenden Worte und fachlichen Inputs während der gesamten Entstehungsdauer.

Insbesondere meinem Bruder Alexander Taschner möchte ich für die Unterstützung bei der Detailplanung und baulichen Umsetzung der Landeplattformen danken.

Ein spezieller Dank gilt meinen Eltern Brigitte und Martin Taschner, die mich in jeder Lebenslage unterstützt und gefördert haben. Ohne sie wäre dieser Entwicklungsweg nicht möglich gewesen. Mit großer Dankbarkeit widme ich euch diese Arbeit!

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Ausgangssituation und Motivation	1
1.2	Allgemeine Problemstellung	3
1.3	Allgemeine Zielsetzung.....	5
1.4	Definition der Forschungsmethodik	6
1.4.1	Wissenschaftliche Eingliederung	6
1.4.2	Abgeleitete methodische Vorgehensweise.....	7
1.5	Struktureller Aufbau der Arbeit.....	9
2	Theoretische Grundlagen und Eingrenzung des Forschungsbereichs	11
2.1	Transportlogistik – Grundlagen und Begriffsdefinitionen	11
2.1.1	Intralogistik und innerbetrieblicher Transport.....	11
2.1.2	Intralogistischer Materialfluss	12
2.1.3	Transportmittel	13
2.2	Drohnen in der Logistik.....	14
2.2.1	Trends in der Drohnentechnologie	14
2.2.2	Begriffsdefinitionen	15
2.2.3	Übersicht der Drohnentypen.....	16
2.2.4	Technische Spezifikationen.....	18
2.2.5	Charakteristiken des Einsatzgebiets	22
2.2.6	Betriebsarten im Außenbereich	23
2.2.7	Prozessbereich für den Drohneneinsatz.....	25
2.2.8	Rechtsgrundlagen in Österreich für die Drohnen Einsatzkategorien - Open, Specific, Certified.....	27
2.3	Eingrenzungen des Untersuchungsbereichs	32
2.3.1	Technologische Eingrenzung	33
2.3.2	Prozessuale Eingrenzung.....	35
2.4	Zusammenfassung des Kapitels.....	36
3	Stand der Wissenschaft und Technik	37
3.1	Vorgehensweise der Literaturanalyse.....	37
3.2	Vorgehensmodelle für die Einführung, Auswahl und den Betrieb von Drohnen für den Materialtransport	38
3.2.1	Modell von Vlahovic et al. (2016) zur Einführung von Drohnen.....	38
3.2.2	Modell von Wrycza et al. (2017) zur Einführung von Drohnen	39

3.2.3	Modell von Fritzsch et al. (2020) zur Einführung von Drohnen.....	40
3.2.4	Modell von Perez-Grau et al. (2021) zur Einführung von Drohnen.....	42
3.2.5	Fazit Vorgehensmodelle.....	43
3.3	Modelle zur Transportaufnahme.....	45
3.3.1	Modell von Wrycza et al. (2017) zur Transportaufnahme.....	47
3.3.2	Modell von Lieret et al. (2019) zur Transportaufnahme.....	49
3.3.3	Modell von Lieret et al. (2020a) zur Transportaufnahme.....	50
3.3.4	Modell von Lieret et al. (2020b) zur Transportaufnahme.....	52
3.3.5	Modell von Zhao et al. (2022) zur Transportaufnahme.....	52
3.3.6	Fazit Transportaufnahmesysteme.....	54
3.4	Lande- und Übergabepattformtypen.....	55
3.4.1	Plattformen ohne Positionierungsfunktion.....	57
3.4.2	Plattformen mit unterstützender Positionierungsfunktion.....	58
3.4.3	Fazit Lande- und Übergabepattformtypen.....	60
3.5	Zusammenfassung des Kapitels.....	61
4	Spezifische Problemstellung und Zieldefinition.....	63
4.1	Problemstellung und Ableitung des Forschungsbedarfs.....	63
4.2	Spezifische Zielsetzung und Forschungsfragen.....	65
4.3	Anforderungen an das Vorgehensmodell.....	66
4.4	Zusammenfassung des Kapitels.....	68
5	Vorgehensmodell zur Einführung von Drohnen im industriellen Umfeld	69
5.1	Vorabprüfung: Eignungsfähigkeit des Drohneneinsatzes.....	71
5.1.1	Anforderungskriterien für die Eingrenzung geeigneter Transportmittel	71
5.1.2	Zusammenfassung und Zwischenfazit der Vorabprüfung.....	74
5.2	Schritt 1 Analysephase: Erfassung notwendiger Informationen und Daten	74
5.2.1	Erhebung von Unternehmensinformationen für den Drohneneinsatz.....	74
5.2.2	Definition des Einsatzgebiets und Prozessentwicklung.....	78
5.2.3	Flug- und Routenplanung.....	79
5.2.4	Transportgutklassifizierung.....	81
5.2.5	Zusammenfassung von Schritt 1 Anforderungsmappe.....	82
5.3	Schritt 2 Transporttechnologiebewertung: Auswahl einer geeigneten Drohne für den automatisierten Materialtransport.....	83
5.3.1	Methodische Vorgehensweise bei der Drohnenauswahl.....	83

5.3.2	Zusammenfassung von Schritt 2 Kriterienkatalog für die Technologiebewertung und Drohnenauswahl	86
5.4	Schritt 3 Formulierung eines Lastenhefts für die luftfahrtrechtliche Betriebsbewilligung in Österreich.....	86
5.4.1	Zusammenfassung von Schritt 3 Formulierung eines Lastenhefts	92
5.5	Schritt 4 Zusammenführung von Drohne, Aufnahmevorrichtung und Landeplattform: Definition einer Anforderungsliste	92
5.5.1	Methodische Vorgehensweise anhand des Produktentwicklungsprozesses nach VDI-Richtlinie 2221	93
5.5.2	Auswahl und Kombination von Kriterien anhand einer Anforderungsliste	95
5.5.3	Zusammenfassung von Schritt 4 Anforderungsliste	99
5.6	Schritt 5 Validierung des wirtschaftlichen Nutzens	100
5.6.1	Personalkosten in Bezug auf den Drohnentransport	100
5.6.2	Ermittlung der Transportzeit	101
5.6.3	Bestimmung der Drohnenanzahl und Betriebskosten	102
5.6.4	Ermittlung der Transportkosten in Abhängigkeit der Transportanzahl pro Jahr	108
5.6.5	Zusammenfassung von Schritt 5 Validierung des wirtschaftlichen Nutzens	112
5.7	Zusammenfassung des Kapitels.....	112
6	Anwendung und Validierung des Vorgehensmodells	113
6.1	Fallbeispiel 1: Materialtransport mit Drohnen in der Baustoffindustrie	113
6.1.1	Ausgangssituation und Problemstellung.....	113
6.1.2	Zielsetzung.....	113
6.1.3	Anwendung der Modelldurchführungsschritte	114
6.2	Zusammenfassende Erkenntnisse aus dem Fallbeispiel	148
7	Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick	151
7.1	Diskussion der Forschungsfragen und der Hypothese	151
7.2	Evaluierung der Anforderungen an das Vorgehensmodell	155
7.3	Weiterer Forschungsbedarf	158
8	Abbildungsverzeichnis.....	160
9	Tabellenverzeichnis	162
10	Formelverzeichnis.....	164
10.1	Formelzeichen	164

11	Abkürzungsverzeichnis	166
12	Literaturverzeichnis	168
12.1	Eigene unveröffentlichte Quellen.....	180
13	Anhang	181
14	Curriculum Vitae	183

1 Einleitung

„Mit kommerziellen Drohnen für die gewerbliche Wirtschaft tritt eine neue Technik auf den Plan.“ (Landrock und Baumgärtel 2018, S. 1)

In dieser Dissertation wird ein Vorgehensmodell zur Einführung von Drohnen im österreichischen Industrieumfeld für den intralogistischen Materialtransport entwickelt. Für den zukünftigen Einsatz in Unternehmen werden anhand technologischer, wirtschaftlicher und rechtlicher Anforderungen strukturierte Maßnahmenschritte definiert, welche die Eignungsfähigkeit des potenziellen Drohneneinsatzes sowie die dafür notwendigen Einführungsmaßnahmen behandeln.

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Der industrielle Einsatz von Drohnen – insbesondere in der Logistik – hat in den letzten Jahren extremes Interesse bei Unternehmen geweckt und zu vermehrten Forschungsarbeiten im Bereich der Drohnentechnologie geführt (vgl. Maghazei und Netland 2020, S. 1237). Neben dem Einsatz für Inspektionen oder Lagerinventuren werden gezielt Drohnen für den Materialtransport im urbanen Bereich oder auf Industriegelände erprobt, um zukünftig als Alternativlösung bzw. Ergänzung zum konventionellen Warentransport zu dienen (vgl. Kirschstein 2020, S. 1–13; vgl. Mohsan et al. 2023, S. 1). Zusätzlich zeigt der Warentransport per Drohne oder in Kombination mit weiteren autonomen Transporttechnologien in urbanen Gebieten ein wesentliches Zukunftspotenzial (vgl. Lemardelé et al. 2021, S. 1). Durch das Zusammenspiel von Drohnen und Alternativsystemen lassen sich komplexe Transportaufgaben zeiteffizienter abbilden (vgl. Eskandaripour und Boldsai Khan 2023, S. 15).

Durch das stetig zunehmende Bevölkerungsalter und den geringen Zulauf qualifizierter Arbeitnehmer stehen diverse Industriezweige vor erheblichen Herausforderungen. Die Nutzung von Drohnen kann dazu beitragen, vorliegende Herausforderungen zu meistern, da die dadurch erzielbare Zeitersparnis, Effektivität, Kontinuität, Kundenzufriedenheit und Kostenreduktion es Unternehmen ermöglichen, am Markt konkurrenzfähig zu bleiben (vgl. Luo et al. 2022, S. 1; vgl. Chung et al. 2020, S. 24). Daher ist es auch unumgänglich, die Akzeptanz im Unternehmen und dessen Unternehmensumfeld für alternative Transporttechnologien wie den Drohnentransport zu forcieren (vgl. Smith et al. 2022, S. 9; vgl. Merkert und Bushell 2020, S. 7).

Durch die Auslagerung von nicht wertschöpfenden Tätigkeiten, die aktuell von qualifizierten Mitarbeitern durchgeführt werden, auf autonom operierende Drohnen besteht die Möglichkeit, den Kostenaufwand für Organisationen zukünftig erheblich zu

reduzieren (vgl. Aurambout et al. 2019, 1). Neben dem Kostenfaktor können die Informationsbereitstellung in Echtzeit und die integrierten Sensoren von Drohnen zudem zu Prozessoptimierungen führen (vgl. Kong et al. 2020, S. 5).

Allgemein findet der konventionelle Materialtransport in der Intralogistik mit manuellen Staplersystemen oder automatisierten Flurfördermitteln am Boden statt. Die Routen sind meist starr und folgen einem fix vorgegebenen Materialtransportnetz, wodurch sich im Vergleich mit der direkten Luftlinie längere Transportwege und Lieferzeiten ergeben (vgl. Institut für Integrierte Produktion Hannover 2019, S. 1–3). Für die ökonomische Beurteilung von Transport- und Materialflusskosten sowie Überlastungen der Transportwege werden Materialflussanalysen herangezogen. Diese Erhebungen dienen als Basis für weiterführende Investitionskostenrechnungen alternativer Transporttechnologielösungen (vgl. VDI 2689:2019-02, S. 3–4). Das Erkennen von Schwachstellen und die Bekämpfung derer Ursachen ist ein Primärziel von Materialflussuntersuchungen (vgl. Martin 2016, S. 30). Aus den gewonnenen Erkenntnissen dieser lassen sich in weiterer Folge Überlegungen für den Einsatz von Drohnen zum Materialtransport im Unternehmen ableiten. Neben der verkürzten Transportzeit führen autonom bzw. semiautonom operierende Drohnensysteme auch zur Eliminierung von Arbeitsunfällen mit Flurförderfahrzeugen und zu einer Effizienzsteigerung von Lagerungsprozessen, wodurch ein weiterer Mehrwert geschaffen wird (vgl. Duric et al. 2018, S. 46).

Einzelne Unternehmen haben bereits große Erwartungen an den Gütertransport mit Drohnen und versuchen, diesbezüglich eine Vorreiterrolle einzunehmen (vgl. Macrina et al. 2020, S. 1). Aus heutiger Sicht ist der Transport von Kleinteilen, Proben und Spezialwerkzeugen mit handelsüblichen Drohnen bis zu einer maximalen Traglast von fünf Kilogramm ohne wesentliche technologische Probleme durchführbar (vgl. Landrock und Baumgärtel 2018, S. 30). Die Bestrebungen von Unternehmen beziehen sich jedoch wesentlich auf den Warentransport im urbanen Bereich oder zur Überbrückung von großen Distanzen, um dadurch Lieferungen über den Luftweg abzubilden (vgl. Li et al. 2022, S. 1–4).

Im Bereich der Intralogistik gibt es bei produzierenden Unternehmen Bemühungen, Kleinteile entlang Produktionslinien durch Drohnen bereitzustellen, um somit Eillieferungen zu realisieren (vgl. Huber 2018, S. 93; vgl. Poll 2017, o.S.). Ein Ansatz ist die Nutzung von Drohnen mit montierten Transportboxen, in die diverse Stückgüter oder Proben gelegt und anschließend automatisiert zum Zielort transportiert werden (vgl. Perez-Grau et al. 2021, S. 312–318). Eine zusätzliche Effizienzsteigerung wird durch die automatisierte Aufnahme der bereits befüllten Transportboxen durch die Drohne erzielt, da dadurch die Gesamtprozesszeit für die Anlieferung am Werk im Gegensatz zu herkömmlichen manuellen Transporten um bis zu 43 % reduziert werden kann (vgl. Wrycza et al. 2017, S. 7).

1.2 Allgemeine Problemstellung

Ineffiziente Warentransporte und Materialbereitstellungen führen in Unternehmen zu einem Anstieg der nicht wertschöpfenden Tätigkeiten, die infolge zunehmender Personalaufwände und kostenintensiveren Transportaufwendungen einen wesentlichen negativen betriebswirtschaftlichen Einflussfaktor darstellen. Da es sich vermehrt um personenbezogene Transporte handelt, ist eine frühzeitige Evaluierung und ein Initiieren alternativer Transporttechnologien anzustreben (vgl. Pfohl 2018, S. 51).

Bislang setzen Unternehmen auf manuelle bzw. automatisierte Transporte mit konventionellen Flurfördermitteln oder fahrerlosen Transportsystemen, die jedoch wesentlichen Restriktionen hinsichtlich der flexiblen Ausnutzung der Materialtransportnetze unterliegen. Insbesondere bei Eiltransporten für anlagenkritische Klein- und Ersatzteile ist die rasche Bereitstellung und Verteilung von Gütern am Werksgelände ein wesentliches Erfolgskriterium, um Stillstandszeiten und Ausfallkosten zu vermeiden (vgl. Institut für Integrierte Produktion Hannover 2019, S. 1–3). Neben einer unterbrochenen Produktionsversorgung bringen vollständige Produktionsstillstände erhebliche Risiken mit sich und führen zu erheblichem monetärem Schaden (vgl. Huber 2018, S. 93–94).

Dahingehend haben Unternehmen begonnen, potenzielle Alternativsysteme für den automatisierten Materialtransport am Werksgelände zu prüfen, die eine Reduktion der Transportzeit und Transportkosten in Aussicht stellen (vgl. Benarbia und Kyamakya 2022, S. 1). Ein automatisierter Drohnentransport für logistische Aufgaben stellt diesbezüglich eine vielversprechende Alternative dar, steht jedoch in Konkurrenz zu konventionellen Transporttechnologien (vgl. Maghazei und Netland 2020, S. 1237–1245). In Vergleichsstudien zwischen konventionellen Transportmitteln und alternativen Transporttechnologien weist beispielhaft ein eingesetzter Schlepper einen 13 % geringeren Nutzwert als eine Drohne für einen unternehmensspezifischen Materialtransport auf. Zusätzlich sind die Kosten pro Transport von 1,35 € für den Schleppertransport auf 1,20 € für den Drohnentransport in dem Anwendungsszenario reduzierbar, womit dem Unternehmen eine potenzielle Alternative für dessen logistische Transportaufgabe vorliegt (vgl. Fritzsich et al. 2020, S. 1–8).

Um eine erfolgreiche Einführung von Drohnen im industriellen Umfeld zu ermöglichen und den wirtschaftlichen Nutzen für Unternehmen darzustellen, sind branchenübergreifende Benchmarks als valide Vergleichsbasis notwendig, die jedoch aufgrund der rasch voranschreitenden Entwicklungen der Drohnentechnologie und dessen Ökosystems sowie der aktuell begrenzten industriennahen Einsätze erschwert wird (vgl. Maghazei et al. 2022, S. 561–562). Die raren Gegenüberstellungen und Erfahrungsberichte von industriell genutzten Drohnen erschweren daher deren

Einführungsprozess (vgl. Landrock und Baumgärtel 2018, S. 1–2). Insbesondere mangelt es Unternehmen an Vergleichsmodellen, welche die rechtlichen, technologischen und wirtschaftlichen Anforderungen und möglichen Nutzen beim Einsatz einer Drohne für den intralogistischen Materialtransport bewerten (vgl. Fritsch und Stonis 2019, S. 585; vgl. Kellermann et al. 2019, S. 1–13). Diese Tatsache verzögert die branchenübergreifende Ausbreitung der Drohnentechnologie im logistischen Kontext (vgl. Giones und Brem 2017, S. 875). Durch die zögerliche Akzeptanz in Unternehmen wird auf eine potenzielle Effizienzsteigerung im Materialanlieferungsprozess verzichtet, obwohl durch die Ausnutzung des direkten Luftwegs signifikante Wegreduktionen und Prozesszeitersparnisse von bis zu 43 % erzielbar sind (vgl. Kempkens 2019, o.S.; vgl. Poll 2017, o.S.; vgl. Wrycza et al. 2017, S. 6).

Eine wesentliche Voraussetzung, um die angestrebte Zeitreduktion bei automatisierten Materialtransporten zu erreichen, ist die dafür notwendige Fähigkeit, Transportgüter selbstständig aufzunehmen und abzugeben (vgl. Lieret et al. 2020a, S. 425). Diesbezüglich ist es zwingend notwendig, spezielle Transportaufnahmeverrichtungen sowie Lande- und Übergabeplattformen, die den Greifprozess unterstützen, für den Drohneneinsatz bereitzustellen. Modelle und Konzepte, die sowohl die erforderlichen Kriterien erfüllen als auch die baulichen Umsetzungen thematisieren, sind nur spärlich vorhanden, wodurch unternehmensinterne Bauteilentwicklungen gefördert werden. Bestehende kommerzielle Systeme verzichten auf die Berücksichtigung von unternehmensspezifischen Anforderungskriterien und müssen stets adaptiert werden (vgl. Galimov et al. 2020, S. 1–31).

Vorliegende Modelle zur Wirtschaftlichkeitsbewertung von Drohnen für den Materialtransport fokussieren sich rein auf statische Kostenvergleichsrechnungen in Kombination mit Nutzwertanalysen, um den potenziellen Mehrwert gegenüber konventionellen Transportmitteln aufzuzeigen. Unternehmensspezifische Ausgangsdaten und Restriktionen im Außenbereich fließen jedoch nicht in Bewertungsmodelle ein. Durch standardisierte Erhebungsbögen im Zuge der Analysephase wären detailliertere Angaben quantifizierbar und dadurch genauere Kostenabschätzungen innerhalb einer Vorabprüfung ableitbar (vgl. Fritsch et al. 2020, S. 9).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass vorliegende Modelle in der Wissenschaft sich entweder nur auf die bauteiltechnische Umsetzung von Transportaufnahmesystemen fokussieren oder ausschließlich die wirtschaftliche Potenzialabschätzung beim Einsatz von Drohnen für den Materialtransport näher betrachten. Obwohl technologische und wirtschaftliche Bewertungsmethoden für die frühzeitige Bewertungsfähigkeit eines Drohneneinsatzes unumgänglich sind, existieren kaum anwendungsorientierten Konzepte in diesem Themenkomplex. Die unzureichende Vergleichsfähigkeit von

bereits durchgeführten Drohnenimplementierungen für den intralogistischen Materialtransport und die fehlenden Bewertungsmethoden für die Auswahl geeigneter Drohnenbauformen in Relation zu Alternativsystemen erschweren den Einführungsprozess in Unternehmen. Zusätzlich erschwert der vorherrschende Interpretationsspielraum hinsichtlich rechtlicher Rahmenbedingungen für industrielle Anwendungsfälle den Genehmigungsprozess bei der Luftfahrtbehörde im Zuge des luftfahrtrechtlichen Betriebsbewilligungsverfahrens. Unternehmen fehlt es aktuell auch an klar definierten rechtlichen, technologischen als auch prozessualen Handlungsmaßnahmen, die im Zuge einer geplanten Drohneneinführung durchzuführen sind.

1.3 Allgemeine Zielsetzung

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit besteht darin, Unternehmen im industriellen Umfeld bei der technologischen und wirtschaftlichen Analysefähigkeit sowie Einführung von spezifischen Transporttechnologiesystemen für den Materialtransport am Werksgelände zu unterstützen, um für vorliegende logistische Transportaufgaben eine kostenoptimale Lösung bereitzustellen. Konkret wird ein Vorgehensmodell entwickelt, welches unter Berücksichtigung unternehmensspezifischer Anforderungskriterien, vorliegender Umfeldbedingungen, transporttechnologischer Systemspezifikationen und rechtlicher Rahmenbedingungen den Einsatz von industriellen Drohnen für den automatisierten Materialtransport am Werksgelände ermöglicht. Besonderer Fokus wird dabei auf die technologische und wirtschaftliche Transporttechnologiebewertung und daraus resultierende Drohnenselektion in Abhängigkeit der anwendungsspezifischen Anforderungskriterien gelegt. Zudem werden auch drohnenspezifische Anforderungen an Unternehmen im Zuge des luftfahrtrechtlichen Betriebsbewilligungsverfahrens mithilfe des entwickelten Vorgehensmodells definiert, die eine Unterstützungsleistung für die Implementierung liefern. Mit Hilfe des entwickelten Vorgehensmodells sollen Unternehmen schlussendlich in der Lage sein, die Eignungsfähigkeit eines potenziellen Drohneneinsatzes sowohl technologisch als auch wirtschaftlich zu bewerten und Alternativsystemen gegenüberzustellen. Daraus abgeleitet wird eine grundlagenbasierte Entscheidungsfähigkeit für die angestrebte Implementierung der Drohne anhand definierter Kriterien bereitgestellt und es werden notwendige Handlungsmaßnahmen für den automatisierten Drohnentransport definiert.

Auf Basis des aktuellen Wissensstandards in der Wissenschaft und Technik (siehe Kapitel 3) erfolgt eine weitere Konkretisierung der Zielsetzung in Kapitel 4.

1.4 Definition der Forschungsmethodik

1.4.1 Wissenschaftliche Eingliederung

Um die Akzeptanz von neu konzipierten Prozessen und innovativen Informationssystemen sowie Technologien in einem Unternehmen zu gewährleisten, ist das Zusammenwirken von zwei sich ergänzenden Paradigmen aus der Verhaltens- (Behavioral Science) und Gestaltungswissenschaft (Design Science) essenziell (vgl. March und Smith 1995, S. 252–254). Der wesentliche Nutzen von Informationssystemen in Organisationen liegt in der gebündelten Speicherung von bereits geschaffenem Wissen und dem weitreichenden Wissenstransfer (vgl. Johannesson und Perjons 2014, S. 28–29).

Der Design-Science-Ansatz, der für die Forschungsmethodik der vorliegenden Dissertation herangezogen wird, hat seine Ursprünge in den Ingenieurwissenschaften und ist wesentlich für die Weiterentwicklung von Informationssystemen verantwortlich (vgl. Hevner und Chatterjee 2010, S. 9–11). Die bei diesem Ansatz definierten Artefakte haben das Ziel, die Umwelt sowohl zu beschreiben als auch zu verbessern und die nachgelagerten Forschungsergebnisse qualitativ zu bewerten. Die Artefakte dienen zur Identifikation von Ineffizienzen und Problemstellungen. Unter den Begriff Artefakt fallen Modelle und Methoden, die zur Lösungsfindung von Problemstellungen beitragen (vgl. Hevner et al. 2004, S. 76–79). Vaishnavi und Kuechler (vgl. 2015, S. 20) weisen einem Artefakt unterschiedliche Ausprägungsarten zu. Potenzielle Ausprägungen sind den Autoren zufolge Konstrukte, Methoden, Modelle und Instanzen.

Die oben beschriebenen Modelle dienen dazu, spezifische Probleme und abgeleitete Lösungen besser zu verstehen. Dadurch sind Auswirkungen von Entwicklungen und Umweltveränderungen untersuchbar. Des Weiteren werden mithilfe von Methoden Problemlösungsprozesse definiert, um Herausforderungen erfolgreich zu meistern (vgl. Hevner et al. 2004, S. 76–79). Auch Johannesson und Perjons (vgl. 2014, S. 29) beschreiben Modelle als lösungsorientierte Vorgehensweise, um Problemstellungen zu lösen und zusätzliche Artefakte zu entwickeln.

Wie bereits beschrieben, dient der Design-Science-Ansatz dazu, realwissenschaftliche Herausforderungen zu bewältigen. Hevner et al. (vgl. 2004, S. 82–90) nennen sieben wesentliche Richtlinien für erfolgreiche Forschungsergebnisse: Fokussierung auf eine relevante Problemstellung, Anwendung wissenschaftlicher Forschungsmethoden, Gestaltung nachhaltiger Suchprozesse, Gestaltung transparenter und nachvollziehbarer Artefakte, Konzeptionierung von Evaluierungsmaßnahmen, wertstiftende Beitragsleistung in der Wissenschaft und nachgelagerte Verbreitung der erzielten Forschungsergebnisse.

Nach den Autoren Peffers et al. (vgl. 2012, S. 398–410) können als Artefakte sowohl Konstrukte, Algorithmen, Rahmenwerke, Instanziierungen, Methoden als auch Modelle verstanden werden, mit denen eine ungelöste Problemstellung bewältigt werden soll.

Tabelle 1: Artefakt Typen (eigene Darstellung in Anlehnung an Peffers et al. 2012, S. 401)

Artefakt	Definition
Konstrukt	Konzept, Behauptung oder Syntax, welche aus einer Gesamtmenge von Aussagen, Behauptungen oder anderen Konzepten konstruiert wird. Darunter fallen beispielhaft Modellierungssprachen.
Algorithmus	Ein Ansatz, eine Methode oder ein Prozess, welcher weitgehend durch eine Reihe von formalen logischen Anweisungen definiert werden kann.
Rahmenwerk	Ein Metamodell, welches die inhaltlichen und sprachlichen Vorgaben für die Erstellung eines Modells beschreibt.
Instanziierung	Die Organisation und Struktur einer Hard- oder Software eines Systems bzw. eines Teils davon.
Methode	Eine Methode stellt eine Handlungsanweisung dar, welche konzeptionell (nicht algorithmisch) ist.
Modell	Ein Modell kann als vereinfachte Darstellung der Realität betrachtet werden, welches mit einer formalen Notation oder Sprache beschrieben wird.

Auf den Grundlagen des Forschungsrahmenwerks von Hevner (vgl. 2007, S. 87–92) und der sieben Richtlinien liefern Peffers et al. (vgl. 2007, S. 45–77) eine methodische Vorgehensweise, um wissenschaftliche Problemstellungen im Zuge von Forschungsvorhaben strukturiert zu behandeln. Hierbei fußt das entwickelte Prozessmodell in der Design-Science-Research-Methode (DSRM) auf sechs grundlegenden Prozessschritten, anhand deren die Konzipierung des Vorgehensmodells in der Dissertation aufgebaut ist.

Dabei wird das Vorgehensmodell zur Einführung industriell genutzter Drohnen für den intralogistischen Materialtransport in Österreich in diesem Zusammenhang als Artefakt verstanden. Mit dessen Hilfe soll eine vorliegende Problemstellung in einer Unternehmensorganisation gelöst werden. Konkret ist dies die mangelnde rechtliche, technologische und wirtschaftliche Bewertungsfähigkeit unter Berücksichtigung individueller Unternehmensanforderungen, um den Einsatz von Drohnen für den Materialtransport am Werksgelände zu ermöglichen.

1.4.2 Abgeleitete methodische Vorgehensweise

Das auf den oben beschriebenen Erläuterungen basierende und in der Dissertation herangezogene Prozessmodell nach Peffers et al. (vgl. 2007, S. 54), siehe Abbildung 1, ist durch sechs aufeinander aufbauende Prozessschritte charakterisiert, wobei der

Prozess nicht vollkommen starr durchlaufen werden muss. Je nach vorliegender Problemstellung und Herausforderung ermöglicht das Modell vier unterschiedliche Anknüpfungsstellen entlang der jeweiligen Prozessschritte, mit deren Hilfe die Annäherung an ein vorliegendes Problem erfolgt (vgl. Brocke et al. 2020, S. 3–5).

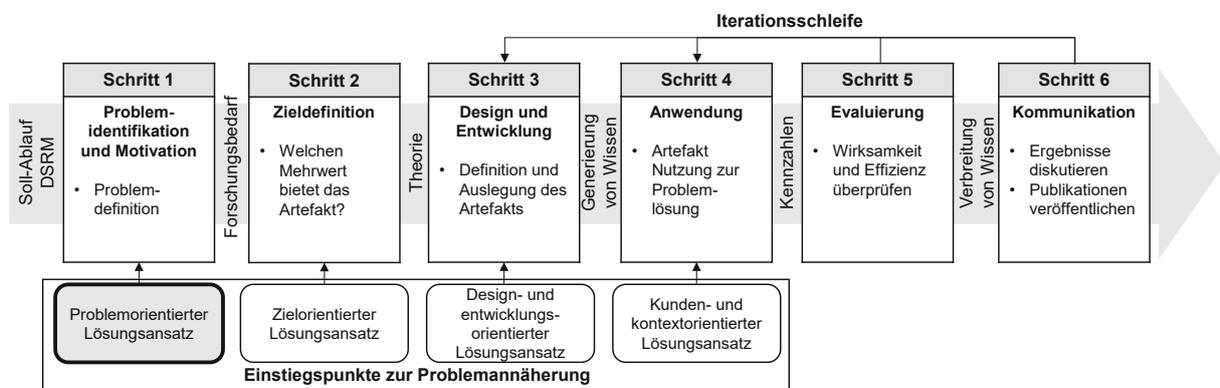


Abbildung 1: Prozessmodell in der Design-Science-Research-Methode (eigene Darstellung in Anlehnung an Peffers et al. 2007, S. 54)

Die vier Eintrittspunkte unterscheiden sich gemäß der Betrachtungsweise eines vorliegenden Problems nach Peffers et al. (vgl. 2007, S. 56–57) folgendermaßen:

- **Problemorientierter Lösungsansatz (gewählter Ansatz):** Dieser Einstiegspunkt wird bei bereits vorliegenden Beobachtungen aus dem Forschungsumfeld oder ausgewiesenem weiterem Forschungsbedarf in vorangegangenen wissenschaftlichen Texten herangezogen.
- **Zielorientierter Lösungsansatz:** Die Anstoßwirkung für diesen Ansatz erfolgt durch ein reges Forschungs- und Industrieinteresse im Hinblick auf eine spezifische Problemstellung.
- **Design- und entwicklungsorientierter Lösungsansatz:** Artefakte, die bereits zur Problemlösung beigetragen haben oder aus anderen Forschungsrichtungen hervorgehen, sind der Ausgangspunkt für diesen Ansatz.
- **Kunden- und kontextorientierter Lösungsansatz:** Bei diesem Ansatz werden bereits unter realen Umfeldbedingungen umgesetzte Lösungen und daraus abgeleitete Beobachtungen herangezogen und auf diverse Problemfelder übertragen.

Aufgrund der Bezugnahme auf den problemorientierten Lösungsansatz in der vorliegenden Dissertation wird das Prozessmodell mit dem Prozessschritt 1 (Problemidentifikation und Motivation) gestartet und linear durchlaufen. In diesem Schritt wird die vorliegende Problemstellung im Forschungsbereich oder aus der industriellen Praxis beschrieben. Aus der Problemstellung erfolgt die Formulierung des notwendigen Forschungsbedarfs. Im Prozessschritt 2 (Zieldefinition) werden die

Forschungsziele definiert und die notwendigen theoretischen Grundlagen im Bereich der Drohnentechnologie aufbereitet. Zusätzlich erfolgt die Eingrenzung des Untersuchungsbereichs. Neben dem Grundlagenwissen erfolgt die Aufbereitung des aktuellen Stands der Wissenschaft und Technik hinsichtlich vorhandener Modelle, die sich mit der rechtlichen, technologischen und wirtschaftlichen Bewertung für die Einführung von Drohnen für den Materialtransport in Unternehmen auseinandersetzen. Außerdem werden vorhandene Modelle in Bezug auf die Entwicklung notwendiger Transportaufnahmevorrichtungen auf der Drohne sowie Lande- und Übergabepattformen untersucht. Im Prozessschritt 3 (Design und Entwicklung) liegt der Fokus auf der Entwicklung des Artefakts, welches in diesem Fall das Vorgehensmodell zur Einführung industriell genutzter Drohnen für den intralogistischen Materialtransport in Österreich ist. Basierend auf dem entworfenen Artefakt wird im Prozessschritt 4 (Anwendung) die praktische Problemstellung behandelt. Zur Gewährleistung der Funktionsfähigkeit wird das Modell auf ein realitätsnahes Fallbeispiel angewandt und im darauffolgenden Prozessschritt 5 (Evaluierung) werden die erzielten Kennzahlen und Ergebnisse mit den unternehmensspezifischen Daten überprüft. Wenn die erzielten Resultate den Anforderungen nicht entsprechen, ist es an diesem Punkt möglich, über eine Rückwärtskopplung das Artefakt anzupassen und zu verbessern. Die resultierenden Erkenntnisse aus der entwickelten Lösung werden wissenschaftlich aufbereitet und dienen zur Verbreitung fachwissenschaftlicher Kenntnis. Abgeschlossen wird das Prozessmodell mit dem Schritt 6 (Kommunikation), in dem auf die zu lösenden Probleme, die Ergebnisse und den weiterführenden Forschungsbedarf eingegangen wird.

1.5 Struktureller Aufbau der Arbeit

Die zugrundeliegende wissenschaftliche Arbeit wird in sieben thematische Kapitel unterteilt, wobei der inhaltliche Aufbau an die gewählte Forschungsmethodik nach Peffers et al. (2007) angelehnt ist.

Das Kapitel 1 dient zur Bildung eines Grundverständnisses für die vorliegende Ausgangssituation und Motivation. Aufbauend auf der allgemeinen Problemstellung werden im Zuge des ersten Abschnitts die abgeleiteten Ziele dieser Arbeit formuliert. Darüber hinaus wird die gewählte Forschungsmethodik für die wissenschaftliche Arbeit definiert und eine überblicksartige Darstellung des strukturellen Aufbaus geliefert.

Die notwendigen Grundlagen und Begriffsdefinitionen für den industriellen Einsatz von Drohnen werden in Kapitel 2 definiert, wobei eine systematische Eingrenzung des relevanten Untersuchungsbereichs erfolgt. Aufbauend auf den Eingrenzungen wird in Kapitel 3 auf den Stand der Wissenschaft und Technik eingegangen.

In Kapitel 4 werden die spezifische Problemstellung und der daraus abgeleitete Forschungsbedarf erläutert. Zusätzlich erfolgt die Formulierung der spezifischen Zielsetzung und Anforderungen an das Vorgehensmodell.

Kapitel 5 fokussiert sich auf die Entwicklung des Vorgehensmodells mit den notwendigen Maßnahmenschritten zur Einführung von Drohnen für den automatisierten Materialtransport.

In Kapitel 6 wird das Vorgehensmodell unter realen Bedingungen evaluiert und auf die industrielle Anwendbarkeit geprüft. Durch diese Vorgehensweise wird der praxisnahe Bezugsrahmen demonstriert.

Schlussendlich erfolgen in Kapitel 7 die Zusammenfassung des Themengebiets und die Diskussion der erzielten Ergebnisse sowie die Definition des weiterführenden Forschungsbedarfs. In nachfolgender Abbildung 2 ist der strukturelle Aufbau der Arbeit ersichtlich.

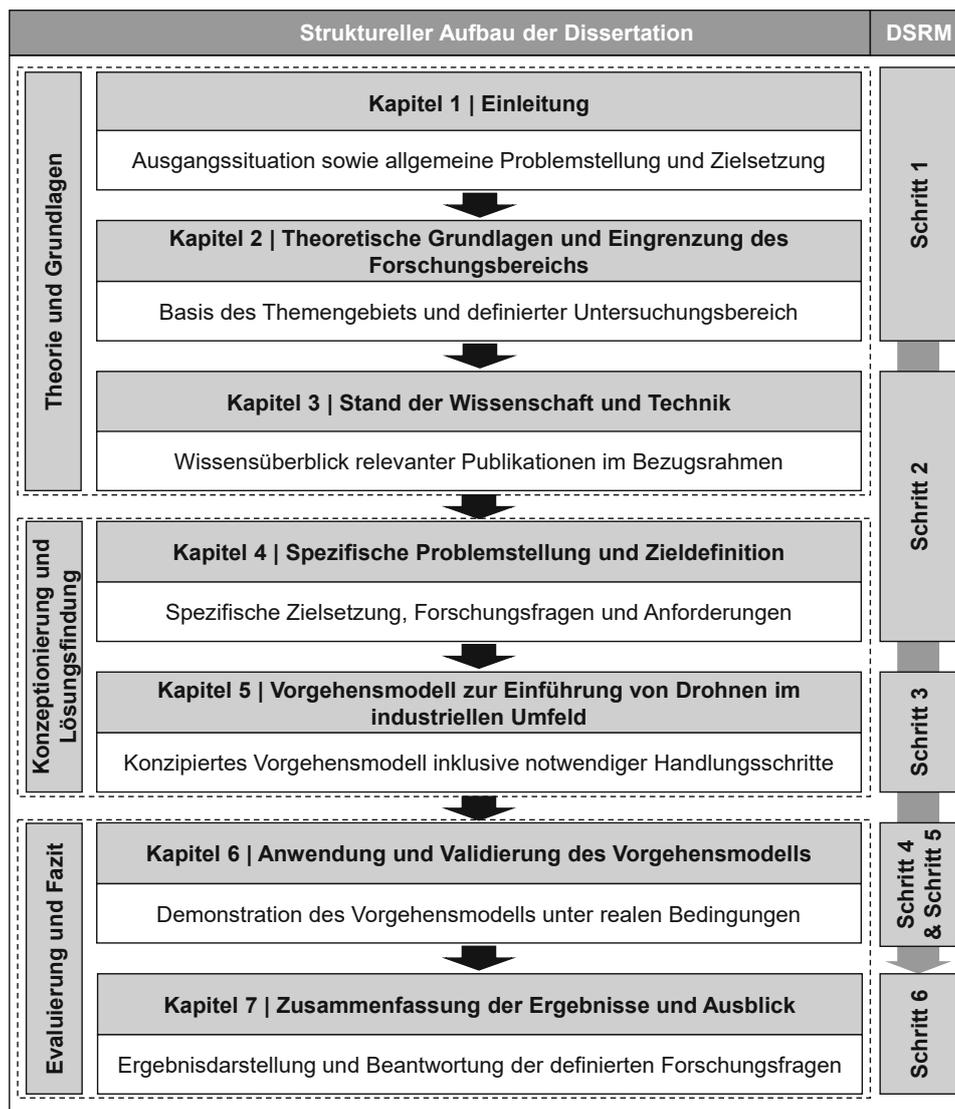


Abbildung 2: Struktureller Aufbau der Arbeit (eigene Darstellung)

2 Theoretische Grundlagen und Eingrenzung des Forschungsbereichs

Das Kapitel 2 dient zum Verständnisaufbau der theoretischen Grundlagen und beschreibt notwendige Definitionen im Bereich der Intralogistik und Drohnentechnik, welche für die Entwicklung des Vorgehensmodells relevant sind. Zudem wird in diesem Kapitel der Untersuchungsbereich eingegrenzt. Diese Grundlagen dienen in der Folge dazu, die im Kapitel 4 dargelegten Forschungsfragen fundiert zu beantworten. Die Übersicht des Kapitelaufbaus ist in Abbildung 3 dargestellt:

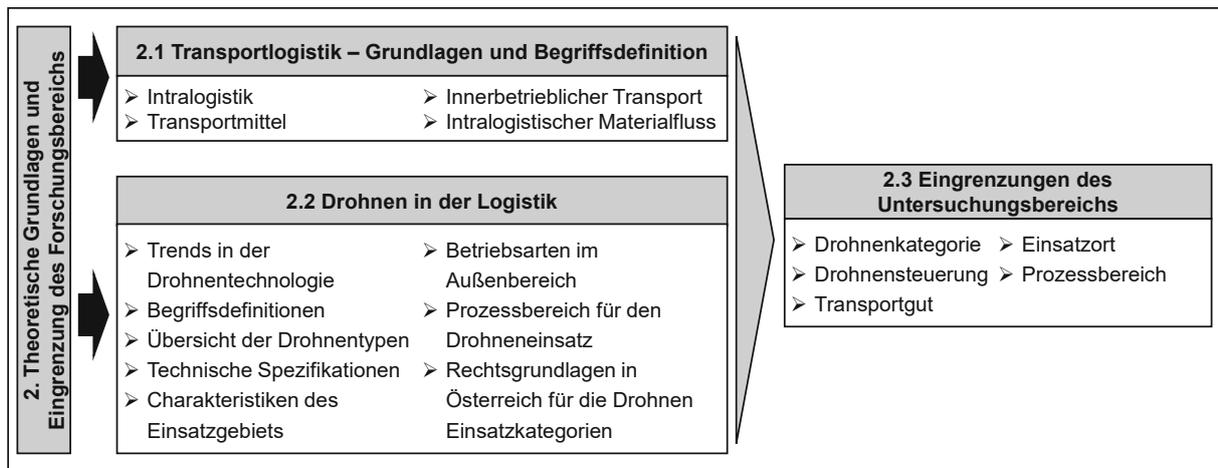


Abbildung 3: Aufbau des Kapitels Theoretische Grundlagen und Eingrenzung des Forschungsbereichs (eigene Darstellung)

2.1 Transportlogistik – Grundlagen und Begriffsdefinitionen

2.1.1 Intralogistik und innerbetrieblicher Transport

Die Aufgabengebiete der Unternehmenslogistik umfassen die Beschaffungs-, Produktions- und Distributionslogistik. Innerbetriebliche Transportbewegungen werden durch interne Verteilungsprozesse festgelegt. Der Begriff Intralogistik umfasst nach Martin (vgl. 2016, S. 4–9) alle innerbetrieblichen Material- und Informationsflüsse, die wiederum das Zusammenwirken entlang der gesamten Wertschöpfungskette gewährleisten.

In der Fachliteratur wird der Begriff außerdem als die Verknüpfung zwischen dem Wareneingang am Werksstandort, den internen Quellen und Senken sowie dem Warenausgang definiert (vgl. Gudehus 2012a, S. 5). Neben der effizienten Organisation, Steuerung und Regelung steht hierbei die Optimierung der logistischen

Materialflüsse und der Informationsflüsse durch den Einsatz spezifischer Systeme im Vordergrund (vgl. Vogel-Heuser et al. 2017, S. 23).

Die Begriffsbezeichnung „Innerbetrieblich“ bezieht sich auf verschiedenste Branchen und Organisationen, worunter sowohl Handels- als auch Industrieunternehmen sowie Flughäfen und Krankenhäuser fallen (vgl. Delfmann et al. 2011, S. 262–274).

Laut Pfohl (vgl. 2018, S. 134) sind zu den innerbetrieblichen Transporten mit herkömmlichen Transportmitteln (Stapler, Routenzüge etc.) sowohl Bewegungsprozesse in einem Lager als auch im gesamten Produktionswerk zu zählen. Hierbei steht besonders die Routenführung für die zu bewältigende logistische Aufgabe im Betrachtungsfokus, da überlastete Fahrwege sowie ineffiziente Fahrrouten zu erheblichen Mehrkosten im Unternehmen führen (vgl. Martin 2016, S. 99).

2.1.2 Intralogistischer Materialfluss

Transporte am Werksgelände werden wesentlich von der Überwindung der Distanzen mit herkömmlichen Transportmitteln bestimmt, wobei der effizienteste Transportweg zwischen Aufnahme- und Abgabepunkt im Fokus steht (vgl. Pfohl 2018, S. 169). Um vorherrschende Routenführungen sowie Fahrwegsbelastungen zu analysieren und daraus Optimierungen wie z. B. einen höheren Auslastungsgrad, geringere Leerwege oder kürzere Transportlieferzeiten für eilige Güter abzuleiten, kann eine Materialflussanalyse im Unternehmen angewandt werden (vgl. Wannewetsch 2014, S. 606).

Diesbezüglich ist nach Martin (2016, S. 29) unter einer Materialflussanalyse „... die Erfassung des Transportvorgangs und -ablaufs sowie alle gewollten und ungewollten Lagerungen aller Materialien des innerbetrieblichen Bereichs des Unternehmens zu verstehen.“

Die Ergebnisse der standardisierten Materialflussanalysen dienen dazu, Belastungsintensitäten auf den Transportrouten visuell aufzuzeigen und auf Basis dieser Erkenntnisse Optimierungsszenarien und notwendige Investitionen in Digitalisierungsstrategien abzuleiten (vgl. VDI 2689:2019-02, S. 3–4).

Transportbewegungen umfassen sowohl Personen, Fahrzeuge, Materialien als auch Ladungsträger, die entlang der Materialflüssebenen auftreten. Friedrich (vgl. 2013, S. 41) definiert diesbezüglich vier grundlegende Ebenen (externer Transport, werksinterner Materialfluss, gebäudeinterner Materialfluss, Materialfluss am Arbeitsplatz) in der Intralogistik, die jeweils hierarchisch in Abbildung 4 aufeinander aufbauen. Konkret wird der werksinterne Materialfluss im Außenbereich (Ebene 2) im Vorgehensmodell adressiert. Die dafür nutzbaren Transportmittel werden nachfolgend im Detail erläutert.

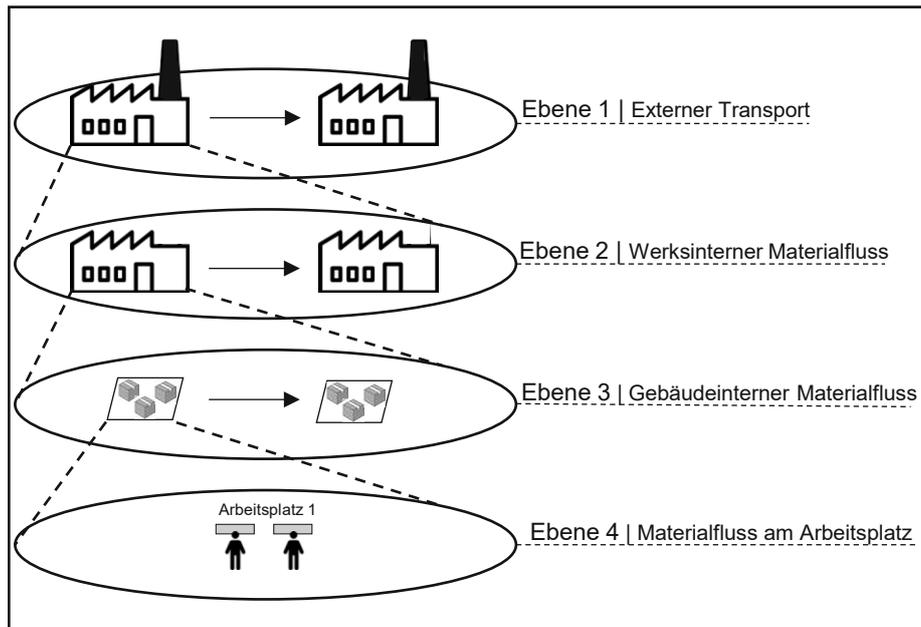


Abbildung 4: Materialflussebenen (eigene Darstellung in Anlehnung an Friedrich 2013, S. 41)

2.1.3 Transportmittel

Für die physische Bewältigung auftretender Warenbewegungen jeglicher Art im Zuge einer logistischen Aufgabe stehen einem Unternehmen unterschiedlichste Arten von Transportmitteln zur Verfügung (vgl. Hompel und Heidenblut 2011, S. 193).

Zur Lösung des Transportproblems muss geklärt werden, welches Transportmittel für die vorliegende logistische Aufgabe am effektivsten ist und minimale Kosten verursacht. Hierbei sind die Eigenschaften des Transportguts (Gewicht, Größe, Form etc.), Häufigkeit des Transportauftrags, Beschaffenheit des Liefergebiets und die strukturellen Gegebenheiten bei den Auf- und Abgabepunkten (Quellen und Senken) ein wesentlicher Einflussfaktor (vgl. Pfohl 2018, S. 170). Abbildung 5 zeigt mögliche Ansätze zur Bewältigung vorliegender logistischer Transportaufträge mit unterschiedlichen Transportmitteln.

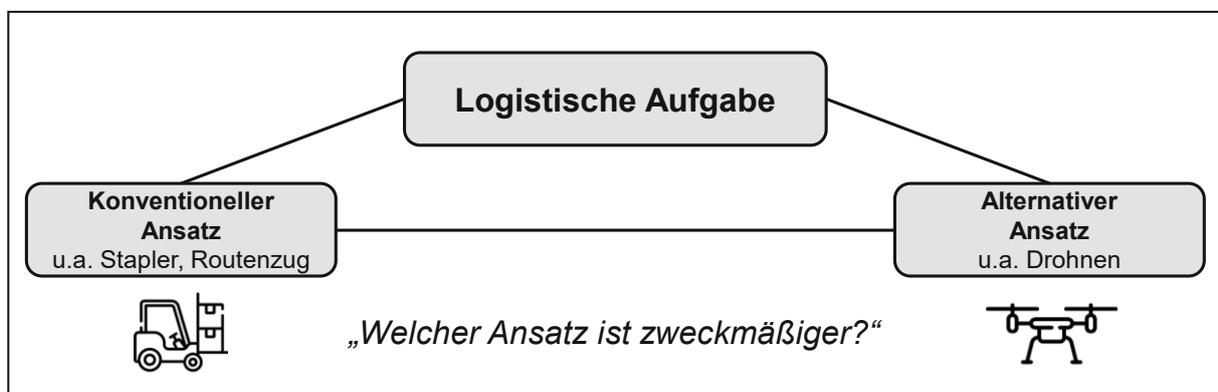


Abbildung 5: Transportansätze für logistische Aufgaben (eigene Darstellung)

Martin (vgl. 2016, S. 102) unterteilt konventionelle Transportmittel für Stück- und Schüttgut in zwei wesentliche Fördertypen:

- Unstetigförderer
 - Hebezeuge, Hängebahnen, Krane, Flurfördermittel
- Stetigförderer
 - Kreisförderer, Becherwerke, Gurtförderer

In der Kategorie der kontinuierlichen Förderer zeichnen sich die Flurfördermittel durch die Fähigkeit des Beförderns von gleichmäßigem und wechselndem Transportgut mit variierendem Beförderungsbedarf über sehr geringe, mittlere und große Distanzen aus, wobei die Anzahl an Lieferstationen und deren Standorte variabel sind (vgl. Gudehus 2012b, S. 820–821).

Konkret werden konventionelle Flurfördermittel (Stapler, Routenzug) und alternative Transportansätze (Drohnen) für den intralogistischen Materialtransport im Vorgehensmodell gegenübergestellt und adressiert. Diesbezüglich wird nachfolgend der Themenbereich der Drohnentechnologie im Detail beschrieben.

2.2 Drohnen in der Logistik

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen der Drohnentechnologie dargelegt und die wesentlichen Begriffe definiert, welche im nachfolgend entwickelten Vorgehensmodell vorausgesetzt werden. Außerdem dienen diese als Grundlage zur anschließenden Eingrenzung des Betrachtungsgebiets.

2.2.1 Trends in der Drohnentechnologie

Digitalisierung und effiziente Produktions- und Logistikprozesse sind im aktuellen Marktumfeld für Unternehmen von essenzieller Bedeutung, um ihre Konkurrenzfähigkeit aufrechtzuerhalten. Zudem müssen neuartige Technologietrends im digitalen Zeitalter frühzeitig erkannt werden, um auf veränderte Marktbedürfnisse rasch reagieren zu können. Technologische Entwicklungen unterliegen immer kürzeren Innovationsphasen, wobei der erwartete Nutzen für den unternehmensspezifischen Anwendungsfall leicht überprüfbar sein muss (vgl. Furmann et al. 2017, S. 207–208). Zukünftige logistische Anwendungsszenarien im Bereich der Drohnentechnologie können unter anderem Flugtaxis, Paketdrohnen für die letzte Meile in urbanen Gebieten sowie Drohnen im industriellen Umfeld für den Materialtransport sein (vgl. Moshref-Javadi und Winkenbach 2021, S. 1–3). Dieser Technologieeinsatz stellt eine weitere Möglichkeit dar, um Lieferaufträge abzubilden. Aufgrund bestehender rechtlicher und technologischer Herausforderungen steht der Drohneneinsatz für den Massentransport noch vor wesentlichen Hürden, die in den

kommenden Jahren von involvierten Interessensvertretern (Drohnenhersteller, Luftfahrtbehörden etc.) bewältigt werden müssen (vgl. Aurambout et al. 2019, S. 1–2).

Diese Einschätzung vertritt auch das Logistikunternehmen DHL, das den Einführungshorizont von Drohnen für seine Anwendungsbereiche zwischen fünf und zehn Jahren sieht. Die nachfolgende Abbildung 6 stellt hierbei die unternehmenseigenen Einschätzungen der Drohnentechnologie in Relation zu weiteren interessanten Technologietrends in der Logistik dar.

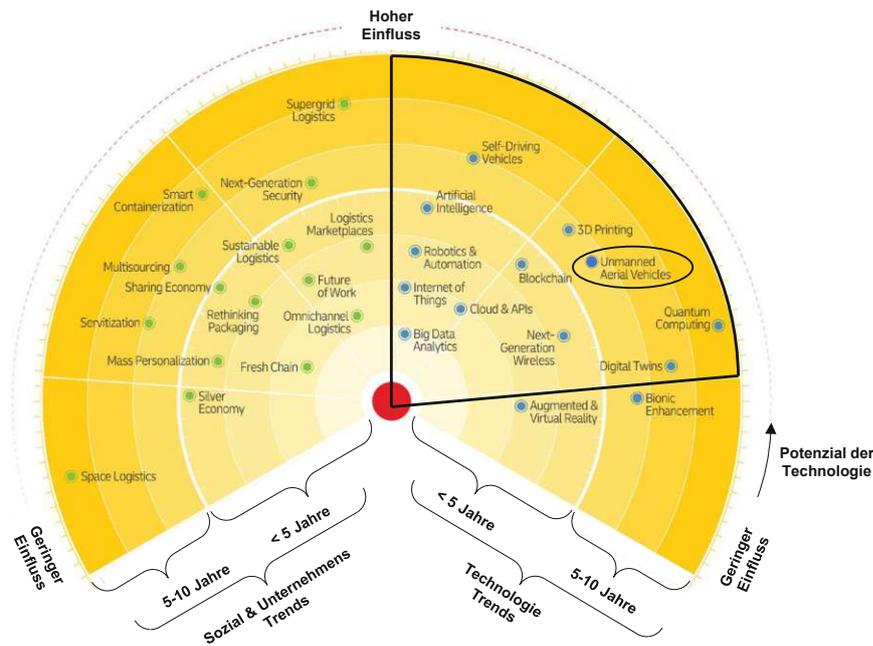


Abbildung 6: Logistik Trend Radar und Einführungshorizont von Drohnen (eigene Darstellung in Anlehnung an DHL 2022, o.S.)

2.2.2 Begriffsdefinitionen

Die Differenzierung von Drohnen im industriellen Umfeld ist durch die verschiedenen technologischen Charakteristiken der jeweiligen Drohnensysteme äußerst komplex. Maßgebliche Eigenschaften wie die Rotoranzahl, die Kategorisierung der Einsatzklasse, die implementierten Sicherheitseinrichtungen, die Flugsteuerung sowie die Flugdauer sind wesentliche Unterscheidungsmerkmale (vgl. Landrock und Baumgärtel 2018, S. 1–2).

Infolge der dynamischen Entwicklung in der Drohnentechnologie und des stetig wachsenden Interesses daran haben sich unterschiedliche Synonyme für den Begriff Drohne, die ein unbemanntes Luftfahrzeug darstellt, etabliert. Aufgrund der nicht vereinheitlichten Gesetzgebung zwischen europäischer und internationaler Ebene liegt in einschlägiger Fachliteratur noch keine übereinstimmende Definition für die Begrifflichkeit vor (vgl. DIN 5452-1:2018-03, S. 3). Der Begriff „unbemanntes

Luftfahrzeug“ wird in angelsächsischer Literatur als UAV (unmanned aerial vehicle) bezeichnet. Dies stellt ein Fluggerät dar, welches für den pilotenunabhängigen Flug konzipiert ist. Dabei kann das Luftfahrzeug ferngesteuert werden, eine vordefinierte Flugroute automatisiert abfliegen oder autonom operieren (vgl. Nato Naval Armaments Group 2007, S. 11).

Nach der DIN 5452-1 (2018-03, S. 9) wird ein autonomes Luftfahrzeug als ein *„unbemanntes Luftfahrzeug, welches keinen Eingriff des Piloten in die Flugdurchführung erlaubt“* bezeichnet. Im Gegensatz zum deutschen Normungsinstitut definiert die Europäische Union (2018, S. 20) ein unbemanntes Luftfahrzeug *„als ein Luftfahrzeug, das ohne einen an Bord befindlichen Piloten autonom oder ferngesteuert betrieben wird oder dafür konstruiert ist“*.

Werden die Fluggeräte mit unterstützenden Systemen in der Luft als auch am Boden sowie zusätzlicher Ausrüstung erweitert, spricht man von unbemannten Luftfahrzeugsystemen. Diese werden wiederum im angelsächsischen Raum als UAS (unmanned aerial system) bezeichnet. Die Europäische Kommission (2019, S. 47) definiert den Begriff als *„ein unbemanntes Luftfahrzeug sowie die Ausrüstung für dessen Fernsteuerung“*.

Abgeleitet aus den zuvor definierten Ausführungen wird für die vorliegende wissenschaftliche Arbeit der Begriff „Drohne“ durchgängig verwendet und folgend abgegrenzt:

„Als Drohne wird im Allgemeinen ein unbemanntes und wiederverwendbares Luftfahrzeug bezeichnet, welches von Menschen oder einem Computer ferngesteuert wird.“ (Fritzsch und Stonis 2019)

2.2.3 Übersicht der Drohrentypen

Nach Erceg et al. (vgl. 2017, S. 46–47) ist eine Differenzierung zwischen einzelnen Drohnenkategorien anhand der Nomenklatur, Steuerungsart, Dimension, Flugreichweite, Tragfähigkeit, dem Modellaufbau sowie der Anzahl an Rotoren möglich. Bei den am Markt vorherrschenden Drohrentypen wird zwischen Bauformen mit fixen Tragflügeln (A), Einzelrotoren (B), Mehrfachrotoren (C) und hybride Ausführungsformen (D) unterschieden. Je nach Einsatzszenario weisen die Kategorien unterschiedliche Restriktionen auf, die bei der Auswahl berücksichtigt werden müssen (vgl. Namuduri et al. 2018, S. 1–10). Diesbezüglich dient die Abbildung 7 zur Gegenüberstellung der zuvor definierten Einsatzklassen (A, B, C, D) und den einflussnehmenden Entscheidungskriterien. Insbesondere die Fragen 3, 4 und 5 haben eine direkte Abhängigkeit zueinander, da die Traglast, die nutzbare Energieleistung der Drohne und die Reichweite einander wesentlich beeinflussen.

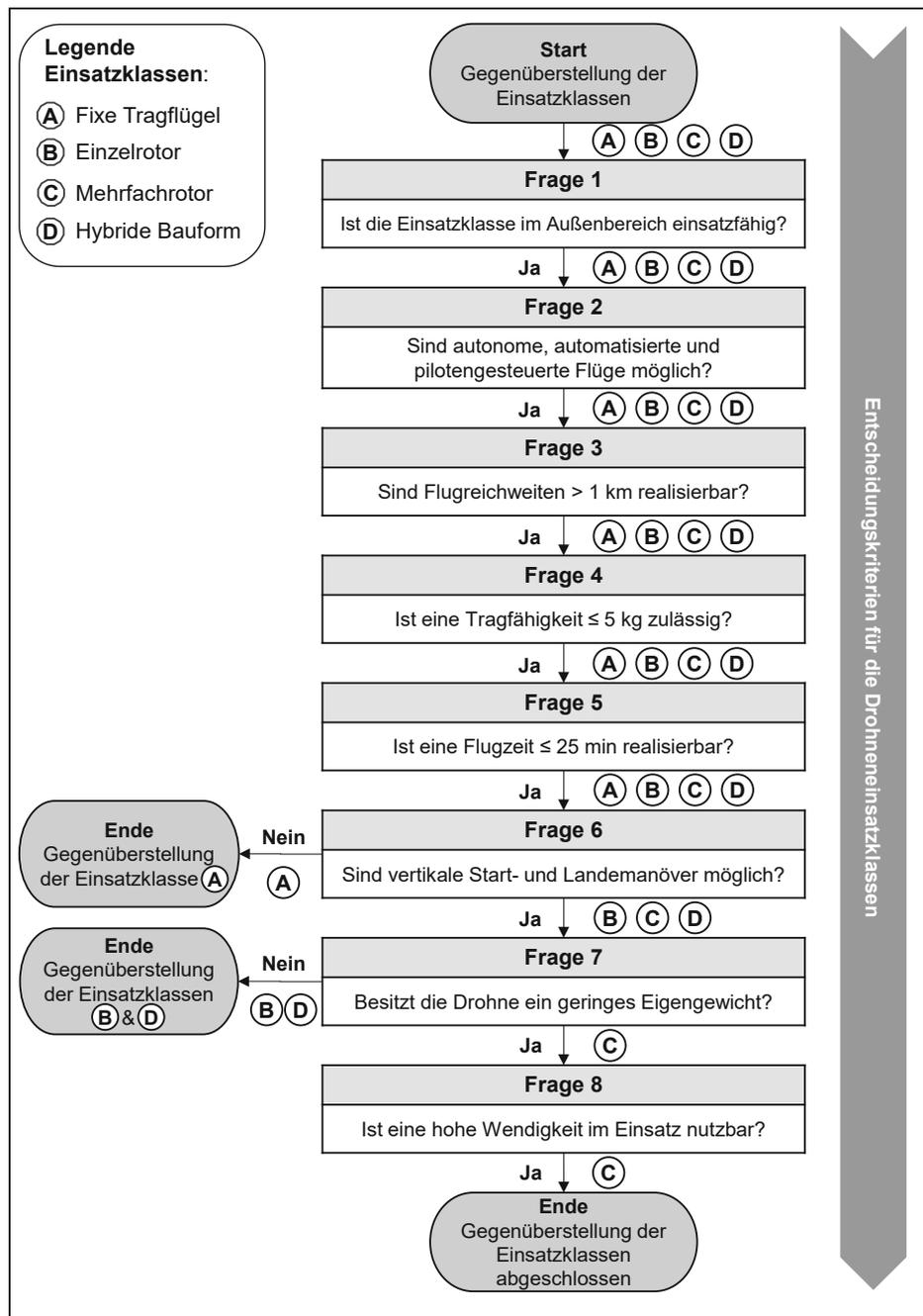


Abbildung 7: Entscheidungsbaum zur Auswahl von Drohneneinsatzklassen (eigene Darstellung)

Die Charakteristiken und Herausforderungen der einzelnen Kategorien werden von Heutger und Kückelhaus (vgl. 2014, S. 6) gegenübergestellt und analysiert. Drohnen mit fixen Tragflügeln (A) eignen sich insbesondere für lange Flugdistanzen, da ihre Flugeigenschaften denen eines konventionellen Flugzeugs ähneln. Nachteilig ist die benötigte Start- und Landebahn, was sich negativ auf die Flexibilität und Wendigkeit der Drohne auswirkt. Das Funktionsprinzip von Drohnen mit einem Einzelrotor (B) ähnelt dem eines Helikopters, wobei auch diese Bauform für Einsätze über längere Distanzen und für hohe Nutzlasten prädestiniert ist. Aufgrund der längeren Rotorblätter, die für die geforderte Stabilität sorgen, unterliegt auch diese Drohnenkategorie Einschränkungen in Bezug auf die Wendigkeit auf engem Raum.

Hybride Bauformen (D) nutzen sowohl Rotoren für den vertikalen Start- und Landeprozess als auch fixe Tragflügel, um weite Flugdistanzen effizient zu überbrücken. Aufgrund der komplexeren Bauweise sind diese Bauformen mit höheren Investitionssummen verbunden.

Bei der Kategorie der Mehrfachrotoren (C), die auch als Multicopter bezeichnet werden, wird zwischen vier Bauformen unterschieden: Tricopter, Quadrocopter, Hexacopter und Octocopter (vgl. Valavanis et al. 2010, S. 246–247). Die Begriffszuordnung bezieht sich auf die Gesamtanzahl der in Verwendung stehenden Rotoren auf der Drohne. Die am Rahmen montierten Rotoren ähneln in ihrer Funktionsweise den Rotorblättern eines konventionellen Helikopters. Je mehr Rotoren verwendet werden, desto stabilere Flugmanöver sind mit der jeweiligen Drohne realisierbar. Die Tragfähigkeit variiert zwischen einigen Gramm und mehreren Kilogramm (vgl. Emery 2016, S. 153–156).

Ein Vorteil von Hexa- und Octocoptern gegenüber Drohnen mit einer geringeren Anzahl an Rotoren ist die höhere Flugstabilität und mögliche Systemredundanz. Bei auftretenden Funktionsunterbrechungen eines Rotors übernehmen die übrigen Rotorpaare, um die Stabilität in der Luft zu gewährleisten und somit einen Absturz zu verhindern (vgl. Löffler 2014, S. 4). Zur Gewährleistung der Redundanz von Drohnen mit ausschließlich vier Rotoren eignen sich Notfallfunktionen, wie zum Beispiel Fallschirmlösungen oder Selbstrotationen um die eigene Achse der Drohne, womit ein unkontrollierter Absturz vermieden wird. Neben der Selbstrotation können auch Algorithmen eingesetzt werden, um die Steuerbarkeit und Landefähigkeit des Quadrocopters trotz unvorhergesehenen Rotorausfalls weiterhin zu ermöglichen (vgl. ETH Zürich 2013, o.S.).

Aufgrund ihrer hohen Effektivität beim intralogistischen Materialtransport und ihrer Wendigkeit fokussiert sich diese Arbeit auf Multicopter, wobei eine detaillierte Eingrenzung in Kapitel 2.3 erfolgt. Wegen der oben angeführten Restriktionen werden Bauformen mit fixen Tragflügeln, mit Einzelrotor und hybride Konzepte nicht näher betrachtet. Die technischen Spezifikationen für die Sicherheitssysteme und die einflussnehmenden Kräfte auf die Flugeigenschaften der Drohne während Flugmanövern werden nachfolgend in Kapitel 2.2.4 am Beispiel eines Quadrocopters erläutert.

2.2.4 Technische Spezifikationen

1. Tragfähigkeit von Gütern und Flugeigenschaften

Die einwirkenden Kräfte und Momente auf ein Flugobjekt mit verbauten Rotorblättern resultieren einerseits aus der Rotation der einzelnen Rotoren und andererseits aus

den Flugbewegungen. Damit eine Drohne mit einer geraden Anzahl an Rotoren samt ihrer Zuladung stabil in der Luft gehalten wird, kommt es zum Einsatz von paarweise gegengleich angetriebenen Rotoren (vgl. Kühn 2013, S. 5–7). Die einzelnen Rotoren der Drohne sind hierbei separat ansteuerbar, wodurch die nötige Schubkraft für die Flugbewegungen proportional über die Drehzahl der einzelnen Rotoren gesteuert wird (vgl. Mahony et al. 2012, S. 20–23). Zur Gewährleistung der Steigbewegung einer Drohne inkl. der zu transportierenden Güter müssen die Auftriebskräfte, die durch die Rotorleistung erzeugt werden, größer als die entgegengesetzte Gewichtskraft sein (vgl. Büchi 2018, S. 122–125).

Diese realisierbare Nutzlast ist ein wichtiges Kriterium für den Gütertransport mit einer Drohne, denn durch die Zuladung werden die Flugeigenschaften im operativen Betrieb wesentlich beeinflusst. Neben dem Gewicht stellt die Geometrieform und Transportart der Bauteile ein wesentliches Einflusskriterium für ein stabiles Flugverhalten dar. Transportvorrichtungen müssen auf die Drohnenbauform speziell angepasst sein, damit die Transportgüter die Flugeigenschaften nicht negativ beeinflussen (vgl. Landrock und Baumgärtel 2018, S. 9). Die Bandbreite der erzielbaren Nutzlasten von kommerziellen Drohnen für den Transport von Paketen, Kleinteilen und schweren Gütern ist wesentlich von der Baugröße der Drohne abhängig, wobei ein erhöhtes Abfluggewicht und höhere Traglasten die Energieversorgung negativ beeinflussen (vgl. PricewaterhouseCoopers 2018, S. 20). Der Begriff „Nutzlast“ beinhaltet alle tragfähigen Sensoren, Sicherheitsausrüstungen und zusätzlichen Zuladungen, die eine Drohne während des Flugs mit sich führt (vgl. Nato Naval Armaments Group 2007, S. 11).

Die Tragfähigkeit einer Drohne (englisch: payload) wird nach der Durchführungsverordnung der Europäischen Kommission 2019/947 (2019, S. 48) wie folgt definiert:

„Instrumente, Mechanismen, Ausrüstungen, Teile, Geräte, Zubehörteile oder Zusatzteile, einschließlich Kommunikationsausrüstungen, die in das Luftfahrzeug eingebaut bzw. an diesem angebracht sind und nicht dazu verwendet werden oder verwendet werden sollen, das Luftfahrzeug im Flug zu betreiben oder zu steuern, ohne jedoch Teil des Flugwerks, eines Motors oder eines Propellers zu sein.“

2. Energiemanagement

Das Energiemanagement einer Drohne ist von diversen äußeren Einflussparametern abhängig, die wiederum die Flugzeit und Reichweite beschränken. Besonders schwere Zuladungen und Windeinflüsse, die wiederum die Flugeigenschaften negativ beeinflussen können, führen zu erhöhten Energieverbräuchen (vgl. Kirschstein 2020, S. 13). Entscheidend für die Versorgungsdauer ist das Verhältnis vom Eigengewicht der Drohne zu den anzusteuern Sensoren, Motoren und äußeren Traglasten. Die

tatsächlich abrufbare Batterieleistung und somit resultierende Einsatzzeit im Anwendungsfall kann daher variieren (vgl. Landrock und Baumgärtel 2018, S. 7–8). Diese Einflussparameter werden in der Technologiebewertung des entwickelten Vorgehensmodells näher betrachtet, um eine für den spezifischen Anwendungsfall geeignete Drohne auszuwählen. Da zusätzlich in der Modellentwicklung die notwendigen Anforderungen an eine anwendungsspezifische Landeplattform unter Berücksichtigung der gewählten Drohne mit Hilfe einer Anforderungsliste berücksichtigt werden sollen, wird nachfolgend auf mögliche Ladekonzepte eingegangen.

Da am Markt verfügbare Drohnen häufig mit Lithium-Polymer-Batterien betrieben werden, sind aus aktueller Sicht regelmäßige Ladezyklen notwendig, welche die Einsatzzeit der Drohne begrenzen (vgl. Um 2019, S. 70–73). Um diese Ineffizienz zu vermeiden, ist es möglich, Drohnen durch Wireless Charging, das ohne den Ausbau der Batterien und Ladekabel auskommt, zu laden (vgl. Simic et al. 2015, S. 1846–1855). Die Funktion wird entweder durch eine magnetisch induktive oder lasergestützte Leistungsübertragung gewährleistet. Ein wesentlicher Vorteil der magnetisch induktiven Ladung gegenüber dem Laser ist die höhere Leistungsübertragung und kostengünstigere Anschaffung. Sobald sich die Drohne in der Nähe der Ladestation und des magnetischen Feldes befindet, beginnt die Leistungsübertragung und automatisierte Ladung der Batterien (vgl. Um 2019, S. 253). Das in die Ladematte integrierte drahtlose Lademodul überträgt die Energie über den montierten Empfänger auf der Drohne. Die Effektivität der induktiven Ladung und die daraus resultierende Ladedauer hängt davon ab, wie präzise die Überlappung des Lademoduls in der Matte mit dem Empfänger übereinstimmt. Eine ungenügende Überschneidung kann zu Verzögerungen im Aufladeprozess führen (vgl. Chae et al. 2015, S. 1575–1579). Das Unternehmen Wibotic, das auf die induktive Ladung von Drohnen spezialisiert ist, verweist auf den sogenannten Sweet Spot, an dem die Überschneidung des Transmitters und Empfängers die maximale Energieübertragung gewährleistet. Hierbei setzt sich das Ladesystem aus einem Transmitter, dessen Energie über eine Wechsel- oder Gleichstromversorgung (AC oder DC) gespeist wird, und einer Transmitterantenne, die auf der Landestation montiert ist und die Energie vom Transmitter erhält, zusammen. Drohnenseitig besteht das System aus einer Empfängerspule und einem Bordladegerät, wodurch die Batterie der Drohne geladen wird (vgl. WiBotic 2020, o.S.).

3. Sicherheitssysteme

Die Flugsicherheit einer Drohne im operativen Betrieb ist von essenzieller Bedeutung und wesentlich für einen erfolgreichen Genehmigungsprozess bei der Luftfahrtbehörde verantwortlich. Insbesondere im Außenbereich, wo unterschiedliche Witterungsbedingungen durch Wind, Lichteinflüsse, Regen und externe

Einflussfaktoren auftreten, sind die Anforderungen an den Piloten und die Drohne erheblich (vgl. Tomic et al. 2012, S. 46–56). Der Verlust der Funkverbindung zwischen dem Steuerungssystem und der Drohne kann zu einer Gefährdung von Personen und zu Sachschäden führen. Um dieses Restrisiko von Sach- und Personenschäden zu vermeiden, müssen gemäß der Risikobewertung im Zuge des luftfahrtrechtlichen Genehmigungsverfahrens diverse Sicherheitssysteme auf der Drohne angebracht oder in die Steuerung integriert werden. Als Absturzsicherung sind automatisch auslösende Fallschirme und Auffangnetze prädestiniert (vgl. Sullivan-Nightengale 2015, S. 34–42). Aufgrund der stetig steigenden Sicherheitsanforderungen an die Drohnenbetreiber und des seit 2021 geltenden regulatorischen Rahmenwerks der Europäischen Union zur präventiven Risikominimierung sind Fallschirmtechniken wie beispielsweise von Drone Rescue Systems GmbH (2020, o.S.) und AVSS (2021, o.S.) für die Risikobewertung im Zuge des Genehmigungsprozesses geeignet. Die Sicherheitssysteme auf der Drohne fließen in die Bewertungskalkulation der Luftfahrtbehörde zur Feststellung des Boden- und Luftrisikos der eingesetzten Drohne ein. Es werden pyrotechnische Auswurfssysteme, Feder- und Airbag-Mechanismen sowie Katapultsysteme für das Auslösen des Fallschirms verwendet. Die Fallschirme können je nach Anbieter automatisiert oder manuell ausgelöst werden. Bei automatisiert auslösenden Systemen erfolgt ein ständiger Abgleich des Neigungswinkels, der Rotation und der Höhenlage der Drohne, um ein Auslösen des Fallschirms verzögerungsfrei zu initiieren. In der nachfolgenden Abbildung 8 ist eine Drohnenkonfiguration mit integriertem Fallschirmsystem und ein simulierter Absturz dargestellt.



Abbildung 8: Aufbau und Funktion einer Fallschirmlösung (eigene Darstellung)

Aufgrund der paarweisen Antriebssteuerung der Rotoren bei Quadrocoptern ist speziell diese Kategorie bei Rotorausfällen durch die fehlende Redundanz gefährdet. Trotz dieser Restriktionen ist es möglich, Drohnen mit vier Rotoren durch gezielte Softwarelösungen gegen einen abrupten Ausfall abzusichern. Durch spezielle Algorithmen, die mit dem Bordcomputer der Drohne interagieren, sind Rotorausfälle kompensierbar und die Drohne kann durch eine Rotation um die eigene Achse sicher gelandet werden (vgl. Mueller und D'Andrea 2014, S. 45–52). Spezielle Algorithmen

zur Absturzsicherung haben gegenüber Fallschirmen den Vorteil, dass die Drohne dadurch keine zusätzliche Traglast hat und somit die Flugeigenschaften und Flugzeiten nicht beeinflusst werden (vgl. Jarrell 2019, o.S.).

2.2.5 Charakteristiken des Einsatzgebiets

In Österreich ist für die Festlegung von Kontrollzonen, Flugbeschränkungs- und militärischen Fluggebieten die nationale Luftfahrtbehörde „Austro Control“ zuständig. Bei notwendigen Drohnenflügen in diesen Beschränkungs- und Kontrollzonen müssen spezielle Sonderbewilligungen eingeholt und vor jeder Inbetriebnahme mit den ortsansässigen Flugleitungen koordiniert werden (vgl. Austro Control 2020, o.S.). Die gesetzlich geltende maximale Flughöhe von Drohnen beträgt 120 Meter, wobei diese je nach Einsatzkategorie und bestehenden Sicherheitsrisiken im Antragsverfahren auf einen geringeren Wert von der Behörde vorgeschrieben werden kann. Die farblichen Markierungen in Abbildung 9 zeigen Einsatzgebiete in Österreich, in denen erhöhte Sicherheitsvorkehrungen gelten. Für diese Zonen muss im Genehmigungsverfahren bei der Luftfahrtbehörde eine detaillierte Risikoeinschätzung des Anwendungsfalles, der eingesetzten Drohntechnologie und der involvierten Sicherheitssysteme gegeben werden.

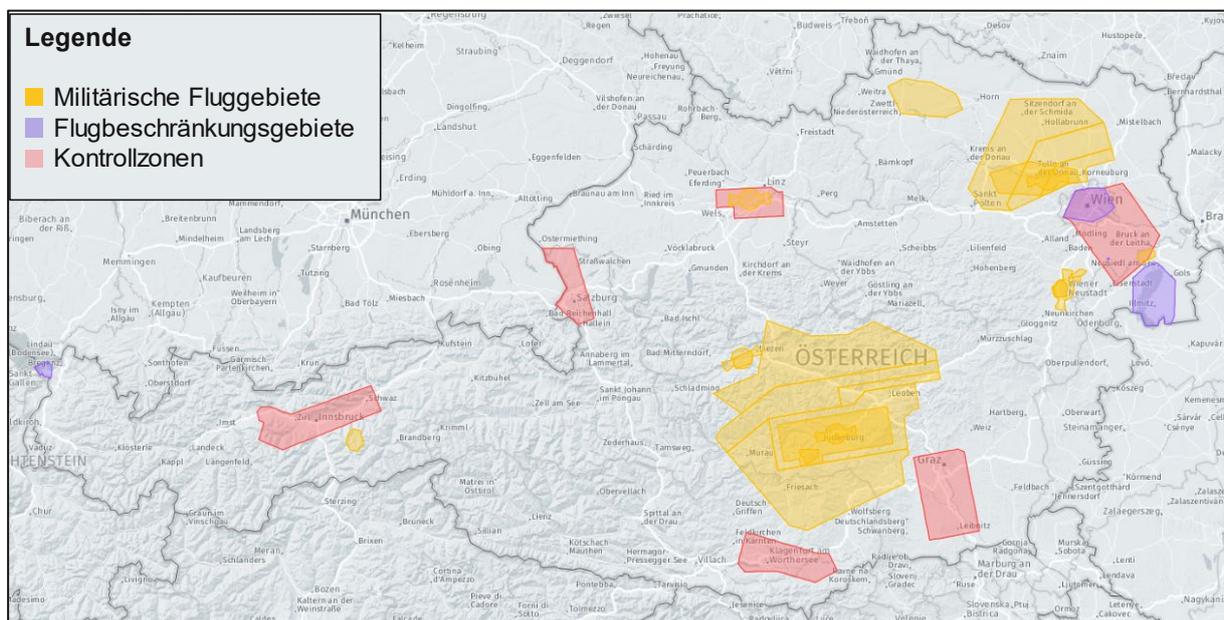


Abbildung 9: Luftraumbeschränkungen in Österreich (eigene Darstellung in Anlehnung an Austro Control 2020, o.S.)

Flüge innerhalb Österreichs, die der militärischen Nutzung und Landesverteidigung dienen, fallen nicht in die Zivilluftfahrt und obliegen daher nicht diesen Richtlinien. Diesbezügliche Flugoperationen dürfen auch über den Sichtbereich hinaus und in Sperrgebieten durchgeführt werden. Auf die unterschiedlichen Betriebsarten von Drohnen wird in Kapitel 2.2.6 näher eingegangen.

Der valide Einsatz von Drohnen im Außenbereich ist von den örtlichen Gegebenheiten (Topografie, Wetterbedingungen, angrenzende Infrastrukturen) des Einsatzgebiets wesentlich abhängig und muss situationsbedingt geprüft werden. Nur durch eine ständige Funkverbindung zwischen Satelliten und Flugobjekt ist ein risikoarmer Einsatz im Anwendungsgebiet möglich. Bei Verlust der Kommunikationsverbindung, etwa durch starken Regen, Wind, Nebel, Wolken oder Gebirge, stehen Anwender vor massiven Herausforderungen mit eingesetzten GPS-(Global Positioning System-)Anwendungen (vgl. Rangarajan 2018, o.S.). Insbesondere ist der Einsatz von GPS-gesteuerten Objekten auf den Außenbereich mit starken Signalstärken beschränkt, da die Empfängerantenne ansonsten nicht funktionsfähig ist (vgl. Um 2019, S. 154).

Die Ungenauigkeit von GPS-Anwendungen liegt je nach Anwendungsfall bei maximal zehn Meter, wobei im Mittel von einer Abweichung von fünf Metern ausgegangen wird. Zur Erhöhung der Positionsgenauigkeit, die für wiederkehrende automatisierte Flugoperationen von essenzieller Bedeutung ist, wird auf bodengebundene Funkstationen oder mehrere Satelliten zurückgegriffen (vgl. Schüttler 2014, S. 89). Durch die Ausstattung der Drohne mit einem RTK-System (Real Time Kinematic) sind Genauigkeiten von ein bis zwei Zentimeter erzielbar. Die Funktionsweise basiert auf dem ständigen Abgleich der Drohnenposition mit einer Bodenstation, um Korrekturen in Echtzeit durchzuführen. Für die Initialisierung der Funkverbindung und die daraus resultierende Positionsgenauigkeit sind mindestens fünf Satelliten erforderlich. Häufig werden RTK-Systemlösungen bei Vermessungsaufgaben genutzt, da bei diesen eine äußerst hohe Genauigkeit gefordert wird (vgl. Um 2019, S. 157–159). Diese Funktionsfähigkeit ist auch für Materialtransporte mit Drohnen, die eine präzise Aufnahme und Abgabe der Güter auf einer Landestation erfordern, dienlich. Für die Entwicklung des Vorgehensmodells wird in weiterer Folge das Einsatzgebiet auf Einsatzorte (ohne militärische Klassifizierung) innerhalb Österreichs beschränkt.

2.2.6 Betriebsarten im Außenbereich

Beim Einsatz einer Drohne wird zwischen den Betriebsverfahren VLOS (Visual Line Of Sight) und BVLOS (Beyond Visual Line Of Sight) unterschieden. Der grundsätzliche Unterschied zwischen den beiden Einsatzarten liegt in der Sichtentfernung während des Drohnenflugs im Einsatzgebiets. Beim VLOS-Betrieb muss der Bediener stets in der Lage sein, die Drohne ohne zusätzliche visuelle Unterstützungssysteme zu sehen und im freien Sichtfeld zu manövrieren (vgl. Bestaoui Sebbane 2018, S. 18).

Das Betriebsverfahren VLOS wird in der Durchführungsverordnung der Europäischen Kommission 2019/947 in Artikel 2, Punkt 7 (2019, S. 48) als „*eine UAS-Betriebsart, bei der der Fernpilot in der Lage ist, einen ununterbrochenen und nicht unterstützten Sichtkontakt mit dem unbemannten Luftfahrzeug aufrechtzuerhalten, sodass er*

dessen Flugweg so steuern kann, dass Kollisionen mit anderen Luftfahrzeugen, Menschen und Hindernissen vermieden werden“ beschrieben.

Je nach eingesetzter Drohne und deren Merkmalen wie z. B. Farbe, Signalleuchten, Dimension sowie den Wetterbedingungen kann die VLOS-Reichweite differieren (vgl. EASA 2019b, S. 14). Die Reichweite der Sichtverbindung ist durch einen zusätzlichen Fernbeobachter erweiterbar (erweiterte visuelle Sichtverbindung – EVLOS). Hierbei muss ein ständiger Kommunikationsaustausch zwischen dem Piloten und dem Fernbeobachter möglich sein, um kritische Informationen schnellstmöglich zu übermitteln (vgl. Bestaoui Sebbane 2018, S. 18).

Im Gegensatz zum Betrieb mit direktem Sichtkontakt wird der Flug außerhalb des Sichtfelds als BVLOS bezeichnet (vgl. Europäische Kommission 2019b, S. 48). Bei Flügen jenseits der visuellen Sichtverbindung ist die Informationsübertragung durch Kamerasysteme auf der Drohne ein bewährtes Funktionsprinzip. Damit die Sicherheit in diesem Flugbetrieb den Anforderungen entspricht, sind zusätzliche Frühwarnsysteme für einen effizienten Kollisionsschutz notwendig (vgl. Bestaoui Sebbane 2018, S. 18).

In der folgenden Abbildung 10 sind die charakteristischen Flugreichweiten im Einsatzgebiet je Betriebsverfahren und die dazu notwendigen Personen für die Kategorie „Specific“ (siehe Kapitel 2.2.8) nach europäischer Gesetzgebung grafisch dargestellt.

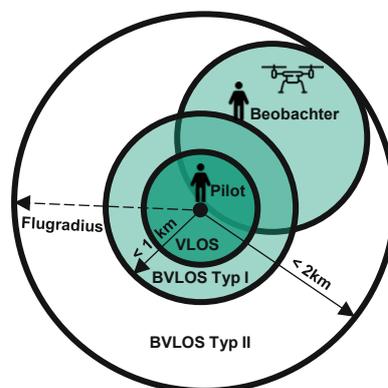


Abbildung 10: VLOS und BVLOS Einsatzreichweiten (eigene Darstellung in Anlehnung an EASA 2019b, S. 14)

Der Flugradius im VLOS-Bereich ist wie bereits beschrieben je nach Situation und eingesetzter Drohne vordefiniert. Wenn die Drohne über eine zusätzliche Visualisierungsunterstützung und Umgebungsortung verfügt, sind zukünftig im BVLOS-Typ-I-Betrieb vorprogrammierte Flugrouten bis zu einer Reichweite von einem Kilometer durchführbar (siehe Abbildung 10). Durch die Integration zusätzlicher Beobachter in das Flugmanöver ist der BVLOS-Typ-II-Flugmodus bis zu zwei Kilometer möglich, wobei es zu keiner Gefährdung von Personen oder Gebäuden

kommen darf (vgl. EASA 2019b, S. 14–15). Um größere Reichweiten im kommerziellen Zivilluftfahrtbereich zu erzielen, wie zum Beispiel durch Lufttaxis, ist die Zulassung in der Kategorie „Certified“ nötig. Eine detaillierte Beschreibung der Gesetzesverordnung folgt im Kapitel 2.2.8 Rechtsgrundlagen in Österreich für die Drohnen Einsatzkategorien.

Im zuvor definierten Einsatzgebiet und innerhalb der genannten Betriebsverfahren können Drohnen unterschiedliche Flugoperationen ausführen. Dabei wird grundsätzlich zwischen autonomen und automatisierten Flügen differenziert. Bei Letzteren führt die Drohne eine vorprogrammierte Instruktion des Piloten aus, wobei jederzeit in die Flugoperation eingegriffen werden kann (vgl. EASA 2019a, o.S.). Aus Effizienzgründen wird auf eine manuelle Steuerung durch den Piloten jedoch verzichtet, um den Anteil an wertschöpfenden Tätigkeiten im operativen Betrieb zu erhöhen. Im Gegensatz dazu erfolgen beim autonomen Betrieb einer Drohne selbstständige Prozessentscheidungen, die nicht durch den Piloten initiiert werden müssen (vgl. Nato Naval Armaments Group 2007, S. 8).

Die Europäischen Kommission (2019, S. 48) definiert den autonomen Betrieb einer Drohne als *„ein Betrieb, bei dem das unbemannte Luftfahrzeug in Betrieb ist, ohne dass der Fernpilot eingreift“*. In der DIN 5452-1 (2018-03, S. 9) wird der autonome Flug wiederum als *„Flug eines ferngeführten Luftfahrzeugs ohne Eingriff eines Piloten in die Flugdurchführung“* definiert.

Die Art der Flugoperation im Anwendungsszenario beeinflusst wesentlich die Anforderungen an die Drohne sowie die Sicherheitsvorkehrungen im involvierten Prozessbereich am Einsatzort. Aufgrund bestehender rechtlicher Restriktionen und technologischer Hürden beim Einsatz von autonomen Drohnen wird in der vorliegenden Arbeit ausschließlich auf automatisierte Flugoperationen im Einsatzgebiet eingegangen.

2.2.7 Prozessbereich für den Drohneneinsatz

Wie bereits in den Grundlagenkapiteln 2.1.2 und 2.1.3 erläutert, können Transportaufträge entlang der vier definierten Materialflussebenen aus Abbildung 4 sowohl mit konventionellen als auch alternativen Transportansätzen realisiert werden. Für externe Transporte, die das Unternehmen mit dem Beschaffungs- und Absatzmarkt verbinden, werden aktuell unterschiedlichste Verkehrsmittel (u.a. Fahrzeuge, Züge, Schiffe etc.) eingesetzt. Damit wird der externe Güterfluss sowohl zwischen einzelnen Produktionsstandorten des Unternehmens als auch für den Warenaustausch mit Kunden oder Zulieferern genutzt (vgl. Friedrich 2013, S. 41). Für Unternehmen in unmittelbarer Nähe zu Ballungszentren kann sich zukünftig eine alternative Zustellmöglichkeit für Kunden durch den Einsatz der Drohnentechnologie

etablieren (vgl. Yoo und Chankov 2018, S. 1216–1217). Abhängig vom Anwendungsfall stellen Drohnen auch für zeitkritische externe Transporte zur Distanzüberbrückung eine interessante Alternative zu Lastkraftfahrzeugen oder Transportern dar (Vlahovic et al. 2016, S. 4026–4030). Insbesondere bei ungeplanten Produktionsstillständen, die zu erheblichen monetären Mehrkosten führen, stellt die Warenanlieferung per Drohne zwischen benachbarten Unternehmensstandorten eine effiziente Problemlösung dar (Jorge Luis Marinez, Gilbert: persönliche Korrespondenz, SEAT S.A, 20.10.2021). Bei Testeinsätzen in der Automobilbranche konnten dabei Zeitreduktionen bis zu 80 % gegenüber konventionell verwendeten Nutzfahrzeugen erzielt werden (vgl. SEAT S.A. 2022, o.S.).

Die Ebenen des werksinternen, gebäudeinternen und am Arbeitsplatz stattfindenden Materialflusses bilden gemäß der Definition nach Friedrich (vgl. 2013, S. 41) den „innerbetrieblichen Materialfluss“. Hinsichtlich der Verkürzung notwendiger Anlieferzeiten von kritischen Ersatzteilen am Werksgelände werden auch Drohneneinsätze mit speziellen Aufnahmevorrichtungen zur automatisierten Aufnahme und Abgabe der Güter geprüft. Sowohl die manuelle Be- und Entladung der Transportbehälter durch einen Mitarbeiter auf der Drohne und anschließenden automatisierten Transportflug als auch die vollständig automatisierte Prozessabwicklung zeigen deutlich erzielbare Spielzeitreduktionen von bis zu 43 % beim Anlieferungsprozess gegenüber einem manuellen Transport (vgl. Wrycza et al. 2017, S. 1–10). Auch für den zügigen Warentransport innerhalb von Produktions- und Lagerhallen eignen sich Drohnen mit speziellen Navigationssystemen zur Orientierung. Hierbei können bereits Logistikaufträge bis zu 500 g erfolgreich zwischen einem Auf- und Abgabepunkt automatisiert transportiert werden (vgl. Perez-Grau et al. 2021, S. 312) . Für den am Arbeitsplatz oder zwischen einzelnen Bearbeitungsstationen stattfindenden Materialfluss liegen Konzepte zur Nutzung von Drohnenschwärmen mit kleiner Bauformausführung für die Materialbereitstellung vor, wobei die geringe Lastaufnahme und der Energieverbrauch bei schweren Teilen einen effizienten Einsatz noch erschweren. Die erzielbare Zeitreduktion für die einzelnen Arbeitsaufträge, die auf die Drohnen ausgelagert werden, liegt in den Testverfahren im Durchschnitt bei 75 %.

Die geltenden Rechtsgrundlagen und notwendigen Voraussetzungen für den in der Arbeit betrachteten Prozessbereich (Ebene 2 – werksinterner Materialfluss) zur Nutzung von Drohnen für den intralogistischen Materialtransport im Außenbereich werden im anschließenden Kapitel im Detail definiert.

2.2.8 Rechtsgrundlagen in Österreich für die Drohnen Einsatzkategorien - Open, Specific, Certified

Durch den Zusammenschluss internationaler Luftfahrtbehörden für die Entwicklung eines einheitlichen europäischen Gesetzesentwurfes werden die rechtlichen Anforderungen an den Drohnennutzer vereinheitlicht und sollen den Drohneneinsatz in den jeweiligen Mitgliedstaaten effizienter gestalten (vgl. Erceg et al. 2017, S. 50–51).

Die zukünftig gemeinsame Nutzung des Luftraums durch Drohnen und konventionellen Luftverkehr stellt jedoch die Behörden in Bezug auf die rechtliche Absicherung vor wesentliche Hürden. Generell hat die Gewährleistung der Sicherheit der Personen höchste Priorität. Zu diesem Schluss kommt auch die Europäische Kommission in ihren Zukunftsszenarien. Der operative Bereich von Drohnen für den urbanen Paketversand und für Analysezwecke soll auf 150 Meter Höhe begrenzt werden. Größere Lufttransporte sollen zukünftig durch autonome Drohnen in einer Flughöhe von ungefähr 4000 Meter erfolgen, um Kollisionen mit anderen Flugobjekten zu vermeiden (vgl. European Commission 2020, o.S.).

Die aktuell geltenden Einsatzkategorien gemäß dem europäischen Drohnen-Regulativs sind in Abbildung 11 inklusive der Hauptmerkmale dargestellt (vgl. Austro Control 2022, o.S.).

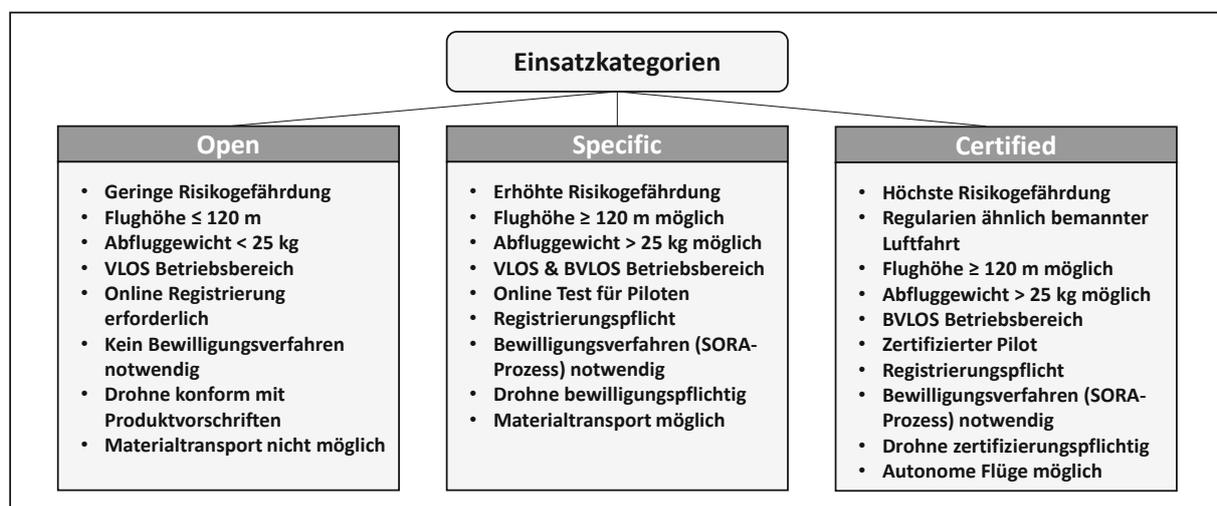


Abbildung 11: Übersicht der Drohnen Einsatzkategorien (eigene Darstellung)

Nachfolgend werden die wesentlichen Unterschiede zwischen den drei Einsatzkategorien (Open, Specific, Certified) im Detail dargelegt. Aufgrund der technologischen und rechtlichen Anforderungen des industriellen Anwendungsfalls wird ausschließlich die Einsatzkategorie „Specific“ für die nachfolgende Modellentwicklung herangezogen.

1. Einsatzkategorie Open

Eine wesentliche Neuerung der geltenden Drohnenbestimmung ist die erforderliche Online-Registrierung aller Drohnenbetreiber bei der nationalen Luftfahrtbehörde. Einzig Drohnen mit einem Abfluggewicht von weniger als 250 g, die auch eine kinetische Übertragungsenergie von weniger als 80 Joule bei einem möglichen Zusammenstoß mit Personen entwickeln und keine verbaute Sensorik (z. B. Video- und Kamerasysteme) zur personenbezogenen Datenaufnahme besitzen, sind von dieser Registrierungspflicht ausgenommen. Mit Abschluss der Anmeldung erfolgt die eindeutige Zuweisung einer Registrierungsnummer, mit der alle Drohnen des Betreibers markiert werden müssen und die jede weitere Geräteregistrierung erübrigt. Die Gültigkeit der Betreiberregistrierung ist auf drei Jahre begrenzt und muss stetig erneuert werden. Piloten, die Fluggeräte über 250 g steuern möchten, müssen im Zuge eines Online-Lehrgangs einen Drohnenführerschein mit abschließendem Testzertifikat erwerben. Die Inhalte des Kurses umfassen luftfahrtrechtliche, technische, mechanische, meteorologische und sicherheitsrelevante Aspekte in Bezug auf den Drohneneinsatz (vgl. Austro Control 2020, o.S.).

In dieser sehr breit aufgestellten Kategorie kommt es zusätzlich je nach Anwendungszweck, Betriebsbeschränkungen sowie Anforderungen an den Piloten zu einer weiteren Klassenunterteilung A1 bis A3 (siehe Abbildung 12). Die maximale Flughöhe ist in diesem Segment auf 120 Meter begrenzt, wobei der Flug im VLOS-Modus (Visual Line of Sight) unter ständigem Sichtkontakt erfolgen muss. Eine weitere Begrenzung stellt das maximale Abfluggewicht der Drohne mit 25 kg dar, wobei zwischen privatem und professionellem Gebrauch nicht unterschieden wird. Der Flug über Menschenansammlungen ist Drohnen in dieser Kategorie nicht gestattet. Zusätzlich muss ein horizontaler Sicherheitsabstand von 30 bis 50 Meter zu Personen eingehalten werden. Neben den bereits genannten Restriktionen ist der Transport von gefährlichen Gütern mit Drohnen dieser Klasse nicht gestattet (vgl. Europäische Kommission 2019b, S. 49–50; vgl. EASA 2021, o.S.).

Verkaufte Drohnen in der EU müssen auf Basis des gegebenen Risikos durch Gewicht, Bauform und Bewegungsenergie nach Klassen (C0–C6) durch den Hersteller gekennzeichnet werden, womit sich unterschiedliche Anforderungsprofile an den Piloten und das Einsatzgebiet für die Klassenunterteilung A1 bis A3 ergeben. Eine Übersicht inklusive der jeweiligen Restriktionen wird in Abbildung 12 dargestellt (vgl. EASA 2017, S. 15).

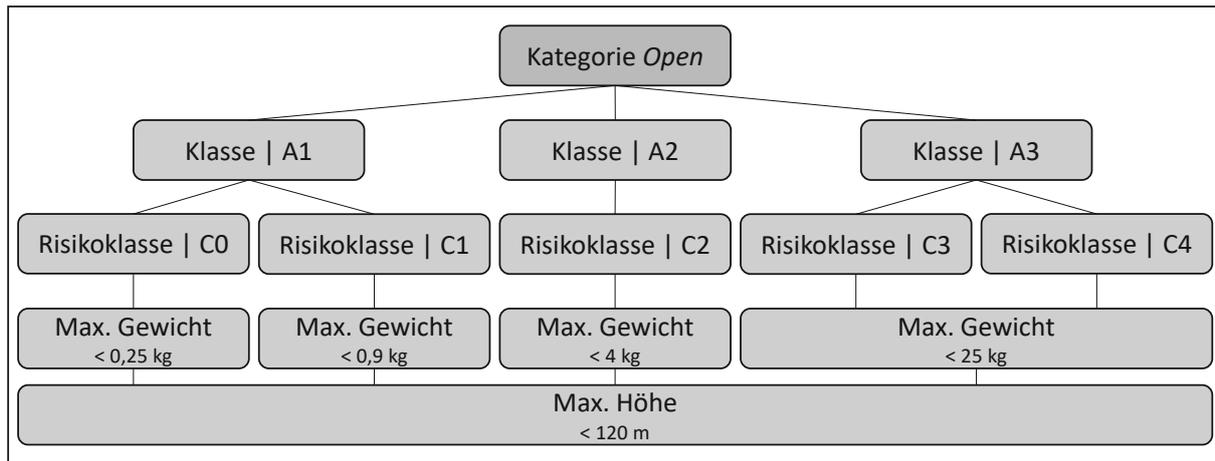


Abbildung 12: Unterteilung der Kategorie Open (eigene Darstellung in Anlehnung an EASA 2017, S. 15; Europäische Kommission 2019b, S. 60–61)

Wesentliche Unterscheidungsmerkmale der einzelnen Risikoklassen sind das maximale Abfluggewicht und die erzielbare Höchstgeschwindigkeit. Die Klassenidentifizierung der jeweiligen Risikogruppe muss auf der Drohne durch den Hersteller gekennzeichnet werden. Innerhalb der Kategorie A3 erfolgt eine weitere Abgrenzung je nach technischer Spezifikation und Bauform (siehe Abbildung 12). Die Risikoklasse C3 darf im Gegensatz zu C4 ausschließlich bauliche Abmessungen kleiner als 3 m aufweisen und ist auf einen elektrischen Antrieb mit höchstens 48 V Nennspannung beschränkt. Zusätzlich muss in dieser Klasse die Drohne über eine Geo-Sensibilisierungsfunktion verfügen, um den Einflug in gewisse Luftbeschränkungszonen und Sperrgebiete zu verhindern. In der Risikoklasse C4 muss gewährleistet werden, dass das System auch bei einem möglichen Kontrollverlust mehrerer Bordsysteme manövrierfähig bleibt. Außerdem ist die Nutzung automatischer Steuerungsmodi in dieser Klasse gesetzlich untersagt (vgl. Europäische Kommission 2019a, 23-32).

2. Einsatzkategorie Specific

Für den Betrieb von Drohnen in der „Specific“-Kategorie sind aufgrund der Betriebsrisiken erweiterte Genehmigungsschritte durchzuführen, um den Anforderungen der Flugbehörde zu entsprechen. Ein wesentlicher Vorteil dieser Einsatzkategorie ist, dass Drohnenflüge außerhalb des Sichtkontakts des Piloten möglich sind (sogenannter BVLOS-(Behind Visual Line of Sight-)Modus). Außerdem ist die Nutzung von Drohnen über 25 kg Abfluggewicht in definierten Einsatzbereichen möglich. Flüge über einem besiedelten Gebiet mit einer Drohne über 4 kg sind in dieser Kategorie ebenfalls möglich. Ein besiedeltes Gebiet ist durch Gebäude, die als Wohn-, Gewerbe- und Erholungsgebiet genutzt werden, charakterisiert (vgl. Austro Control 2020, o.S.). Zur Abschätzung der Risiken ist eine SORA-(Specific Operational Risk Assessment-)Risikoanalyse durchzuführen, sofern das Szenario nicht in bereits evaluierten und standardisierten Einsatzszenarien durch die Luftfahrtbehörde

abgebildet ist. In diesen STS (Standardszenarien) sind die Anforderungen an den Betreiber, die Drohne und das Einsatzgebiet vorgeschrieben (vgl. EASA 2021, o.S.). Die Richtlinien, an denen sich der SORA-Prozess orientiert, sind durch die Organisation JARUS (Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems) definiert. Im Fokus steht dabei die Minimierung der Boden- und Luftrisiken für Drittpersonen und die Reduzierung des Beschädigungsrisikos im Hinblick auf kritische Infrastrukturen im umliegenden Bereich. Der SORA-Prozess ist eine logische und strukturierte Abfolge von zehn Schritten, um Risikoszenarien zu bewerten. Nachfolgend ein Überblick der jeweiligen Schritte gemäß den JARUS-Richtlinien (vgl. Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems 2019, S. 17–18):

Schritt 1: Konzeptbeschreibung

Schritt 2: Erfassung der Bodenrisikoklasse

Schritt 3: Finale Bestimmung des Bodenrisikos

Schritt 4: Erfassung der Luftrisikoklasse

Schritt 5: Bestimmung des Restrisikos in der Luft

Schritt 6: Anforderungen an die taktische Einsatzrisikominimierung

Schritt 7: Bestimmung des endgültigen spezifischen Sicherheits- und Zuverlässigkeitsniveaus

Schritt 8: Erfassung der operativen Sicherheit

Schritt 9: Berücksichtigung angrenzender Einsatzgebiete und Lufträume

Schritt 10: Definition des ganzheitlichen Sicherheitsprogramms

Eine detaillierte Behandlung der einzelnen Schritte erfolgt in der Modellentwicklung in Kapitel 5.4 innerhalb der Lastenhefterstellung für die luftfahrtrechtliche Betriebsbewilligung.

Erst nach abgeschlossener Analysephase und Definition des spezifischen Einsatzzwecks sowie daraus abgeleiteter Drohnenkategorie ist das Ausmaß an notwendigen Nachweisen und der Detaillierungsgrad ersichtlich. Im Gegensatz zur „Open“-Kategorie gelten folgende Dokumente als zusätzliche Voraussetzung für den Drohnenbetrieb in der „Specific“-Kategorie und müssen in der Lastenhefterstellung im Zuge des Genehmigungsverfahrens bei der Luftfahrtbehörde vom Antragssteller entwickelt werden:

a. Trainingsbuch als Kompetenznachweis für Drohnenpiloten

Um den sicheren Umgang mit der Drohne im operativen Betrieb zu gewährleisten und dem Bedienpersonal das notwendige Grundlagenwissen bereitzustellen, muss sowohl ein internes Schulungsprogramm etabliert als auch auf externe Nachweisüberprüfungen zurückgegriffen werden. Diesbezüglich müssen die

durchgeführten Schulungseinheiten und Prüfungen in einem Trainingsbuch dokumentiert werden, siehe Tabelle 2. Diese Unterlagen dienen als Nachweis für etwaige Überprüfungen durch die Luftfahrtbehörde und müssen auf Verlangen ausgehändigt werden.

Tabelle 2: Auszug aus dem entwickelten Trainingsbuch (eigene Darstellung)

Trainingsbuch									
Person	Unternehmensinterne Schulung (5h)			Kompetenznachweis für die Luftfahrtbehörde		Luftrecht Trainingslehrgang		uLFZ-Luftrechtsprüfung	
	Erfolgreich absolviert am	Datum	Abgehalten durch	Erfolgreich absolviert am	Datum	Erfolgreich absolviert am	Datum	Erfolgreich absolviert am	Datum

b. Flugbuch zur Dokumentation der Einsatzflüge

Zur Nachverfolgbarkeit der durchgeführten Drohnenflüge und gegebenenfalls auftretenden Missionsabweichungen muss ein Flugbuch, siehe Tabelle 3, entwickelt werden. Hierbei muss das Bedienpersonal im Zuge des Einsatzflugs das Handbuch mit den jeweiligen Parametern befüllen.

Tabelle 3: Auszug aus dem entwickelten Flugbuch (eigene Darstellung)

Flugbuch										
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Nr.	Datum	Einsatzort	Kategorie	Piloten	Einsatzzweck	Einsatz von - bis	Start - Landungen	Gesamtflugzeit [min]	Ereignisse	Unterschrift

c. Personaldokumente und medizinische Tauglichkeitsbestätigung

Im Zuge des Genehmigungsverfahrens sind persönliche Ausweisdokumente der Piloten sowie die durchgeführten medizinischen Tauglichkeitsuntersuchungen bei einem Amtsarzt dem Dokument beizufügen. Die Überprüfung des aktuellen Gesundheitsstatus der Piloten dient als zusätzliches Beurteilungskriterium hinsichtlich der Einflusswahrnehmung und Risikoabschätzung während der Drohneneinsätze.

d. Sicherheitscheckliste

Die Entwicklung einer Sicherheitscheckliste muss durch den Betreiber als präventives Fehlervermeidungswerkzeug durchgeführt werden. Hierbei müssen sowohl allgemeine Sicherheits- als auch spezifische Bauteilüberprüfungen definiert werden,

um der Luftfahrtbehörde den ordnungsgemäßen Umgang bei Flugoperationen aufzuzeigen. Neben drohnenspezifischen Überprüfungsmaßnahmen sind auch für externe Hilfssysteme (z. B. ein verwendetes RTK-System) Sicherheitschecklisten zu definieren. Um menschliches Versagen bei Überprüfungen zu verhindern, muss zusätzlich ein Mehraugenprinzip zur gegenseitigen Kontrolle etabliert werden. Eine exemplarisch entwickelte Sicherheitscheckliste für das Genehmigungsverfahren im Zuge des Fallbeispiels ist im Anhang 2 dargestellt.

3. Einsatzkategorie Certified

Bei Drohnenanwendungen, die in die Kategorie „Certified“ fallen, sind eine spezielle Fernpilotenlizenz und eine Betriebsgenehmigung inklusive Risikoabschätzung erforderlich, da diese Flugoperationen das höchste Risiko aufweisen. Zusätzlich zu den Anforderungen an den Fernpiloten und das Betriebsgerät müssen weitere Sicherheitssysteme in die Drohne verbaut werden. Neben einer elektronischen Identifizierung ist eine automatisierte Nachrichtenübermittlung bzw. Aktionsdurchführung der Drohne bei Eintritt in einen gesperrten Luftraum vorgesehen. Dieser Sicherheitsaspekt wird in der Literatur als Geofencing bezeichnet und soll wesentlich zur Vermeidung von Unfällen und Missbräuchen beitragen (vgl. Europäische Kommission 2019b, S. 50; vgl. Bestaoui Sebbane 2018, S. 7–8).

Lufttaxis, unbemannte Frachtflugzeuge und autonome Logistikdrohnen im urbanen Gebiet zur Paketzustellung fallen unter diese spezielle Kategorie, da diese Anwendungszwecke der bemannten Luftfahrt ähneln. Aufgrund der sehr innovativen Technologiekonzepte und der dadurch erforderlichen rechtlichen Genehmigungsprozesse steht diese Kategorie noch vor wesentlichen Hürden in der Umsetzung und erfordert eine Anpassung an bestehende Luftfahrtgesetze (vgl. EASA 2021, o.S.).

2.3 Eingrenzungen des Untersuchungsbereichs

Das in dieser Arbeit adressierte Vorgehensmodell soll einen Beitrag zur Einführung von industriell genutzten Drohnen für den effizienten Materialtransport am Werksgelände leisten. Dabei unterliegt das Modell technischen und rechtlichen Rahmenbedingungen, die die Einführung im industriellen Umfeld beeinflussen. Um den Einsatz in einem definierten Rahmen zu ermöglichen, wird der Untersuchungsbereich daher eingegrenzt. Der Eingrenzungsbereich wird in einen technologischen und einen prozessualen Themenabschnitt unterteilt. Der technologische Abgrenzungsbereich umfasst sowohl die Drohnenkategorien und -steuerungen als auch die zu transportierenden Güter, die wesentlich in die Auswahlkriterien des Modells einfließen. Der prozessbezogene Eingrenzungsbereich berücksichtigt den Einsatzort und die Materialflussebene im Unternehmen, was sich

direkt auf die industrielle Umsetzungsfähigkeit auswirkt. Der Untersuchungsraum wird gemäß der Abbildung 13 nach mehreren Aspekten eingegrenzt.

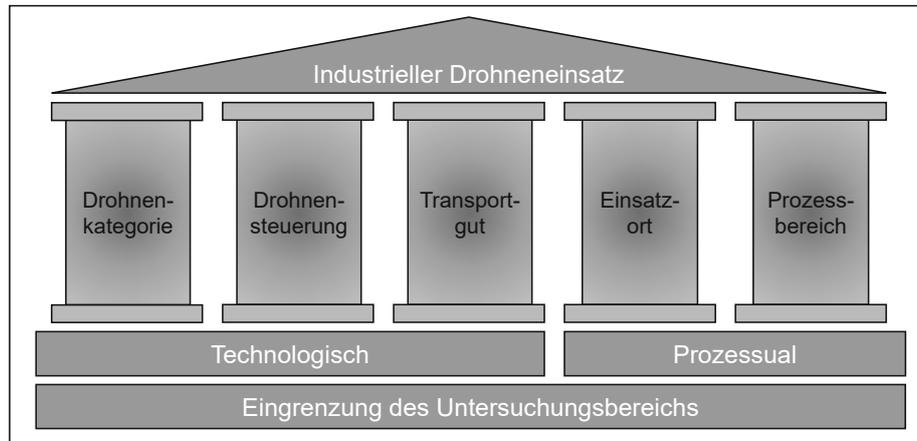


Abbildung 13: Thematische Eingrenzung (eigene Darstellung)

Die definierten Kategorien, für die das nachfolgend entwickelte Vorgehensmodell eine hinreichende Gültigkeit aufweisen soll, werden im folgenden Abschnitt näher erläutert.

2.3.1 Technologische Eingrenzung

1. Drohnenkategorie

Aus den jeweiligen Anwendungsszenarien der Drohne resultieren die Bauform und die Kategorie (vgl. Namuduri et al. 2018, S. 2). Aufgrund der baulichen Gegebenheiten im industriellen Umfeld und der notwendigen Manövrierbarkeit auf engstem Raum werden in der vorliegenden Arbeit ausschließlich handelsübliche Industriedrohnen mit hoher Flugwendigkeit berücksichtigt. In Bezug auf die Vor- und Nachteile der jeweiligen Einsatzklassen (vgl. Kapitel 2.2.3) werden ausschließlich Bauformen mit mehreren Rotorpaaren, sogenannte Mehrfachrotoren, in dieser Arbeit näher betrachtet. Drohnen mit fixen Tragflügeln oder einem Einzelrotor sowie hybride Ausführungsformen werden daher nicht behandelt, da diese Kategorien wesentliche Restriktionen bezüglich Wendigkeit in baulich verwinkelten Einsatzbereichen aufweisen.

Damit eine alternative Transportmöglichkeit im Unternehmen etabliert werden kann, muss eine Tragfähigkeit (vgl. Kapitel 2.2.4) der Drohne von mindestens 0,5 kg gewährleistet werden. Kategorien, die diese technischen Eigenschaften nicht erfüllen, stehen nicht im Betrachtungsfokus. Außerdem müssen spezifische Transportaufnahmeverrichtungen auf der Drohne montierbar sein, wobei die dafür notwendige Bauteilentwicklung des Greifmechanismus und die unterstützend wirkenden Landeplattformen nicht im Fokus der Arbeit stehen. Das bedeutet, dass ausschließlich Anforderungskriterien für eine allgemeingültige Bauteilumsetzung definiert werden.

Zur Gewährleistung der operativen Einsatzfähigkeit erfolgt außerdem eine Eingrenzung auf Drohnenkategorien, die mindestens der Schutzklasse IP43 genügen. Damit soll ein Wassereintritt bei schlechten Witterungsbedingungen während des Einsatzflugs verhindert werden.

Um die rechtlichen Voraussetzungen (vgl. Kapitel 2.2.8) im Zuge des Genehmigungsprozesses bei der Luftfahrtbehörde zu erfüllen, werden ausschließlich Drohnen in die engere Auswahl genommen, die bei Notwendigkeit das Nachrüsten von Sicherheitssystemen (z. B. Fallschirmsysteme) erlauben, um das Sicherheitsrisiko zu minimieren. Algorithmen und Programmierungen, die spezielle Flugeigenschaften während Notsituationen erlauben, jedoch einen Eingriff in die Hard- und Software der Drohne voraussetzen, werden nicht berücksichtigt.

2. Drohnensteuerung

Bei der Betriebsart der Drohnen im Arbeitsprozess richtet sich der Fokus auf vorprogrammierte Arbeitsroutinen, wobei der Pilot bei einer Fehlermeldung des Systems fähig ist, in die Steuerung manuell einzugreifen und Instruktionen zu ändern. Aufgrund der aktuell noch nicht vorhandenen Erfahrungen am Markt und fehlender Gesetzesverordnungen für autonome Flugoperationen, die vollkommen ohne Piloten auskommen und mittels Algorithmen sowie künstlicher Intelligenz operieren, richtet sich diese Arbeit auf automatisierte Prozessausführungen (vgl. EASA 2019b, S. 11).

Der Steuerungsbereich der Drohne fokussiert sich auf den VLOS-Sichtbereich (vgl. Kapitel 2.2.6), um jederzeit in Flugmanöver manuell eingreifen zu können. BVLOS-Flugoperationen werden aufgrund aktueller rechtlicher Bestimmungen in Österreich und komplexer bauteiltechnischer Umsetzungsfähigkeit mit handelsüblichen Industriedrohnen in dieser Arbeit nicht näher behandelt.

3. Transportgut

Wie bereits in der Eingrenzung der Drohnenkategorien erläutert, konzentriert sich diese Arbeit auf Multicopter zur Abwicklung von Transportaufwänden. Das Transportgut umfasst u.a. mechanische oder elektrische Bauteile, Verbrauchsteile sowie Kleinteile mit einem Gewicht zwischen $0,1 \text{ kg} \leq x \text{ kg} \leq 5 \text{ kg}$. Die transportfähige Bauteilgröße der Güter ist wesentlich von der Drohnenbauform (vgl. Kapitel 2.2.3) und den dadurch beeinflussten Flugeigenschaften der Drohne (vgl. Kapitel 2.2.4) abhängig. Für die vorliegende Arbeit werden Transportgüter mit Abmessungen (L x B x H) von maximal 160 mm x 100 mm x 100 mm betrachtet. Die zu transportierenden Teile werden zum Schutz vor Umwelteinflüssen ausschließlich mit standardisierten Transportbehältern befördert. Aufgrund der rechtlichen Bestimmungen ist der Transport von explosionsfähigen, chemischen und biologischen Gütern mit Drohnen nicht gestattet, wodurch dieser Anwendungsfall nicht näher

untersucht wird. Es werden daher ausschließlich Teile transportiert, die kein Sicherheitsrisiko für Personen und die Umwelt darstellen.

2.3.2 Prozessuale Eingrenzung

1. Einsatzort

Im Rahmen dieser Arbeit wird ausschließlich der Einsatz von Drohnen im Außenbereich behandelt. Das Untersuchungsgebiet beschränkt sich hierbei auf die vorliegenden Werksgrenzen des Unternehmens. Produktionsstätten, die durch eine Verkehrsstraße baulich voneinander getrennt sind, werden nicht betrachtet. Materialtransporte, die mit Drohnen im Innenbereich erfolgen, sind in der vorliegenden Arbeit nicht von Relevanz. Auch der kombinierte Einsatz von Drohnen, die sowohl für den Innen- als auch Außenbereich konzipiert sind, wird nicht weiter thematisiert.

Auf Basis der Erkenntnisse aus dem Grundlagenteil (vgl. Kapitel 2.2.5) erfolgt eine geografische Eingrenzung auf das Land Österreich, da zwar die allgemeinen rechtlichen Rahmenbedingungen eine europaweite Gültigkeit besitzen (vgl. Kapitel 2.2.8), jedoch diverse Flugverbotszonen und Flugbeschränkungsgebiete auf Einzelstaatsebene gelten. Das Einsatzgebiet und aktuelle Beschränkungen sind im erwähnten Grundlagenkapitel 2.2.5 in Abbildung 9 dargestellt. Die farblichen Markierungen zeigen Einsatzgebiete, in denen erhöhte Sicherheitsvorkehrungen gelten. Aufgrund dieser Gegebenheiten werden in der vorliegenden Arbeit nur Einsatzorte betrachtet, in denen der Betrieb von Drohnen durch die Luftfahrtbehörde genehmigt ist. Unternehmensstandorte, die sich in erweiterten militärischen Fluggebieten befinden, werden dabei nicht berücksichtigt.

2. Prozessbereich

Die Grundlagen zu den innerbetrieblichen Materialtransporten wurden bereits im Kapitel 2.1.1 näher beschrieben. Da die Funktionsbestandteile der Intralogistik das Transportieren, Umschlagen, Kommissionieren und Verpacken sind, ist es notwendig, diesen Betrachtungsbereich zu präzisieren (vgl. Bichler et al. 2010, S. 18).

Die Funktionsweise des Transports ist durch die Überwindung von Distanzen mit verfügbaren Transportmitteln (vgl. Kapitel 2.1.3) gekennzeichnet (vgl. Pfohl 2018, S. 169). Diesbezüglich wird in der vorliegenden Forschungsarbeit der Materialtransport mit Drohnen am Werksstandort analysiert. Der in Abbildung 14 markierte Betrachtungsbereich (Ebene 2) bezieht sich auf die werksintere Materialflussebene und lässt Drohnentransporte über die Werksgrenzen hinaus außer Betracht.

Die Einsatzreichweite von Drohnen ist maßgeblich von den Werkslayoutstrukturen abhängig, wobei Transportflüge ausschließlich im bereits eingegrenzten VLOS-Sichtbereich innerhalb der Werksgrenzen untersucht werden. Für die Flughöhe

werden die geltenden rechtlichen Vorschriften in der Einsatzkategorie „Specific“ (vgl. Kapitel 2.2.8) herangezogen und auf die unternehmensspezifischen Anwendungsfälle angewendet. Um eine ausreichende Sichtverbindung zur Drohne und im Notfall eine optimale Reaktionszeit für Sicherheitssysteme zu gewährleisten, wird die Einsatzhöhe am Werksgelände auf maximal 50 Meter festgesetzt.

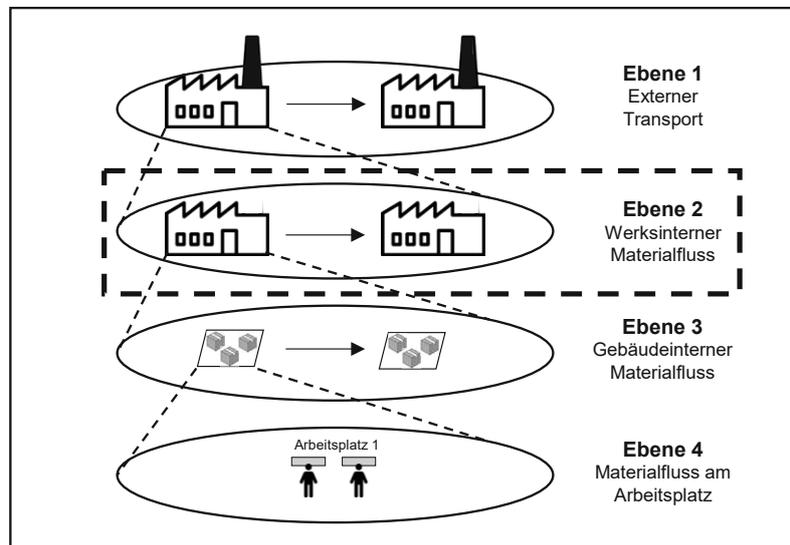


Abbildung 14: Materialflussebenen in der Intralogistik (eigene Darstellung in Anlehnung an Friedrich 2013, S. 41)

2.4 Zusammenfassung des Kapitels

In Kapitel 2 wird zunächst die Relevanz von Drohnen als alternativer Transportansatz in der Logistik hervorgehoben und es werden die dafür notwendigen technologischen und rechtlichen Rahmenbedingungen erörtert. Zur Verständnisbildung erfolgen anfänglich Begriffsdefinitionen, die eine Relevanz für den Betrachtungsbereich besitzen. Darauf aufbauend werden nutzbare Drohnenkategorien und Einflussgrößen auf die Flugdynamik während Materialtransporten näher erläutert. Zudem werden die wesentlichen Vorteile des Drohnenverkehrs in der Intralogistik und die dadurch erzielbaren Optimierungspotenziale beleuchtet.

Zusätzlich erfolgt eine detaillierte Betrachtung der Betriebsarten im Außenbereich, die wesentlich von den geltenden rechtlichen Regulationen in der Europäischen Union beeinflusst werden. Am Beispiel Österreich wird die rechtliche Grundlage für den notwendige Zertifizierungsprozess der Drohneinsätze bei der Luftfahrtbehörde präzisiert.

Abschließend erfolgt die thematische Eingrenzung des Untersuchungsbereichs in einen technologischen und prozessualen Themenbereich. Die Übertragungsfähigkeit des Modells und der Systembauteile auf angrenzende Anwendungsbereiche wird in Kapitel 7 beschrieben.

3 Stand der Wissenschaft und Technik

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand in Wissenschaft und Technik zur Nutzung von Drohnen für den intralogistischen Materialtransport dargelegt. Aufbauend auf den in Kapitel 2.3 beschriebenen Eingrenzungen des Betrachtungsbereichs werden in Kapitel 3.2 identifizierte Vorgehensmodelle aus der Literaturrecherche gegenübergestellt, die sich mit der prozessualen und technologischen Umsetzbarkeit der Drohneneinführung auseinandersetzen. In Kapitel 3.3 werden wissenschaftlich relevante Ansätze zur Umsetzung von Transportaufnahmeverrichtungen betrachtet und hinsichtlich ihrer Funktionalität sowie Umsetzbarkeit bewertet. Aktuelle Ansätze zur Einbindung von Lande- und Übergabepattformen in den Drohnentransport werden abschließend in Kapitel 3.4 vorgestellt.

3.1 Vorgehensweise der Literaturanalyse

Zur Schaffung einer validen Grundlagenbasis für die Entwicklung des Vorgehensmodells, welches die Auswahl und Einführung von Drohnen für den intralogistischen Materialtransport sowie dafür notwendigen Anforderungen an eine Transportaufnahmeverrichtungen und Landeplattform integriert, dient eine systematisch durchgeführte State-of-the-Art Literaturanalyse. Um eine strukturierte Vorgehensweise bei der Recherche und dem darauf aufbauenden Reviewprozess zu gewährleisten, wird auf die Grundzüge von Ramdhani et al. (vgl. 2014, 47-56) zurückgegriffen.

Den Beginn der Literaturanalyse bildet die Schlagwortsuche in einschlägigen wissenschaftlichen Datenbanken, darunter (a) Science Direct, (b) Springer Link, (c) IEEE Xplore und (d) Google Scholar. Hierbei werden sowohl englisch- als auch deutschsprachige Literaturquellen einbezogen, wobei die präferierte Publikationssprache Englisch ist. Die Relevanz der identifizierten Publikationen wird mit den Titelbezeichnungen und Kurzbeschreibungen der ausgewiesenen wissenschaftlichen Arbeiten überprüft. Nach abgeschlossener Vorselektion erfolgt eine inhaltliche Detailanalyse der Arbeiten in Bezug auf die definierte Problemstellung und den Untersuchungsraum. Die relevanten Publikationsergebnisse werden miteinander verglichen und etwaige Synergien aufgezeigt. Anhand der quantifizierten Erkenntnisse werden die finalen Arbeiten hinsichtlich ihrer möglichen Beitragsleistung für die Zielsetzung der Forschungsarbeit bewertet. Darauf aufbauend lassen sich der notwendige Forschungsbedarf und die spezifischen Forschungsfragen formulieren. Trotz systematischer und detaillierter Vorgehensweise bei der Literaturanalyse wird aufgrund des dynamisch wachsenden Forschungsbereichs kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben. Die eingegrenzten Arbeiten in Bezug auf den Einführungsprozess, die Auswahl und den Betrieb von Drohnen sowie existierende

Ansätze für Transportaufnahmeverrichtungen können nachfolgender Tabelle 4 (siehe Seite 44) und Tabelle 5 (siehe Seite 46) entnommen werden.

3.2 Vorgehensmodelle für die Einführung, Auswahl und den Betrieb von Drohnen für den Materialtransport

Im Zuge der Literaturrecherche zeigte sich die begrenzte Anzahl an wissenschaftlichen Modellen, die sich mit der Implementierung von Drohnen in Unternehmen auseinandersetzen. Großteils lassen sich unternehmensinterne Entwicklungen identifizieren, die jedoch keine aussagekräftigen Informationen hinsichtlich des Einführungsprozesses liefern. Beispielhaft ist der Transport von Airbags und Lenkrädern in der Automobilindustrie mittels Drohne zwischen zwei Standorten des Unternehmens SEAT S.A. (vgl. 2022, o.S.) sowie der Probentransport am Werksgelände eines Stahlerzeugers zu erwähnen (vgl. Doks Innovation 2020, o.S.).

In der Metastudie von Kellermann et al. (vgl. 2019, S. 1–13), die 111 interdisziplinäre wissenschaftliche Veröffentlichungen im Zeitraum 2013 bis 2019 im Bereich Transportdrohnen in der Logistik umfasst, entfallen lediglich 20 Forschungsarbeiten auf intralogistische und 13 auf gesetzliche Themen. Im folgenden Abschnitt werden aktuelle Modelle zur Einführung von Drohnen in Unternehmen beschrieben. Dabei fokussiert sich die nachfolgende Detailanalyse auf vier relevante Publikationen, die sich mit der Einführung, Auswahl und dem Betrieb von Drohnen beschäftigen.

3.2.1 Modell von Vlahovic et al. (2016) zur Einführung von Drohnen

Vlahovic et al. (vgl. 2016, S. 4026–4031) untersuchen die Voraussetzungen für die Implementierung von Drohnen am Fallbeispiel der pharmazeutischen Industrie. Das Modell befasst sich mit der Auslegung von operativen Prozessen und der Simulation drohnengestützter Einsätze zur Überbrückung der Transportroute zwischen zwei definierten Stellen. Zur Validierung der Funktionalität und Leistungsfähigkeit des Modells erfolgt ein qualitativer Vergleich zwischen der Materialbereitstellung mittels Kleintransporter und Transportdrohne, und zwar sowohl im zeitlichen als auch im wirtschaftlichen Kontext (siehe Abbildung 15).

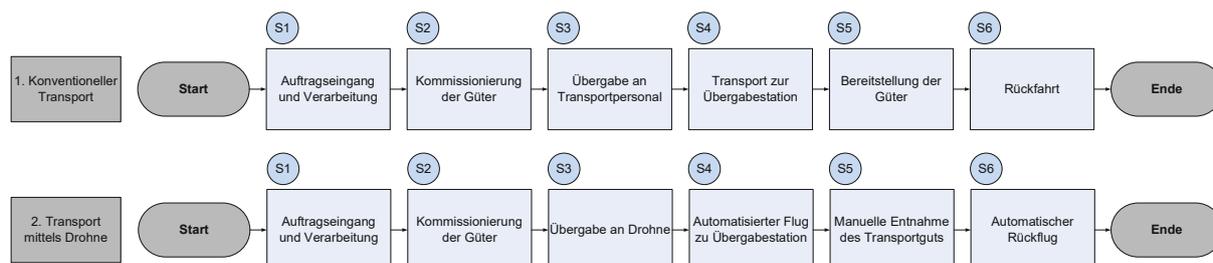


Abbildung 15: Prozessablauf konventioneller Transport versus Drohnentransport(eigene Darstellung in Anlehnung an Vlahovic et al. 2016, S. 4027–4028)

Eine wesentliche Restriktion bei der Zustellung mit dem Transporter ist die notwendige Nutzung einer Fähre für den Transport zwischen der Quelle und Senke. Durch die beschränkten Abfahrtszeiten und geringe Transportgeschwindigkeit der Fähre kommt es zu massiven Abweichungen bei der Zustelldauer und beim Lieferservicegrad.

Die Zeitersparnis durch die Nutzung der Transportdrohne liegt bei 60 % gegenüber dem konventionellen Transportmittel. Neben dem zeitlichen Vorteil sind bis zu 50 % höhere Gewinne durch den Drohneneinsatz in dem Fallbeispiel gegenüber dem traditionellen Transport erzielbar, und zwar trotz einer Kapazitätserhöhung um weitere vier Pakete pro Transportfahrt mit dem Kleintransporter. Durch den Einsatz der Drohne sind außerdem 185 zusätzliche Materialbereitstellungen im Vergleich zum Referenztransportmittel realisierbar.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Autoren trotz ökonomischer Bewertung auf die Definition eines adäquaten Vorgehensmodells inklusive notwendiger Maßnahmenschritte zur Implementierung einer Drohne verzichten. Grundlagenbasierte Entscheidungsmethoden zur Technologieauswahl in Kombination mit definierten Handlungsschritten (z. B. rechtlichem Genehmigungsprozess) für den Einführungsprozess in Unternehmen werden in diesem Modell nicht näher betrachtet.

3.2.2 Modell von Wrycza et al. (2017) zur Einführung von Drohnen

Wrycza et al. (vgl. 2017, S. 1–10) beschreiben die Implementierung einer autonomen Drohne im Automobilbereich zur Reduktion der Transportzeit bei der Anlieferung von eiligen Gütern am Werksgelände und die Konzeptionierung der dafür erforderlichen Transportaufnahmevorrichtung. Es werden dabei Transportzeiten kalkuliert, erhoben und auf Basis der Modellkriterien ausgewertet. Die Autoren ziehen außerdem einen Vergleich zwischen dem bestehenden Prozessablauf sowie dem Drohnentransport mit manuellem als auch automatischem Lastwechsel.

Die Unterschiede im Prozessablauf zwischen manuellem Transport und Drohnentransport beim Modell von Wrycza et al. (2017) sind in nachfolgender Abbildung 16 dargestellt.

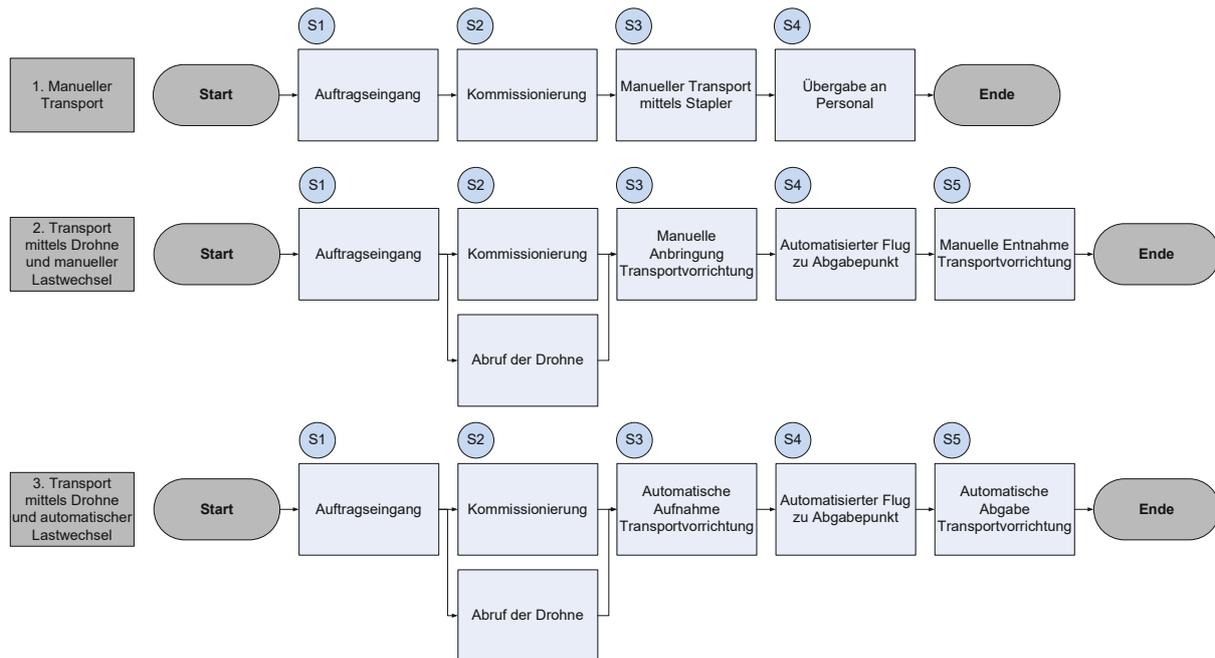


Abbildung 16: Gegenüberstellung von manuellem Transport versus Drohnen-transport in der Automobilindustrie (eigene Darstellung in Anlehnung an Wrycza et al. 2017, S. 6)

Trotz des zusätzlichen Prozessschritts beim Transport mit der Drohne ist eine Reduktion der Gesamtprozesszeit durch die automatisierte Lastaufnahme (Prozessnummer 3 in Abbildung 16) von 43 % gegenüber dem manuellen Transport (Prozessnummer 1) erzielbar. Die vollautomatisierte Variante (Prozessnummer 3) ermöglicht eine Prozesszeitminimierung von 17 % gegenüber der manuellen Anbringung der Transportvorrichtung (Prozessnummer 2) auf der Drohne. Die prozentualen Zeiteinsparungen basieren auf einem Referenzszenario, bei dem der manuelle Transport mit einem herkömmlichen Flurförderfahrzeug (z. B. Stapler) mit einer Geschwindigkeit von 10 km/h über eine Distanz von 1500 m erfolgt. Im Vergleich dazu nutzt die Drohne den direkten Luftweg, der 900 m beträgt. Die erhebliche Zeiteinsparung gegenüber dem manuellen Transport wird durch die Fluggeschwindigkeit von 30 km/h während des Drohnenflugs erzielt.

Die Studie und Konzeptionierung der Lastaufnahme gehen zusammenfassend weder auf die nötigen Maßnahmenschritte für die Unternehmenseinführung von Drohnen für den Materialtransport ein, noch beschäftigen sie sich mit den rechtlichen Herausforderungen und Restriktionen im Außenbereich.

3.2.3 Modell von Fritsch et al. (2020) zur Einführung von Drohnen

Fritsch et al. (vgl. 2020, S. 1) analysieren die Potenziale und Voraussetzungen für den innerbetrieblichen Einsatz von Logistikdrohnen im Vergleich zu konventionellen Transportsystemen. Dabei wird auch Bezug auf die Auswahl einer geeigneten Drohne für den Anwendungsfall genommen. Das Modell beinhaltet sowohl eine Nutzwertanalyse und statistische Investitionsrechnung im Einzelnen als auch die

kombinierte Bewertung beider Methoden und dient als Entscheidungsgrundlage für die Einführung von Logistikdrohnen. Dabei werden Investitions-, Betriebs-, Arbeits- und Zeitkosten berücksichtigt. In der Nutzwertanalyse werden verschiedene Kriterien in vier Hauptkategorien zusammengefasst und gleichmäßig gewichtet, um eine aussagekräftige Bewertung zu erhalten. Die einzelnen Einflussgrößen werden je nach Erfüllungsgrad mit 1–3 Punkten bewertet. In der Nutzwertanalyse werden Gabelstapler, Schlepper, Fahrerlose Transportsysteme (FTS) und eine Drohne betrachtet, wobei Letztgenannte mit 82 % den höchsten Nutzwert erzielt; im Vergleich dazu Gabelstapler 67 %, Schlepper 69 % und FTS 79 %. Auf Basis der Analysen ist eine datenbasierte Technologieauswahl und Reihung von Alternativkonzepten möglich. Die Inputfaktoren zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung plus die Bewertungseinflüsse sind in Abbildung 17 ersichtlich und dienen weiters als Referenz für die im Vorgehensmodell entwickelten wirtschaftlichen Bewertungsverfahren.

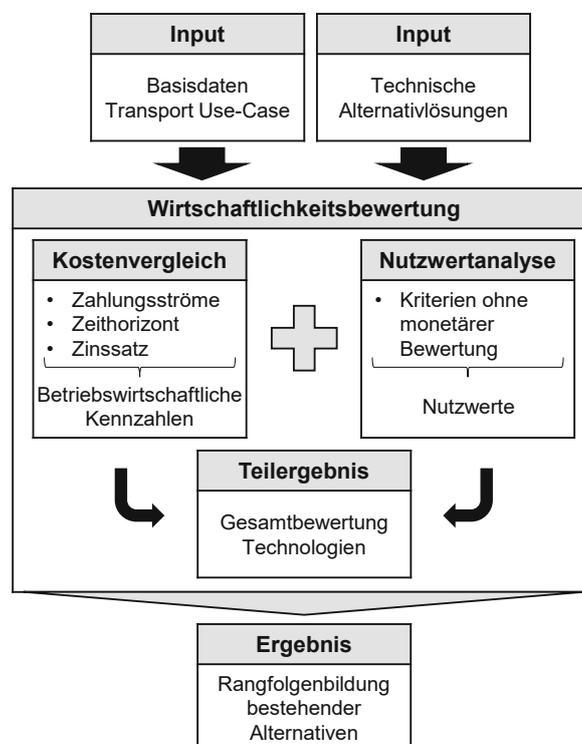


Abbildung 17: Bewertungsmodell als Entscheidungsgrundlage für den Technologieeinsatz (eigene Darstellung in Anlehnung an Fritsch et al. 2020, S. 6)

Zur Evaluierung des Modells werden fünf logistische Use-Cases in Bezug auf den Materialtransport definiert und mit der Kostenvergleichsmethode bewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Drohne – abhängig vom Einsatzszenario – eine wirtschaftliche Lösung für den Materialtransport darstellen kann. Die größten Vorteile ergeben sich für die Drohne bei Transporten mit kleinen und leichten Gegenständen oder bei Dringlichkeitsaufträgen. Die Autoren konstatieren jedoch, dass der Drohneneinsatz aufgrund aktuell bestehender Nachteile wie z. B. geringe Traglast und mangelnde Batterieleistung gegenüber konventionellen Transportmitteln keine

Universallösung ist, sich das jedoch mit technologischen Weiterentwicklungen zukünftig ändern kann. Forschungsbedarf besteht in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Logistikdrohnen in Kombination mit konventionellen Transportsystemen (vgl. Fritsch et al. 2020, S. 1–11). Trotz der Bewertungsmethodik zur Technologieentscheidung liefert das Modell weder eine Möglichkeit zur Vorabprüfung der Eignungsfähigkeit eines potenziellen Drohneneinsatzes, noch stellt es Handlungsschritte für den abschließenden Einführungsprozess in einem Unternehmen für den Außeneinsatz dar. Außerdem wird kein Bezug auf die erzielbaren Transportkosten in Abhängigkeit der Gesamttransportanzahl pro Jahr für die Drohnentechnologie und die Alternativsysteme genommen.

Diese Feststellung deckt sich mit den Aussagen von Fritsch und Stonis (2019, S. 585), die den Forschungsbedarf mit folgendem Zitat untermauern: *„Aktuell sind jedoch keine Vorarbeiten bekannt, welche die Potenziale und Anforderungen des innerbetrieblichen Einsatzes von Multikoptern untersuchen.“*

3.2.4 Modell von Perez-Grau et al. (2021) zur Einführung von Drohnen

Perez-Grau et al. (vgl. 2021, S. 312) untersuchen die Implementierung einer autonomen Drohne im Innenbereich eines Produktionsunternehmens in der Luftfahrtindustrie für den Materialtransport von Kleinteilen. Sie beleuchten zunächst die unternehmensspezifischen Anforderungen und Sicherheitskriterien für die Implementierung am Standort. Darauf aufbauend konzipieren sie eine Transportaufnahmevorrichtung für den Materialtransport.

In dem Beispiel entfallen 98 % aller internen Logistikaufträge auf Kleinteiltransporte unter 500 g. Als Transportmittel wird ein Hexacopter verwendet, der mit einem LiDAR- (Light Detection and Ranging-)Sensor ausgestattet ist, wodurch der autonome Flug im Innenbereich gewährleistet wird. Zur Orientierung werden digitale Markierungen, sogenannte Waypoints, in der Software definiert, anhand derer sich die Drohne zwischen der Quelle und Senke fortbewegt. Der automatisierte Abruf der Drohne erfolgt über ein Dashboard des Produktionsmitarbeiters an der Arbeitsstation, die Bestückung der Drohne mit dem angeforderten Teil im Ersatzteillager findet durch einen Mitarbeiter manuell statt. Die Übergabe des Transportguts erfolgt durch das Abwerfen des kommissionierten Teils aus der Luft in eine vordefinierte Auffangbox.

Nach abgeschlossener Sicherheitsanalyse wird im Vorgehensmodell der Einsatzbereich im Detail definiert. Es wird der Flugbereich eingegrenzt und die Position notwendiger Sicherheitsnetze definiert. Zusätzlich wird ein neuer Bereitstellungsprozess entwickelt, um Personen während des operativen Betriebs

nicht zu gefährden. Nach der Definitionsphase werden umfangreiche Sicherheits- und Zuverlässigkeitstests in einer abgegrenzten Umgebung und in der Produktionshalle durchgeführt. Das System erzielt bei den Tests eine Navigationszuverlässigkeit von 96 % und erreicht eine Bereitstellungsquote von 97,4 % (vgl. Perez-Grau et al. 2021, S. 312–324). Zusammenfassend sei erwähnt, dass auch dieses Modell auf die Festlegung von aufeinander aufbauenden Maßnahmenschritten zur Implementierung einer Drohne für den Materialtransport verzichtet.

3.2.5 Fazit Vorgehensmodelle

Die in den Kapiteln 3.2.1 bis 3.2.4 beschriebenen wissenschaftlichen Arbeiten zeigen deutlich die Lücke im Stand der Wissenschaft und Technik in Bezug auf ein systematisches Vorgehensmodell zur Einführung von Drohnen im industriellen Umfeld für den Materialtransport auf. Das deckt sich mit den Aussagen von Fritzsche und Stonis (2019, S. 585), die die Problematik von fehlenden Vorarbeiten zu den Unternehmensanforderungen für den innerbetrieblichen Drohneneinsatz betonen. Durch das neuartige und dynamisch wachsende Forschungsfeld kann daher das Potenzial von Transporten mithilfe von Drohnen in Unternehmen aktuell nicht vollumfänglich ausgeschöpft werden.

Darüber hinaus ist anzumerken, dass die identifizierten Publikationen die geltenden europäischen Rechtsgrundlagen und notwendigen Risikoeinschätzungsmaßnahmen für den Außeneinsatz je eingesetzter Drohnenkategorie innerhalb des Genehmigungsprozesses bei der Luftfahrtbehörde vernachlässigen. Aufgrund der Komplexität der rechtlichen Regularien innerhalb der eingegrenzten Einsatzkategorie sind diese Schritte im Zuge des Implementierungsprozesses allerdings unumgänglich.

Abschließend werden die betrachteten Forschungsarbeiten für die Einführung, Auswahl und den Betrieb von Drohnen für den Materialtransport in nachfolgender Tabelle 4 tiefgehender analysiert, gegenübergestellt und anhand festgelegter Eigenschaften je nach Berücksichtigungsgrad verglichen.

Tabelle 4: Qualitative Einordnung ausgewählter Ansätze zur Einführung, Auswahl und den Betrieb von Drohnen (eigene Darstellung)

Gegenüberstellung identifizierter Ansätze					
Legende		Untersuchte Arbeiten			
Grad der Erfüllung	Symbol	Vlahovic et al. (2016)	Wrycza et al. (2017)	Fritsch et al. (2020)	Perez-Grau et al. (2021)
Nicht erfüllt	○				
Teilweise erfüllt	◐				
Vollständig erfüllt	●				
Eigenschaften	Spezifikationen				
Drohnenkategorie	Fixe Tragflügel	○	○	○	○
	Einzelrotor	○	○	○	○
	Mehrfachrotor	●	●	●	●
	Hybride Bauform	○	○	○	○
Einsatzort	Indoor	○	◐	●	●
	Outdoor	●	●	◐	○
Steuerungsbereich	VLOS	○	◐	○	○
	BVLOS	●	●	○	○
Betriebsart	Automatisiert	●	●	●	○
	Autonom	○	○	○	●
	Pilotengesteuert	○	○	○	○
Betrachtungsbereich des Modells	Kostenbewertung	○	○	◐	○
	Prozessbetrachtung	●	●	○	○
	Sicherheits- und Risikobetrachtung	○	○	◐	●
	Akzeptanzbewertung	○	○	○	●
	Technologiebewertung	○	○	●	○
	Rechtliche Anforderungen	○	○	○	◐
	Implementierungsmaßnahmen	○	○	○	○

3.3 Modelle zur Transportaufnahme

Neben einer geeigneten Drohnenkategorie für den Materialtransport in Abhängigkeit des Anwendungsfalls ist die Konzeptionierung und Auslegung der Aufnahmeeinheit bzw. des Abgabemechanismus für das zu transportierende Gut von essenzieller Bedeutung, um einen automatisierten Drohnenbetrieb zu ermöglichen. Hauptkriterium für einen wirksamen Greifmechanismus ist die Fähigkeit, Objekte vollständig zu ergreifen und eine ausreichende Fixierung während des Flugs zu gewährleisten (vgl. Lieret et al. 2020a, S. 425). Neben der manuellen Transportgutbefestigung an der Drohne können alternative Manipulationsmethoden eingesetzt werden, um Objekte automatisiert aufzunehmen. Dabei greifen die Ansätze auf pneumatische oder magnetische Aufnahmeprinzipien zurück. Des Weiteren können an der Drohne montierte Seilwinden als Manipulationsverfahren aus der Luft angewandt werden (vgl. Zhao et al. 2022, S. 1; vgl. Li et al. 2021, S. 1–12; vgl. Loianno und Kumar 2018, S. 680; vgl. Kessens et al. 2016, S. 3249–3251; vgl. Pounds et al. 2011, S. 2491–2498). Dabei ähnelt diese Funktionsweise herkömmlichen Mehrschalengreifern bei Baukränen, die ein Objekt kraftschlüssig umschließen (vgl. Stavenuiter et al. 2017, S. 295–306).

Ruggerio et al. (vgl. 2018, S. 1–4) unterteilen Transportaufnahmevorrichtungen danach, ob sie direkt an der Drohne fixiert oder als flexibler mechanischer Roboterarm ausgebildet sind. Mithilfe der variabel steuerbaren Greifarme lassen sich einerseits komplexe und feinfühligere Arbeitsschritte manuell durchführen und andererseits einzelne Objekte aus der Luft form- und kraftschlüssig ergreifen (vgl. Atakuru und Samur 2018, S. 583–589; vgl. Qi et al. 2017, S. 126–131). Die Feinfühligkeit des Greifarms ist wesentlich, um Beschädigungen am Objekt zu vermeiden (vgl. Setty et al. 2020, S. 486–488; vgl. Hou et al. 2019, S. 706–708). In diesem Zusammenhang werden auch spezielle Greiffunktionen aus der Bionik auf die technischen Anwendungsfälle übertragen (vgl. Wang et al. 2020, S. 283–290). Ding et al. (vgl. 2019, S. 200–214) stellen in ihrer Studie diverse diesbezügliche Mechanismen und deren Spezifikationen gegenüber.

Vorliegende Greifmechanismen erfordern eine äußerst präzise Fortbewegung und Positionierung der Drohne, um den Aufnahme- und Abgabeprozess durchzuführen (vgl. Lieret et al. 2020a, S. 425). Dahingehend werden in den folgenden Kapiteln Ansätze gegenübergestellt, die als Basis für die Anforderungskriterien des adressierten Greifsystems im Vorgehensmodell dienen.

Innerhalb der durchgeführten Literaturrecherche konnten insgesamt 19 relevante Publikationen identifiziert werden, die sich mit der Entwicklung einer für den Anwendungsfall notwendigen Transportaufnahmeeinheit auf der Drohne beschäftigen. Die nachfolgende Tabelle 5 zeigt die identifizierten und analysierten

wissenschaftlichen Arbeiten in Bezug auf das Aufnahmeprinzip, den Einsatzort der Drohne und der transportfähigen Objektform. Anhand der Erkenntnisse werden fünf Modellansätze (gekennzeichnet durch ✓) zur Detailanalyse übernommen und im weiteren Verlauf gegenübergestellt. Ausgeschlossene Ansätze sind mit ✗ markiert.

Tabelle 5: Modellvergleich von Transportaufnahmesystemen (eigene Darstellung in Anlehnung an Taschner et al. 2022, S. 3)

Modellvergleich von Transportaufnahmesystemen											
Legende			Aufnahmeprinzip				Einsatzort		Objektform		Übernahme von Ansätzen zur weiteren Detailanalyse
Berücksichtigungsgrad	Symbol		Magnetisch	Pneumatisch	Kraftschlüssig	Formschlüssig	Indoor	Outdoor	Standardisiert	Variabel	
Nicht berücksichtigt	○										
Teilweise berücksichtigt	◐										
Berücksichtigt	●										
Nr.	Jahr	Literaturverweis									
1	2011	<i>Pounds et al.</i>	○	○	●	○	○	●	●	◐	✗
2	2016	<i>Kessens et al.</i>	○	●	○	○	●	○	●	●	✗
3	2017	<i>Stavenuiter et al.</i>	○	○	●	○	k.A.	k.A.	○	●	✗
4	2017	<i>Qi et al.</i>	○	○	●	○	●	○	◐	○	✗
5	2017	<i>Wrycza et al.</i>	○	○	○	●	●	●	●	○	✓
6	2018	<i>Ruggiero et al.</i>	○	○	◐	●	○	●	●	●	✗
7	2018	<i>Atakuru und Samur</i>	○	○	◐	●	k.A.	k.A.	◐	◐	✗
8	2018	<i>Loianno und Kumar</i>	●	○	○	○	●	○	●	○	✗
9	2018	<i>Kim und Oh</i>	○	○	●	○	●	○	●	○	✗
10	2019	<i>Ding et al.</i>	○	○	◐	◐	●	◐	◐	◐	✗
11	2019	<i>Hou et al.</i>	○	○	●	○	k.A.	k.A.	●	●	✗
12	2019	<i>Lieret et al.</i>	○	○	○	●	●	○	●	○	✓
13	2020	<i>Setty et al.</i>	○	○	◐	◐	◐	○	○	●	✗
14	2020	<i>Wang et al.</i>	○	○	●	○	k.A.	k.A.	◐	●	✗
15	2020a	<i>Lieret et al.</i>	○	○	●	○	●	○	●	●	✓
16	2020b	<i>Lieret et al.</i>	○	○	○	●	●	○	●	○	✓
17	2021	<i>Perez-Grau et al.</i>	○	○	○	●	●	○	○	●	✗
18	2021	<i>Li et al.</i>	○	●	○	○	○	●	●	●	✗
19	2022	<i>Zhao et al.</i>	○	○	●	○	●	●	●	○	✓

Tabelle 5 ist zu entnehmen, dass fünf der erhobenen und analysierten Publikationen zur Detaillierung für die Entwicklung der Anforderungskriterien an eine Transportaufnahmeeinheit innerhalb des Vorgehensmodells herangezogen werden.

Bei den ausgewiesenen Ansätzen von Wrycza et al. (vgl. 2017), Lieret et al. (vgl. 2019) und Lieret et al. (vgl. 2020b) ist dies durch ihr formschlüssiges Funktionsprinzip begründet, welches Vorteile gegenüber kraftschlüssigen Prinzipien aufweist. Insbesondere beim Außeneinsatz und bei höheren Gewichtsklassen der Transportgüter weisen formschlüssige Ansätze ein geringeres Risiko gegenüber herabstürzenden Gütern auf, da das Halteprinzip nicht von äußeren Einflusskriterien (z. B. Regen) negativ beeinflusst wird.

Bei Lieret et al. (vgl. 2020a) und Zhao et al. (vgl. 2022) steht vor allem die Ansteuerungsart (z. B. durch Servomotoren) und bauliche Integration des Transportaufnahmesystems auf der Drohne im Fokus, da dies ein wesentliches Einflusskriterium für die Funktionstauglichkeit darstellt. Wie bereits einleitend erläutert, muss das Aufnahmesystem so konzipiert sein, dass Transportgüter selbstständig aufgenommen oder durch eine manuelle sowie automatisierte Beladung an den Greifmechanismus angebracht werden können (vgl. Lieret et al. 2020a, S. 425). Diesbezüglich muss die Betriebsart der Drohne (z. B. autonom) die notwendige Positionsgenauigkeit bei Landemanövern für den Greifprozess gewährleisten, um das Objekt tatsächlich vollständig zu ergreifen. Neben den technischen Aspekten muss die Transportaufnahmeeinheit qualitative Kriterien (z. B. Zuverlässigkeit, Systemstabilität, Robustheit) erfüllen, um den operativen Einsatz sicherzustellen.

Die spezifischen Eigenschaften der eingegrenzten Modellansätze werden nachfolgend detailliert beschrieben und in abschließender Tabelle 6 anhand der folgenden Fragestellungen bezüglich des jeweiligen Erfüllungsgrads bewertet:

1. Welche Betriebsart der Drohne wird mit dem Greifprozess gekoppelt?
2. Welche Ansteuerungsart des Transportaufnahmesystems wird adressiert?
3. Welche Aufnahmeprinzipien für die Transportgüter werden berücksichtigt?
4. Welche Gewichtsklassen der Transportgüter werden behandelt?
5. Welche qualitativen Kriterien werden für das Transportaufnahmesystem erfüllt?

3.3.1 Modell von Wrycza et al. (2017) zur Transportaufnahme

Wrycza et al. (vgl. 2017, S. 1–8) beschäftigen sich, wie bereits im Kapitel 3.2.2 angedeutet, mit der Auslegung einer autonomen Lastaufnahme, um eine Spielzeitreduktion für eilige Produkte am Werksgelände zu erzielen. Im Speziellen widmen sie sich der Gestaltung und Funktionsbeschreibung des Greifmechanismus.

Das ganzheitliche Konzept (siehe Abbildung 18) besteht aus einem auf dem Transportgut befindlichen Adapter und einem Gegenstück mit integrierter Schließfunktion auf der Drohne, wobei die Annäherung des Greifmechanismus an das positionierte Gut über eine bildverarbeitende Software und einen am Produkt befestigten QR-Code (Quick-Response Code) erfolgt – siehe Abbildung 19 und

Abbildung 20. Bei der Nutzung von Mehrwegbehältern wird der Adapter in den Deckel direkt integriert, um ein wiederkehrendes Befestigen mit Bändern zu vermeiden. Ein definiertes Ablagefeld zur Positionierung des Transportguts dient der Drohne als Fixpunkt im Raum, wodurch die Positionsbestimmung bei der Landung erleichtert wird. Die Fortbewegung der Drohne wird über eine Kombination aus GPS, Ultraschall und Kamerasystemen ermöglicht, da die Drohne hauptsächlich im Innenbereich eingesetzt wird (vgl. Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML 2020, o.S.). Die auf 3D-Druck basierenden Drohnenstrukturen zur Gewichtsoptimierung bauen auf einer handelsüblichen Mavic-M300-Grundplattform des Unternehmens DJI (Da-Jiang Innovations Science and Technology Co., Ltd) auf. Auf die zusätzliche Auslegung eines Landegestells wurde verzichtet, da das Modul als Landevorrichtung agiert und für ausreichende Stabilität bei Landemanövern sorgt. Das Gesamtgewicht der Drohne beträgt 6,3 kg, wobei eine Nutzlast von 2,7 kg realisierbar ist (vgl. Philipp, Wrycza: persönliche Korrespondenz, Fraunhofer-Gesellschaft – Institut für Materialfluss und Logistik IML, 29.09.2021).

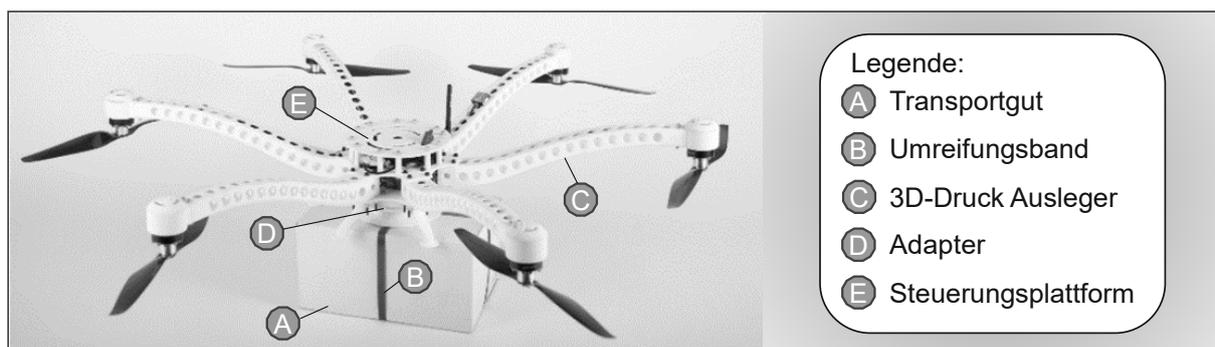


Abbildung 18: Ganzheitliche Systemarchitektur (eigene Darstellung in Anlehnung an Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML 2020, o.S.)

Das Funktionsprinzip der Aufnahmevorrichtung, die im Wesentlichen einer Fotoblende ähnelt, ist in Abbildung 19 in sechs Funktionsschritte untergliedert.

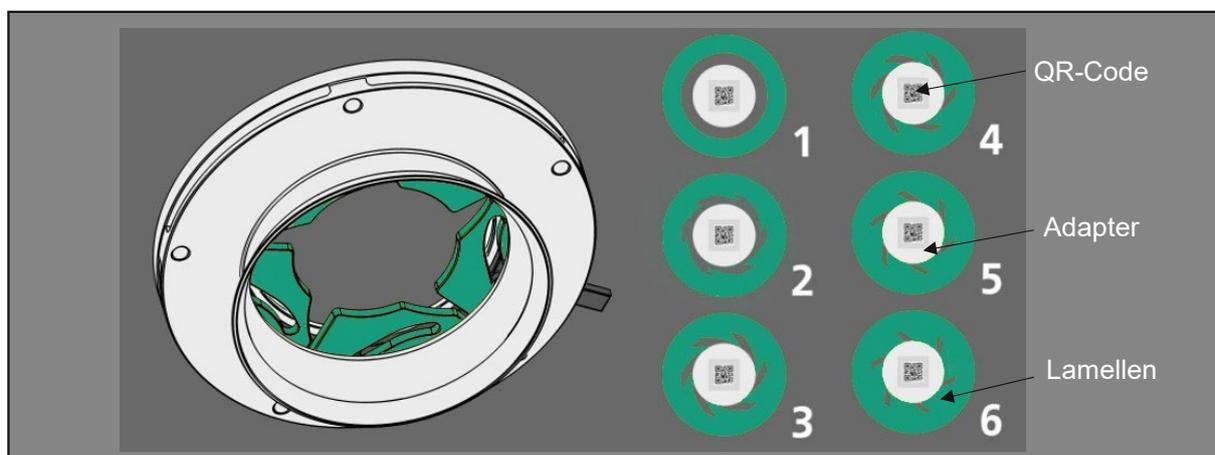


Abbildung 19: Funktionsprinzip der Transportaufnahme (eigene Darstellung in Anlehnung an Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML 2020, o.S.)

Nach Anflug der Drohne in die vordefinierte Aufnahmezone erfolgt die schrittweise Annäherung an das auf dem Transportgut angebrachte Adapterstück durch eine Kameraeinheit und Objekterkennung. Aufgrund der trichterförmigen Öffnung des Schließmechanismus (siehe Abbildung 20) wird eine Selbstzentrierung des zylinderförmigen Adapters auf dem Paket realisierbar. Durch die rotationssymmetrische Geometrie ist die Drohne in der Lage, Abweichungen in der Neigung und Position selbständig zu korrigieren. Eine schematische Vorgehensweise in drei Schritten bei Positionsabweichungen wird in Abbildung 20 gezeigt.

In Schritt 1 wird eine Positionskorrektur des Adapterstücks durch den trichterförmigen Greifmechanismus in Richtung der Mittelachse ermöglicht, wodurch Positionsabweichungen ausgeglichen werden. Nach der Landung der Drohne wird über einen Sensor das korrekte Ankoppeln geprüft. In Schritt 2 erfolgt der Verschluss der Fotoblende gemäß den einzelnen Bildphasen in Abbildung 19. Hierbei wird durch die Bewegung eines verbauten Servomotors ein Ring in Umlauf gebracht, wodurch die Lamellen ausfahren. Durch die zylinderförmige Geometrieform wird in Schritt 3 ein vollständiger Formschluss zwischen Adapterstück und Schließmechanismus realisiert (vgl. Philipp, Wrycza: persönliche Korrespondenz, Fraunhofer-Gesellschaft – Institut für Materialfluss und Logistik IML, 29.09.2021).

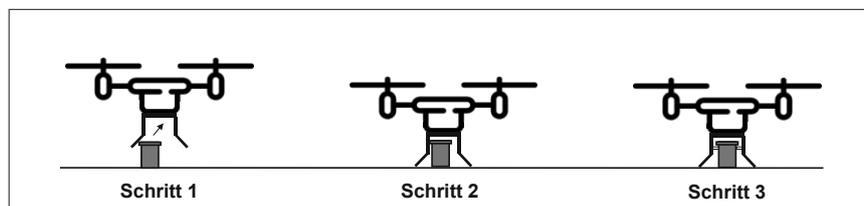


Abbildung 20: Positionsenausgleich und selbständige Zentrierung (eigene Darstellung in Anlehnung an Wrycza et al. 2017, S. 5)

Zusammenfassend sei erwähnt, dass notwendige Anforderungskriterien für die Entwicklung und bauliche Umsetzung des Transportaufnahmemechanismus gemäß einem Anforderungskatalog in dieser Publikation vernachlässigt werden.

3.3.2 Modell von Lieret et al. (2019) zur Transportaufnahme

Lieret et al. (vgl. 2019, S. 1010-1015) beschreiben die Konzeptionierung sowohl eines Greifmechanismus als auch einer automatisierten Beladungsstation (siehe Kapitel 3.4.2), um den Materialtransport von kleinen Ladungsträgern innerhalb einer Produktionshalle zu ermöglichen. Die auf Leichtbau basierende Konstruktion verfügt über mehrere Befestigungspunkte direkt an der Drohne. Damit der zu transportierende Ladungsträger sowohl in vertikaler als auch horizontaler Richtung nicht verschiebbar ist, wird die Einheit an der Front und auf der Unterseite mit ansteuerbaren Klappen gesichert (siehe Punkt A in Abbildung 21). Die Ansteuerung des Klappenmechanismus erfolgt dabei über Servomotoren. Eine schematische Funktionsskizze der

Bauteilkonstruktion ist in nachfolgender Darstellung ersichtlich, wobei die Transportaufnahmeverrichtung sowohl geöffnet als auch geschlossen visualisiert ist.

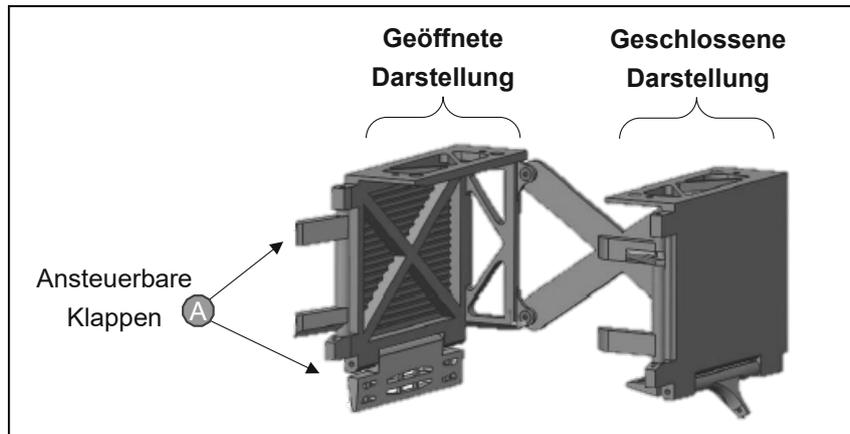


Abbildung 21: Gestaltung der Transportaufnahme (eigene Darstellung in Anlehnung an Lieret et al. 2019, S. 1012)

Lieret et al. (vgl. 2019, S. 1014–1015) weisen auf die notwendige Weiterentwicklung der automatischen Transportaufnahme hin, da mit definierter Systemarchitektur der operative Betrieb nicht gewährleistet ist. Da sich dieses Konzept wiederum nur auf den Innenbereich konzentriert, werden im Zuge des Vorgehensmodells (siehe Kapitel 5) Anforderungskriterien an den Einsatz im Außenbereich für die Zentrierungs- und Aufnahmefähigkeit des Greifers definiert und evaluiert.

3.3.3 Modell von Lieret et al. (2020a) zur Transportaufnahme

Vergleichbar mit oben beschriebenem Modell von Lieret et al. (vgl. 2019, 1010-1015) fokussieren sich Lieret et al. (vgl. 2020a, S. 425–430) ausschließlich auf die Konzeptionierung eines durch Servomotoren initiierten Aufnahmepinzips auf der Drohne für die Kommissionierung und den automatisierten Transport von Gütern. Die Autoren weisen auf die fehlenden einheitlichen Standards in der Literatur zu den Anforderungskriterien für die Entwicklung eines auf Leichtbau basierenden Greifers hin. Des Weiteren betonen sie die fehlende Verfügbarkeit von Transportaufnahmeverrichtungen mit einer sofortigen Rückmeldung über einen vermeintlich erfolgreichen Greifprozess.

Das Konzept von Lieret et al. (2020a) ist in Abbildung 22 dargestellt; die Funktionsweise und Spezifikationen der fünf Baugruppen werden im folgenden Abschnitt beschrieben. Das System des Greifprinzips ähnelt jenem von Kim und Oh (vgl. 2018, S. 279), deren Ausführung jedoch ausschließlich für den fragilen Transport von Mikrochips ausgelegt ist.

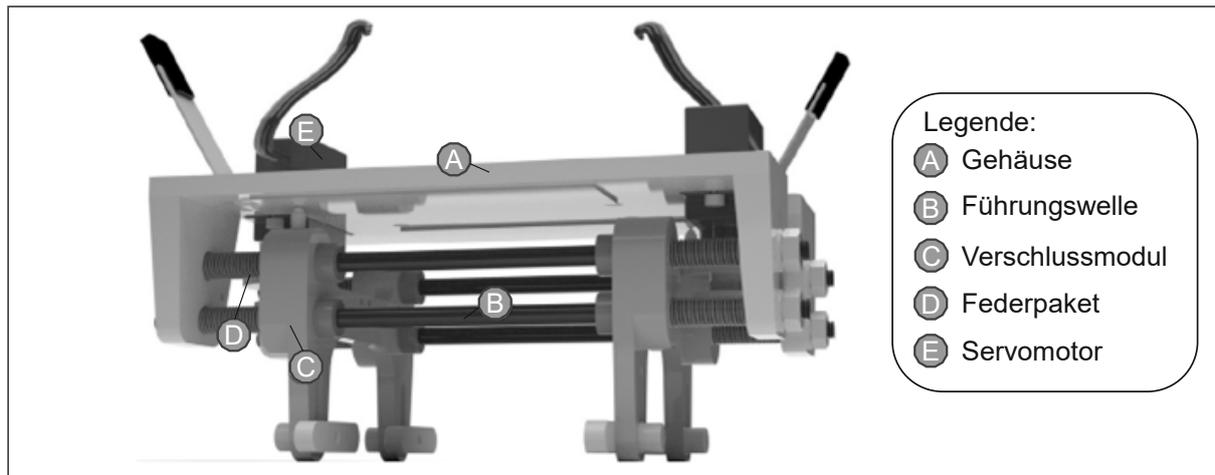


Abbildung 22: Konzeption Transportaufnahmevorrichtung (eigene Darstellung in Anlehnung an Lieret et al. 2020a, S. 426)

Als Grundkonstruktion für die Befestigung der vier Führungswellen (Bauteil B) und der zwei Servomotoren (Bauteil E) dient das in Leichtbauweise konstruierte, additiv hergestellte Gehäuse (Bauteil A), das zusätzlich über Schrauben auf der Unterseite der Drohne montiert wird. Die zwei Verschlussmodule (Bauteil C) sind über Führungswellen linear geführt und für die Haltefunktion der Transportgüter verantwortlich. Die vier Aufnahmepunkte des Greifers sind aus Gummi, um die Reibkraft zwischen den Verschlussmodulen und dem Transportgut zu maximieren. Die Übertragung der Haltekraft erfolgt über acht Federpakete (Bauteil D) entlang der Führungswellen. Zur Überwindung der Federkraft beim Öffnen des Verschlussmoduls dienen die zwei Servomotoren.

Aufgrund des kraftschlüssigen Funktionsprinzips sind mit dem dargestellten Mechanismus im Anwendungsfall nur Transportgewichte bis maximal 200 g realisierbar, was eine erhebliche Einschränkung für den Materialtransport darstellt.

Zusätzlich weist das definierte Drohnensystem Schwächen in der Positionsgenauigkeit bei Landevorgängen auf. Diese Ungenauigkeit resultiert in lediglich vier erfolgreichen von insgesamt 20 Greifversuchen, wodurch die Autoren den Greifmechanismus als nicht sicherheitszulässig einstufen und weiterführende Entwicklungsarbeit als notwendig erachten. Zudem berücksichtigen Lieret et al. (2020a) weder Umfeldeinflüsse noch rechtliche Aspekte bei der Auslegung des Schließmechanismus. Es wird auch nicht auf die speziellen Anforderungen im Außeneinsatz, die eine Vermeidung von herabstürzenden Gütern aus der Luft trotz Systemausfalls des Greifers vorschreiben, und die negativ einwirkenden Einflusskriterien (z. B. Regen, Nebel, Ölrückstände an der Produktoberfläche etc.) in Bezug auf das kraftschlüssige Halteprinzip eingegangen.

3.3.4 Modell von Lieret et al. (2020b) zur Transportaufnahme

Diese Entwicklung von Lieret et al. (2020b, 241-249) bezieht sich ähnlich den bereits oben vorgestellten Systemen auf die automatische Lokalisierung, Ergreifung und das Löseprinzip von kleinen Transportgütern mit einer Drohne. Da sich die Systementwicklung auf den Innenbereich fokussiert, wird zur Fortbewegung und Orientierung die UWB-(Ultra-wide-band-)Technologie verwendet. Die damit erzielbare Positionsgenauigkeit stellt auch eine wesentliche Anforderung an den Greifmechanismus im Außenbereich dar. Dieser ist in Abbildung 23 ersichtlich, wobei das Schließen durch einen Servomotor (Bauteil D) und einen Führungsstift erfolgt. Zur Umwandlung der Rotationsbewegung dient ein Servohebel, mit dessen Funktion der Bolzen in eine Geometrieausnehmung in der Außenhülle des Ladungsträgers formschlüssig einrastet. Zur Selbstzentrierung des Greifmechanismus bei Landemanövern dienen vier Einführungsschrägen an der Innenkante des Systems.

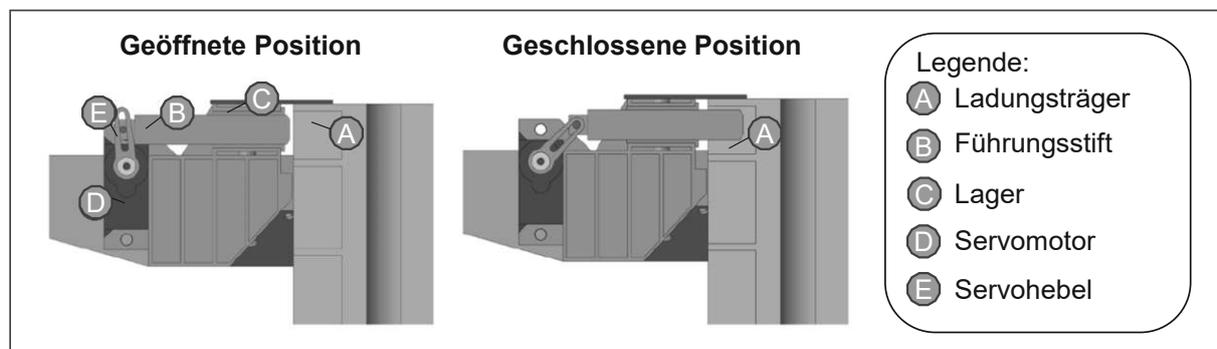


Abbildung 23: Systemkonfiguration und Funktionsprinzip (eigene Darstellung in Anlehnung an Lieret et al. 2020b, S. 243)

Lieret et al. (2020b, S. 249) bekräftigen den weiterhin bestehenden Forschungsbedarf zur Systemzuverlässigkeit automatischer Aufnahme- und Abgabeprozesse. Aufgrund fehlender Anforderungskriterien an den Greifmechanismus lässt sich eine allgemeingültige Bauteilkonstruktion auf Basis eines Anforderungskatalogs auch mit diesem Modell nicht ableiten.

3.3.5 Modell von Zhao et al. (2022) zur Transportaufnahme

Zhao et al. (vgl. 2022, S. 1–13) fokussieren sich auf die Produktentwicklung des Greifmechanismus und die Erprobung der Effektivität, verschiedene Objekte mit dem konzipierten System zu greifen. Die Funktionsfähigkeit wird anhand unterschiedlicher Objekteigenschaften, wie z. B. Bauteilgröße, Bauform, Oberflächenart, in Versuchen evaluiert. Zusätzlich wird überprüft, wie sich die Integration des Greifers auf das Flugverhalten der Drohne auswirkt. Die Systemkonfiguration (siehe Abbildung 24) besteht aus vier Greifarmen (Bauteil A), die über eine Scherengliedkonstruktion (Bauteil B) mechatronisch durch vier symmetrisch angeordnete Servomotoren (Bauteil C) betätigt werden. Die Strukturveränderung des Mechanismus, während eines

Schließ- bzw. Öffnungsvorgangs ist in Abbildung 24 ersichtlich, wobei je nach Bauteilgröße die Scherenglieder unterschiedlich weit geschlossen sind. Die Funktionsweise der Greifarme ist im Wesentlichen Insekten (z. B. Bienen) nachempfunden, die Objekte mit ihren Beinen für den Transport umfassen.



Abbildung 24: Greifmechanismus mit Scherengliedern (eigene Darstellung in Anlehnung an Zhao et al. 2022, S. 4)

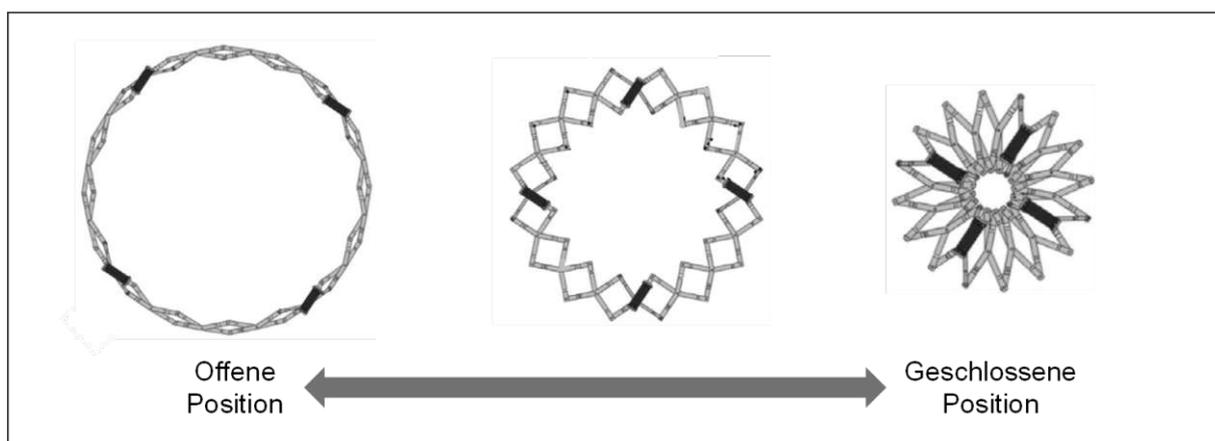


Abbildung 25: Funktionsprinzip des Greifmechanismus (eigene Darstellung in Anlehnung an Zhao et al. 2022, S. 4)

Zhao et al. (2022) kommen zu dem Schluss, dass die Bauteilkonstruktion und die Funktionsweise des Greifmechanismus erheblichen Einfluss auf die Flugeigenschaften der Drohne besitzen. Bei dem in Abbildung 25 gezeigten Modell muss nach aktuellem Forschungsstand ein Kompromiss zwischen der Greif- und Verformungsfähigkeit der einzelnen Scherenglieder eingegangen werden. Bei diesem Ansatz wird außerdem auf ein formschlüssiges Greifprinzip verzichtet, wodurch Traglasten und Haltefähigkeiten begrenzt sind. Damit ist die Vermeidung von herabstürzenden Transportgütern im Außenbereich nicht gewährleistet, was aber von den Forschern nicht weiter thematisiert wird. Abschließend sei festgehalten, dass auch Zhao et al. (2022) auf die Definition eines allgemeingültigen Anforderungskatalogs zur Umsetzung der Transportaufnahmeverrichtung verzichtet.

3.3.6 Fazit Transportaufnahmesysteme

Abschließend werden die spezifischen Eigenschaften der eingegrenzten und zuvor beschriebenen Ansätze in Tabelle 6 gemäß den definierten Fragestellungen je nach Erfüllungsgrad bewertet.

Tabelle 6: Detailanalyse der relevanten Modellansätze für die Transportaufnahme (eigene Darstellung)

Detailanalyse der Modellansätze für die Transportaufnahme						
Legende		Untersuchte Arbeiten				
Grad der Erfüllung	Symbol	Wrycza et al. (2017)	Lieret et al. (2019)	Lieret et al. (2020a)	Lieret et al. (2020b)	Zhao et al. (2022)
Nicht erfüllt	○					
Teilweise erfüllt	◐					
Vollständig erfüllt	●					
Eigenschaften	Spezifikationen					
Betriebsart der Drohne	Automatisiert	●	○	○	◐	◐
	Autonom	○	●	●	●	●
	Pilotengesteuert	○	○	○	○	○
Ansteuerungsart Transportaufnahme-system	Servomotor	●	●	●	●	●
	Pneumatik	○	○	○	○	○
	Elektromagnetik	○	○	○	○	○
Aufnahmeprinzip Transportgut	Manuelle Beladung	●	○	○	○	○
	Automatisierte Beladung	○	●	○	○	○
	Selbständig	●	●	●	●	●
Gewichtsklasse Transportgut	0-0,5 kg	○	●	●	●	○
	0,5-2,5 kg	○	○	○	○	●
	2,5-5 kg	●	○	○	○	○
Qualitative Kriterien Transportaufnahme-system	Zuverlässigkeit	●	◐	◐	◐	◐
	Systemstabilität	●	◐	◐	◐	●
	Robustheit	●	●	●	●	●
	Komplexität	●	◐	◐	◐	●

Zusammenfassend lässt sich Folgendes festhalten:

- (i) Eine allgemeingültige Umsetzung gemäß standardisierter Anforderungskriterien wird in der Forschung nicht adressiert.**

Es gibt eine Vielzahl an Ansätzen zur Gestaltung von Transportaufnahmesystemen mit unterschiedlichen Funktionsprinzipien. Trotz der Gesamtmenge an präsentierten wissenschaftlichen Publikationen zur baulichen Umsetzung eines Greifmechanismus mangelt es an Forschungsarbeiten, die standardisierte Anforderungskriterien für die allgemeingültige Bauteilgestaltung adressieren. Dies wird auch durch die im Detail analysierten Arbeiten in Kapitel 3.3 verdeutlicht.

Aus der Detailanalyse der relevanten Modellansätze für die Aufnahme eines Transportguts geht hervor, dass der Großteil ausschließlich für Gewichtsklassen bis 0,5 kg ausgelegt ist. Dahingehend stellt die Gewährleistung der Haltefunktion bei schwereren Gütern während des Transportflugs im Außenbereich ein wesentliches Anforderungskriterium dar. Neben der Haltefunktionalität zählt das Aufnahmeprinzip des Guts zu den essenziellen Kriterien, die ein Transportaufnahmesystem reproduzierbar erfüllen muss. Dabei steht die selbstständige Aufnahme durch die Drohne im Betrachtungsfokus. Obwohl alle Modellansätze in Tabelle 6 dieses Funktionsprinzip verfolgen, zeigt sich anhand der von Lieret et al. (vgl. 2020a, S. 429) erzielten Fehlerquote von 80 % (lediglich vier von 20 durchgeführten Greif- und Transportversuchen waren erfolgreich) in der Versuchsreihe und der damit weitgehend unzuverlässigen Systemarchitektur der weiterhin bestehende Forschungsbedarf in diesem Themenfeld. Die sich daraus ergebende Forschungslücke, insbesondere für Materialtransporte im Outdoorbereich, soll durch die Festlegung notwendiger technischer Anforderungskriterien und die darauf aufbauende Umsetzung der Transportaufnahmeverrichtung unter Berücksichtigung rechtlicher Erfordernisse in dieser Arbeit geschlossen werden.

3.4 Lande- und Übergabepattformtypen

Neben den im Kapitel 3.3 beschriebenen Modellen zur automatischen Aufnahme des Transportguts beeinflusst die Konzeption der Lande- und Übergabepattform die gesamte Funktionstauglichkeit des Systems. Dementsprechend ist eine kombinierte Betrachtungsweise der Anforderungskriterien an die Konzepte nötig, um Synergieeffekte nutzen zu können.

Forschungsarbeiten zu dem Thema unterscheiden sich wesentlich in Bezug auf die Bestückung der Drohne mit dem Transportgut und den Übergabeprozess beim Abgabeort. Scott und Scott (vgl. 2017, S. 3299) stellen vorherrschende Prinzipien für die Transportaufnahme und -abgabe der Produkte gegenüber. Die Bandbreite reicht dabei von Abwurffallschirmen auf den Ladungsträgern über fixe Transportboxen auf

der Drohne, die manuell be- und entladen werden, bis hin zu automatischen Bestückungsautomaten, mit deren Hilfe die Transportbox selbstständig zur Transportdrohne befördert und fixiert wird. Galimov et al. (vgl. 2020, S. 1–31) listen die Konzepte auf und stellen die dabei eingesetzten Technologielösungen gegenüber. Dabei zeigen sie sowohl unternehmensspezifische Lösungskonzepte als auch Patente zur Plattformfunktionalität auf und bewerten diese. Der Fokus liegt in der Betrachtung aller interagierenden Bauteile und Sensoren, die die Positionierung und Ladefunktion der Drohne und die Übergabe des Transportguts unterstützen. Eine Kategorisierung von Plattfortmtypen ist in Abbildung 26 ersichtlich.

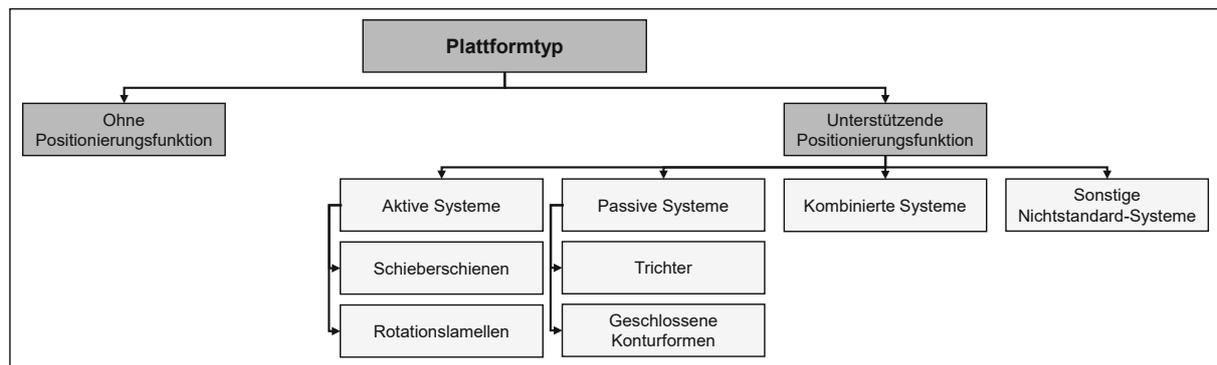


Abbildung 26: Kategorisierung von Plattfortmtypen (eigene Darstellung in Anlehnung an Galimov et al. 2020, S. 3)

Auf die jeweiligen Spezifikationen und Eigenschaften ausgewählter Plattfortmssysteme wird in den nachfolgenden Kapiteln detailliert eingegangen. Als Basis für den Modellvergleich dienen die 17 identifizierten wissenschaftlichen Arbeiten und Patente in Tabelle 7 im Betrachtungszeitraum 2014 bis 2022. Dabei werden die Modelle gemäß der in Abbildung 26 definierten Plattfortmtypen eingeordnet. Zusätzlich erfolgt eine Unterscheidung zwischen den unterschiedlichen Positionierungssystemen (aktive, passive, kombinierte oder sonstige Nichtstandard-Systeme). Diese Nichtstandard-Systeme, wie sie Palafox et al. (vgl. 2019, S. 1–21) und Wu et al. (2019, S. 163–168) darstellen, werden aufgrund der unzureichenden Anwendbarkeit für den Anwendungsfall nicht näher beschrieben. Abschließend werden die Arbeiten anhand des berücksichtigten Ladepinzips (induktive Ladung oder Energiebereitstellung über Kontaktzonen) für die Drohne im operativen Betrieb eingeordnet. Anhand dieser Kriterien erfolgt schlussendlich eine Eingrenzung einzelner Modellansätze für die weiterführende Detailanalyse und Berücksichtigung für die in Schritt 4 des Vorgehensmodells zu definierenden Anforderungskriterien für eine repräsentative Lande- und Übergabepattform.

Die aus der Gesamtheit (siehe nachfolgende Tabelle 7) eingegrenzten Ansätze von Zhang et al. (vgl. 2019), Lieret et al. (vgl. 2019), Zang et al. (vgl. 2020) und Kapetanović et al. (vgl. 2022), welche mit dem Symbol ✓ gekennzeichnet sind, fallen unter Plattfortmtypen mit Positionierungsunterstützung für Drohnen, welche die

Anforderungskriterien für die automatisierte Transportgutaufnahme sowie -abgabe erfüllen. Die identifizierten Alternativansätze erfüllen die Anforderungen nicht und werden von der Detailanalyse ausgeschlossen. Diese werden in der Tabelle 7 mit dem Symbol ✕ markiert.

Tabelle 7: Modellvergleich identifizierter Lande- und Übergabepattformtypen (eigene Darstellung)

Modellvergleich von Lande- und Übergabepattformtypen											
Legende			Plattformtyp		Positionierungssystem			Ladeprinzip		Übernahme von Ansätzen zur weiteren Detailanalyse	
Berücksichtigungsgrad	Symbol		ohne Positionierungsunterstützung	mit Positionierungsunterstützung	Aktiv	Passiv	Kombiniert	Sonstige nicht Standardsysteme	Induktiv		Kontaktzonen
Nicht berücksichtigt	○										
Teilweise berücksichtigt	◐										
Berücksichtigt	●										
Nr.	Jahr	Literaturverweis									
1	2014	<i>Magana et al.</i>	○	●	●	○	○	○	○	○	✕
2	2014	<i>Godzdanker et al.</i>	○	●	●	○	○	○	○	○	✕
3	2017	<i>Minnick et al.</i>	●	○	○	○	○	○	○	●	✕
4	2017	<i>Yi et al.</i>	○	●	●	○	○	○	○	○	✕
5	2017	<i>Wang und Zhang</i>	○	●	●	○	○	○	○	●	✕
6	2017	<i>Antonini et al.</i>	○	●	○	●	○	○	○	●	✕
7	2018	<i>Kim und Song</i>	○	●	○	●	○	○	●	○	✕
8	2019	<i>Zhang et al.</i>	○	●	○	●	○	○	○	●	✓
9	2019	<i>Jiang</i>	●	○	○	○	○	○	●	○	✕
10	2019	<i>Palafox et al.</i>	○	●	○	○	○	○	●	○	✕
11	2019	<i>Wu et al.</i>	○	●	○	○	○	○	●	○	✕
12	2019	<i>Wubben et al.</i>	●	○	○	○	○	○	○	○	✕
13	2019	<i>Campi et al.</i>	●	○	○	○	○	○	●	○	✕
14	2019	<i>Lieret et al.</i>	○	●	◐	◐	●	○	○	○	✓
15	2020	<i>Zang et al.</i>	○	●	●	○	○	○	●	○	✓
16	2020	<i>Al-Obaidi et al.</i>	●	○	○	○	○	○	○	●	✕
17	2022	<i>Kapetanović et al.</i>	○	●	●	○	○	◐	○	○	✓

3.4.1 Plattformen ohne Positionierungsfunktion

Landeplattformen ohne unterstützende Systembauteile zur Positionierung der Drohne bei Landemanövern dienen zur Bereitstellung eines ebenen Landebereichs am Einsatzort und zur Realisierung der Ladefunktion. Diese Plattformen verfügen entweder über elektrische Kontaktzonen (ähnlich einem Schachbrett- oder Streifenmuster) (vgl. Minnick et al. 2017, S. 1; vgl. Al-Obaidi et al. 2020, S. 1–13) oder über induktive Lademöglichkeiten (vgl. Campi et al. 2019, S. 3). Je nach Bauform

unterscheiden sich die zusätzlichen technischen Komponenten auf der Drohne (z. B. elektrische Kontaktflächen auf den Aufstandsbeinen) und in der Plattform (z. B. Transmitter), um die Übertragungsfähigkeit zu gewährleisten (vgl. Wenqing 2016, S. 1; vgl. Galimov et al. 2020, S. 4). Vereinzelt Modellansätze wie Wubben et al. (vgl. 2019, S. 1–16) und Jiang (vgl. 2019, S. 23–30) setzen auf Orientierungsmarker (vgl. Garrido-Jurado et al. 2014, S. 2281), wie z. B. ARuco-Marker, zur präzisen Navigation bei Landemanövern, wobei hier zusätzliche Sensorik auf der Drohne und ein Eingriff in die Drohnensoftware notwendig sind.

3.4.2 Plattformen mit unterstützender Positionierungsfunktion

1. Aktive Positionierungssysteme

Entsprechend der Kategorisierung in Abbildung 26 werden aktive Systeme zur Positionierung nach dem Landeprozess herangezogen, um entweder Ungenauigkeiten auszugleichen (vgl. Yi et al. 2017, S. 3–6) oder eine gewünschte Positionierung für Ladevorgänge zu erreichen (vgl. Magana et al. 2014, S. 1–17). Zur Zentrierung der Drohne auf der Plattform werden insbesondere Schiebeschienensysteme verwendet (vgl. Kapetanović et al. 2022, S. 130–135). Damit lässt sich die automatisierte Transportgutübergabe von der Drohne auf die Plattform gewährleisten. Die Ladungsträger können außerdem mit geeigneten Fördertechniken zum finalen Übergabepunkt befördert werden (vgl. Godzdanker et al. 2014, S. 1). Um die Drohne vor äußeren Umwelteinflüssen zu schützen, sind vereinzelt Modelle in der Lage die Drohnenplattform abzusenken und zu schließen (vgl. Zang et al. 2020, S. 2–4). Beispielhaft werden zwei kommerziell verfügbare unternehmensspezifische Landeplattformen mit integrierter Übergabestation in Abbildung 27 gezeigt. Durch das gleichmäßig verschiebbare Schienensystem (Punkt C und D) wird die Zentrierung der Drohne sichergestellt, um anschließend die Transportbox per Fördertechnik (Punkt B) abwärts zur Übergabeöffnung des Bestückungsautomaten (Punkt A) zu transportieren (vgl. Galimov et al. 2020, S. 8–10). Um die Ladefunktionalität zu gewährleisten, sind die Plattformen mit integrierten elektrischen Kontakten versehen (vgl. Wang und Zhang 2017, S. 1–15).

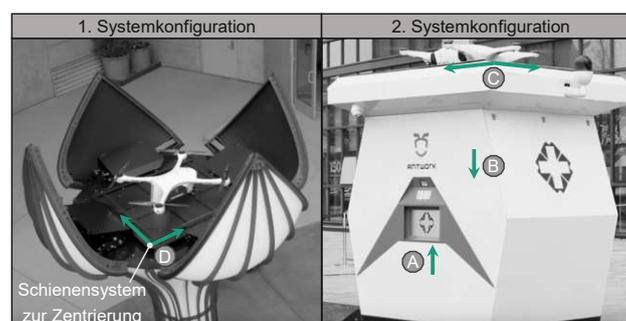


Abbildung 27: Automatisierte Bestückungsautomaten (eigene Darstellung in Anlehnung an Matternet; Antwork, o.S.)

2. Passive Positionierungssysteme

Diese Kategorie ist durch die passive Interaktion der Plattform mit den Bauteilelementen der Drohne gekennzeichnet, wobei die vertikale Bewegung bei Landemanövern durch schräge Flächen und Kanten sowie Trichterformen korrigiert wird und eine selbständige Zentrierung ermöglicht (vgl. Galimov et al. 2020, S. 12). Je nach Drohnenkonfiguration gibt es unterschiedliche Positionierungsmöglichkeiten, die die Bauart der Plattform erheblich beeinflussen (vgl. Antonini et al. 2017, S. 1–11). Ähnlich den aktiven Systemen werden auch passive Systemarchitekturen mit elektrischen Ladepaneeelen oder induktiven Ladepinzpien ausgestattet (vgl. Kim und Song 2018, S. 1). Die Grafik des Patents WO2019061519A1 von Zhang et al. (2019) (siehe Abbildung 28) für eine Landeplattform inklusive integrierter Ladestation zeigt sowohl die Trichterbauweise, die die Zentrierfähigkeit der Drohne ermöglicht, als auch die integrierte Ladefunktion. Einen ähnlichen Ansatz verfolgt das Unternehmen DJI mit seiner Landestation (vgl. DJI 2022, o.S.).

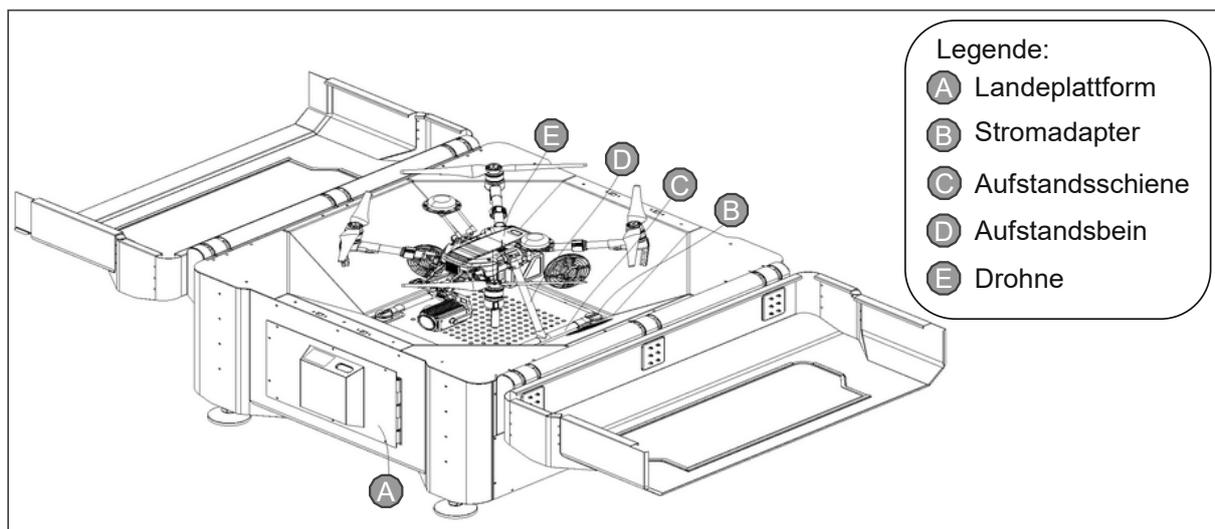


Abbildung 28: Trichterplattform (eigene Darstellung in Anlehnung an Zhang et al. 2019, S. 1)

3. Kombinierte Positionierungssysteme

Systembauweisen in dieser Kategorie vereinen aktive und passive Plattformeigenschaften. Als Beispiel dient das Konzept von Lieret et al. (vgl. 2019, S. 1010–1015), das zur Zentrierung der Drohne bei Landemanövern eine Trichterplattform und eine Förderstrecke (Markierung D) zur automatisierten Bestückung des Transportguts (Markierung C) verwendet. Mithilfe der geneigten Aluprofile (Markierung A) und optischen Markern (Markierung B) (siehe Abbildung 29) wird die geforderte Zentrierposition zur Aufnahme des Ladungsträgers gewährleistet. Die Funktionsweise der Transportaufnahmeverrichtung bei Schließvorgängen wird in Kapitel 3.3.2 beschrieben.

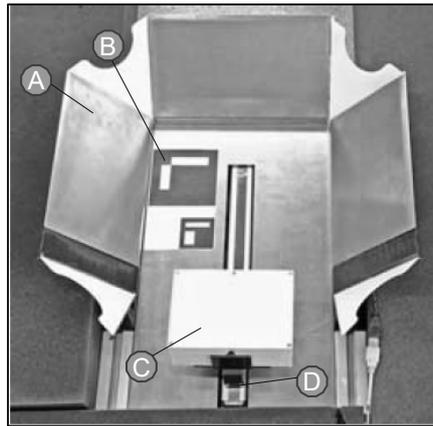


Abbildung 29: Trichterbauweise der Landeplattform inklusive Förderstechnik (eigene Darstellung in Anlehnung an Lieret et al. 2019, S. 1012)

Die Autoren Lieret et al. (vgl. 2019, S. 1010–1015) weisen bei diesem Modell auf die unzureichende Zentrierung der Drohne hin, da nur eine Positionskorrektur an drei Seiten möglich ist, was in weiterer Folge zu einer unkontrollierten Abgabe oder Aufnahme des Ladungsträgers auf der Förderstrecke führt.

3.4.3 Fazit Lande- und Übergabeplattformtypen

Die systematisch durchgeführte Literaturrecherche mit 17 relevanten Arbeiten (Betrachtungszeitraum 2014 bis 2022) in Bezug auf Lande- und Übergabeplattformlösungen in Kapitel 3.4 zeigt, dass sowohl im wissenschaftlichen als auch im unternehmensspezifischen Kontext eine große Vielfalt an Modellansätzen besteht, um den Landeprozess, die Zentrierfähigkeit, die Energieversorgung und das Ladeprinzip der Drohne effizienter zu gestalten. Dabei unterscheiden sich bestehende Systeme erheblich in ihrer technologischen Funktionalität. Auf die spezifische Nutzung der Lande- und Übergabeplattform für Materialtransporte mittels Drohne gehen 16 der 17 quantifizierten wissenschaftlichen Arbeiten jedoch nicht näher ein. Zhang et al. (vgl. 2019, S. 1), Zang et al. (2020, S. 2–4) und Kapetanović et al. (vgl. 2022, S. 130–135) fokussieren sich lediglich auf die Zentrierung der Drohne mittels Positionierungssysteme und die Energieversorgung auf der Plattform.

Bei bestehenden Konzepten, die eine automatisierte Transportübergabe ermöglichen, handelt es sich meist um kommerzielle Plattformen (siehe Abbildung 27 auf Seite 58), bei denen Kompromisse in der Bedienbarkeit eingegangen werden müssen (vgl. Galimov et al. 2020, S. 1–31). Von den vier zur Detailanalyse eingegrenzten Arbeiten (in Tabelle 7 auf Seite 57 mit dem Symbol ✓ gekennzeichnet) beschäftigen sich einzig Lieret et al. (vgl. 2019, S. 1010–1015) mit der Zentrierung und automatisierten Materialübergabe, siehe Abbildung 29 auf Seite 60, im wissenschaftlichen Kontext. Dabei zeigt das bestehende Modell erhebliche Schwächen in der wiederkehrenden Zentrierfähigkeit und automatisierten Materialübergabe an die Förderstrecke, da die Plattformkonstruktion nur eine Positionskorrektur an drei Seiten ermöglicht. Aufgrund

der unzureichenden Systemarchitekturen zeigt sich der bestehende Forschungsbedarf in diesem Themenbereich. Die geringe Systemzuverlässigkeit und daraus abgeleitete Forschungslücke soll durch die Definition erforderlicher technischer Anforderungskriterien für eine Lande- und Übergabepattform unter Berücksichtigung der automatisierten Transportgutaufnahme und -abgabe in dieser Arbeit geschlossen werden.

3.5 Zusammenfassung des Kapitels

Anhand der einleitend dargelegten Problemstellungen erfolgt in Kapitel 3 eine tiefgehende Analyse und Aufbereitung des aktuellen Stands der Wissenschaft und Technik. Diesbezüglich erfolgt eine Fokussierung auf wissenschaftliche Ansätze zur (i) Einführung, Auswahl und den Betrieb von Drohnen für den Materialtransport sowie (ii) Modelle für die technologische Umsetzung von notwendigen Transportaufnahmeeinheiten für den automatisierte Auf- und Abgabeprozess der Transportgüter und (iii) Modelle für Lande- und Übergabepattformen zur Unterstützungsleistung des automatisierten Drohnentransports. Dabei werden die einzelnen Modelle im Detail untersucht und bewertet.

Die Vorgehensmodelle in Abschnitt 3.2, die die Einführung von Drohnen im industriellen Umfeld für den Materialtransport betrachten, konzentrieren sich vereinzelt auf wirtschaftliche Bewertungsmodelle, andererseits auf die Prozessentwicklung und Integrationsfähigkeit in bestehende logistische Prozessabläufe. Diese Arbeiten lassen jedoch luftfahrtrechtliche und unternehmensspezifische Anforderungen sowie daraus abzuleitende Handlungsschritte für eine Implementierung im Unternehmen außer Betracht. Vorhandene wissenschaftliche Arbeiten ermöglichen somit aktuell keinen stufenweisen Implementierungsprozess. Diese Problematik führt zu einer unzureichenden Potenzialausnutzung für den Materialtransport mit Drohnen (vgl. Fritsch und Stonis 2019, S. 585).

Im Abschnitt 3.3 werden Modelle, die sich mit der automatisierten Transportaufnahme auseinandersetzen, analysiert. Konzepte zur Realisierung von Transportaufnahmeverrichtungen für den automatischen Greif- und Abgabemechanismus beinhalten unterschiedliche Lösungen, um das Erfassen der Güter und die Haltefunktion während operativer Flüge zu gewährleisten. Die gegenübergestellten und bewerteten Technologielösungen (vgl. Tabelle 6) sind jedoch für den industriellen Einsatz nicht zweckmäßig, um einerseits höhere Lasten sicher zu transportieren und andererseits den rechtlichen Anforderungen im Außenbereich zu genügen. Der Großteil der Entwicklungen fokussiert sich auf den Materialtransport von Kleinteilen mit geringem Gewicht, während die spezifischen Anforderungskriterien an den Außeneinsatz nicht betrachtet werden. Auf die Definition systemrelevanter

Anforderungsparameter in Form eines Anforderungskatalogs wird in den identifizierten Arbeiten prinzipiell verzichtet.

Der Abschnitt 3.4 konzentriert sich auf bestehende Konzepte für Lande- und Übergabepattformtypen im wissenschaftlichen und unternehmensspezifischen Kontext. Dabei müssen bei bestehenden Bauformen stets Kompromisse bei der Funktionalität und Bedienbarkeit eingegangen werden. Eine valide reproduzierbare Zentrierfähigkeit der Drohne auf der Plattform während Landeprozessen für die automatisierte Materialübergabe wird durch aktuell bestehende Modelle nicht gewährleistet. Da das Zusammenspiel zwischen Drohne, Transportaufnahmeeinheit und Plattform jedoch einen erheblichen Einfluss auf die Effektivität des Gesamtsystems in der Praxis hat, muss ein spezieller Fokus auf die technologische Anforderungsdefinition gelegt werden. Bestehende Modelle verzichten jedoch auf die Definition spezifischer Anforderungskriterien an eine Lande- und Übergabepattform, um den automatisierten Drohnentransport zu unterstützen.

Anhand der identifizierten Herausforderungen lassen sich zusammenfassend folgende Forschungslücken für die vorliegende Arbeit formulieren:

- Es besteht weiterhin ein Bedarf an spezifischen Methoden, die eine technologische Vorselektion bzw. Eingrenzung verfügbarer Transporttechnologien inklusive Drohnentechnologie anhand unternehmensspezifischer Einflussgrößen ermöglichen.
- In der Literatur fehlen bis dato methodische Vorgehensweisen, die Anforderungskriterien für die Konzeption von Transportaufnahmeverrichtungen auf der Drohne und systemunterstützende Lande- und Übergabepattformen für den drohnenbasierten Materialtransport je Anwendungsfall definierbar machen. Bestehende Konzepte weisen aktuell insbesondere Schwächen in der Systemstabilität und reproduzierbaren Zentrierfähigkeit der Drohne auf.
- Es wird kein Bezug auf erforderliche rechtliche Handlungsschritte in Abhängigkeit des unternehmensspezifischen Anwendungsfalls im Zuge einer potenziellen Drohneneinführung genommen.
- Es existiert in der wissenschaftlichen Literatur keine definierte Vorgehensweise für eine stufenweise Implementierung von automatisierten Drohnen für den logistischen Materialtransport in einem Unternehmen.
- Zum gegenwärtigen Zeitpunkt mangelt es an wissenschaftlich dokumentierten Vorgehensweisen zur Einführung von industriell genutzten Drohnen für den Materialtransport am Werksgelände, die neben der wirtschaftlichen und technologischen Bewertungsfähigkeit auch rechtliche Rahmenbedingungen und daraus notwendige Handlungsschritte für den potenziellen Drohneneinsatz im Unternehmen vereinen.

4 Spezifische Problemstellung und Zieldefinition

Aufbauend auf den im Kapitel 1 erörterten Herausforderungen und allgemeinen Zielsetzungen beim Einsatz von Drohnen im industriellen Umfeld für den Materialtransport und den einhergehenden Forschungslücken (siehe Kapitel 3.5) wird in diesem Kapitel auf die spezifische Problemstellung und den abgeleiteten Forschungsbedarf detailliert eingegangen. Außerdem wird die damit verbundene Spezifizierung der Zielsetzung für die vorliegende Forschungsarbeit definiert. Abschließend werden Forschungsfragen und Anforderungen an das zu entwickelnde Vorgehensmodell formuliert.

4.1 Problemstellung und Ableitung des Forschungsbedarfs

Die Forschungsrelevanz im Bereich des transportlogistischen Drohneneinsatzes zeigt sich anhand des im Kapitel 3 erläuterten Standes der Wissenschaft und Technik im Hinblick auf bestehende Entwicklungs- und Umsetzungsmodelle. Anhand dieser Modelle sind Prozessanforderungen bestimmbar und Sicherheitsanalysen durchführbar (vgl. Perez-Grau et al. 2021, S. 312–324; vgl. Wrycza et al. 2017, S. 1–10). Außerdem beschäftigen sich vereinzelt Arbeiten mit der Bewertung von Drohnensystemen für spezifische Anwendungsfälle anhand Nutzwertanalysen in Kombination mit Kostenkalkulationen für grundlagenbasierte Investitionsentscheidungen (vgl. Fritzsich et al. 2020, S. 1–11).

In dem jungen und dynamisch wachsenden Forschungsfeld lassen sich nach aktuellem Wissensstand (vgl. Kapitel 3.2) nur vereinzelt Arbeiten identifizieren, die ein Vorgehensmodell für eine Implementierung im Unternehmen festlegen (vgl. Kellermann et al. 2019, S. 1–13). Die Folge ist, dass Unternehmen häufig auf unternehmensinterne Entwicklungen und Fachexperten zurückgreifen und wissenschaftliche Publikationen außer Acht lassen. Durch die fehlenden Standards und Vorarbeiten, die den Nutzen von Transportdrohnen im Außenbereich technologisch als auch wirtschaftlich detailliert betrachten, wird die Technologieeinführung wesentlich erschwert (vgl. Fritzsich und Stonis 2019, S. 585).

Um den intralogistischen Materialtransport mittels Drohnen in bestehende Logistikprozesse einzubetten, sind innovative Lösungskonzepte für die automatisierte Aufnahme und Abgabe des Transportguts durch spezielle Transportaufnahmevorrichtungen notwendig. Die identifizierten Greifmechanismen weisen unterschiedliche Stärken und Schwächen auf, zudem ist ihre Prozessstabilität aktuell nicht vollständig gewährleistet (vgl. Lieret et al. 2020a, S. 1010–1015; vgl. Lieret et al. 2019, S. 1014–1015). Wesentlich für die Prozesssicherheit ist das Funktionsprinzip des Greifmechanismus, da das Transportgut wiederkehrend mit einer hohen Präzision erfasst und eine ausreichende Fixierung während des Transportflugs

gewährleistet werden muss. Bestehende Konzepte gewähren jedoch keine dauerhafte Systemzuverlässigkeit (vgl. Lieret et al. 2020b, S. 249). Die identifizierten Systemlösungen im Stand der Wissenschaft und Technik zeigen deutlich, dass es keine standardisierten und signifikant zuverlässigen Transportaufnahmeverrichtungen gibt, die den Ansprüchen der Industrie genügen. Fehlende Kriterien (z. B. Werkstoffart in Abhängigkeit des Einsatzortes und der vorherrschenden Witterungsbedingungen, zulässige Tragfähigkeit etc.) in Form eines Anforderungskatalogs erschweren die Umsetzbarkeit für Unternehmen.

Insbesondere die rechtlichen Aspekte, anhand derer ein Greifmechanismus für den Außeneinsatz als funktionstauglich eingestuft wird, werden im Stand der Wissenschaft und Technik nicht im Detail beschrieben. Die vorgestellten Konzepte fokussieren sich hierbei vermehrt auf den Drohnentransport im Innenbereich von Fabrik- und Produktionshallen (vgl. Zhao et al. 2022, S. 1–13).

Um den Prozess der automatischen Transportaufnahme und -abgabe im operativen Betrieb zu unterstützen und den Dauerbetrieb zu gewährleisten, sind innovative Plattformkonzepte erforderlich, die sowohl die Zentrierfähigkeit als auch die Batterieladung der Drohne in sich vereinen. Hierfür stehen bereits diverse Technologiekonzepte zur Verfügung, wobei auch hier die Definition der notwendigen Kriterien anhand eines Anforderungskatalogs außer Betracht gelassen wird (vgl. Galimov et al. 2020, S. 1–31). Die identifizierten Studien und Patente fokussieren sich entweder auf die notwendige Zentrierung bei Landemanövern oder auf das Ladeprinzip, wodurch aktuell Kompromisse eingegangen werden müssen (vgl. Lieret et al. 2019, S. 1012; vgl. Kim und Song 2018, S. 1; vgl. Zhang et al. 2019, S. 1).

Zur Nutzung von Drohnen für den intralogistischen Materialtransport ist daher für Unternehmen eine standardisierte Implementierung notwendig, die technologische, wirtschaftliche, rechtliche und prozessuale Aspekte berücksichtigt. Eine methodische Drohnenauswahl unter Berücksichtigung produkttechnischer Anforderungskriterien für die Transportaufnahmeverrichtung in Kombination mit einer Lande- und Übergabepattform integriert in ein Vorgehensmodell kann im Stand der Wissenschaft und Technik nicht identifiziert werden.

Somit lässt sich der bestehende Forschungsbedarf wie folgt ableiten:

- Trotz einzelner Forschungsarbeiten, die sich der technologischen und wirtschaftlichen Bewertung einzelner Transporttechnologien widmen, existiert ein Forschungsbedarf hinsichtlich spezifischer Methoden zur Vorselektion und Detailprüfung des erzielbaren wirtschaftlichen Nutzens eines möglichen Drohneneinsatzes in Abhängigkeit des unternehmensspezifischen Anwendungsfalls.

- In der wissenschaftlichen Literatur existiert ein Bedarf an definierten rechtlichen Handlungsschritten sowie einer wissenschaftlich dokumentierten Vorgehensweise zur systematischen Einführung von Drohnen im industriellen Umfeld für den logistischen Materialtransport im Außenbereich.
- Durch das Fehlen von definierten Standards und Anforderungskriterien werden bestehende Greifmechanismen zur automatischen Transportgutaufnahme und -abgabe vermehrt nach subjektiven Einschätzungen konzipiert und baulich umgesetzt. Es ist kein standardisierter Anforderungskatalog in der Literatur identifizierbar, der die Auswahl und Kombination spezifischer Kriterien für die Konzeptionierung einer Transportaufnahmevorrichtung in einer Anforderungsliste vereint.
- Bei den untersuchten Plattformkonzepten kann nach aktuellem Stand kein Modell, das die Anforderungen an eine hinreichende Positionierungsgenauigkeit für die Transportgutaufnahme inklusive induktiver Ladefunktionalität für die Drohne erfüllt, identifiziert werden. Bestehende Konzepte verzichten auf die Definition von Kriterienkatalogen und müssen stets Kompromisse in Bezug auf die Anwendbarkeit eingehen.

Ungeachtet einzelner wissenschaftlicher Publikationen im eingegrenzten Untersuchungsbereich mangelt es bis dato an einem anwendungsorientierten Vorgehensmodell, welches die oben definierten Aspekte vereint. Der damit resultierende Forschungsbedarf soll mit dem in dieser Arbeit entwickelten Vorgehensmodell geschlossen werden.

4.2 Spezifische Zielsetzung und Forschungsfragen

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit besteht in der Entwicklung eines anwendungsorientierten Vorgehensmodells, welches die Einführung von Drohnen im industriellen Umfeld für den intralogistischen Materialtransport unterstützt.

Das erwartete Ergebnis dieser wissenschaftlichen Arbeit ist ein aus mehreren Teilschritten bestehendes Modell, welches

- i. die technologische und wirtschaftliche Bewertung eines Drohneneinsatzes gegenüber alternativen Transporttechnologien ermöglicht sowie
- ii. unter Berücksichtigung technologischer Systemspezifikationen, unternehmensbasierter Anforderungskriterien und rechtlicher Rahmenbedingungen notwendige Entwicklungs- und Maßnahmenschritte für eine Unternehmensimplementierung adressiert als auch
- iii. wesentliche Anforderungskriterien an eine Transportaufnahmeeinheit zur automatisierten Auf- und Abgabe von Transportgütern auf interagierenden Lande- und Übergabeplattformen definiert.

Dafür werden Konzepte und Methoden, die dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik entsprechen, herangezogen und gemäß dem Forschungsbedarf weiterentwickelt.

Anhand der definierten spezifischen Zielsetzung und dem erwarteten Ergebnis lassen sich folgende Forschungsfragen ableiten:

1. Unter welchen Rahmenbedingungen erweist sich der automatisierte Drohneneinsatz für den logistischen Materialtransport am Werksgelände als kosteneffiziente Ergänzungslösung zu konventionellen Transporttechnologien?
2. Welches Vorgehen lässt sich zur technologischen und wirtschaftlichen Bewertung und Eignungsprüfung eines potenziellen Drohneneinsatzes unter Berücksichtigung alternativer Transporttechnologien sinnvoll anwenden?
3. Welche unternehmensspezifischen, luftfahrtrechtlichen und technologischen Voraussetzungen sowie Prozessschritte muss ein Vorgehensmodell aufweisen, um den drohnenbasierten Materialtransport am Werksgelände zu etablieren?

Auf Basis der Zielsetzung und der Forschungsfragen wird folgende Forschungshypothese formuliert:

Die Nutzung von automatisierten Drohnentransporten am Werksgelände für spezifische Transportgüter stellt für Unternehmen eine zusätzliche technologische und wirtschaftliche Ergänzungslösung in der Abwicklung logistischer Transportaufgaben dar.

4.3 Anforderungen an das Vorgehensmodell

Aufbauend auf den in Kapitel 3 identifizierten Ansätzen des aktuellen Standes der Wissenschaft und Technik sowie der definierten Zielsetzung besteht ein Forschungsbedarf für ein geeignetes Vorgehensmodell zur Implementierungsunterstützung von Drohnen für den automatisierten Transport von spezifischen Gütern am Werksgelände. Es existieren zwar bereits vereinzelt funktionsfähige Systemlösungen für den drohnenbasierten Materialtransport, die einen Beitrag zur Effizienzsteigerung in der Logistik leisten, eine ganzheitliche Betrachtungsweise der notwendigen Maßnahmenschritte für eine Technologieeinführung erfolgt jedoch nicht. Aus den genannten Gründen soll das entwickelte Vorgehensmodell einen wesentlichen Beitrag für die technologische und wirtschaftliche Bewertungsfähigkeit eines potenziellen Drohneneinsatzes liefern sowie notwendige Maßnahmenschritte für eine Implementierung von automatisierten Drohnen im industriellen Umfeld für den intralogistischen Materialtransport leisten. Das Vorgehensmodell unterliegt folgenden Anforderungskriterien:

Anforderung 1 | Branchenneutrale Anwendbarkeit

Unabhängig von den unternehmensspezifischen Einflussfaktoren, die je nach Branche unterschiedlich sind, ist eine adäquate Implementierungsunterstützung durch das Vorgehensmodell erforderlich. Daher muss für das zu entwickelnde Vorgehensmodell sichergestellt werden, dass unterschiedliche strukturelle Gegebenheiten (z. B. Werkslayout, Einsatzbereich, Flug- und Routenführung sowie Umfeldeinflüsse) durch praxistaugliche Werkzeuge (z. B. Fragenkataloge, Anforderungsmappen und Bewertungsverfahren) in der Vorabprüfung und Analysephase eingebettet werden, um eine technologische und wirtschaftliche Bewertung zu ermöglichen.

Anforderung 2 | Definition des Einsatzbereichs

Der Drohneneinsatz im Unternehmen und die zugrundeliegenden rechtlichen Anforderungen sind vom jeweiligen Einsatzgebiet und Unternehmensstandort abhängig. Im Zuge der geografischen Eingrenzung müssen notwendige Handlungsschritte für den jeweiligen Einsatzbereich im Modell ableitbar sein. Das Vorgehensmodell behandelt gemäß den Eingrenzungen in Kapitel 2.3 ausschließlich Einsatzszenarien im Außenbereich, weshalb keine speziellen Anforderungen an den Einsatz im Innenbereich von Fabrik- und Produktionshallen formuliert werden. Außerdem stellt der standortübergreifende Materialtransport mit Drohnen keine Anforderung an das Vorgehensmodell dar.

Anforderung 3 | Transportgutklassifizierung

Abhängig vom unternehmensspezifischen Anwendungsbereich muss das zu transportierende Artikelspektrum in das Vorgehensmodell einfließen. Im Zuge der Transportgutklassifizierung sollen mithilfe von methodischen Transportdatenblättern die jeweiligen Produkteigenschaften (Gewichtsklassen, Geometrieabmessungen, Materialbeschaffenheit etc.) im Modell erhoben werden, die sowohl Einfluss auf die Drohnenauswahl (Transportfähigkeit etc.) als auch die Anforderungskriterien der Transportaufnahmeeinheit und Landeplattform für den automatisierten Auf- und Abgabeprozess besitzen. Damit sollen Transportgüter innerhalb eines großen Branchenbereichs für Unternehmen klassifizierbar werden und eine unternehmensspezifische Betrachtung sicherstellen.

Anforderung 4 | Auswahl geeigneter Transporttechnologien

Da für Transportaufträge verschiedene Transportansätze in Betracht gezogen werden können, müssen vorhandene Transportmittel für den spezifischen Anwendungsfall anhand definierter Entscheidungskriterien auf deren Eignungsfähigkeit überprüft werden. Da bestehende Methoden in der Literatur ausschließlich konventionelle Transportmittel betrachten, soll das Vorgehensmodell verfügbare Drohnentechnologien zur Erfüllung der Transportaufträge einbeziehen. Darüber

hinaus gilt es für die abschließende Entscheidungsfindung eines potenziellen Drohnensystems in Abhängigkeit des unternehmensspezifischen Anwendungsfalls und der Transportgutklassifizierung einflussnehmende technologische Parameter mit spezifischen Bewertungsmethoden zu analysieren, um eine grundlagenbasierte Entscheidungsfindung zu ermöglichen. Dabei fokussiert sich das Modell ausschließlich auf multirotorgetriebene Drohnen (Quadro-, Hexa-, Octocopter) für den intralogistischen Materialtransport.

Anforderung 5 | Bezugnahme auf rechtliche Rahmenbedingungen

Da der Einsatz von Drohnen im industriellen Umfeld speziellen rechtlichen Anforderungen unterliegt und die zu durchlaufenden Prozessschritte im Genehmigungsprozess sowohl von der gewählten Drohnentechnologie, den Unternehmensspezifikationen als auch den Einsatzszenarien abhängen, bieten genau definierte Maßnahmenschritte Orientierung, um notwendige Prozessentwicklungen und Handlungsmaßnahmen anzustoßen. Eine Anforderung ist daher der Einbezug rechtlicher Rahmenbedingungen und notwendiger Prozessschritte für die Drohnenimplementierung.

Anforderung 6 | Bereitstellung praxistauglicher Werkzeuge

Aufgrund mangelnder wissenschaftlicher Arbeiten mit praxisnahen Fallbeispielen und bewährten Methoden für industrielle Anwendungsfälle fehlt es an praxistauglichen Werkzeugen im Zuge einer potenziellen Drohnenimplementierung für logistische Materialtransporte. Durch den stufenweisen Aufbau des Modells und die methodischen Bewertungswerkzeuge sind strategische Handlungsempfehlungen ableitbar, die eine wissenschaftliche Entscheidungsgrundlage für die Implementierung von Drohnen als zusätzliches Fördermittel für einen effizienten Materialtransport in einem Unternehmen bieten. Darüber hinaus gilt es notwendige Anforderungskriterien für eine Transportaufnahmeeinheit zur automatisierten Auf- und Abgabe von Transportgütern zu definieren, um den Materialtransport zu gewährleisten.

4.4 Zusammenfassung des Kapitels

Anhand der Aufarbeitung des aktuellen Stands der Wissenschaft und Technik in Kapitel 3 und des daraus abgeleiteten Forschungsbedarfs erfolgt in Kapitel 4 die Spezifizierung der allgemeinen Problemstellung aus Kapitel 1. Darauf aufbauend wird die spezifische Zielsetzung formuliert, anhand derer Forschungsfragen und eine Forschungshypothese formuliert werden. Die Diskussion und die Beantwortung der Fragestellungen erfolgen in Kapitel 7.1. Zudem werden spezifische Anforderungen an das Vorgehensmodell, welche sich aus der definierten Zielsetzung ergeben, festgelegt. Die Evaluierung hinsichtlich der Erfüllung der Anforderungen erfolgt in Kapitel 7.2.

5 Vorgehensmodell zur Einführung von Drohnen im industriellen Umfeld

Anhand der definierten spezifischen Problemstellung in Kapitel 4.1 und der daraus abgeleiteten Zielsetzung wird in diesem Kapitel ein Vorgehensmodell für den automatisierten Materialtransport mit Drohnen im industriellen Umfeld auf Basis der gewählten Forschungsmethodik aus Kapitel 1.4 entwickelt. Das stufenweise aufgebaute Vorgehensmodell gliedert sich in eine Vorselektion und fünf Teilschritte (siehe Abbildung 30), die jeweils die notwendigen Handlungsschritte für die Einführungsphase adressieren. Die wesentlichen Inhalte der einzelnen Durchführungsschritte sind folgende:

Die Vorabprüfung bezieht sich auf die Gegenüberstellung und Bewertung potenzieller Transportmittel in Bezug auf die technologische Eignungsfähigkeit für den spezifischen Anwendungsfall. Dabei werden sowohl konventionelle als auch alternative Ansätze mit Hilfe definierter Einflusskriterien bewertet. Die resultierende Bewertungsmatrix mit abschließender Reihung der Transportmittel dient dem Unternehmen im Vorfeld als Entscheidungsgrundlage für die etwaige Detailprüfung des potenziellen Drohneneinsatz unter Bezugnahme auf die nachfolgenden Teilschritte des Vorgehensmodells.

Schritt 1 befasst sich mit der Erhebung aller unternehmensspezifischen Anforderungen und Restriktionen, die für den Drohneneinsatz im Unternehmen notwendig sind. Diesbezüglich werden die Herausforderungen anhand eines entwickelten Fragenkatalogs im Vorfeld strukturiert erhoben und mit der vorherrschenden Layoutstruktur sowie Güterklassifikation in einer Anforderungsmappe gebündelt.

In Schritt 2 werden Drohnenkonzepte anhand eines Kriterienkatalogs für den im Vorfeld definierten Anwendungsfall eingegrenzt und methodisch bewertet. Die Drohnenvariationen werden gemäß den Spezifikationen bewertet und je nach Nutzungsfähigkeit gereiht. Dadurch ist eine fundierte Transporttechnologiebewertung zur finalen Drohnenauswahl möglich.

Schritt 3 widmet sich dem notwendigen luftfahrtrechtlichen Genehmigungsprozess in Österreich für die im vorgelagerten Durchführungsschritt identifizierte Drohnenkategorie. Je nach Einsatzzweck und geografischer Eingrenzung werden für den Drohneneinsatz notwendige Dokumente entwickelt und Maßnahmenschritte gemäß den geltenden Regularien formuliert. Daraus resultiert ein Lastenheft zur konsolidierten Dokumentenbereitstellung für den Genehmigungsprozess bei der Luftfahrtbehörde.

Auf Basis der Eingrenzungen und der resultierenden Drohne aus Modellschritt 2 sowie der zur Genehmigung erforderlichen Dokumente aus Schritt 3 erfolgt in Schritt 4 die Auswahl und Kombination definierter Anforderungskriterien mittels einer Anforderungsliste für die automatisierte Transportaufnahmeverrichtung und Landeplattform. Dadurch soll die Realisierung des intralogistischen Materialtransports mit einer industriellen Drohne gewährleistet werden. Mithilfe der definierten Anforderungsliste sind weiterführende Entwicklungs- und Umsetzungsmaßnahmen für die Bauteile ableitbar.

Der abschließende Schritt 5 ist sowohl der technologischen wie auch der wirtschaftlichen Machbarkeitsprüfung gewidmet. Hierzu dienen definierte Überprüfungsmaßnahmen der Sicherstellung der Systemstabilität im operativen Betrieb. Darunter fallen Sicherheitstests in der Einsatzumgebung mit der Drohne sowie Langzeit- und Belastungstests, die einen Dauerbetrieb simulieren. Die abschließende wirtschaftliche Betrachtung hinsichtlich der anfallenden Transportspiel- und Betriebskosten in Abhängigkeit der Transportmittelanzahl sowie gewählten Transportmittel rundet das Vorgehensmodell ab. Die dadurch getroffene Aussage dient schlussendlich als Entscheidungskriterium für eine mögliche Technologieeinführung.

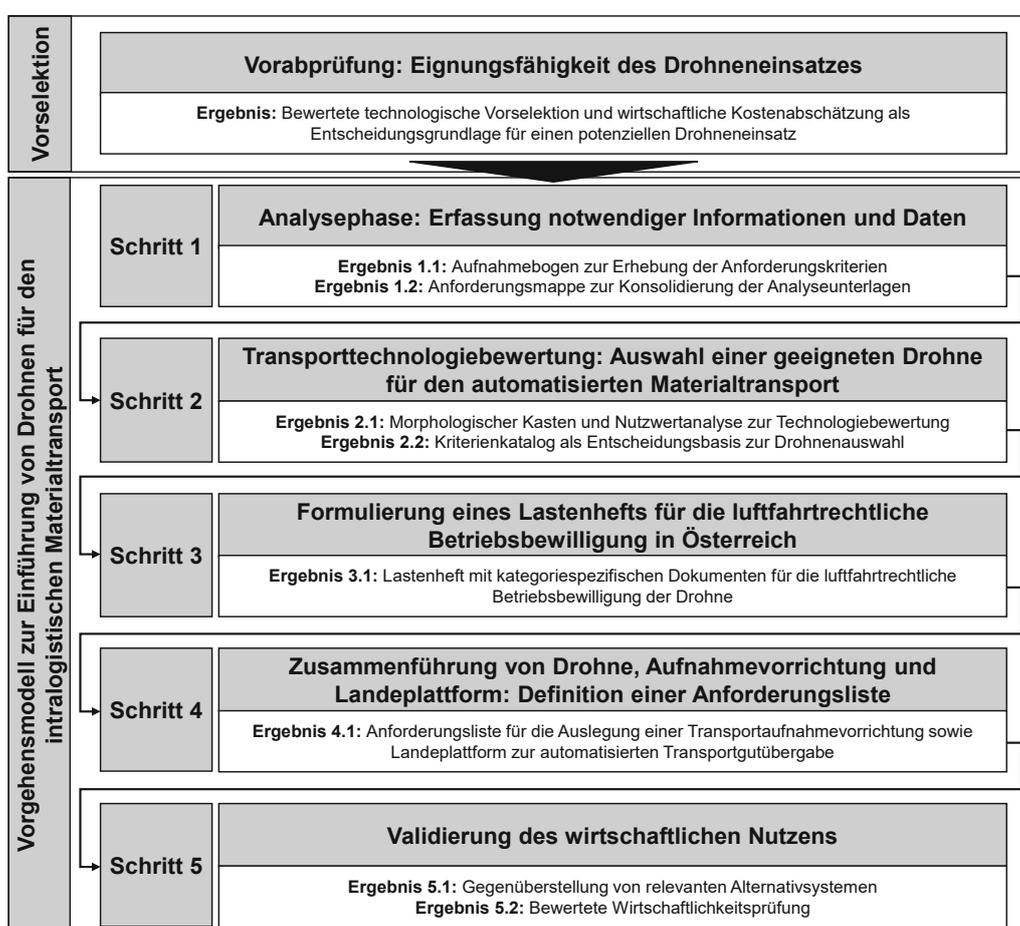


Abbildung 30: Durchführungsschritte des entwickelten Vorgehensmodells (eigene Darstellung)

5.1 Vorabprüfung: Eignungsfähigkeit des Drohneneinsatzes

Dieses Kapitel dient zur Vorabprüfung hinsichtlich der technologischen Eignungsfähigkeit eines potenziellen Drohneneinsatzes für den automatisierten Materialtransport im Unternehmen. Dabei werden unternehmensspezifische Einflusskriterien in Abhängigkeit vorliegender Transporttechnologien bewertet, um den möglichen Nutzen für das Unternehmen bei einer Drohneneinführung im Vorfeld abzuschätzen. Das Ergebnis soll als Entscheidungsgrundlage für eine weitergehende Prüfung unter Bezugnahme der entwickelten Teilschritte des Vorgehensmodells dienen.

5.1.1 Anforderungskriterien für die Eingrenzung geeigneter Transportmittel

Zur Eingrenzung vorhandener Transportmittel für die Abwicklung eines effizienten logistischen Materialtransports im Unternehmen ist es zwingend notwendig, diese anhand maßgebender Kriterien auf deren Eignungsfähigkeit zu prüfen. Für die technische Eingrenzungsfähigkeit eines für den Anwendungsfall qualifizierten Transportmittels wird die Richtlinie VDI 2710 (vgl. VDI 2710-1:2007-08, S. 3–21) herangezogen. Da hierbei ausschließlich konventionelle Transportmittel (vgl. Kapitel 2.1.3) betrachtet werden, erfolgt eine eigenständige Erweiterung um Drohnen als mögliche Alternative. Einleitend werden relevante Transportmittel hinsichtlich ihrer Eignungsfähigkeit (schlecht und gut geeignet) zur Erfüllung der definierten fördertechnischen Aufgabe qualitativ bewertet (siehe Tabelle 8), um auf Basis der Ergebnisse einzelne Transportsysteme vollständig auszuschließen oder einer weiterführenden Detailanalyse zu unterziehen (vgl. VDI 2710-1:2007-08, S. 3–4). Die Kriterien beziehen sich sowohl auf die Einsatzumgebung, das Transportgut als auch auf die Unternehmensorganisation und referenzieren auf die definierten Einflussgrößen in der VDI-Richtlinie, wobei eine Erweiterung und Bezugnahme auf den möglichen Drohneneinsatz erfolgt (vgl. VDI 2710-1:2007-08, S. 6–11).

Dabei werden die Transportmittel hinsichtlich der für den Anwendungsfall geforderten Anforderungskriterien bewertet. Weist ein Transportmittel bei einer Anforderungsart mindestens eine unzureichende Bewertung (schlecht geeignet) auf, erfolgt ein Ausschluss für die weiterführende Detailanalyse.

Tabelle 8: Anforderungskriterien für die Vorselektion von Transportmitteln hinsichtlich ihrer Eignungsfähigkeit (eigene Darstellung in Anlehnung an VDI 2710-1:2007-08, S. 9)

Anforderungskriterien zur Vorselektion von Transportmitteln									
Legende		Anforderungsart							Übernahme von Transportmitteln zur weiteren Detailanalyse
Grad der Eignung	Symbol	Einsatz im Außenbereich	Züige Überbrückung von Transportdistanzen > 500 m	Hohe Transportanzahl pro Zeiteinheit	Flexible Routenführung (Vielzahl an Quellen und Senken) am Werksgelände	Transportfähigkeit von standardisierten Ladungsträgern	Tragfähigkeit von Gewichten zwischen 0,1 kg ≤ x kg ≤ 5 kg	Bedarfsorientierter Transportabruf	
Schlecht geeignet	○								
Gut geeignet	●								
Weitere Detailanalyse	Symbol								
Ja	✓								
Nein	✗								
Nr.	Art des Transportmittels								

Nach abgeschlossener Eingrenzung hinsichtlich der geeigneten Transportmittel für den unternehmensspezifischen Anwendungsfall und der relevanten Einflussgrößen erfolgt eine wirtschaftliche Abschätzung für die überschlagsmäßige Kostenkalkulation in Tabelle 9 inklusive finaler Bewertung der einzelnen Transportsysteme. Mit Hilfe der technologischen Vorselektion und der wirtschaftlichen Grobanalyse ist schlussendlich eine Einschätzung hinsichtlich des Nutzens eines potenziellen Drohneneinsatzes für das Unternehmen möglich.

Tabelle 9: Wirtschaftliche Abschätzung verschiedener Transportmittel (eigene Darstellung)

Wirtschaftliche Abschätzung der Transportmittel			
Inputparameter		Kurzbeschreibung Anwendungsfall:	
Arbeitstage pro Jahr [d/a]	At_{Jahr}		
Arbeitsstunden pro Tag [h/d]	AS_{Tag}		
Materialgewicht je Bedarf [kg/Bedarf]	mg_{Bedarf}		
Materialbedarf pro Stunde [Bedarf/h]	m_{Bedarf_h}		
Gesamtdauer je Transport [s/n]	t_{Tm_sek}		
Auswertung	Transportmittel 1	Transportmittel 2	Transportmittel 3
Transporte pro Stunde [n/h]	$x_{Transporte_h}$		
Transporte pro Jahr [n/a]	$x_{Transporte_a}$		
Gesamttransportzeit pro Jahr [min]	$t_{Tm_a_min}$		
Anzahl erforderlicher Transportmittel [-]	s_{Anzahl}		
Gesamtinvestitionshöhe [€]	$G_{Investition}$		
Kalkulatorische Abschreibung [€/a]	A_{Jahr}		
Kalkulatorische Zinskosten [€/a]	K_{Zinsen}		
Fixkosten pro Jahr [€/a]	K_{Fix}		
Variable Kosten pro Jahr [€/a]	$K_{variabel}$		
Betriebskosten pro Jahr [€/a]	$K_{Betrieb}$		
Personalkosten pro Jahr [€/a]	$K_{Personal}$		
Gesamtkosten pro Jahr [€/a]	K_{Gesamt}		

Abhängig von den unternehmensspezifischen Inputparametern in Tabelle 9 erfolgt die Abschätzung der notwendigen Transportmittelanzahl und dahingehenden Investitionskosten, Betriebskosten sowie resultierenden Gesamtkosten pro Jahr für das jeweilige Transportmittel. Für die Abschätzung des Materialbedarfs pro Stunde m_{Bedarf_h} ist auch eine Gleichverteilung über die verfügbaren Arbeitsstunden pro Tag zulässig, sofern mehrere Transporte zur Bewältigung des Materialgewichts pro Bedarf mg_{Bedarf} notwendig sind. Zusätzlich muss die Gesamtdauer je Transport t_{TM_sek} anhand der präferierten Transportroute abgeschätzt werden. Die Transporte pro Stunde $x_{Transporte_h}$ lassen sich durch die Division des Materialgewichts je Bedarf mg_{Bedarf} mit einer durchschnittlichen Tragfähigkeit Tf_{TM} des spezifischen Transportmittels und anschließender Multiplikation mit dem Materialbedarf pro Stunde m_{Bedarf_h} (vgl. Formel 4 auf Seite 103 in Schritt 5 des Vorgehensmodells) abschätzen.

Die Transporte pro Jahr $x_{Transporte_a}$ (siehe Formel 5 auf Seite 103) und die Gesamttransportzeit pro Jahr $t_{TM_a_min}$ dienen zur Abschätzung der Energiekosten innerhalb der variablen Kosten $K_{variabel}$. Anhand der Transporte pro Stunde $x_{Transporte_h}$ und Multiplikation mit der Gesamtdauer je Transport t_{TM_sek} bezogen auf eine Stunde lässt sich die Transportmittelanzahl s_{Anzahl} zur Bewältigung des Transportauftrags abschätzen (siehe Formel 6 auf Seite 103).

Nach abgeschlossener Ermittlung der notwendigen Transportmittel erfolgt die Abschätzung der Investitionskosten $G_{Investition}$ (siehe Formel 7 auf Seite 104). Hierzu können Richtpreise von Fahrzeugherstellern für konventionelle Transportmittel¹ (52.370 Euro für einen Stapler, 39.979 Euro für einen Outdoor-Routenzug) herangezogen werden. Als unterer Referenzwert kann für Industriedrohnen, die den Eingrenzungen des Untersuchungsbereichs entsprechen, inklusive Sicherheitssysteme mit 15.000 Euro kalkuliert werden, wobei dieser Preis je nach Konfiguration und Anbieter variieren kann.

Anhand der Gesamtinvestitionskosten lassen sich im Anschluss die kalkulatorischen Abschreibungen A_{Jahr} (z. B. 20 Prozent pro Jahr) in Abhängigkeit der Abschreibungsmethode ermitteln. Diesbezüglich dient Formel 8 (siehe Seite 106) zur Ermittlung der Abschreibungshöhe. In die Fixkosten pro Jahr K_{Fix} fließen außerdem die kalkulatorischen Zinsen K_{Zinsen} gemäß Formel 9 (siehe Seite 106) ein.

Für die Abschätzung der variablen Kosten $K_{variabel}$ müssen Instandhaltungsmaßnahmen und Energiekosten (vgl. Tabelle 20 auf Seite 105) in Abhängigkeit der Gesamttransportzeit pro Jahr $t_{TM_a_min}$ einkalkuliert werden. Anhand der Betriebskosten $K_{Betrieb}$, die sich additiv aus Fixkosten und variablen Kosten pro

¹ Die Basis der Richtpreise für die spezifischen Flurfördermittel bilden die vom Autor im Jahr 2022 im Zuge eines Ausschreibungsverfahrens für ein Industrieprojekt eingeholten Angebote.

Jahr zusammensetzen, sowie den unternehmensspezifischen Personalkosten $K_{Personal}$ (Referenzwerte für Personalkosten je Qualifikationsprofil siehe Tabelle 17 auf Seite 100) lassen sich abschließend die Gesamtkosten pro Jahr K_{Gesamt} je Transportmittel kalkulieren (vgl. Formel 13 auf Seite 108). Für die Abschätzung der Personalkosten des Drohnenverantwortlichen in der Vorabprüfung kann ein variabler Kostenanteil des Logistikmitarbeiters (z. B. 50%) angenommen werden, sofern zusätzliche wertschöpfende Tätigkeiten neben der Drohnensteuerung über den Arbeitstag verteilt durchgeführt werden. Im abschließenden Schritt 5.6 des Vorgehensmodells werden die Personalkosten pro Jahr in Abhängigkeit der ermittelten Gesamttransportzeit pro Jahr detailliert kalkuliert.

Damit steht dem Unternehmen schlussendlich eine Entscheidungsgrundlage für die potenzielle Implementierungsphase zu Verfügung.

5.1.2 Zusammenfassung und Zwischenfazit der Vorabprüfung

Mit Hilfe der methodischen Vorgehensweise auf Basis der Richtlinie VDI 2710 lassen sich einzelne Transportmittel in Abhängigkeit des unternehmensspezifischen Anwendungsfalls und dafür geforderte Anforderungskriterien innerhalb einer Vorabprüfung technologisch bewerten und eingrenzen. Aus der Gesamtheit aller gegenübergestellten Transportmittel resultiert eine Vorselektion für die nachgelagerte wirtschaftliche Abschätzung gemäß unternehmensspezifischer Inputparameter. Die technologische Vorselektion und wirtschaftliche Kalkulation dient dem Unternehmen im Vorfeld als Entscheidungsgrundlage für eine weiterführende Detailprüfung eines möglichen Drohneneinsatzes unter Bezugnahme der Teilschritte des Vorgehensmodells.

5.2 Schritt 1 | Analysephase: Erfassung notwendiger Informationen und Daten

5.2.1 Erhebung von Unternehmensinformationen für den Drohneneinsatz

Aufgrund der Alleinstellungsmerkmale jedes Unternehmens und dessen Standorts ist es unerlässlich, im Vorfeld das Anwendungsszenario hinsichtlich definierter Attribute und Ausprägungsformen einzuordnen. Anhand der vorgenommenen Eingrenzung der Transporttechnologien aus der Vorabprüfung dient der definierte morphologische Kasten in nachfolgender Tabelle 10 der weiteren Beschreibung des Anwendungsfalls. Damit lässt sich ein Vorzugsszenario möglichen Alternativszenarien im weiteren Betrachtungsverlauf gegenüberstellen.

Tabelle 10: Morphologischer Kasten zur Einordnung des Anwendungsszenarios (eigene Darstellung)

Nr.	Ausprägungen			
	Attribute	Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3
1	Art des Transportmittels	Flurförderfahrzeug	Drohne	Lastenfahrrad
2	Transportgewicht	$0,1 \text{ kg} \leq w < 1 \text{ kg}$	$1 \text{ kg} \leq w < 2,5 \text{ kg}$	$2,5 \text{ kg} \leq w < 5 \text{ kg}$
3	Arbeitsschichten	1	2	3
4	Anzahl Transporte pro Schicht	$5 \leq y < 10$	$10 \leq y < 20$	$20 \leq y < 50$
5	Transportaufkommen Wareneingang	Anlieferungen 1/Tag gebündelt - sofortiger Transport	Anlieferungen über Tagesverlauf verteilt - sofortiger Transport	Anlieferungen über Tagesverlauf verteilt - Konsolidierung und einmaliger Transport
6	Transportdistanz	$100 \text{ m} \leq z < 400 \text{ m}$	$400 \text{ m} \leq z < 800 \text{ m}$	$800 \text{ m} \leq z < 1200 \text{ m}$

Zur effizienten Sammlung notwendiger Unternehmensinformationen in Bezug auf die definierten Ausprägungsformen des Anwendungsszenarios in Tabelle 10 und Beantwortung von Schlüsselfragen dienen in dieser Arbeit persönliche Interviews mit Fachexperten im Unternehmen ebenso wie strukturierte Fragebögen, um sowohl qualitative als auch quantitative Antworten zu den Fragestellungen zu erhalten. Zu den wesentlichen Vorteilen von Fragenkatalogen, die im Vorfeld an die Unternehmensexperten übermittelt werden, zählen, dass genügend Zeit für die Beantwortung zur Verfügung steht und keine persönliche Einflussnahme durch den Interviewer vorliegt (vgl. Balzert et al. 2010, S. 56).

Für die Erhebung der unternehmensspezifischen Informationen und Daten wird ein Fragenkatalog entwickelt, der einen wesentlichen Teil der Analysephase darstellt. Auf Basis der Antworten werden im weiteren Verlauf des Vorgehensmodells Handlungsschritte für die Umsetzung des Drohneneinsatzes im jeweiligen Einsatzgebiet abgeleitet.

In Tabelle 11 ist der Fragenkatalog für die Informationsgewinnung dargestellt. Insofern Fragestellungen mit „Nein“ beantwortet werden, müssen die notwendigen Konsequenzen durch definierte Handlungsschritte erfüllt werden. Gegebenenfalls muss der Fragenkatalog bis zur vollständigen Erfüllung der Anforderungen mehrmals durchlaufen werden.

Die möglichen Konsequenzen der Fragestellungen 1.1 bis 3.3 müssen bis zur Durchführung von Schritt 3 des Modells erfüllt werden. Die Fragen 3.4 bis 3.6 sowie die möglichen Handlungsschritte müssen bereits in Schritt 1 durch den Anwender beantwortet und erfüllt werden. Diese Informationen dienen nämlich als Basis für die nachgelagerte Flug- und Routenplanung sowie die Transportgutklassifizierung in Schritt 1 des Modells.

Tabelle 11: Fragenkatalog zur Ermittlung der unternehmensspezifischen Informationen und Daten (eigene Darstellung)

Fragenkatalog für den Drohneneinsatz im Außenbereich					
Nr.	Fragen	Erklärung	Antwort		Konsequenz
1. Drohnenexpertise & Rechtliches		Warum ist die Info notwendig?	Ja	Nein	Falls nein, notwendige Handlungsschritte?
1.1	Besitzen Fachexperten im Unternehmen einen Drohnenführerschein für diverse Kategorien?	Beeinflusst die Einsatzklasse im Bewilligungsverfahren. (vgl. Schritt 3)			Ausbildung von Drohnenpiloten im Unternehmen je Einsatzklasse.
1.2	Ist ein Sicherheitskonzept für zukünftige Drohneneinsätze im Unternehmen bereits erarbeitet?	Ist für die Betriebsgenehmigung gemäß dem SORA Prozesses notwendig. (vgl. Schritt 3)			Entwicklung eines ERP- (Emergency Response Plan)-Prozesses für Notsituationen.
1.3	Ist ein Betriebsrat vorhanden?	Bei anfallenden Bilddaten im Zuge des Drohnenflugs sind Personenrechte im Vorfeld abzustimmen. Die Zustimmung muss dokumentiert werden. (vgl. Schritt 3)			Bei einem fehlenden Betriebsrat sind Mitarbeiter proaktiv über Bildaufnahmen während des Einsatzflugs zu informieren.
1.4	Ist der Drohneneinsatz nur zu einer Tageszeit angedacht?	Flugzeiten müssen definiert werden, da die Einsatzzeit zwischen Sonnenaufgang und Abenddämmerung begrenzt ist. (vgl. Schritt 3)			Definition einer ordnungsgemäßen Einsatzhäufigkeit innerhalb der rechtlichen Zeitbeschränkungen.
1.5	Ist die Anzahl an Transportflügen pro Tag ≤ 50 ?	Einsatzhäufigkeit muss gemäß Fragestellung 1.4 im rechtlichen Genehmigungsprozess festgelegt werden. (vgl. Schritt 3)			Prüfung hinsichtlich resultierenden Umfeldbelastungen (z.B. Lärmentwicklung). Ggf. Lärmmessung beilegen.
2. Infrastruktur und Werkslayout					
2.1	Sind digitale Layouts vom Werksgelände vorhanden?	Sind sowohl für die Routenplanung als auch den SORA-Prozess notwendig. (vgl. Schritt 1 & 3)			Erstellung eines digitalen Abbilds der vorhandenen Werksstrukturen.
2.2	Sind die Gebäudehöhen im Layout ersichtlich?	Vermeidung von Hindernissen in der Routenplanung. (vgl. Schritt 1)			Angabe der maximalen Gebäudehöhen im Layout.
2.3	Ist der Einsatzort frei von Flugbeschränkungszonen (z.B. Flughafen, Raffinerien, Naturschutzgebiet, Militärgebiet)?	Beeinflusst die notwendigen Handlungsschritte im Zuge des Genehmigungsverfahrens bei der Luftfahrtbehörde. (vgl. Schritt 1)			Liegt das Werksgelände in diesen Gebieten, ist im Vorfeld eine Sondergenehmigung bei der Luftfahrtbehörde oder dem Militär einzuholen.

2.4	Ist das Werksgelände freistehend und von keinen anderen Gebäuden umgeben?	Festlegung der Flugzone und notwendigen Sicherheitspuffer im Layout für die Risikobewertung. (vgl. Schritt 1)		Es muss genügend Puffervolumen zu den Gebäuden bei einem Absturz berücksichtigt werden. Die rechtliche Flughöhe wird dadurch beeinflusst.
2.5	Ist die unmittelbare Umgebung des Werkslayouts frei von Strommasten oder Überlandleitungen?	Zur Beurteilung möglicher Interferenzen durch elektromagnetische Störungen. (vgl. Schritt 1)		Störquellen, welche die Signalübertragung beeinträchtigen, sind im Vorfeld zu quantifizieren. Ggf. erfolgt eine Anpassung der Flugroute.
2.6	Ist das Werkslayout baulich (z.B. Zäune) abgegrenzt?	Beeinflusst die Risikoabschätzung im Genehmigungsprozess. (vgl. Schritt 1 & Schritt 3)		Der Einsatzort ist für unbeteiligte Personen durch Absperrungen unzugänglich zu machen.
3. Materialtransport				
3.1	Sollen ausschließlich Kleinteile transportiert werden?	Einfluss auf die auszuwählende Drohnenkategorie und Transportaufnahme. (vgl. Schritt 2)		Maximale Gewichtszuladung je Einsatzklasse prüfen.
3.2	Ist das Transportgewicht pro Flug ≤ 5 kg?	Beeinflusst die Drohnenkategorie und Anforderungen des Greifmechanismus. (vgl. Schritt 2 & 4)		Anforderungen an Drohne und Greifmechanismus prüfen.
3.3	Soll der Gütertransport in standardisierten Ladungsträgern erfolgen?	Einfluss auf die Anforderungen des Greifmechanismus. (vgl. Schritt 1 & 4)		Greifmechanismus auf variable Form und Oberfläche des Objekts auslegen.
3.4	Ist das Transportgut als ungefährlich einzustufen?	Notwendige Information für den Genehmigungsprozess. (vgl. Schritt 1 & Schritt 3)		Der Transport gefährlicher Güter ist im Vorfeld von der Luftfahrtbehörde zu evaluieren.
3.5	Sind die Güter unempfindlich gegenüber Erschütterungen?	Relevant für die Auslegung des Anforderungskatalogs der Aufnahmeinheit. (vgl. Schritt 1 & 4)		Spezielle Vorrichtungen gegen Erschütterungen sind bei der Auslegung des Transportbehälters zu berücksichtigen.
3.6	Ist nur eine Quelle und Senke für den Drohnentransport vorgesehen?	Für die Definition der effizientesten Flugroute in der Routenplanung. (vgl. Schritt 1)		Die Anzahl der Übergabepattformen und Flugdistanzen ist zu prüfen. Positionen sind im Layout zu vermerken.

5.2.2 Definition des Einsatzgebiets und Prozessentwicklung

Nach der Voranalyse mittels Fragenkatalog sind weiterführende Informations- und Datenerhebungen notwendig, die Bezug auf den Einsatzort und die Anforderungen an den Prozess nehmen. Diese werden nachfolgend beschrieben:

1. Analyse des Einsatzortes

Aufgrund der rechtlichen Gegebenheiten im Zuge des Betriebsbewilligungsverfahrens (vgl. Modellschritt 3) ist es in der Analysephase notwendig, eine geografische Einsatzanalyse für den Unternehmensstandort näher zu betrachten. Sofern der Unternehmensstandort in Flugbeschränkungszonen oder militärischen Luftbereichen liegt, müssen Sonderbewilligungen und das Einverständnis der lokalen Luftfahrtbehörde eingeholt werden, wodurch die Standortanalyse zwingend notwendig ist. Zur Beurteilung der Boden- und Luftrisiken am Einsatzort dienen sowohl die Antworten auf die Fragen 2.3 bis 2.5 aus dem Fragenkatalog als auch detaillierte Luftkarten (siehe Abbildung 9 im Grundlagenteil). Neben der Kennzeichnung von Flugbeschränkungszonen werden Flugkorridore von tieffliegenden Flugzeugen und Höhenangaben von Bodenerhebungen in diesen Karten ausgewiesen. Diese sind für die Einsatzanalyse des Anwendungsfalls unerlässlich. In der Luftkarte muss der Unternehmensstandort für das nachgelagerte Bewilligungsverfahren markiert werden (z. B. durch eine Flagge), siehe Abbildung 31.

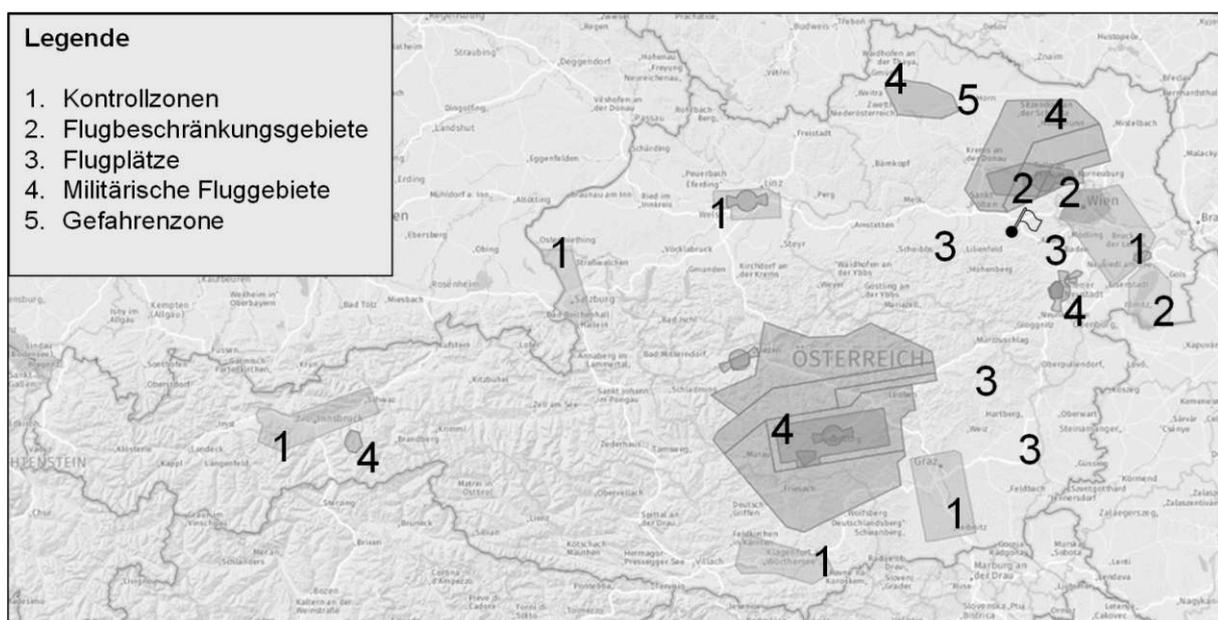


Abbildung 31: Geografische Standortanalyse (eigene Darstellung in Anlehnung an Austro Control 2020, o.S.)

Die erhobenen Daten fließen in die SORA-Prozessabwicklung im Zuge des Betriebsgenehmigungsverfahrens bei der Luftfahrtbehörde ein und bilden einen

zusätzlichen Baustein für das notwendige luftfahrtrechtliche Lastenheft in Schritt 3 (vgl. Kapitel 5.4) des Vorgehensmodells.

2. Definition der Prozessanforderungen

Für die Implementierung des Materialtransports mit Drohnen am Werksgelände müssen im Vorfeld die Abläufe der bestehenden Prozesse im innerbetrieblichen Logistikbereich erhoben und analysiert (vgl. Antwort der Frage 1.2 im Fragenkatalog) sowie gegebenenfalls an den neuen Technologiestandard angepasst werden. Sofern bestehende Logistikprozesse den Einsatz der Drohnentechnologie nicht unterstützen, ist eine grundlegende Überarbeitung betroffener und angrenzender Prozesse vonnöten. Für die Darstellung der Prozessabläufe im Zuge der Konzeptionsphase wird das Swimlane-Darstellungsformat verwendet (siehe Abbildung 32).

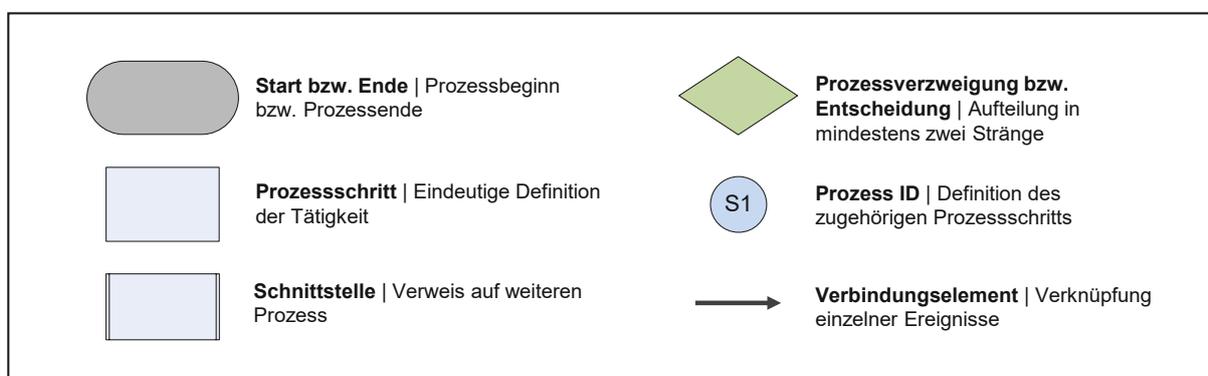


Abbildung 32: Verwendete Symbole im Swimlane-Darstellungsformat (eigene Darstellung in Anlehnung an Wagner und Patzak 2019, S. 106)

Prozessverantwortliche, die einerseits für die Flugüberwachung der Drohne und andererseits für die Wartung sowie Entnahme des Transportguts verantwortlich sind, müssen ebenfalls in der Soll-Prozess Entwicklung berücksichtigt werden. Schnittstellen zu IT-Netzwerken sind im Vorfeld zu prüfen, um die Interaktivität mit der Drohnensoftware zu gewährleisten. Die digitale Prozessdokumentation wird für das luftfahrtrechtliche Lastenheft in Schritt 3 benötigt, da die visualisierten Prozessbilder dem Dokument beigelegt werden müssen, um die Drohnenkompetenz im Unternehmen im Zuge des Genehmigungsverfahrens zu untermauern.

5.2.3 Flug- und Routenplanung

Neben beeinflussenden Umweltbedingungen in unmittelbarer Umgebung des Unternehmens, die eine wesentliche Hürde für den Drohneinsatz darstellen können, ist das Werkslayout mit den Konturen eine weitere Einflussgröße. Diesbezüglich ist es zwingend notwendig, auf Basis der Antworten des Fragenkatalogs (vgl. Fragen 2.1-2.5 und Frage 3.6) einen Analyseplan zu erstellen. Im Zuge dieser Analysephase sind Restriktionen in einem digitalen Layout (z. B. CAD-(Computer Aided Design)Plan) zu

vermerken, um für die Routenführung der Drohne eine Entscheidungsgrundlage zu schaffen.

Sowohl der Grundriss als auch die Höhenprofile statischer Hindernisse am Werksgelände sind im Vorfeld durch bestehende Gebäudepläne oder Experteninterviews zu prüfen und im Plan zu vermerken, um Betriebsunfälle während des operativen Betriebs mit der Drohne zu verhindern und eine ideale Routenplanung festzulegen. Zusätzlich zu den gebäudetechnischen Restriktionen müssen mobile Hindernisse, die durch Stapler, Personen oder LKWs gegeben sein können, bei der Routenführung berücksichtigt werden. Diesbezüglich können im Vorfeld durchgeführte Material-, Verkehrs- und Personenflussanalysen zum Abgleich herangezogen werden. Auf Basis der Analyseergebnisse lassen sich anschließend präventive Sicherheitsvorkehrungen (z. B. Absperrungen, akustische Signale vor Flugbeginn etc.) ableiten. Die Montage von Sicherheitsnetzen entlang eines Flugkorridors als mögliche Schutzbarriere und weitere Schutzmechanismen müssen im Vorfeld in die Werksstrukturanalyse einbezogen werden, da dies in die Flugroutenplanung der Drohne einfließt und im Layout vermerkt werden muss. Außerdem muss bei der Routenführung die Funkübertragungsfähigkeit (GPS, RTK, WLAN) beachtet werden und das Gebiet auf Interferenzen durch elektromagnetische Störungen mittels Signalstärken-Messgerät geprüft werden. Hinsichtlich der Schallentwicklung und -ausbreitung des Drohnenflugs zu angrenzenden Grundstücken und Gebäuden muss im Zuge der Analysephase auch eine Schallmessung durchgeführt und dokumentiert werden.

Zusätzlich zu den bereits beschriebenen Restriktionen müssen für die Flug- und Routenplanung der Drohne relevante räumliche Eigenschaften in dem Plan definiert werden. Diese sind:

- Grundriss der Werksstrukturen inklusive Maßstabsangaben
- Legende
- Standorte der Drohnenplattformen (Quellen und Senken)
- Flugrouten inklusive Richtungsangaben
- Stromanschlüsse für die induktive Ladefunktion der Plattformen
- Mögliche Kreuzungspunkte (z. B. mit Geh- und Fluchtwegen) entlang der Routenführung
- Etwaige statische Hindernisse am Werksgelände (z. B. Schornsteine)

In der exemplarischen Layoutanalyse in Abbildung 33 sind sowohl die definierten Quellen- und Senkenbeziehungen für den Materialtransport mittels Drohne zwischen der Warenannahme (A) und dem Ersatzteillager (ETL) eingezeichnet als auch unterschiedliche Flugroutenvarianten (V1 und V2). Ein Flug entlang eines fix vorgegebenen Flugkorridors, der vom übrigen Werksverkehr gänzlich abgegrenzt ist,

ist in der Variante 1 ersichtlich. Trotz der längeren Flugdistanz als bei Variante 2, die die direkte Luftlinie über das Gebäude nutzt, kann die Festlegung eines fixen Bereichs für den Drohnentransport zielführend sein, da diverse Restriktionen (z. B. Schornsteine, Dampfauslässe, Funkmasten etc.) den direkten Überflug erschweren und das Unfallrisiko erheblich steigern können. Je nach Anwendungsszenario ist die Erweiterung einzelner Quellen und Senken im Werkslayout möglich, wobei die optimale Flugroutenführung für eine effiziente Transportabwicklung geprüft werden muss. Der Plan muss schlussendlich dem Lastenheft in Schritt 3 beigefügt werden.

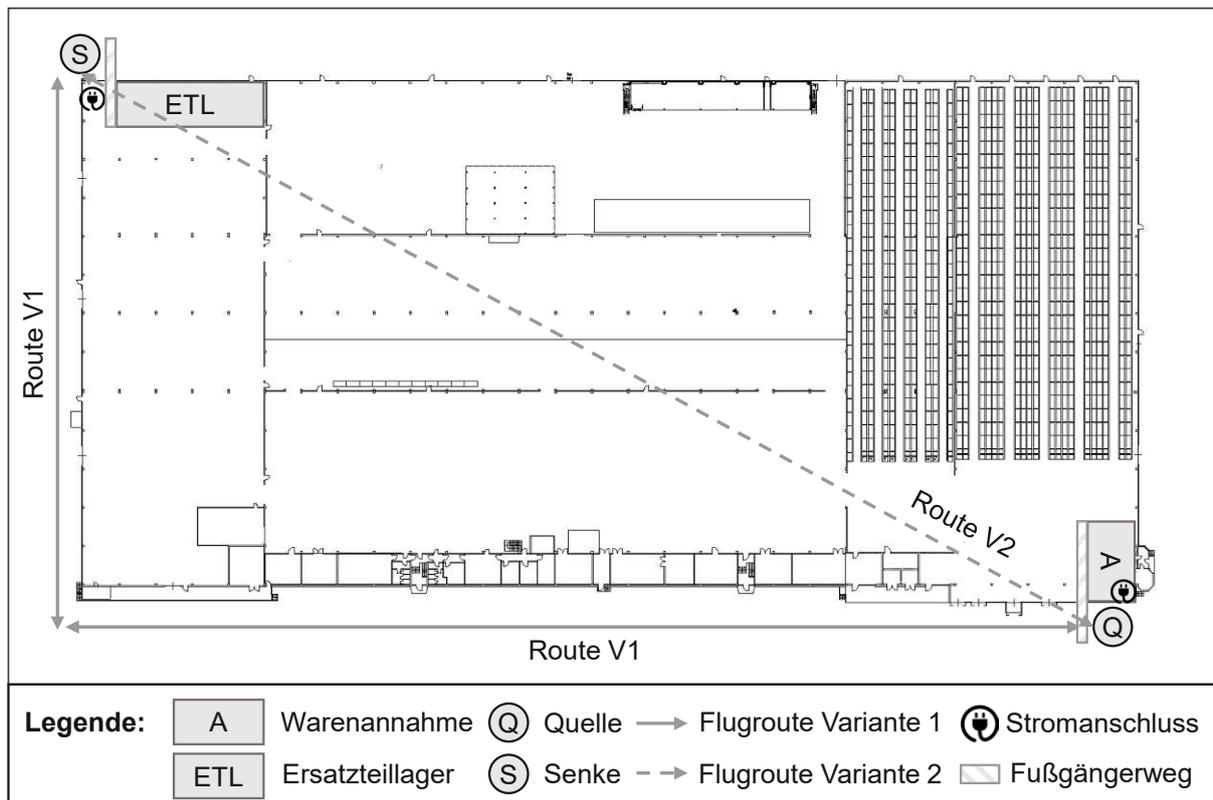


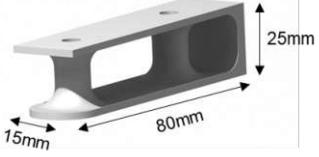
Abbildung 33: Layoutanalyse und Flugroutenplanung (eigene Darstellung)

5.2.4 Transportgutklassifizierung

In der Analysephase ist es außerdem zwingend notwendig, das Produktspektrum für den Drohnentransport zu bewerten, um die Produkte je nach Größe, Gewicht und möglichem Schlichtmuster im Ladungsträger gruppieren zu können. Nach abgeschlossener Layoutbetrachtung und festgelegter Flugroute ist die Klassifizierung der Transportgüter ein wesentliches Einflusskriterium für die Frequenz der Transportflüge. Je nach Produktart und deren Eigenschaften ist es erforderlich, einerseits die Häufigkeit der Flüge an den Einsatzzweck anzupassen und andererseits die Anforderungen an die Drohne inklusive der automatisierten Transportvorrichtung (vgl. Modellschritt 4) darauf auszulegen.

Die erhobenen Informationen zu den Fragestellungen 3.1–3.5 des Fragenkatalogs zur Transportfähigkeit, Gewichtsangabe, Erschütterungsempfindlichkeit, Brennbarkeit und Gefahrgutklassifizierung der Transportgüter sind in diesem Abschnitt mithilfe eines vordefinierten Datenblatts zu präzisieren. Aufgrund der aktuellen Gesetzesgrundlage sind insbesondere Gefahrgüter (z. B. chemische, biologische, radioaktive) für den Transport mittels Drohne auszuklammern. Um eine standardisierte Vorgehensweise zu etablieren, wird die Güterklassifizierung in einem Transportdatenblatt dokumentiert und dient ebenfalls als Beilage für das Lastenheft in Schritt 3. Der Aufbau des Datenblatts inklusive einer beispielhaften Produktbeschreibung ist in Tabelle 12 ersichtlich. Die Positionen 1–4 sind im Datenblatt manuell zu befüllen. Für die Positionsbeschreibungen 5–8 ist die zutreffende Antwortmöglichkeit anzukreuzen.

Tabelle 12: Transportdatenblatt mit beispielhaften Beschreibungen (eigene Darstellung)

Transportdatenblatt Güterdefinition			
Pos.	Positionsbezeichnung	Beschreibung	
1	Artikelklassifizierung	Metallisches Bauteil	
2	Werkstoffart	Aluminium	
3	Gewicht	300 g	
4	Geometrieabmessungen inkl. Abbildung	 (eigene Darstellung)	
5	Erschütterungsempfindlich	Nein	Ja
6	Gefahrgut	Nein	Ja
7	Temperaturbeständig	Nein	Ja
8	Stapel- u. Schlichtfähigkeit	Nein	Ja

5.2.5 Zusammenfassung von Schritt 1 | Anforderungsmappe

Aus den mithilfe eines Fragenkatalogs erhobenen Antworten sowie den festgelegten Einsatzbereichen im Zuge der Layoutuntersuchung resultieren ein Einsatzplan für den Drohnenflug mit definierter Flugroute sowie Auf- und Abgabepunkte im Werkslayout. Darauf aufbauend erfolgt die Erfassung produktrelevanter Basisinformationen der zu transportierenden Teile mit einem standardisierten Transportdatenblatt. Das Ergebnis von Schritt 1 ist eine Anforderungsmappe, die aus den Einzeldokumenten zusammengestellt und dem zu formulierenden Lastenheft in Schritt 3 angehängt wird.

5.3 Schritt 2 | Transporttechnologiebewertung: Auswahl einer geeigneten Drohne für den automatisierten Materialtransport

Basierend auf den Antworten des Fragenkatalogs in Schritt 1 hinsichtlich des Einsatzorts, der Einsatzhäufigkeit und den Transportguteigenschaften sowie den erhobenen Informationen und Daten für den Drohneneinsatz erfolgt in Schritt 2 eine Vorselektion verfügbarer Drohnentechnologien in Bezug auf den analysierten Stand der Wissenschaft und Technik. Auf Basis der in Kapitel 2.3.1 vorgenommenen technologischen Eingrenzung werden im weiteren Verlauf geeignete Mehrfachrotorbauformen (Quadro-, Hexa-, Octocopter) im Detail gegenübergestellt und bewertet.

5.3.1 Methodische Vorgehensweise bei der Drohnenauswahl

1. Morphologischer Kasten

Zur Eingrenzung von am Markt verfügbaren Drohnentechnologien, Lösungskonzepten und Bauformen werden die anwendungsspezifischen Anforderungen aus den vorangegangenen Kapiteln mithilfe eines morphologischen Kastens (siehe nachfolgende Tabelle 13) gegenübergestellt. Diese Vorgehensweise ermöglicht es, eine große Anzahl an Anforderungskriterien und Ausprägungen zu verknüpfen und verschiedene Lösungsansätze vereinfacht grafisch darzustellen (vgl. Fleischer und Theumert 2009, S. 4).

Tabelle 13: Morphologischer Kasten zur Verknüpfung von Anforderungskriterien mit möglichen Lösungsvarianten (eigene Darstellung in Anlehnung an Fleischer und Theumert 2009, S. 11)

Legende		Morphologischer Kasten zur Verknüpfung von Anforderungskriterien mit Lösungsvarianten			
Grad der Erfüllung	Symbol				
Anforderung	A				
Optional	O				
Anforderungskriterien	Varianten	Quadrocopter	Hexacopter	Octocopter	A/O
Outdoor-Einsatz		Ja	Nein	-	
Wasserbeständigkeit		Ja	Nein	Teilweise	
Geringes Eigengewicht		$1 \text{ kg} \leq w < 3 \text{ kg}$	$3 \text{ kg} \leq w < 5 \text{ kg}$	$5 \text{ kg} \leq w \leq 10 \text{ kg}$	
Geringe Investitionskosten		$1.000 \text{ €} \leq x < 5.000 \text{ €}$	$5.000 \text{ €} \leq x < 10.000 \text{ €}$	$10.000 \text{ €} \leq x \leq 30.000 \text{ €}$	
RTK-Kompatibilität		Ja	Nein	-	
Traglast		$0 \text{ kg} \leq y < 1 \text{ kg}$	$1 \text{ kg} \leq y < 3 \text{ kg}$	$3 \text{ kg} \leq y \leq 6 \text{ kg}$	
Automatisierte Flüge		Ja	Nein	-	
Hohe Flugreichweite		VLOS	BVLOS	Kombiniert	
Lange Flugzeit		$10 \text{ min} \leq z < 20 \text{ min}$	$20 \text{ min} \leq z < 30 \text{ min}$	$30 \text{ min} \leq z \leq 60 \text{ min}$	
Fallschirm-Kompatibilität		Ja	Nein	-	
Kamera-Adaptierbarkeit		Ja	Nein	Integriert	

Die Anforderungskriterien in Abhängigkeit der exemplarisch dargestellten Drohnenvarianten in Tabelle 13 werden mit dem geforderten Erfüllungsgrad

(Anforderung oder optional) klassifiziert, um zwingende Forderungen an die Drohne aufzuzeigen. Je nach unternehmensspezifischen Anforderungen, Umfeldeinflüssen und rechtlichen Rahmenbedingungen können unterschiedliche Lösungsvarianten für den Anwendungsfall zielführend sein.

Damit Lösungsansätze und interessante Alternativlösungen eingrenzbar sind, werden die geforderten Kriterien je Variante (Quadrocopter, Hexacopter, Octocopter) mit einer Punktelinie verbunden. Das daraus resultierende Schaubild stellt die gewünschten Parametereigenschaften – abhängig von den Drohnenbauformen – in den Vordergrund und dient als Basis für die nachfolgende Nutzwertanalyse.

2. Nutzwertanalyse

Aufgrund der im Grundlagenteil erläuterten technologischen und rechtlichen Herausforderungen müssen verfügbare Drohnenvarianten hinsichtlich der Anforderungskriterien aus dem morphologischen Kasten mit einer geeigneten Methode, z. B. einer Nutzwertanalyse oder einem Kriterienkatalog, bewertet werden. Das Ziel ist es, auf Basis der erreichten Punktzahl bzw. des Grades der Erfüllung eine fundierte Entscheidung zur Auswahl einer für den definierten Anwendungsfall optimalen Drohne treffen zu können.

Die Nutzwertanalyse, auch als Scoring-Modell oder Punktwertverfahren bekannt, dient hierbei als Bewertungsmethode mehrerer Anforderungskriterien und verschiedener Technologieausprägungen im Kontext einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Investitionsentscheidung (vgl. Burghardt 2018, S. 101). Der Nutzen dieser Bewertungsmethode liegt in der Quantifizierung und Vergleichbarkeit von mehreren qualitativen Anforderungen und der subjektiven Charakterisierung durch Fachexperten, wobei die maximale Gewichtungszahl mit der Zahl 100 begrenzt ist (vgl. Schuh und Klappert 2011, S. 328).

In nachfolgender Tabelle 14 ist die Vorgehensweise einer Nutzwertanalyse für den Vergleich exemplarischer Drohnenvarianten dargestellt.

Tabelle 14: Durchführung einer Nutzwertanalyse für den Transporttechnologievergleich (eigene Darstellung in Anlehnung an Schuh und Klappert 2011, S. 328)

Bewertungskriterien						Nutzwertanalyse zur Bewertung von industriellen Multicoptern für den intralogistischen Materialtransport							
Grad der Erfüllung	--	-	0	+	++								
Punktwertung	1	2	3	4	5	Quadrocopter		Hexacocter		Octocopter			
Anforderungskriterien	Gewichtung [g _j]	Grad der Erfüllung [TN _{ij}]		Gewichteter Teilnutzwert [TE _i]		Grad der Erfüllung [TN _{ij}]		Gewichteter Teilnutzwert [TE _i]		Grad der Erfüllung [TN _{ij}]		Gewichteter Teilnutzwert [TE _i]	
		Outdoor-Einsatz											
Wasserbeständigkeit													
Geringes Eigengewicht													
Geringe Investitionskosten													
RTK-Kompatibilität													
Traglast													
Automatisierte Flüge													
Hohe Flugreichweite													
Lange Flugzeit													
Fallschirm-Kompatibilität													
Kamera-Adaptierbarkeit													
Gesamtnutzwert [GN_i]													
Rangordnung													

Für die Bewertung der jeweiligen Anforderungen in Abhängigkeit von der Drohnenvariante dient der Grad der Erfüllung TN_{ij} . Die Unter- und Obergrenze der Punktevergabe ist mit 1 und 5 festgelegt. Sollte der Erfüllungsgrad weder positiv noch negativ sein, kommt es zu einer neutralen Bewertung von 3 Punkten. Je nach Wichtigkeit und Notwendigkeit der definierten Anforderungskriterien für die Drohnenvarianten erfolgt die Punkteverteilung in der Gewichtungsspalte mit g_j . Die Verteilung der vorhandenen 100 Punkte erfolgt gemäß den Präferenzen des Unternehmens, damit die Drohrentypen für den spezifischen Anwendungsfall zielführend sind.

Die Teilergebnisse der gegenübergestellten Technologien lassen sich nach dem folgenden Schema berechnen:

$$TE_i = g_j * TN_{ij}$$

mit

TE_i ... Gewichteter Teilnutzwert für das jeweilige Anforderungskriterium

g_j ... Gewichtung des Bewertungskriteriums

TN_{ij} ... Grad der Erfüllung je Anforderungskriterium und Drohnenvariante

Formel 1: Gewichteter Teilnutzwert je Anforderungskriterium (eigene Darstellung in Anlehnung an Schuh und Klappert 2011, S. 328)

Nach der Berechnung der Teilsummen für die Anforderungskriterien je Drohne kommt es zur Bildung der Gesamtsumme mit folgender Formel 2:

$$GN_i = \sum_{j=1}^n g_j * TN_{ij}$$

mit

GN_i ... Gesamtnutzwert für die jeweilige Drohnenvariante

g_j ... Gewichtung des Bewertungskriteriums

TN_{ij} ... Grad der Erfüllung je Anforderungskriterium und Drohnenvariante

Formel 2: Berechnung des Gesamtnutzwerts für die Drohnenauswahl (eigene Darstellung in Anlehnung an Wöltje 2008, S. 112)

Abschließend werden die Endresultate verglichen, wobei die Drohnenvariante mit dem höchsten Gesamtnutzwert GN_i und dem daraus resultierenden ersten Rang zu bevorzugen ist. Daraus lassen sich am Markt verfügbare Drohnen für den unternehmensspezifischen Anwendungsfall selektieren.

5.3.2 Zusammenfassung von Schritt 2 | Kriterienkatalog für die Technologiebewertung und Drohnenauswahl

Durch die methodische Vorgehensweise und Verwendung eines morphologischen Kastens zur Verknüpfung der Anforderungskriterien und Drohnenvarianten lassen sich unterschiedliche Ausführungsformen grafisch gegenüberstellen.

Die darauf aufbauende Nutzwertanalyse dient zur Bewertung und Reihung verfügbarer Drohnenvarianten. Die Multicopter (Quadro-, Hexa-, Octocopter) werden mit Punkten bewertet und gereiht.

Das Ergebnis von Schritt 2 ist ein Kriterienkatalog zur fundierten Entscheidungsfindung und Auswahl einer für den unternehmensspezifischen Anwendungsfall geeigneten Drohne. Dieses Auswahlverfahren ist wesentlich für die Formulierung des Lastenhefts für das luftfahrtrechtliche Betriebsbewilligungsverfahren im nachfolgenden Schritt notwendig.

5.4 Schritt 3 | Formulierung eines Lastenhefts für die luftfahrtrechtliche Betriebsbewilligung in Österreich

Nach Aufnahme der unternehmensspezifischen Informationen und Daten in Schritt 1 und der darauf aufbauenden Technologiebewertung zur Drohnenauswahl in Schritt 2 werden in diesem Schritt die Spezifikationen an das Lastenheft für das Genehmigungsverfahren bei der Luftfahrtbehörde festgelegt. Die Gestaltung des Dokuments orientiert sich an den Richtlinien VDI 2519-01 (VDI 2519-01:2001-12) und VDI/VDE 3694 (VDI/VDE 3694:2014-04). Wie bereits im Grundlagenkapitel 2

dargelegt, ist für die Drohnenkategorie „Specific“ ein Nachweis der Risikobewertung des zugrundeliegenden Use-Cases notwendig, um Einsätze am Werksgelände durchführen zu können. Dazu müssen die verpflichtenden Durchführungsschritte in ein Lastenheft überführt und detailliert beschrieben werden. Diesbezüglich fließen auch die erhobenen Unternehmensinformationen und erarbeiteten Dokumente aus der Analysephase (Schritt 1) in die finale Lastenhefterstellung ein. Der systematische Ablauf der zehn Prozessschritte sowie mögliche Iterationsschleifen inklusive der Entscheidungsbausteine sind in Abbildung 34 ersichtlich.

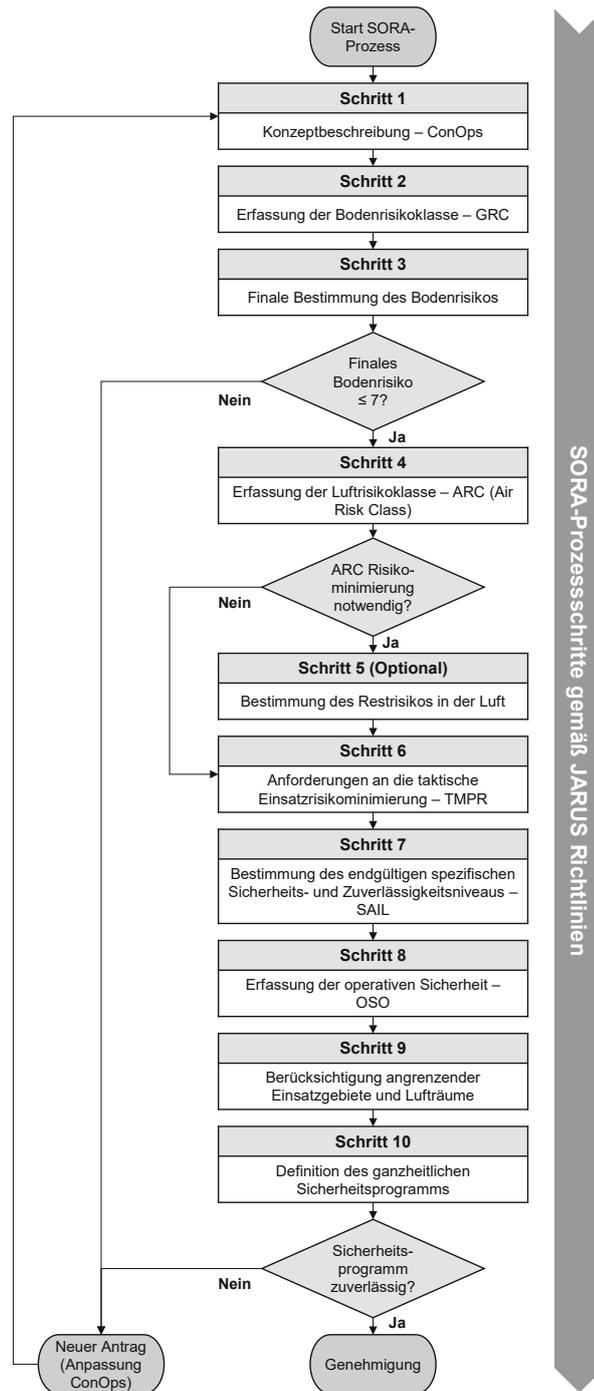


Abbildung 34: SORA-Prozess für die Zulassung der Kategorie Specific (eigene Darstellung in Anlehnung an Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems 2019, S. 18)

- **Schritt 1 | Konzeptbeschreibung – ConOps (Concept of Operations)**

Im ersten Prozessschritt muss der verantwortliche Antragsteller alle relevanten Informationen hinsichtlich der technischen, betrieblichen und systemrelevanten Spezifikationen zum Use-Case definieren, um eine Risikobewertung durchführen zu können. Dafür dient die Anforderungsmappe aus Schritt 1 des Vorgehensmodells als Grundlage.

- **Schritt 2 | Erfassung der Bodenrisikoklasse – GRC (Ground Risk Class)**

Zur Eingrenzung des Gefährdungspotenzials wird in Abhängigkeit von Gewicht, Fluggeschwindigkeit und den maximalen Abmessungen der ausgewählten Drohne aus Schritt 2 die daraus theoretisch resultierende kinetische Energie bei einem Bodenaufprall ermittelt, um das Bodenrisiko je nach den beabsichtigten Einsatzszenarios ableiten zu können. Die Einteilung des Risikos erfolgt von 1–10, wobei 10 das höchste Gefahrenpotenzial für involvierte Personen aufweist. Mit der berechneten kinetischen Energie und dem Missionsszenario (z. B. Drohnenflug im VLOS-Modus über kontrolliertem Bodenbereich) lässt sich die Risikozahl aus einem Tabellenblatt gemäß den offiziellen SORA-Richtlinien (vgl. Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems 2019, S. 20) entnehmen.

- **Schritt 3 | Finale Bestimmung des Bodenrisikos**

In diesem Durchführungsschritt werden schadensmindernde Maßnahmen (z. B. Absperrung des Flugbereichs, Begehung vor Missionsbeginn, technische Sicherheitskomponenten, Entwicklung eines Notfallplans für Missionsabweichungen etc.) zur Risikominimierung betrachtet, um abschließend die endgültige Gefahrenbewertung des Drohneneinsatzes durchzuführen. Dafür ist die erzielbare Schadensbegrenzung bei Missionsabweichung durch die getroffenen Maßnahmen zu bewerten.

Dabei wird zwischen drei risikomindernden Maßnahmen (M1 bis M3) unterschieden: Maßnahmen (M1) zur Gefahrenreduktion von involvierten Personen im Einsatzbereich durch Berücksichtigung des möglichen Absturzradius bei definierter Flughöhe der Drohne sowie Absperrungen und Distanzabständen zu Menschen. Schadensmindernde Maßnahmen (M2) zur Minimierung der Aufprallenergie am Boden durch Absturzsicherungen (z. B. Fallschirmsysteme). Die Entwicklung von festgelegten Handlungsplänen (siehe Abbildung 43 im Fallbeispiel 1) bei unvorhergesehenen Missionsabweichungen dient als weitere mögliche schadensmindernde Maßnahme (M3) für das Bodenrisiko (GRC) aus Schritt 2.

Die erzielbaren Korrekturfaktoren je nach Abschwächungsmöglichkeit des Risikos durch die Maßnahmen werden wiederum aus einem Tabellenblatt der SORA-Richtlinien (vgl. Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems 2019, S. 21) entnommen und fließen in die endgültige Bewertungskalkulation ein. Der resultierende Risikozahlenwert für die Bodenrisikoklasse aus Schritt 2 wird mit den Korrekturzahlenwerten aus Schritt 3 aufsummiert. Hierbei ist zu beachten, dass der niedrigste Wert des Bodenrisikos je kinetischer Energieklasse aus Schritt 2 trotz negativer Risikominimierungskennzahlen nicht unterschritten werden darf.

Am folgenden Beispiel wird der Berechnungsvorgang illustriert: Für die gewählte Drohne aus Modellschritt 2 wird die maximale kinetische Energie berechnet. Anhand des Ergebnisses und des definierten Einsatzszenarios wird exemplarisch die Bodenrisikokennzahl (GRC) mit dem Wert zwei (niedrigster Spaltenwert) aus der zugehörigen Tabelle in der Verordnung entnommen. Durch gezielte Maßnahmen ergibt sich beispielhaft für M1 eine Risikominimierungskennzahl von minus eins. Für die schadensmindernden Maßnahmen M2 ergibt sich ein Wert von null. Die Maßnahmen M3 ergeben einen Wert von eins. Die Summenbildung liefert somit einen finalen Bodenrisikowert von drei, da wie bereits oben beschrieben der niedrigste Spaltenwert der Bodenrisikotabelle aus Schritt 2 nicht unterschritten werden darf.

Sofern das Bodenrisiko einen Summenwert kleiner oder gleich sieben aufweist, kann der nachfolgende Schritt 4 durchlaufen werden. Bei Werten über sieben muss der SORA-Prozess abgebrochen (siehe Abbildung 34) und die Konzeptbeschreibung (Schritt 1) überarbeitet werden. In diesem Fall ist auch eine Beantragung in der restriktiveren Einsatzklasse „Certified“ zu prüfen.

- **Schritt 4 | Erfassung der Luftrisikoklasse – ARC (Air Risk Class)**

In diesem Prozessschritt steht die Vermeidung von Kollisionen mit unbeteiligten Flugteilnehmern im Fokus, wobei Risiken durch den Betrieb zu fixierten Zeiten und durch definierte Flugbereiche minimiert werden können. Die ARC-Klassifizierung ist eine qualitative Einstufung der Häufigkeit, mit der eine Drohne in einem typischen allgemeinen zivilen Luftraum auf ein bemanntes Luftfahrzeug treffen könnte. Das verbleibende Restrisiko ist mittels spezifischer Maßnahmen während des Betriebs auf ein Minimum zu reduzieren. Um Drohnen für andere Luftteilnehmer sichtbar zu machen, ist es zielführend, Erkennungs- und Frühwarnsysteme in die Systemkonfiguration zu integrieren und somit das Luftrisiko zu reduzieren. Diesbezüglich erfolgt eine Unterteilung des Luftraums in 13 Kollisionskategorien, die je nach Flughöhe und Einsatzort (z. B. in der Nähe sensibler Infrastrukturen, Städten, in ländlichen Umgebungen etc.) unterschieden werden. Mithilfe dieser Risikoabschätzung ist eine Einstufung in Bezug auf die Annäherungshäufigkeit zwischen der Drohne und anderen Luftfahrtteilnehmern möglich.

- **Schritt 5 | Bestimmung des Restrisikos in der Luft (optionaler Schritt)**

Wenn die Luftrisikoklasse aus Schritt 4 für den Use-Case des Betreibers zweckmäßig und auf den Einsatzort sowie die Betriebshäufigkeit der Drohne anwendbar ist, muss der Prozessschritt 5 nicht berücksichtigt werden. Für den Fall, dass die Risikoklasse aus dem vorangegangenen Schritt dem Anwender zu hoch erscheint, sind strategische Abhilfemaßnahmen zur Minimierung des

vermeintlichen Kollisionsrisikos gemäß dem ARC-Reduktionsverfahren vorzulegen (z. B. Flughöhenbegrenzung, Nachweis über Flugaufkommen im Fluggebiet).

- **Schritt 6 | Anforderungen an die taktische Einsatzrisikominimierung – TMPR (Tactical Mitigation Performance Requirement and Robustness Levels)**

Nach dem Start der Drohne müssen durchgängig taktische Schritte zur Reduzierung des Restrisikos von Kollisionen in der Luft gesetzt werden. Dafür dient bei VLOS-Einsätzen der simple Ansatz der Risikoidentifikation und -vermeidung durch den operierenden Piloten. Zur proaktiven Risikoeinschätzung ist bei Flügen innerhalb des Sichtbereichs im Vorfeld ein dokumentiertes Deeskalationskonzept für eventuelle Flugzeugannäherungen auszuarbeiten. Bei BVLOS-Operationen sind alternative Systeme nötig, die dynamisch und auf Basis von Echtzeitinformationen auf mögliche Flugzeugkollisionen selbstständig oder in Kooperation mit dem Piloten agieren.

- **Schritt 7 | Bestimmung des endgültigen spezifischen Sicherheits- und Zuverlässigkeitsniveaus – SAIL (Specific Assurance and Integrity Levels)**

Dieser Prozessschritt führt die bereits bewerteten Boden- und Luftrisiken in dem durchzuführenden Use-Case zusammen, wodurch die erforderlichen Aktivitäten für den risikoarmen Betrieb der Drohne ableitbar sind. Die Kombination erlaubt eine Bewertung hinsichtlich des Vertrauensgrads, dass das System gemäß der definierten Konzeptbeschreibung aus Schritt 1 (ConOps) kontrollierbar ist. Die resultierende SAIL-Kennzahl (I bis VI) fließt in die Bestimmung der Sicherheitsziele während des operativen Betriebs im nachfolgenden Schritt 8 ein.

- **Schritt 8 | Erfassung der operativen Sicherheit – OSO (Operational Safety Objectives)**

Mithilfe der zuvor eruierten Kennziffer aus Schritt 7 erfolgt in diesem Abschnitt die Bewertung der notwendigen Schutzmaßnahmen für die Gewährleistung der operativen Sicherheit sowie des Zuverlässigkeitsgrads. Die Bewertungskriterien berücksichtigen technische Probleme mit der Drohne, Beeinträchtigungen der extern angebrachten Systeme (z. B. Fallschirm oder Sensorik), menschliche Fehlerquellen und ungünstige Betriebsbedingungen. Je nach SAIL-Kennzahl und Sicherheitsziel sind Kriterien mit unterschiedlichen Zuverlässigkeitslevels (niedrig, mittel, hoch) zu erfüllen. Dabei müssen dokumentierte Nachweise durch gezielte Prozessentwicklungen (vgl. Abbildung 44, Abbildung 45 und Abbildung 46 im Fallbeispiel 1) gemäß dem definierten Swimlane-Darstellungsformat (vgl. Abbildung 32) aus dem Teilschritt 1 des Vorgehensmodells bei der Luftfahrtbehörde vorgelegt werden.

- **Schritt 9 | Berücksichtigung angrenzender Einsatzgebiete und Lufträume**

Der Fokus dieses Prozessschrittes liegt in der Risikoabschätzung für umliegende Gebiete und Personen am Boden sowie angrenzende Lufträume bei einem unvorhergesehenen Kontrollverlust der Drohne. Weder ein interner noch ein externer Systemausfall darf dazu führen, dass es zu einer Gefährdung Unbeteiligter kommt. Diesbezüglich dienen die erhobenen Informationen und Daten aus der Analysephase (Schritt 1 des Vorgehensmodells) hinsichtlich des Einsatzgebiets und der definierten Flugroute der Drohne als Referenz.

- **Schritt 10 | Beschreibung des ganzheitlichen Sicherheitsprogramms**

Auf Basis des methodischen Vorgehens des SORA-Prozesses und der zugrundeliegenden Prozessschritte inklusive der Risikominimierungsmaßnahmen werden beim Genehmigungsprozess die Vertrauenswürdigkeit und die Zuverlässigkeit des Systems bewertet. Zusätzlich ist es notwendig, Anforderungen involvierter Interessensgruppen in dem ganzheitlichen Sicherheitsprogramm zu berücksichtigen. Sofern die Zuverlässigkeit gegeben ist, kommt es zur Genehmigung des Betriebsbewilligungsantrags durch die Luftfahrtbehörde. Falls dem nicht so ist, erfolgt eine geforderte Rückkopplung zur Konzeptbeschreibung (Schritt 1), wobei die Use-Case-Beschreibung an die jeweiligen Gegebenheiten angepasst werden muss.

5.4.1 Zusammenfassung von Schritt 3 | Formulierung eines Lastenhefts

Für den industriellen Drohneneinsatz am Werksgelände werden in Schritt 3 des Vorgehensmodells die rechtlichen Anforderungen entsprechend den geltenden Regularien dargelegt. Die 10 Durchführungsschritte sowie entwickelten Dokumente für die Kategorisierung der Drohne in der jeweiligen Einsatzklasse werden in einem Lastenheft gemäß den Richtlinien VDI 2519-01 (VDI 2519-01:2001-12) und VDI/VDE 3694 (VDI/VDE 3694:2014-04) aufbereitet und zusammengefasst. Das Ergebnis ist ein für den Genehmigungsprozess unerlässliches Dokument, das bei der Luftfahrtbehörde im Zuge der Betriebsbewilligung einzureichen ist.

5.5 Schritt 4 | Zusammenführung von Drohne, Aufnahmeverrichtung und Landeplattform: Definition einer Anforderungsliste

Gemäß der definierten Eingrenzung, die in Kapitel 2.3 erläutert wurde, werden in diesem Abschnitt sowohl für die Transportaufnahmeverrichtung und die notwendigen Plattformen in Abhängigkeit von der Drohne unternehmensspezifische Anforderungen

festgelegt, welche die Systembestandteile allgemeingültig umsetzbar machen sollen. Anhand der durchgeführten Literaturanalyse in Bezug auf bestehende Modelle und Konzepte für Transportaufnahmevorrichtungen (vgl. Kapitel 3.3) sowie Lande- und Übergabepattformen (vgl. Kapitel 3.4) ist festzuhalten, dass aktuelle Vorrichtungen den geforderten Anforderungen nicht genügen bzw. die Bauteile nach aktuellem Stand nicht frei am Markt erwerbbar sind und dadurch gemäß den definierten Anforderungslisten konzipiert werden müssen. Für eine konstruktive Umsetzung der jeweiligen Systembauteile erweisen sich die nachfolgend beschriebenen Prozessschritte des Produktentwicklungsprozesses gemäß der VDI-Richtlinie 2221 als zielführend. Die Grundlage dafür wird durch die entwickelte Anforderungsliste geschaffen.

5.5.1 Methodische Vorgehensweise anhand des Produktentwicklungsprozesses nach VDI-Richtlinie 2221

Die zentralen Aufgaben des Produktentwicklungsprozesses umfassen die Konzipierung und Planung, die Definition von Anforderungskriterien, die Erstellung eines Detailkonzepts inklusive Prototypengestaltung und die finale Umsetzung des Produkts (vgl. Kirchner 2020, S. 7).

Wesentliche Einflussparameter entlang eines Entwicklungsprozesses sind in Abbildung 35 dargestellt und müssen bereits bei der Anforderungsdefinition berücksichtigt werden, um schlussendlich ein funktionsfähiges Produkt zu generieren.

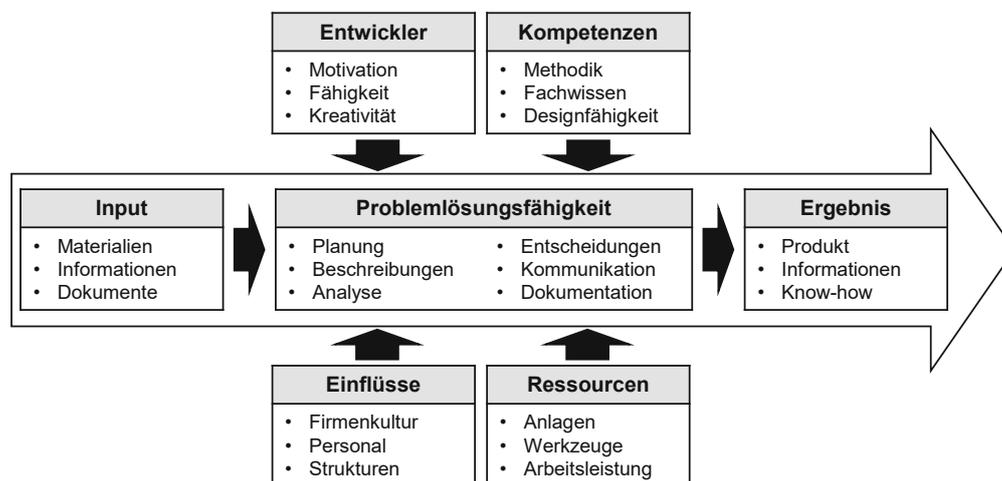


Abbildung 35: Einflussfaktoren in einem Produktentwicklungsprozess (eigene Darstellung in Anlehnung an Geis et al. 2007, S. 6–7)

Die Prozessschritte für die Realisierung eines funktionsfähigen Produkts entlang der jeweiligen Entwicklungsstufe werden im Hinblick auf die Problembewältigung definiert. Diese systematische Herangehensweise ist eine grundlegende Charakteristik des Produktentwicklungsprozesses, der auf den Grundlagen der VDI-Richtlinie 2221 aufbaut (vgl. VDI 2221-1:2019-11, S. 15). Die Prozessschritte in der Richtlinie und die

darin dargelegten Aktivitäten innerhalb einer Entwicklungsphase basieren auf den Erkenntnissen von Pahl et al. (2005). Ein wesentliches Kriterium für eine effiziente Produktentwicklung ist das Durchlaufen von Iterationsschleifen, um Ergebnisse und Veränderungen frühzeitig in die jeweilige Phase einfließen zu lassen (vgl. Feldhusen und Grote 2013, S. 16–18). Während des ganzen Produktentwicklungsprozesses ist es zielführend, regelmäßige Kontrollzyklen zur Problemidentifikation einzuführen, um daraus Handlungsempfehlungen abzuleiten. Neben den iterativen Prozessschleifen ist der PDCA-Zyklus von Deming (1989) zielführend, um den aktuellen Entwicklungsstand zu evaluieren und gegebenenfalls Veränderungen anzustoßen (vgl. VDI 2221-1:2019-11, S. 16). Der geschlossene und wiederkehrende Zyklus umfasst das Planen (Plan), Handeln (Do), Kontrollieren (Check) und Umsetzen (Act), was besonders in der frühen Konzeptions- und Entwicklungsphase von Relevanz ist (vgl. Lindemann 2009, S. 40–41).

In Abbildung 36 sind die vier Phasen des Produktentwicklungsprozesses mit den Iterationsschleifen zwischen den sieben Prozessschritten dargestellt. Dabei wird zwischen dem Planen und Klären der Aufgabe (Phase 1), dem Konzipieren (Phase 2), dem Entwerfen (Phase 3) und dem Aufbereiten (Phase 4) unterschieden (vgl. Pahl et al. 2005, S. 169). Um eine allgemeingültige Umsetzung zu ermöglichen, wird der Teilprozessschritt 1 der ersten Produktentwicklungsphase im folgenden Abschnitt exemplarisch beschrieben.

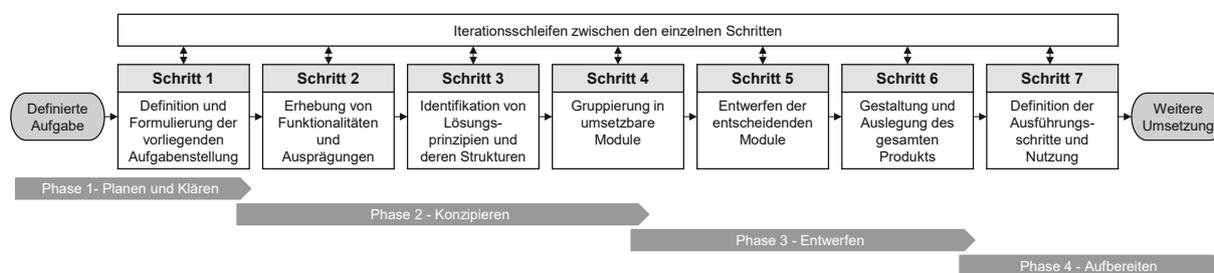


Abbildung 36: Prozessschritte des Produktentwicklungsprozesses (eigene Darstellung in Anlehnung an VDI 2221-1:2019-11, S. 19; Feldhusen und Grote 2013, S. 18)

Anhand der definierten Kriterien innerhalb der entwickelten Anforderungsliste ist unter Bezugnahme auf die Entwicklungsphasen 2–4 und die Prozessschritte eine weiterführende Konzipierung und bauliche Umsetzung der automatisierten Aufnahmevorrichtung sowie der Landeplattform für die Drohne in Anlehnung an Taschner et al. (2022, S. 4–5) möglich. Das Vorgehensmodell in dieser Dissertation berücksichtigt dabei ausschließlich die Phase 1, in der die Entwicklung der Anforderungslisten im Fokus steht.

5.5.2 Auswahl und Kombination von Kriterien anhand einer Anforderungsliste

Gemäß dem ersten Teilprozessschritt (vgl. Abbildung 36) des Produktentwicklungsprozesses erfolgt in diesem Abschnitt die Festlegung der Anforderungen an eine Aufnahmevorrichtung sowie unterstützend wirkende Lande- und Übergabepattform, die schlussendlich in eine Anforderungsliste einfließen. Hierbei werden die Anforderungskriterien in unbedingte Unternehmensforderungen, die unter allen Umständen erfüllt werden müssen, und in Wünsche, die nach Möglichkeit einbezogen werden, unterteilt. Die Unterteilungen sind je nach Anforderungen an die Bauteilfunktionen adaptierbar. Zusätzlich werden die jeweiligen Kriterien mit Quantitätsinformationen (z. B. Stückzahl, Leistung, Menge) und Qualitätsinformationen (z. B. Abweichungen, Materialanforderungen) erweitert, um ein vollumfängliches Verzeichnis für die nachfolgenden Entwicklungsschritte zu erhalten (vgl. Pahl et al. 2005, S. 187–190).

Die übergeordneten Anforderungskategorien sowie die Eigenschaften in Kombination mit den jeweiligen Ausprägungsarten sind je nach Bedarf und den angestrebten Entwicklungen erweiterbar. Nach abgeschlossener Definition möglicher Ausprägungsformen und einer Einordnung hinsichtlich unbedingter Forderung oder angestrebtem Wunsch erfolgt die finale Festlegung der Produkteigenschaften.

In folgender Tabelle 15 und Tabelle 16 ist der allgemeingültige Aufbau der Anforderungslisten für die Aufnahmevorrichtung und Landeplattform zur finalen Auswahl und Kombination der Anforderungen dargestellt. Die Anforderungskategorien beruhen auf den Erkenntnissen aus dem Stand der Wissenschaft und Technik sowie den erläuterten Optimierungspotenzialen in den Modellbeschreibungen in Kapitel 3. Die Kategorien orientieren sich an den Hauptmerkmallisten nach Pfahl et al. (vgl. 2005, S. 194) und sind mit drohnenspezifischen Anforderungskriterien erweitert. Abhängig von der Anforderungskategorie werden einflussnehmende Eigenschaften für die Auslegung definiert. Hierbei fließen die Ergebnisse aus den Modellschritten 1–3 in den Entwicklungsprozess ein. Mithilfe der definierten Ausprägungsformen lassen sich die Anforderungskriterien manuell festlegen (farblich hervorgehoben in Tabelle 15 und Tabelle 16) oder bei mehreren Ausprägungsmöglichkeiten gezielt auswählen.

Insbesondere die Geometrieabmessungen der Aufnahmevorrichtung in Tabelle 15 sind von der gewählten Drohne aus Modellschritt 2 abhängig, da sich die Fixierungspunkte je Bauform unterscheiden. Die notwendige Werkstoffart für die Auslegung des Greifmechanismus wird vom Einsatzort (siehe Modellschritt 1) beeinflusst, da sich je nach Witterungsbedingungen die Anforderungen an das Bauteil unterscheiden. Die Anforderungskriterien für die Energie bestimmen die maximale Stromstärke, Betriebsspannung sowie Bezugsquelle, um die geforderte Flugreichweite

der Drohne zu gewährleisten. Der Stromverbrauch der Transportaufnahmeverrichtung ist von der gewählten Ansteuerung und Fixierung im Unterpunkt vier der Anforderungskategorien abhängig, da je nach genutztem Prinzip die Verbrauchswerte variieren. Der Betriebsmodus (manuell oder autonom) für die Ansteuerung der Aufnahmeverrichtung hängt von der geforderten Materialübergabe aus Schritt 1 und den rechtlichen Gegebenheiten aus Schritt 3 des Vorgehensmodells ab. Wesentliches Kriterium für die Funktionsfähigkeit des Greifmechanismus ist die mögliche Traglast in Abhängigkeit vom Eigengewicht. Dazu müssen die maximalen mechanischen Belastungen an der Aufhängevorrichtung und die Tragfähigkeit der Drohne in die Anforderungsliste einbezogen werden. Das Herstellungsverfahren in der Kategorie Fertigung wird sowohl von den wirtschaftlichen als auch von den werkstoffspezifischen Anforderungen beeinflusst. Die Anforderungen in den Kategorien Sicherheit, Kontrolle, Gebrauch und sonstige Kriterien sind wesentlich für die Genehmigung im operativen Betrieb verantwortlich und müssen dementsprechend erfüllt werden.

Die Anforderungskategorien für die Landeplattform in Tabelle 16 ähneln den bereits vorgestellten Kriterien der Aufnahmeverrichtung. Hierbei sind die Abmaße und Oberflächenbeschaffenheiten der Gleitflächen und die Energiebereitstellung für die Ladesysteme wesentliche Einflusskriterien für die Funktionstauglichkeit des gesamten Systems. Zudem sind für die Bestimmung der Anforderungen an die Plattformen die Bereitstellung der Transportboxen und die Ergonomie während der operativen Verwendung zu berücksichtigen.

Tabelle 15: Anforderungsliste für eine Transportaufnahmevorrichtung (eigene Darstellung)

Legende		Anforderungsliste für die Auslegung einer Transportaufnahmevorrichtung		
Grad der Relevanz	Symbol			
Forderung	F			
Wunsch	W			
Anforderungskategorie	Eigenschaften	Ausprägung	F/W	Anmerkung
1. Geometrie	Länge x Breite x Höhe	X x Y x Z mm		Abhängig von den Aufhängepunkten der gewählten Drohne (vgl. Schritt 2)
	Witterungsbeständig	Indoor Outdoor		Abhängig von Use-Case (vgl. Schritt 1)
2. Werkstoff	Materialart	Kunststoff Metall Holz		
	Stromstärke	≤ X Ampere		Abhängig von der gewählten Drohne (vgl. Schritt 2)
3. Energie	Betriebsspannung	≤ X Volt		Abhängig von Energiebereitstellung und Ansteuerungsart
	Bezugsquelle	Drohnenbatterie		
		Externe Batterie		Abhängig von der Traglast der Drohne (vgl. Schritt 2)
4. Ansteuerung und Fixierung	Ansteuerungsart	Servomotor		
		Elektromagnetik		
		Pneumatik		
	Halteprinzip	kraftschlüssig	Abhängig von rechtlichen und technischen Anforderungen (vgl. Schritt 3)	
formschlüssig				
Vakuum				
magnetisch				
5. Signale	erfolgreiche Ansteuerung und Fixierung	Lichtanzeige		
		akustisch		
	Betriebsmodus	manuell		
		autonom		
6. Kräfte	Traglast	≥ X kg		Abhängig von der Aufhängung und Traglast der Drohne (vgl. Schritt 2)
	Eigengewicht	≤ X kg		
7. Fertigung	Verfahren	3D-Druck	Abhängigkeit von gewählten Werkstoff	
		Spritzgießen		
		Stoffschlüssige Verbindung		
keine scharfen Kanten	erforderlich			
8. Kosten	Herstellungskosten	minimal		
9. Sicherheit	keine Gefahren für den Operator	mechanisch		
		elektrisch		
10. Kontrolle	Zulassung	SORA-Prozess		Abhängig von lokaler Gesetzeslage (vgl. Schritt 3)
11. Gebrauch	Geräuscharm	erforderlich		
	Zuverlässigkeit	erforderlich		
	Systemstabilität	erforderlich		
12. Sonstige Kriterien	Schließpräzision	erforderlich		

Tabelle 16: Anforderungsliste für eine Landeplattform (eigene Darstellung)

Legende		Anforderungsliste für die Auslegung einer Landeplattform		
Grad der Relevanz	Symbol			
Forderung	F			
Wunsch	W			
Anforderungskategorie	Eigenschaften	Ausprägung	F/W	Anmerkung
1. Geometrie	Länge x Breite x Höhe	X x Y x Z mm		Abhängig von der Drohne (vgl. Schritt 2) und der Transportbox
	Außenmaß Gleitfläche	≥ X mm		
	Innenmaß Gleitfläche	≤ Y mm		
	Zentriergenauigkeit	erforderlich		
2. Werkstoff	Witterungsbeständig	Indoor		Abhängig von Use-Case (vgl. Schritt 1)
		Outdoor		
	Materialart	Kunststoff		Abhängig von Einsatzort (vgl. Schritt 1)
		Metall		
Oberflächenbeschaffenheit	Holz		Beeinträchtigung der Sensorik vermeiden	
	Gleitfähig			
3. Energie	Energieversorgung	X Volt		Abhängig von Einsatzland (vgl. Schritt 1)
	Energiebereitstellung für Drohne	Induktion		Abhängig von der gewählten Drohne (vgl. Schritt 2)
		Ladekabel		
		Batterie		
Energiebereitstellung für Plattform	Ladekabel			
	Batterie			
	Generator			
4. Transport	Bereitstellung Transportbox	manuell		
		automatisiert		
5. Signale	Ladestatus	Lichtanzeige		
		akustisch		
6. Kräfte	Traglast Plattform	≥ X kg		Abhängig von Drohne, Transportgut und Energiebereitstellung
	Eigengewicht Plattform	≤ X kg		Abhängig von Material
7. Fertigung	Verfahren	3D-Druck		Abhängigkeit von gewählten Werkstoff
		Spritzgießen		
		Stoffschlüssige Verbindung		
keine scharfen Kanten	erforderlich			
8. Kosten	Herstellungskosten	minimal		Abhängig von Material
9. Sicherheit	keine Gefahren für den Operator	mechanisch		
		elektrisch		
		stoffbezogen		
10. Ergonomie	Bedienbarkeit	Entnahmeposition der Transportbox		
		Entnahmehöhe nicht über Schulterhöhe		
11. Sonstige Kriterien	Zentrierfähigkeit	erforderlich		
	Systemstabilität	erforderlich		Gewährleistung der Zentrierung
	Ladefähigkeit	vorhanden		Erhöhung der Einsatzdauer

Nach der Aufstellung der allgemeinen Anforderungsliste mit den möglichen Ausprägungsformen erfolgt die Festlegung der unbedingten Forderungen und Wünsche durch das Unternehmen. Darauf aufbauend werden die ausgewählten Ausprägungen mit Kreisen markiert und die Anforderungskategorien (z. B. Geometrie, Energie und Kräfte bei der Aufnahmevorrichtung) mit den spezifischen Informationen manuell beschrieben.

Exemplarisch wird in Abbildung 37 ein Ausschnitt aus einer befüllten und markierten Anforderungsliste für eine Aufnahmevorrichtung gezeigt.

Legende		Anforderungsliste für die Auslegung einer Transportaufnahmevorrichtung		
Grad der Relevanz	Symbol			
Forderung	F			
Wunsch	W			
Anforderungskategorie	Eigenschaften	Ausprägung	F/W	Anmerkung
1. Geometrie	Länge x Breite x Höhe	185 x 60 x 50 mm	F	Abhängig von den Aufhängepunkten der Drohne (vgl. Schritt 2)
	Witterungsbeständig	Indoor Outdoor	F	Abhängig vom Use-Case (vgl. Schritt 1)
2. Werkstoff	Materialart	Kunststoff	F	
		Metall	F	
		Holz		
3. Energie	Stromstärke	≤ 1,0 Ampere	F	
	Betriebsspannung	≤ 5,0 Volt	F	Abhängig von Energiebereitstellung und Ansteuerungsart
	Bezugsquelle	Drohnenbatterie	F	
Externe Batterie		W	Abhängig von Traglast	

Abbildung 37: Exemplarischer Ausschnitt aus einer befüllten Anforderungsliste am Beispiel einer Transportaufnahmevorrichtung (eigene Darstellung)

5.5.3 Zusammenfassung von Schritt 4 | Anforderungsliste

Der Schritt 4 des Vorgehensmodells liefert eine Auswahlmöglichkeit und Parameterdefinition von unternehmensspezifischen Anforderungskriterien, die eine Aufnahmevorrichtung sowie Lande- und Übergabepattform (abhängig vom Anwendungsfall und der Drohne) für eine allgemeingültige Umsetzung erfüllen müssen.

Durch die Anforderungsdefinition ist eine weiterführende Bauteilentwicklung für Konstrukteure gemäß des beschriebenen Produktentwicklungsprozesses nach der VDI-Richtlinie 2221 möglich, die für den automatisierten Materialtransport mittels Drohne unerlässlich ist.

5.6 Schritt 5 | Validierung des wirtschaftlichen Nutzens

Um eine fundierte Entscheidung zur finalen Technologieimplementierung auf Basis valider Kriterien treffen zu können und die Unsicherheiten bzw. Risiken zu minimieren, ist es zwingend notwendig, wirtschaftliche Bewertungsverfahren für die Drohnen (inklusive Komponenten) anzuwenden (vgl. Schuh und Klappert 2011, S. 316–317). Neben den Anforderungskriterien an die Technologie spielt der wirtschaftliche Nutzen bei der angestrebten Technologieimplementierung für das Unternehmen eine zentrale Entscheidungsrolle. Diesbezüglich werden im nachfolgenden Abschnitt einzelne wirtschaftliche Einflusskriterien auf Basis der identifizierten Modelle aus Kapitel 3.2 definiert und erweitert, die in die abschließende Kostenbewertung einfließen.

5.6.1 Personalkosten in Bezug auf den Drohnentransport

Zur Bewertungsfähigkeit des wirtschaftlichen Nutzens von Drohnen müssen im Vorgehensmodell Personen, die im drohnenbasierten Transportprozess involviert sind, im Unternehmen kostentechnisch berücksichtigt werden. Dabei können die definierten Personalkosten inklusive der dargelegten Kostensätze je Qualifikationsprofil, siehe Tabelle 17, im Modell als Referenzwerte für Unternehmen dienen, sofern unzureichende unternehmensspezifische Kosteninformationen vorliegen. Das jährliche Durchschnittsgehalt wird aus der Einkommensunter- und -obergrenze der Berufsgruppe gebildet und muss abhängig vom Anwendungsfall (siehe Kapitel 6) separat betrachtet werden. Die Überwachung der Transportflüge und Bestückung der Drohne mit den Ladungsträgern kann dabei durch Logistikmitarbeiter im Unternehmen erfolgen.

Tabelle 17: Durchschnittliche Personalkosten je Qualifikationsprofil in Österreich (eigene Darstellung in Anlehnung an Arbeitsmarktservice, o.S.)

Personalkosten je Qualifikationsprofil			
Berufsbezeichnung	Ø Bruttogehalt [€/a]	Ø Jährliche Kosten Dienstgeber [€/a]	Produktivkostensatz [€/h]
Logistikmitarbeiter	23.660	30.808	22,11

Zur Ermittlung der jährlichen Kosten für den Dienstgeber muss das Bruttogehalt des Dienstnehmers aufgrund der Lohnnebenkosten (z. B. Sozialversicherungsbeiträge, Kommunalsteuern, Mitarbeitervorsorgebeiträge) für das Unternehmen um durchschnittlich 30 % erhöht werden (vgl. WKO 2022, o.S.). Im Kalenderjahr ist für das Personal nach Berücksichtigung von Urlauben, Wochenenden, Feiertagen und Krankenständen mit 213 tatsächlich verfügbaren Arbeitstagen) zu kalkulieren. Bei 7,7 Arbeitsstunden pro Tag und einer Verteilzeit von 15 % (vgl. Schlick et al. 2018, S. 577–578) ergeben sich 6,54 Produktivstunden pro Arbeitstag. Daraus resultiert beispielhaft ein Produktivkostensatz für den Logistikmitarbeiter von 22,11 Euro, der für die

Kostenbewertung als Referenzwert dient. Aufgrund erhöhter Teuerungsraten und damit einhergehenden Lohnsteigerungen für Personal müssen im Vorgehensmodell die jährlichen Kosten für den Dienstgeber an die aktuellen Kollektivvertragsverhandlungen angepasst werden.

5.6.2 Ermittlung der Transportzeit

Zur Ermittlung der Kosten des Einsatzes einer Drohne für den intralogistischen Materialtransport ist es zwingend notwendig, die zeitlichen Aufwände je Prozessschritt zu erheben und diese kostentechnisch zu bewerten (vgl. Fritsch et al. 2020, S. 6–8). Zur Ermittlung der Zeitaufwände werden die einzelnen Tätigkeitsschritte der Drohne durch manuelle Zeitmessung modelliert. Für die Darstellung der auftretenden Zeiten bei einem Transportflug mittels Drohne dient beispielhaft die Abbildung 38. Anzumerken ist, dass zur Beendigung des Prozesses die Drohne nach Abgabe des Transportguts bei der Senke (S) wieder zum Ausgangspunkt (Q) zurückkehren muss. Somit müssen die Zeiten t_{Flug} , $t_{steigen}$, t_{Landen} in der Zeiterfassung zweimal berücksichtigt werden (siehe Formel 3). Die in Schritt 1 festgelegte Flug- und Routenplanung (vgl. Abbildung 33) ist dafür eine wesentliche Einflussgröße.

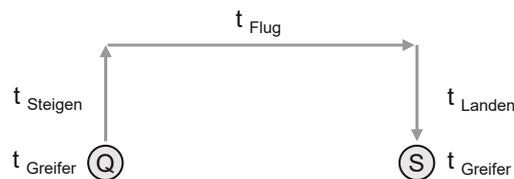


Abbildung 38: Zeiten bei einem Transportflug mit einer Drohne (eigene Darstellung)

$$t_{Tm_sek} = 2 * (t_{Steigen} + t_{Landen} + t_{Flug} + t_{Greifer})$$

mit

t_{Tm_sek} ... Gesamtdauer je Transport [s/n]

$t_{Steigen}$... Zeit zum Erreichen der definierten Flughöhe [s]

t_{Landen} ... Zeit für ein Landemanöver auf der Plattform aus der definierten Flughöhe [s]

t_{Flug} ... Zeit für die zurückgelegte Wegstrecke in Abhängigkeit der Fluggeschwindigkeit [s]

$t_{Greifer}$... Zeitdauer für das Öffnen bzw. Schließen des Greifmechanismus [s]

Formel 3: Berechnung Transportzeit je Drohnenflug (eigene Darstellung in Anlehnung an Wrycza et al. 2017, S. 6–7)

Es ist festzuhalten, dass die Gesamtdauer des Prozesses gemäß Formel 3 abhängig von der Höhe und Fluggeschwindigkeit ist. Durch die Beeinflussung dieser Parameter lässt sich die Prozessdauer variabel steuern. Die Flugzeit t_{Flug} resultiert aus der zurückgelegten Wegstrecke gemäß der Routenführung und wird durch die

Fluggeschwindigkeit der Drohne dividiert. Die Prozesszeit $t_{Greifer}$ setzt sich aus der manuellen Auftragsbestätigung am Pilotendashboard und der Schaltzeit des Servomotors im Greifer zur Betätigung der Gelenkhebel (Öffnungs- und Schließprinzip) zusammen. Die erforderliche Zeit für ein Landemanöver ist wesentlich von der geforderten Präzision für die Aufnahme des Transportguts abhängig. Anhand der Anforderungslisten für die Transportaufnahmeeinheit und die Plattformen (siehe Schritt 4 des Modells) und der daraus resultierenden Forderung an die reproduzierbare Zentrierfähigkeit ist mit einer höheren Zeit t_{Landen} zu kalkulieren. Ein zusätzlicher Einflussfaktor ist die maximale Geschwindigkeit im vertikalen Sinkflug der gewählten Drohne (siehe Schritt 2 im Vorgehensmodell). Die Zeitdauer $t_{Steigen}$ zum Erreichen der Flughöhe ist von der maximal möglichen Steiggeschwindigkeit und der zu transportierenden Last abhängig. Tabelle 18 zeigt eine exemplarische Berechnung der Transportzeit für eine Drohne in Abhängigkeit der Prozesshäufigkeit und notwendigen Zeitdauer. Die ermittelte Gesamtdauer je Transport t_{Tm_sek} fließt wiederum in die abschließende Kalkulation der erforderlichen Transportmittelanzahl ein.

Tabelle 18: Berechnung der Transportzeit für einen Drohnentransport (eigene Darstellung)

Berechnung der Transportzeit für einen Drohnentransport				
Formelzeichen	Beschreibung	Häufigkeit	Zeitdauer	Gesamtzeit
$t_{Steigen}$	Zeit zum Erreichen der definierten Flughöhe [s]	2	15	30
t_{Landen}	Zeit für ein Landemanöver auf der Plattform aus der definierten Flughöhe [s]	2	20	40
t_{Flug}	Zeit für die zurückgelegte Wegstrecke in Abhängigkeit der Fluggeschwindigkeit [s]	2	71	143
$t_{Greifer}$	Zeitdauer für das Öffnen bzw. Schließen des Greifmechanismus [s]	2	10	20
t_{Tm_sek}	Gesamtdauer je Transport [s/n]			233

5.6.3 Bestimmung der Drohnenanzahl und Betriebskosten

Um den wirtschaftlichen Nutzen eines Drohnentransports im Zuge der finalen Machbarkeitsprüfung zu validieren, ist es notwendig, die benötigte Anzahl an Transportmitteln für den unternehmensspezifischen Anwendungsfall in Bezug auf die bereits getätigten Abschätzungen aus der Vorabprüfung detailliert zu betrachten. Unter Zuhilfenahme der in Tabelle 19 (siehe Seite 104) definierten Inputparameter (z. B. Arbeitstage, Arbeitsstunden, Materialbedarf etc.) und der spezifischen Daten des Anwendungsfalls (z. B. Wegstrecken, Höhenangaben) sind die Prozesszeiten in Abhängigkeit des Transportmittels ermittelbar. Für die Inputparameter dienen die Antworten des ausgewerteten Fragenkatalogs und die Ergebnisse der Analysephase aus Schritt 1 des Vorgehensmodells als Referenz.

Es sei angemerkt, dass für den Materialbedarf pro Stunde m_{Bedarf_h} auch von einer Gleichverteilung über die verfügbaren Arbeitsstunden pro Arbeitstag ausgegangen werden kann, sofern mehrere Transporte zur Bewältigung des Materialgewichts pro Bedarf $m_{g_{Bedarf}}$ erforderlich sind. Beispielhaft führt dies bei acht verfügbaren Arbeitsstunden pro Tag zu 0,125 (1/8) Materialbedarfen pro Stunde. Die Werte können

je nach unternehmensspezifischem Anwendungsfall im Vorgehensmodell adaptiert werden. Die zugrundeliegenden Berechnungen und Erhebungen für die Gesamtdauer je Transport t_{Tm_sek} für Drohnen sind der Formel 3 sowie Tabelle 18 zu entnehmen. Die erhobene Zeitdauer dient als Ausgangsbasis für die nachfolgende Auswertung und Ermittlung der erforderlichen Transportmittelanzahl. Zur Bestimmung der Transporte pro Stunde $x_{Transporte_h}$ wird das Materialgewicht je Bedarf mg_{Bedarf} durch die Tragfähigkeit des Transportmittels Tf_{Tm} dividiert und mit dem Materialbedarf pro Stunde m_{Bedarf_h} multipliziert, siehe Formel 4.

$$x_{Transporte_h} = m_{Bedarf_h} * \frac{mg_{Bedarf}}{Tf_{Tm}}$$

mit

mg_{Bedarf} ... Materialgewicht je Bedarf [kg/Bedarf] $x_{Transporte_h}$... Transporte pro Stunde [n/h]

Tf_{Tm} ... Transportfähigkeit des Transportmittels [kg]

Formel 4: Berechnung der Transporte pro Stunde (eigene Darstellung in Anlehnung an Fritzsich 2020, S. 25)

Die erforderlichen Transporte pro Jahr $x_{Transporte_a}$ werden durch die Multiplikation der verfügbaren Arbeitstage pro Jahr At_{Jahr} , den Arbeitsstunden pro Tag As_{Tag} und den ermittelten Transporten pro Stunde $x_{Transporte_h}$ berechnet (siehe Formel 5). Die Anzahl an notwendigen Transportmitteln s_{Anzahl} berechnet sich schlussendlich aus den resultierenden Transporten pro Stunde $x_{Transporten_h}$ multipliziert mit der Gesamtdauer eines Transports t_{Tm_sek} bezogen auf eine Stunde (siehe Formel 6).

$$x_{Transporte_a} = At_{Jahr} * As_{Tag} * x_{Transporte_h}$$

mit

$x_{Transporte_a}$... Transporte pro Jahr [n/a] At_{Jahr} ... Arbeitstage pro Jahr [d/a]

$x_{Transporte_h}$... Transporte pro Stunde [n/h] As_{Tag} ... Arbeitsstunden pro Tag [h/d]

Formel 5: Berechnung der Transporte pro Jahr (eigene Darstellung in Anlehnung an Fritzsich 2020, S. 25)

$$s_{Anzahl} = x_{Transporte_h} * \frac{t_{Tm_sek}}{3600}$$

mit

s_{Anzahl} ... Anzahl erforderlicher Transportmittel [-] t_{Tm_sek} ... Gesamtdauer je Transport [s/n]

$x_{Transporte_h}$... Transporte pro Stunde [n/h]

Formel 6: Berechnung der erforderlichen Transportmittelanzahl (eigene Darstellung in Anlehnung an Fritzsich 2020, S. 25)

Tabelle 19: Ermittlung erforderlicher Transportmittel für den Anwendungsfall (eigene Darstellung in Anlehnung an Fritzsich 2020, S. 11–24)

Ermittlung erforderlicher Transportmittellanzahl			
Inputparameter			
Arbeitstage pro Jahr	At_{Jahr}	Kurzbeschreibung Anwendungsfall:	
Arbeitsstunden pro Tag	As_{Tag}		
Materialgewicht je Bedarf [kg/Bedarf]	mg_{Bedarf}		
Materialbedarf pro Stunde [Bedarf/h]	m_{Bedarf_h}		
Spezifikationen Anwendungsfall	Drohne		siehe Formel bzw. Tabelle
	Wegstrecke [m]	Zeitdauer [s]	
Gesamtwegstrecke ohne Last	s_{Flug}	t_{Flug}	Formel 3 auf Seite 101
Gesamtwegstrecke mit Last	s_{Flug}	t_{Flug}	
Positive Höhenüberwindung bis Flughöhe	$h_{Steigen}$	$t_{Steigen}$	
Negative Höhenüberwindung für Landung	h_{Landen}	t_{Landen}	
Lastaufnahme		$t_{Greifer}$	Tabelle 18 auf Seite 102
Lastabgabe		$t_{Greifer}$	
Gesamtdauer je Transport [n/s]		t_{Tm_sek}	
Auswertung Anwendungsfall			
Transporte pro Stunde [n/h]	$x_{Transporte_h}$		
Gesamtdauer je Transport [min]	t_{Tm_min}		
Transporte pro Jahr [n/a]	$x_{Transporte_a}$		
Gesamttransportzeit pro Jahr [min/a]	$t_{Tm_a_min}$		
Anzahl erforderlicher Transportmittel	s_{Anzahl}		

Nach abgeschlossener Ermittlung der erforderlichen Transportmittellanzahl müssen zur ganzheitlichen Betrachtungsweise die Betriebskosten in Abhängigkeit des Abschreibungszeitraums berechnet werden, um abschließend für den spezifischen Anwendungsfall das Einsparungspotenzial zu bestimmen (vgl. Martin 2014, S. 120). Für die Ermittlung der erforderlichen Gesamtinvestitionshöhe $G_{Investition}$ dient die Formel 7, wobei die Investitionspositionen in Tabelle 20 je nach unternehmensspezifischen Anforderungen variabel erweiterbar sind.

$$G_{Investition} = K_{Transportmittel} + K_{Hardware} + K_{Ladestation} + K_{Batterie} + K_{Fallschirm}$$

mit

$G_{Investition}$... Gesamtinvestitionshöhe [€]

$K_{Transportmittel}$... Investitionskosten Transportmittel [€]

$K_{Hardware}$... Investitionskosten Hardware [€]

$K_{Ladestation}$... Investitionskosten Ladestation [€]

$K_{Batterie}$... Investitionskosten Batterie [€]

$K_{Fallschirm}$... Investitionskosten Fallschirm [€]

Formel 7: Ermittlung der Gesamtinvestitionshöhe (eigene Darstellung)

Innerhalb der Investitionskategorie werden neben dem notwendigen Transportmittel auch beispielhafte Positionen für unterstützend wirkende Hard- und Software berücksichtigt. Um einen dauerhaften Drohneneinsatz zu simulieren, müssen in der Kalkulation neben einer Ladestation zusätzliche Ersatzbatterien berücksichtigt werden. Dabei ist die maximale Batterienutzungsdauer innerhalb eines Einsatzflugs mit dem notwendigen Ladezyklus abzugleichen. Bei einer angenommenen Flugzeit von 24 Minuten und einem benötigten Ladezyklus von 144 Minuten sind insgesamt 6 Ersatzbatterien (3 Batteriepaare) für einen Dauerbetrieb notwendig. Aufgrund unternehmensindividueller Lieferantenbeziehungen sind unterschiedliche Kostensätze je Anwendungsfall möglich.

Tabelle 20: Kostenkalkulation für exemplarische Transportmittel (eigene Darstellung in Anlehnung an VDI 2695:2010-03, S. 3–13 und Martin 2014, S. 253)

Kostenkalkulation für den Drohnentransport				
Position	Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit	Kostensatz
1	Ermittlung der Investitionskosten			
1.1	Transportmittel	$K_{Transportmittel}$	€	
1.2	Hardware (Sensorik, Plattform, Greifer etc.)	$K_{Hardware}$	€	
1.3	Ladestation	$K_{Ladestation}$	€	
1.4	Ersatzbatterieset	$K_{Batterie}$	€	
1.4	Sicherheitsfallschirm	$K_{Fallschirm}$	€	
1.5	Gesamtinvestitionshöhe	$G_{Investition}$	€	
2	Ermittlung der jährlichen Fixkosten			
2.1	Kalkulatorische Abschreibung	A_{Jahr}	€/a	
2.2	Kalkulatorische Zinskosten	K_{Zinsen}	€/a	
2.3	Fixkosten pro Jahr	K_{Fix}	€/a	
3	Ermittlung der jährlichen variablen Kosten			
3.1	Instandhaltungsmaßnahmen	$K_{Instandhaltung}$	€/a	
3.2	Energiekosten	$K_{Energie}$	€/a	
3.3	Variable Kosten pro Jahr	$K_{variabel}$	€/a	
4	Betriebskosten pro Jahr	$K_{Betrieb}$	€/a	
5	Personalkosten	$K_{Personal}$	€/a	
6	Gesamtkosten pro Jahr	K_{Gesamt}	€/a	

Neben den anfallenden Investitionskosten ist die Ermittlung der jährlichen Fixkosten K_{Fix} , die sich durch die Addition von Abschreibungen (Position 2.1 in Tabelle 20) und Zinskosten (Position 2.2) für das Transportmittel zusammensetzen, ein wesentlicher Bestandteil für die Kalkulation der Betriebskosten. Die herangezogenen kalkulatorischen Abschreibungen sind von der unternehmensspezifisch verwendeten Abschreibungsmethode (z. B. lineare oder degressive Abschreibung) und dem gewählten Abschreibungszeitraum (z. B. 5 Jahre) abhängig. Exemplarisch kann die angeschaffte Drohne in der Kostenkalkulation (Position 2.1) mit 20 Prozent pro Jahr abgeschrieben werden. Die zugrundeliegende Berechnung liefert Formel 8.

$$A_{\text{Jahr}} = \frac{G_{\text{Investition}}}{L_{\text{Wirtschaftlich}}}$$

mit

A_{Jahr} ... Jährliche Abschreibungen [€/a] $L_{\text{Wirtschaftlich}}$... Abschreibungszeit [n]

$G_{\text{Investition}}$... Gesamtinvestitionshöhe [€]

Formel 8: Jährliche Abschreibungen für Investitionsgüter (eigene Darstellung in Anlehnung an Martin 2014, S. 120)

Für die jährlichen Fixkosten K_{Fix} müssen auch anfallende Zinskosten K_{Zinsen} für beanspruchtes Fremdkapital berücksichtigt werden, siehe Formel 9. Bei den kalkulatorischen Zinskosten (Position 2.2) kann der nach Martin (vgl. 2014, S. 253) ausgewiesenen exemplarische Zinssatz Z_{Kapital} (z. B. 8 Prozent) in Abhängigkeit des Fremdfinanzierungsanteils $v_{\text{Fremdfinanzierung}}$ (z. B. 50 Prozent) der Gesamtinvestitionshöhe $G_{\text{Investition}}$ angewandt werden. Der Fremdfinanzierungsanteil kann je nach Liquidität des Unternehmens variabel definiert werden.

$$K_{\text{Zinsen}} = v_{\text{Fremdfinanzierung}} * G_{\text{Investition}} * Z_{\text{Kapital}}$$

mit

K_{Zinsen} ... Kalkulatorische Zinskosten [€/a] $G_{\text{Investition}}$... Gesamtinvestitionshöhe [€]

Z_{Kapital} ... Zinssatz [%] $v_{\text{Fremdfinanzierung}}$... Anteil der Fremdfinanzierung [%]

Formel 9: Jährliche Zinskosten für beanspruchtes Fremdkapital (eigene Darstellung in Anlehnung an Martin 2014, S. 120)

Bei der Ermittlung der variablen Kosten K_{Variabel} muss für notwendige Instandhaltungsmaßnahmen während der Betriebsdauer ein definierter Prozentsatz (z. B. 10 Prozent) der ermittelten Investitionskosten veranschlagt werden. Für die verursachten Energiekosten der Transportmittel muss eine grobe Abschätzung hinsichtlich der auftretenden Entladungen pro Jahr durchgeführt werden (siehe Formel 10). Für eine Drohne ergeben sich bei einer exemplarischen Flugzeit von 24 Minuten und 8 Stunden Einsatzzeit in den 249 Werktagen insgesamt 4980 Entladungen und notwendige Ladezyklen.

$$E_{\text{Entladungen}} = \frac{A_{\text{tJahr}} * A_{\text{STag}}}{t_{\text{Batterie}_h}}$$

mit

$E_{\text{Entladungen}}$... Entladungen Batterie [Ladungen/a] A_{STag} ... Arbeitsstunden pro Tag [h/d]

A_{tJahr} ... Arbeitstage pro Jahr [d/a] t_{Batterie_h} ... Flugzeit pro Ladung [h/Ladung]

Formel 10: Berechnung der Ladezyklen pro Jahr in Abhängigkeit der maximalen Flugzeit, Arbeitsstunden und Arbeitstage pro Jahr (eigene Darstellung)

Anhand der elektrischen Energie, die entweder in technischen Datenblättern angegeben ist oder über die Batteriekapazität und Nennspannung ermittelt werden kann, und des aktuell gültigen Strompreises lassen sich die Kosten pro Batterieladung berechnen (siehe Formel 11).

$$K_{\text{Batterieladung}} = E_{\text{Batterie}} * K_{\text{Strom}}$$

mit

$K_{\text{Batterieladung}}$... Kosten pro Ladung [€/Ladung] E_{Batterie} ... Energie Batterie [kWh/Ladung]

K_{Strom} ... Strompreis [€/kWh]

Formel 11: Berechnung der Kosten pro Ladevorgang für Drohnen (eigene Darstellung)

Ergänzend können weitere Kostenpositionen (z. B. Versicherungsgebühren, Unfallversicherung, Anmeldegebühren bei der Luftfahrtbehörde etc.) in der Kostenkalkulation berücksichtigt werden. Die Betriebskosten pro Jahr K_{Betrieb} setzen sich schlussendlich additiv aus den Fixkosten K_{Fix} und variablen Kosten K_{Variabel} pro Jahr (Position 2.3 und 3.3 in Tabelle 20 auf Seite 105) zusammen.

Zusätzlich müssen anfallende Personalkosten durch die Inbetriebnahme und Bedienung der Drohne berücksichtigt werden. Aufgrund gesetzlicher Richtlinien ist beim automatisierten Drohnentransport weiterhin ein geschultes Fachpersonal als Überwachungsorgan zwingend notwendig. Hierzu dienen die exemplarischen Kostensätze aus Tabelle 17 (siehe Seite 100) als Referenz. Zur Kalkulation der Personalkosten pro Jahr für den operativen Betrieb der Drohne wird der Referenzkostensatz c_{MA} des Unternehmens mit der ermittelten Gesamttransportzeit pro Jahr $t_{Tm,a,min}$ (siehe Tabelle 19 auf Seite 104) multipliziert.

$$K_{\text{Personal}} = \frac{t_{Tm,a,min}}{60} * c_{MA}$$

mit

K_{Personal} ... Personalkosten pro Jahr [€/a] c_{MA} ... Produktivkostenstundensatz Personal [€/h]

$t_{Tm,a,min}$... Gesamttransportzeit pro Jahr [min/a]

Formel 12: Berechnung der jährlichen Personalkosten in Abhängigkeit der Gesamttransportzeit pro Jahr (eigene Darstellung)

Die Gesamtkosten pro Jahr K_{Gesamt} in Tabelle 20 (siehe Seite 105) werden durch die resultierenden Betriebskosten K_{Betrieb} und Personalkosten K_{Personal} gemäß nachfolgender Formel 13 gebildet.

$$K_{Gesamt} = K_{Betrieb} + K_{Personal}$$

mit

K_{Gesamt} ... Gesamtkosten pro Jahr [€/a]

$K_{Personal}$... Personalkosten pro Jahr [€/a]

$K_{Betrieb}$... Betriebskosten pro Jahr [€/a]

Formel 13: Kosten über die Abschreibungsdauer (eigene Darstellung in Anlehnung an Martin 2014, S. 120)

5.6.4 Ermittlung der Transportkosten in Abhängigkeit der Transportanzahl pro Jahr

Neben der Ermittlung der notwendigen Drohnenanzahl (vgl. Formel 6 auf Seite 103) zur Bewältigung der auftretenden Transportaufträge stellen die anfallenden Transportkosten pro Flug ein weiteres Entscheidungskriterium für den wirtschaftlichen Nutzen dar.

Die zu erwartenden Transportkosten für den Drohneneinsatz im Unternehmen hängen von den maximal auftretenden Transporten pro Jahr und den anfallenden Gesamtkosten ab. In Formel 14 ist diesbezüglich die Berechnungsweise der Transportkosten mit der Drohne in Abhängigkeit der jeweiligen Transportanzahl pro Jahr dargestellt. Für die Personalkosten des Drohnenverantwortlichen wird dessen Produktivkostenstundensatz c_{MA} (vgl. Tabelle 17) mit der Gesamtdauer des Drohnenflugs (vgl. Tabelle 18) für einen Transport t_{Tm_sek} multipliziert. Die in Schritt 1 des Modells erhobenen Umwelteinflüsse am Einsatzort werden mit einem Einflussfaktor z in der Berechnung berücksichtigt. Je weniger theoretisch mögliche Transporte x pro Jahr durchführbar sind, desto kleiner muss der Korrekturfaktor mit Werten zwischen $0 < z \leq 1$ angenommen werden. Sofern keine den Drohnenflug beeinflussenden Witterungsbedingungen vorliegen, ist der Wert mit eins anzunehmen.

Damit ist eine Näherung der tatsächlich durchführbaren Transportflüge pro Jahr darstellbar. Zur Erhebung der Energiekosten je Transport mit der Drohne müssen die technischen Daten der Betriebsanleitung der in Schritt 2 gewählten Drohnenbauform entnommen werden. Die maximale Energiebereitstellung durch den Akku wird mit dem Kilowattstundenpreis multipliziert (vgl. Formel 11 auf Seite 107). Als Referenz für den geltenden Stromtarif in Österreich werden 0,2498 Cent Euro pro Kilowattstunde (Stand Juni 2022) angenommen (vgl. E-Control 2022, o.S.). Die daraus resultierenden Kosten pro Ladung werden abschließend mit der maximalen Akkulaufzeit in Relation gesetzt. Mit den Energiekosten pro Flugsekunde werden die Kosten je Gesamtdauer des Transports t_{Tm_sek} skaliert. Damit ist eine detaillierte Betrachtung in Abhängigkeit der Flugdistanzen und Transporthäufigkeiten realisierbar.

$$c_{Drohne}(x) = t_{Tm_sek} * \frac{c_{MA}}{3600} + \frac{K_{Betrieb}}{x * z} + c_{ED}$$

mit

$c_{Drohne}(x)$... Transportkosten je Transportanzahl [€/n]

t_{Tm_sek} ... Gesamtdauer je Transport [s/n]

c_{MA} ... Produktivkostenstundensatz Personal [€/h]

$K_{Betrieb}$... Betriebskosten pro Jahr [€/a]

c_{ED} ... Energiekosten Drohne je Transport [€/n]

x ... Laufvariable (Transportanzahl) [n/a]

z ... Einflussfaktor Wetterbedingungen [1]

Formel 14: Transportkosten je Transportanzahl pro Jahr am Beispiel einer Drohne (eigene Darstellung)

Gemäß der Formel 14 reduzieren sich die Transportkosten für die Drohne, je mehr Transporte pro Jahr durchführbar sind. Das wird auch durch den Einflussfaktor für Witterungsbedingungen in der Berechnung berücksichtigt. Es ist anzumerken, dass die Kosten für die Drohne bei einer geringen Transportanzahl aufgrund der Investitions- und Betriebskosten äußerst hoch ausfallen. Zur verbesserten Darstellung startet die x-Achse in nachfolgender Abbildung 39 mit dem Wert 10 für die repräsentative Transportanzahl pro Jahr. Die Obergrenze der maximal durchführbaren Transporte pro Jahr wird durch die Multiplikation der verfügbaren Arbeitstage At_{Jahr} mit den Arbeitsstunden As_{Tag} (vgl. Tabelle 19) und anschließender Division durch die notwendige Transportzeit t_{Tm_sek} (vgl. Tabelle 18) ermittelt. Eine Möglichkeit, die exemplarische Kurve weiter nach links zu verschieben, ist, die Gesamtdauer pro Transportspiel t_{Drohne} oder den Produktivkostenstundensatz c_{MA} (siehe Tabelle 17 auf Seite 100) für den Drohnenpiloten zu senken. Des Weiteren wirken sich niedrigere jährliche Betriebskosten für die Drohne und geringere Energiekosten positiv auf die Kurve aus. Es wird außerdem angenommen, dass die anfallenden Transporte gleichverteilt über die verfügbaren Arbeitstage auftreten.

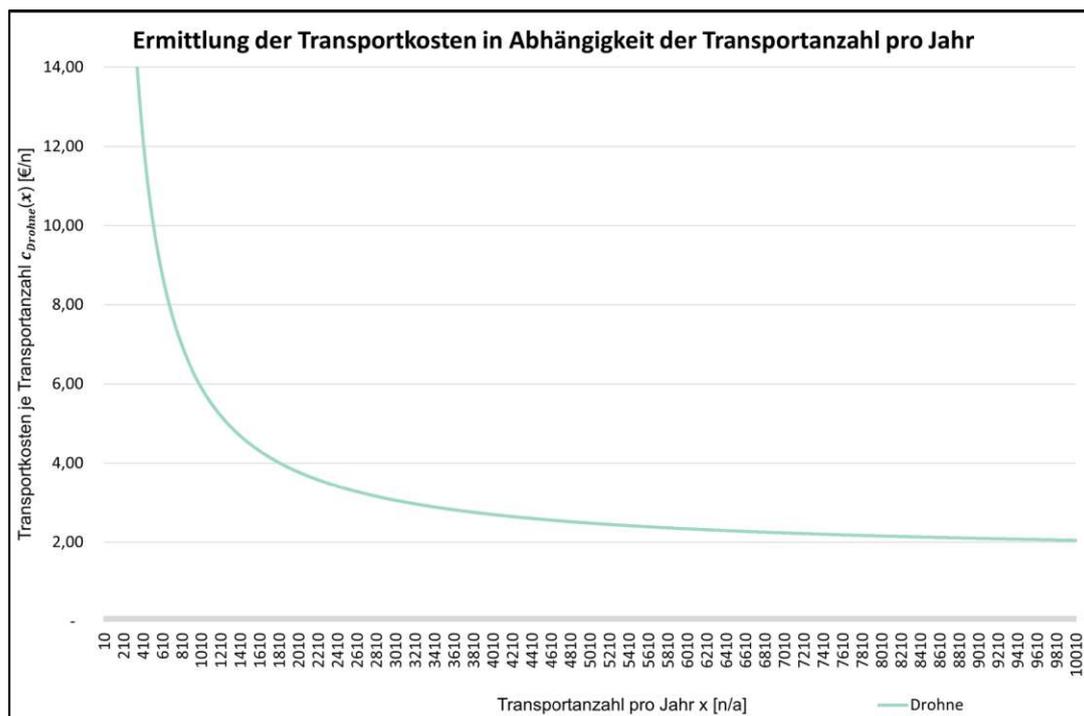


Abbildung 39: Exemplarische Ermittlung der Transportkosten in Abhängigkeit der Transportanzahl pro Jahr (eigene Darstellung)

Um abschließend eine vergleichende Betrachtungsweise zwischen den zuvor ermittelten Transportkosten für eine Drohne und einem für den Anwendungsfall prädestinierten Transportmittel (z. B. Stapler oder Lastenfahrrad) in Abhängigkeit der Ergebnisse aus der Vorabprüfung zu ermöglichen, muss für das Vergleichsobjekt ebenfalls eine Kostenkalkulation in Anlehnung an Tabelle 20 durchgeführt werden. Zur Ermittlung der Kosten pro Transport für einen exemplarischen Stapler dient Formel 15. Je nach Vergleichsobjekt müssen die staplerspezifischen Variablen ersetzt werden. Das Ergebnis dient der finalen Gegenüberstellung der einzelnen Kostenverläufe gemäß Abbildung 39.

$$c_{\text{Stapler}}(x) = t_{\text{Stapler}} * \frac{c_{MA}}{3600} + \frac{K_{\text{Betrieb}}}{x} + c_{ES}$$

mit

$c_{\text{Stapler}}(x)$... Transportkosten je Transportanzahl [€/n]

t_{Stapler} ... Zeitdauer pro Transport mit einem Stapler [s/n]

c_{MA} ... Produktivkostenstundensatz Personal [€/h]

K_{Betrieb} ... Betriebskosten pro Jahr [€/a]

c_{ES} ... Energiekosten Stapler pro Transportspiel [€/n]

x ... Laufvariable (Transportanzahl) [n/a]

Formel 15: Transportkosten je Transportanzahl am Beispiel eines Staplers (eigene Darstellung)

Zur Gegenüberstellung der Transportzeiten dient für die Vergleichsobjekte (z. B. Stapler) die Methodenzeitmessung „Methods Time Measurement“ (MTM). Hierbei werden empirisch ermittelte Prozessbausteine als Planungsinstrument für Prozessgestaltungen und die Leistungsbewertung verwendet (vgl. Morlock et al. 2017, S. 370). Die jeweiligen Tätigkeiten (z. B. Gehen, Fahren pro Meter etc.) sind mit Normzeiten hinterlegt und liefern die Basis für eine detaillierte Zeiterfassung. Die definierten Bausteine sind mit der Einheit „Time Measurement Unit“ (TMU) ausgewiesen, wobei eine TMU 0,036 Sekunden entspricht (vgl. Jankulik und Pfiff 2009, S. 121–122). Die Nutzung der MTM-Methode im vorliegenden Vorgehensmodell ermöglicht die Simulation und Modellierung verschiedener Soll-Prozessabläufe in Relation zur Normleistung der Mitarbeiter. Es werden vor allem logistische Standardvorgänge für die Bewertung der operativen Tätigkeiten herangezogen und je nach spezifischem Anwendungsfall adaptiert (vgl. Österreichische MTM-Vereinigung 2022, o.S.). Tabelle 21 dient zur exemplarischen Illustration einer MTM-Bewertung für die Erhebung der Transportzeit eines Transportmittels am Beispiel eines Staplers. Je Vergleichsobjekt liegen in der Literatur unterschiedliche Zeitbausteine vor, die in der Berechnung berücksichtigt werden müssen. Auf die Bestimmung der drohnenbasierten Abläufe in Relation zu einem für den Materialtransport eingesetzten Stapler fokussiert sich das wissenschaftliche Paper von Taschner et al. (2021, S. 1–6). Die einzelnen Prozessschritte mit zugehörigem Kode können im Vorgehensmodell je nach unternehmensspezifischen Prozessabläufen variabel angepasst werden. Die schlussendlich resultierende Zeitdauer pro Transport t_{Stapler} dient als weiterer Baustein für die zuvor definierte Formel 15 (siehe Seite 110).

Tabelle 21: Exemplarische Ermittlung der Transportzeit mittels MTM-Bewertung am Beispiel eines Staplers (eigene Darstellung)

MTM-Bewertung Ermittlung der Transportzeit am Beispiel eines Staplers								
Schritt	Kode	Beschreibung	TMU	Anzahl	Häufigkeit	A x H	Gesamt TMU	Sekunden
S1	4LTAZA	Aufsteigen des Staplerfahrers	220	1	0,5	0,5	110	4,0
S2	4LTAZT	Türe öffnen und schließen	100	1	1,0	1	100	3,6
S3	4LTAZS	Sicherheitsgurt anlegen	175	1	0,5	0,5	87,5	3,2
S4	4LTAZM	Motor starten	90	1	0,5	0,5	45	1,6
S5	4LTAZF	Feststellbremse lösen	120	1	0,5	0,5	60	2,2
S6	4LTABJ	Joystickschaltung betätigen	10	1	1,0	1	10	0,4
S7	4LTSFAS	Mit Stapler zur Senke fahren (Außenbereich)	7	200	1,0	200	1400	50,4
S8	4LTSFKS	Kurve 90 Grad 2x (stabile Fahrt)	16	2	1,0	2	32	1,2
S9	4LTSFVB	Verzögerung Start und Stopp (beladener Zustand)	56	1	1,0	1	56	2,0
S10	4LTAZM	Motor ausschalten und starten	90	1	1,0	1	90	3,2
S11	4LTAZA	Auf- und Absteigen des Staplerfahrers	220	1	1,0	1	220	7,9
S12	4LTAZT	Türe öffnen und schließen	100	2	1,0	2	200	7,2
S13	4LTAZF	Feststellbremse ziehen und lösen	120	1	1,0	1	120	4,3
S14	4LTAZS	Sicherheitsgurt an- und ablegen	175	1	1,0	1	175	6,3
S15	4LTABJ	Joystickschaltung betätigen	10	1	1	1	10	0,4
S16	4LTSFAS	Mit Stapler zur Quelle zurückfahren (Außenbereich)	7	200	1	200	1400	50,4
S17	4LTSFKS	Kurve 90 Grad 2x (stabile Fahrt)	16	2	1,0	2	32	1,2
S18	4LTSFVB	Verzögerung Start und Stopp (unbeladener Zustand)	30	1	1,0	1	30	1,1
S19	4LTAZM	Motor ausschalten	90	1	0,5	0,5	45	1,6
S20	4LTAZF	Feststellbremse ziehen	120	1	0,5	0,5	60	2,2
S21	4LTAZS	Sicherheitsgurt ablegen	175	1	0,5	0,5	87,5	3,2
S22	4LTAZT	Türe öffnen und schließen	100	1	1,0	1	100	3,6
S23	4LTAZA	Absteigen des Staplerfahrers	220	1	0,5	0,5	110	4,0
t_{Stapler} - Zeitdauer pro Transport mit einem Stapler [s/n]								164,9

5.6.5 Zusammenfassung von Schritt 5 | Validierung des wirtschaftlichen Nutzens

Das Ergebnis des letzten Durchführungsschritts im Vorgehensmodell ist eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Drohneneinsatzes, um den wirtschaftlichen Nutzen zu überprüfen. Dabei umfasst dies sowohl die Erhebung notwendiger Personalkosten in Bezug auf den Drohneneinsatz als auch die Ermittlung der Transportzeit zur Erfüllung der logistischen Aufgabe. Einzelne Zeitbausteine für die jeweiligen Tätigkeitsschritte der Drohne werden dabei definiert, anhand der die Zeitaufwände ermittelbar sind. Zur abschließenden Ermittlung der resultierenden Betriebskosten und Amortisationszeit für den operativen Drohneneinsatz wird eine Kalkulationsmethode für die notwendige Drohnenanzahl in Abhängigkeit definierter Inputparameter (z. B. Arbeitstage, Arbeitsstunden, Materialgewicht je Bedarf, Transportzeit etc.) definiert. Für die Ermittlung der Transportkosten in Abhängigkeit der Transportanzahl pro Jahr wird sowohl eine singuläre Betrachtungsweise zur Wirtschaftlichkeitsbewertung des Drohneneinsatzes als auch eine vergleichende Betrachtung unter Berücksichtigung herkömmlicher Flurfördermittel am Beispiel eines Staplers definiert.

5.7 Zusammenfassung des Kapitels

Für die Implementierung von Drohnen für den intralogistischen Materialtransport in einem Unternehmen werden in Kapitel 5 die notwendigen Handlungsschritte im Rahmen des entwickelten Vorgehensmodells schrittweise definiert. Anhand einer methodischen Vorabprüfung erfolgt die anfängliche technologische Eingrenzung und Bewertung der für den Anwendungsfall prädestinierten Transporttechnologien. Unter Bezugnahme des Bewertungsschemas und der abgeleiteten Reihung der Transportmittel liegt dem Unternehmen eine Entscheidungsbasis für die potenzielle Detailprüfung anhand der nachfolgenden Teilschritte des Modells vor.

Neben der in Schritt 1 durchgeführten Analysephase, bei der unternehmensspezifische Anforderungen erhoben werden, stehen die methodische Technologiebewertung und Entscheidungsunterstützung für die Drohnenauswahl in Schritt 2 des Modells im Betrachtungsfokus. Darauf aufbauend werden in Schritt 3 die für die notwendige luftfahrtrechtliche Betriebsbewilligung der Drohne und des Einsatzortes erforderlichen Maßnahmen definiert. Hierfür dient das Lastenheft inklusive den spezifischen Prozessentwicklungen und Dokumenten als Leitfaden. Auf Basis der Transporttechnologiebewertung werden in Schritt 4 notwendige Kriterien für die automatisierte Transportaufnahmevorrichtung und Landeplattform mittels definierter Anforderungslisten festgelegt. Das Vorgehensmodell wird durch eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in Schritt 5 abgeschlossen.

6 Anwendung und Validierung des Vorgehensmodells

Auf Basis eines industrienahen Fallbeispiels wird das Modell aus Kapitel 5 auf die industrielle Anwendbarkeit überprüft. Dafür werden im folgenden Abschnitt die Schritte des Vorgehensmodells stufenweise durchlaufen und die praxisbezogene Umsetzung im Detail behandelt.

6.1 Fallbeispiel 1: Materialtransport mit Drohnen in der Baustoffindustrie

Die industrielle Anwendbarkeit wird bei einem führenden österreichischen Dämmstoffhersteller mit mehreren Produktionsstandorten in Mittel- und Osteuropa getestet. Das Produktspektrum umfasst hochwertige, innovative Wärme- und Schalldämmungsprodukte für den Einsatz in der Baubranche. Durch die stetige Produktentwicklung und -optimierung liefert das Unternehmen einen erheblichen Beitrag für zukunftsorientierte Baustofflösungen. Zur Effizienzsteigerung innerbetrieblicher Materialtransporte und Weiterentwicklung von Digitalisierungslösungen wird an einem Produktionsstandort in Österreich eine automatisierte Materialbereitstellung im Außenbereich mittels Drohne erprobt.

6.1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Der Standort ist sehr weitläufig und erstreckt sich über eine Länge von 0,5 km, wodurch sich für das Unternehmen Herausforderungen bei der Überbrückung langer Distanzen für die Materialbereitstellungen am Werksgelände ergeben. Aktuell werden angelieferte Klein- und Ersatzteile für die Instandhaltung der Maschinen und Gewerke im Logistikbüro an der Werkseinfahrt entgegengenommen und konsolidiert. Die Zustellung der Einzelteile zu den jeweiligen Lagerabteilungen am Werksgelände erfolgt durch Mitarbeiter. Zur Distanzüberbrückung werden aktuell Stapler und Lastenfahräder eingesetzt. Diese manuelle, personengebundene Materialbereitstellung ist zeitintensiv und unterliegt keiner wertschöpfenden Tätigkeit.

6.1.2 Zielsetzung

Das angestrebte Ziel ist die Etablierung eines personenunabhängigen Materialtransports durch eine prädestinierte Transporttechnologielösung. Diesbezüglich soll auch die technologische und wirtschaftliche Eignungsfähigkeit von Drohnen für die spezifischen Transportaufträge im Unternehmen überprüft und Alternativansätzen gegenübergestellt werden. Auf Basis dessen, soll eine grundlagenbasierte Entscheidung über die Einführung von Drohnen für den

automatisierten Materialtransport getroffen werden. Anhand einer Vorselektion und Eingrenzung geeigneter Drohnentechnologien soll der Klein- und Ersatzteiletransport am Werksgelände automatisiert abgewickelt werden. Zur Bewerksstellung des automatisierten Auf- und Abgabeprozesses der Transportboxen sollen unternehmensspezifische Anforderungskriterien für eine geeignete Transportaufnahmeeinheit sowie Lande- und Übergabepattform definiert werden. Durch die selbstständige Aufnahme und Abgabe der Transportboxen auf den Landepositionen am Standort sollen Zeit- und Kosteneinsparungen erzielt werden. Zusätzlich steht der vertiefende Drohnenkompetenzaufbau im Betrachtungsfokus, um die Drohnentechnologie als unterstützendes Werkzeug dem operativen Personal bereitzustellen. Zur Lösungsfindung wird das in Kapitel 5 entwickelte Vorgehensmodell mit dessen Teilschritten, Methoden und Handlungsmaßnahmen angewandt.

6.1.3 Anwendung der Modelldurchführungsschritte

In diesem Abschnitt werden die im vorangegangenen Kapitel 5 dargelegten Handlungsschritte sukzessive durchlaufen und geprüft.

Vorabprüfung: Eignungsfähigkeit des Drohneneinsatzes

Einleitend erfolgt eine Vorabprüfung relevanter Transportmittel hinsichtlich ihrer Eignungsfähigkeit, um die im Anwendungsfall auftretenden fördertechnischen Aufgaben zu erfüllen. Diesbezüglich werden die im Vorgehensmodell entwickelten Anforderungskriterien (vgl. Tabelle 22) zur Vorselektion angewandt.

Tabelle 22: Vorselektion von Transportmitteln im Fallbeispiel 1 (eigene Darstellung)

Anforderungskriterien zur Vorselektion von Transportmitteln									
Legende		Anforderungsart							Übernahme von Transportmitteln zur weiteren Detailanalyse
Grad der Eignung	Symbol	Einsatz im Außenbereich	Zügige Überbrückung von Transportdistanzen > 500 m	Hohe Transportanzahl pro Zeiteinheit	Flexible Routenführung (Vielzahl an Quellen und Senken) am Werksgelände	Transportfähigkeit von standardisierten Ladungsträgern	Tragfähigkeit von Gewichten zwischen 0,1 kg ≤ x kg ≤ 5 kg	Bedarfsorientierter Transportabruf	
Schlecht geeignet	○								
Gut geeignet	●								
Weitere Detailanalyse	Symbol								
Ja	✓								
Nein	✗								
Nr.	Art des Transportmittels								
1	Stapler	●	●	●	●	●	●	●	✓
2	Outdoor-Routenzug	●	●	●	○	●	●	●	✗
3	Lastenfahrrad	●	●	●	●	●	●	●	✓
4	FTS	○	○	○	○	●	●	●	✗
5	Drohne	●	●	●	●	●	●	●	✓

Die Eingrenzung relevanter Transportmittel zeigt, dass sowohl Stapler, Lastenfahrrad als auch Drohnen für den unternehmensspezifischen Anwendungsfall geeignet sind und zur weiteren Detailanalyse übernommen werden. Anhand der definierten Zielsetzung und der technologischen Vorselektion erfolgt im Anschluss eine wirtschaftliche Abschätzung und überschlagsmäßige Kostenkalkulation (siehe Kapitel 5.1.1) der eingegrenzten Transporttechnologien in Tabelle 23.

Tabelle 23: Wirtschaftliche Abschätzung der eingegrenzten Transportmittel im Fallbeispiel 1 (eigene Darstellung)

Wirtschaftliche Abschätzung der Transportmittel			
Inputparameter		Kurzbeschreibung	
Arbeitstage pro Jahr [d/a]	249	Anwendungsfall: Automatisierter Klein- und Ersatzteiletransport von der Warenannahme zum Ersatzteillager am weitläufigen Werksgelände.	
Arbeitsstunden pro Tag [h/d]	8		
Materialgewicht je Bedarf [kg/Bedarf]	1,5		
Materialbedarf pro Stunde [Bedarf/h]	3		
Gesamtdauer je Transport Drohne [s/n]	250		
Gesamtdauer je Transport Stapler [s/n]	300		
Gesamtdauer je Transport Lastenfahrrad [s/n]	600		
Auswertung	Drohne	Stapler	Lastenfahrrad
Transporte pro Stunde [n/h]	3	3	3
Transporte pro Jahr [n/a]	5.976	5.976	5.976
Gesamttransportzeit pro Jahr [min]	24.900	29.880	59.760
Anzahl erforderlicher Transportmittel [-]	1	1	1
Gesamtinvestitionshöhe [€]	15.000	55.000	6.000
Kalkulatorische Abschreibung [€/a]	3.000	11.000	1.200
Kalkulatorische Zinskosten [€/a]	600	2.200	240
Fixkosten pro Jahr [€/a]	3.600	13.200	1.440
Variable Kosten pro Jahr [€/a]	2.000	7.500	600
Betriebskosten pro Jahr [€/a]	5.600	20.700	2.040
Personalkosten pro Jahr [€/a]	17.500	35.000	22.000
Gesamtkosten pro Jahr [€/a]	23.100	55.700	24.040

Nachdem die unternehmensspezifischen Inputparameter definiert sind, erfolgt die anschließende Auswertung und überschlagsmäßige Kalkulation der notwendigen Transportmittellanzahl. Es wird ein durchschnittliches Materialgewicht je Bedarf von rund 1,5 kg angenommen. Der Materialbedarf pro Stunde referenziert auf die angenommenen Anlieferungen der Klein- und Ersatzteile durch die Speditionen, die gemäß der Szenario-Definition (vgl. Tabelle 24 auf Seite 116) sofort ins Ersatzteillager transportiert werden müssen. Für die zurückgelegte Wegstrecke pro Transport wird die Gesamtdauer zeitlich abgeschätzt. Auf Basis der Inputparameter werden die notwendigen Transporte pro Stunde ermittelt (vgl. Formel 4 auf Seite 103). Anhand der resultierenden Transporte pro Stunde und abgeschätzten Gesamtdauer je Transport ergibt sich die erforderliche Transportmittellanzahl (vgl. Formel 6 auf Seite 103). Darauf aufbauend erfolgt eine Abschätzung der Gesamtinvestitionshöhen auf Basis einer Marktrecherche (vgl. Formel 7 auf Seite 104 und Tabelle 20 auf Seite 105). Anhand der ermittelten Investitionskosten werden die Abschreibungen bei fünfjähriger Nutzungsdauer sowie die Zinskosten gemäß Formel 8 (siehe Seite 106) und Formel 9 (siehe Seite 106) berechnet. Dabei wird ein Zinssatz von 8 Prozent und ein Fremdfinanzierungsanteil von 50 Prozent in Bezug auf die Gesamtinvestitionshöhe angenommen. Die Fixkosten pro Jahr werden additiv durch die Abschreibungen und

Zinskosten bestimmt. In die Abschätzung der variablen Kosten fließen sowohl die jährlichen Energiekosten sowie Instandhaltungskosten ein. Dabei wird auf die jährlichen Entladungen und den aktuell gültigen Strompreis referenziert (vgl. Formel 11 auf Seite 107). Für die Instandhaltungskosten werden zehn Prozent der Gesamtinvestitionshöhe einkalkuliert. Durch die Addition der fixen und variablen Kosten resultieren die Betriebskosten pro Jahr für die Transportmittel. Zur schlussendlichen Bestimmung der Gesamtkosten fließen Personalkosten für den operativen Betrieb in die Kalkulation ein (vgl. Formel 12 auf Seite 107). Da der Drohnentransport automatisiert ablaufen und die Betreuung durch einen bestehenden Logistikmitarbeiter erfolgen soll, wird für den Drohneneinsatz lediglich mit 50 Prozent der Personalkosten für den Staplereinsatz in der Vorabprüfung kalkuliert. Damit zeigt sich schlussendlich, dass die Gesamtkosten für den potenziellen Drohneneinsatz geringer als die des Staplers und Lastenfahrrads ausfallen. Auf Basis der wirtschaftlichen Abschätzung zeigt sich, dass eine weiterführende Detailprüfung für den automatisierten Materialtransport mittels Drohnen am Werksgelände legitim ist.

Schritt 1 | Analysephase: Erfassung notwendiger Informationen und Daten

Die unternehmensspezifischen Anforderungen an das Anwendungsszenario, die Technologie und das Umfeld werden mithilfe des entwickelten morphologischen Kastens (vgl. Tabelle 24) und Fragebogens (vgl. Tabelle 25) aus Kapitel 5.2.1 im Vorfeld durch unternehmensverantwortliche Personen erhoben und definiert. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Visualisierung von einem Ausgangsszenario (V1) und Vergleichsszenarien (V2 und V3) sowie die Einschätzung des aktuellen Kompetenzstands und organisatorischen Reifegrads des Unternehmens in Bezug auf eine Drohnenimplementierung, woraus in weiterer Folge spezifische Handlungsmaßnahmen für die Umsetzung des angestrebten Drohneneinsatzes ableitbar sind. Zur Gewährleistung der qualitativen Beantwortungsfähigkeit werden die Fragen vom Werksleiter des Produktionsstandorts beantwortet.

Tabelle 24: Einordnung des Anwendungsszenarios (eigene Darstellung)

Nr.	Attribute	Ausprägungen		
		Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3
1	Art des Transportmittels	Flurförderfahrzeug	Drohne	Lastenfahrrad
2	Transportgewicht	$0,1 \text{ kg} \leq w < 1 \text{ kg}$	$1 \text{ kg} \leq w < 2,5 \text{ kg}$	$2,5 \text{ kg} \leq w < 5 \text{ kg}$
3	Arbeitsschichten	1	2	3
4	Anzahl Transporte pro Schicht	$5 \leq y < 10$	$10 \leq y < 20$	$20 \leq y < 50$
5	Transportaufkommen Wareneingang	Anlieferungen 1/Tag gebündelt - sofortiger Transport	Anlieferungen über Tagesverlauf verteilt - sofortiger Transport	Anlieferungen über Tagesverlauf verteilt - Konsolidierung und einmaliger Transport
6	Transportdistanz	$100 \text{ m} \leq z < 400 \text{ m}$	$400 \text{ m} \leq z < 800 \text{ m}$	$800 \text{ m} \leq z < 1200 \text{ m}$

Tabelle 25: Fragebogen im Zuge der Analysephase (Werksleiter, Fallbeispiel 1, persönliche Korrespondenz, Wien, 21.09.2021)

Fragenkatalog für den Drohneneinsatz im Außenbereich					
Nr.	Fragen	Erklärung	Antwort		Konsequenz
			Ja	Nein	
1. Drohnenexpertise & Rechtliches					
		Warum ist die Info notwendig?			Falls nein, notwendige Handlungsschritte?
1.1	Besitzen Fachexperten im Unternehmen einen Drohnenführerschein für diverse Kategorien?	Beeinflusst die Einsatzklasse im Bewilligungsverfahren. (vgl. Schritt 3)	X		Ausbildung von Drohnenpiloten im Unternehmen je Einsatzklasse.
1.2	Ist ein Sicherheitskonzept für zukünftige Drohneneinsätze im Unternehmen bereits erarbeitet?	Ist für die Betriebsgenehmigung gemäß dem SORA Prozesses notwendig. (vgl. Schritt 3)		X	Entwicklung eines ERP- (Emergency Response Plan)- Prozesses für Notsituationen.
1.3	Ist ein Betriebsrat vorhanden?	Bei anfallenden Bilddaten im Zuge des Drohnenflugs sind Personenrechte im Vorfeld abzustimmen. Die Zustimmung muss dokumentiert werden. (vgl. Schritt 3)		X	Bei einem fehlenden Betriebsrat sind Mitarbeiter proaktiv über Bildaufnahmen während des Einsatzflugs zu informieren.
1.4	Ist der Drohneneinsatz nur zu einer Tageszeit angedacht?	Flugzeiten müssen definiert werden, da die Einsatzzeit zwischen Sonnenaufgang und Abenddämmerung begrenzt ist. (vgl. Schritt 3)		X	Definition einer ordnungsgemäßen Einsatzhäufigkeit innerhalb der rechtlichen Zeitbeschränkungen.
1.5	Ist die Anzahl an Transportflügen pro Tag ≤ 50 ?	Einsatzhäufigkeit muss gemäß Fragestellung 1.4 im rechtlichen Genehmigungsprozess festgelegt werden. (vgl. Schritt 3)	X		Prüfung hinsichtlich resultierenden Umfeldbelastungen (z.B. Lärmentwicklung). Ggf. Lärmmessung beilegen.
2. Infrastruktur und Werkslayout					
2.1	Sind digitale Layouts vom Werksgelände vorhanden?	Sind sowohl für die Routenplanung als auch den SORA-Prozess notwendig. (vgl. Schritt 1 & 3)	X		Erstellung eines digitalen Abbilds der vorhandenen Werksstrukturen.
2.2	Sind die Gebäudehöhen im Layout ersichtlich?	Vermeidung von Hindernissen in der Routenplanung. (vgl. Schritt 1)	X		Angabe der maximalen Gebäudehöhen im Layout.
2.3	Ist der Einsatzort frei von Flugbeschränkungszonen (z.B. Flughafen, Raffinerien, Naturschutzgebiet, Militärgebiet)?	Beeinflusst die notwendigen Handlungsschritte im Zuge des Genehmigungsverfahrens bei der Luftfahrtbehörde. (vgl. Schritt 1)	X		Liegt das Werksgelände in diesen Gebieten, ist im Vorfeld eine Sondergenehmigung bei der Luftfahrtbehörde oder dem Militär einzuholen.

2.4	Ist das Werksgelände freistehend und von keinen anderen Gebäuden umgeben?	Festlegung der Flugzone und notwendigen Sicherheitspuffer im Layout für die Risikobewertung. (vgl. Schritt 1)		X	Es muss genügend Puffervolumen zu den Gebäuden bei einem Absturz berücksichtigt werden. Die rechtliche Flughöhe wird dadurch beeinflusst.
2.5	Ist die unmittelbare Umgebung des Werkslayouts frei von Strommasten oder Überlandleitungen?	Zur Beurteilung möglicher Interferenzen durch elektromagnetische Störungen. (vgl. Schritt 1)		X	Störquellen, welche die Signalübertragung beeinträchtigen, sind im Vorfeld zu quantifizieren. Ggf. erfolgt eine Anpassung der Flugroute.
2.6	Ist das Werkslayout baulich (z.B. Zäune) abgegrenzt?	Beeinflusst die Risikoabschätzung im Genehmigungsprozess. (vgl. Schritt 1 & Schritt 3)		X	Der Einsatzort ist für unbeteiligte Personen durch Absperrungen unzugänglich zu machen.
3. Materialtransport					
3.1	Sollen ausschließlich Kleinteile transportiert werden?	Einfluss auf die auszuwählende Drohnenkategorie und Transportaufnahme. (vgl. Schritt 2)		X	Maximale Gewichtszuladung je Einsatzklasse prüfen.
3.2	Ist das Transportgewicht pro Flug ≤ 5 kg?	Beeinflusst die Drohnenkategorie und Anforderungen des Greifmechanismus. (vgl. Schritt 2 & 4)		X	Anforderungen an Drohne und Greifmechanismus prüfen.
3.3	Soll der Gütertransport in standardisierten Ladungsträgern erfolgen?	Einfluss auf die Anforderungen des Greifmechanismus. (vgl. Schritt 1 & 4)		X	Greifmechanismus auf variable Form und Oberfläche des Objekts auslegen.
3.4	Ist das Transportgut als ungefährlich einzustufen?	Notwendige Information für den Genehmigungsprozess. (vgl. Schritt 1 & Schritt 3)		X	Der Transport gefährlicher Güter ist im Vorfeld von der Luftfahrtbehörde zu evaluieren.
3.5	Sind die Güter unempfindlich gegenüber Erschütterungen?	Relevant für die Auslegung des Anforderungskatalogs der Aufnahmeeinheit. (vgl. Schritt 1 & 4)		X	Spezielle Vorrichtungen gegen Erschütterungen sind bei der Auslegung des Transportbehälters zu berücksichtigen.
3.6	Ist nur eine Quelle und Senke für den Drohnentransport vorgesehen?	Für die Definition der effizientesten Flugroute in der Routenplanung. (vgl. Schritt 1)		X	Die Anzahl der Übergabepattformen und Flugdistanzen ist zu prüfen. Positionen sind im Layout zu vermerken.

Als Konsequenz auf die Antworten der Frage 1.2 muss im Modellschritt 3 ein Notfallplan für unvorhersehbare Missionsabweichungen entwickelt werden und dieser den Anträgen zur Betriebsbewilligung beigelegt werden. Die Flugzeiten werden gemäß der Antwort auf die Frage 1.5 auf den Bereich zwischen Sonnenaufgang und Abenddämmerung festgelegt. Aufgrund des kalkulierten Materialgewichts pro Bedarf aus der vorangegangenen Vorabprüfung wird angenommen, dass pro Tag bis zu 15 Transportflüge in diesem Zeitfenster durchgeführt werden müssen.

Daran anschließend erfolgen vertiefende Informations- und Datenerhebungen hinsichtlich des geografischen Einsatzgebiets und der Prozessanforderungen, wobei die vorliegenden Gegebenheiten mit dem Werksleiter des Produktionsstandorts spezifiziert werden.

1. Analyse des Einsatzortes sowie Flug- und Routenplanung

Im Zuge der Werkslayoutüberprüfung wird auch erhoben, ob es Einschränkungen bezüglich des Einsatzgebietes gibt, in dem sich das Unternehmen befindet. Hierzu werden Flächenwidmungen der umliegenden Grundstücke sowie mögliche Schutzgebiete bei den zuständigen Behörden abgefragt. Zusätzlich erfolgt eine Überprüfung der Luffahrtkarten hinsichtlich Flugzonen des kommerziellen Luftverkehrs und Luftraumbeschränkungen, wobei der Unternehmensstandort in der Luftkarte für die nachfolgende Betriebsbewilligung markiert werden muss (siehe Abbildung 40). Aufgrund der Nähe des Produktionsstandorts zu einem Naturschutzgebiet, müssen proaktiv Gespräche mit der Luffahrtbehörde hinsichtlich des Drohneneinsatzes durchgeführt werden.

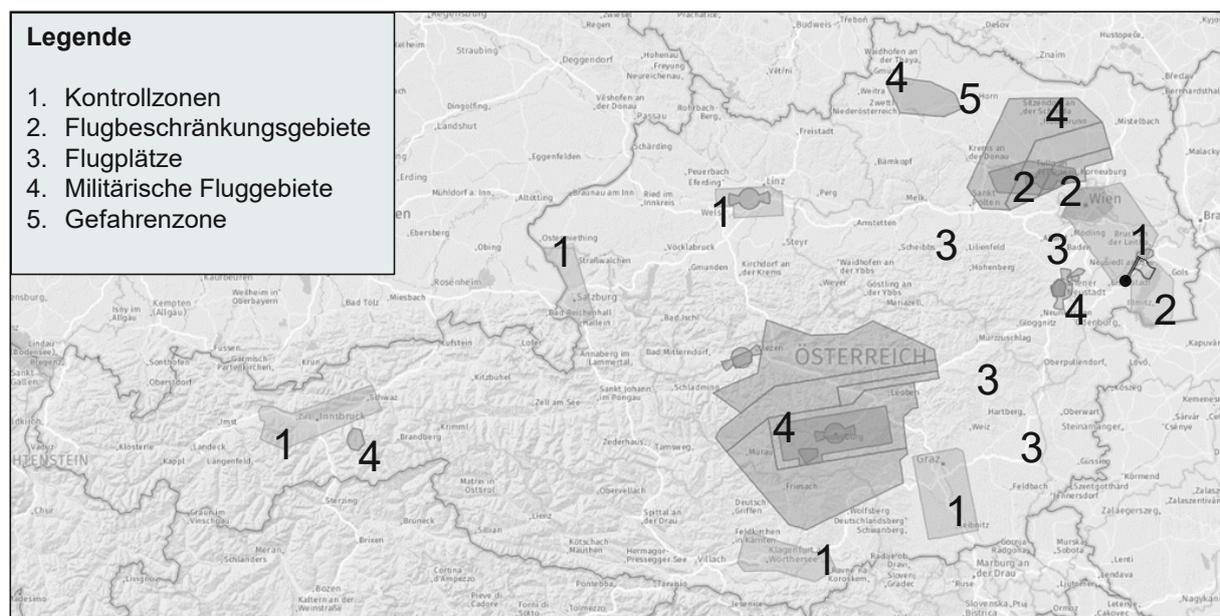


Abbildung 40: Geografische Standortanalyse (eigene Darstellung in Anlehnung an Austro Control 2020, o.S.)

Nach der Gebietsüberprüfung werden das Werkslayout und die bautechnischen Restriktionen am Grundstück anhand der Antworten auf die Fragen 2.1 bis 2.6 des Fragebogens durch Unternehmensexperten analysiert. Dabei werden auch die Höhenprofile der am Standort befindlichen Gebäude diskutiert und in die Routenplanung einbezogen. Gegebenenfalls müssen Anpassungen bei der Flugroute durchgeführt werden, um Beeinträchtigungen zu vermeiden. Zusätzlich wird das digitale Layout mit den Quellen und Senken sowie der Flugroute der Drohne erweitert (siehe Abbildung 41), welches wiederum als weiterer Bestandteil des luftfahrtrechtlichen Lastenhefts (vgl. Kapitel 5.4 im Vorgehensmodell) dient.

Die festgelegte Flugroute erfolgt ausgehend von der Warenannahme (Symbol A), wo die Klein- und Ersatzteile konsolidiert und im Anschluss daran über die Aufnahmeplattform (Symbol Q) an das Ersatzteillager (Symbol ETL) über den Luftweg zur Abgabepattform (Symbol S) transportiert werden. Aus sicherheitstechnischen Gründen wird für die zurückgelegte Route ein Sicherheitskorridor neben der LKW-Fahrbahn etabliert, um das Gefährdungsrisiko während des operativen Betriebs für das Personal zu minimieren. Obwohl der direkte Luftweg zwischen Quelle und Senke durch den Überflug des Außenlagers und der Bürogebäude eine zusätzliche Zeitersparnis liefern würde, wird aufgrund des potenziellen Gefährdungspotenzials für die operativen Staplerfahrer im Freilager darauf aktiv verzichtet.

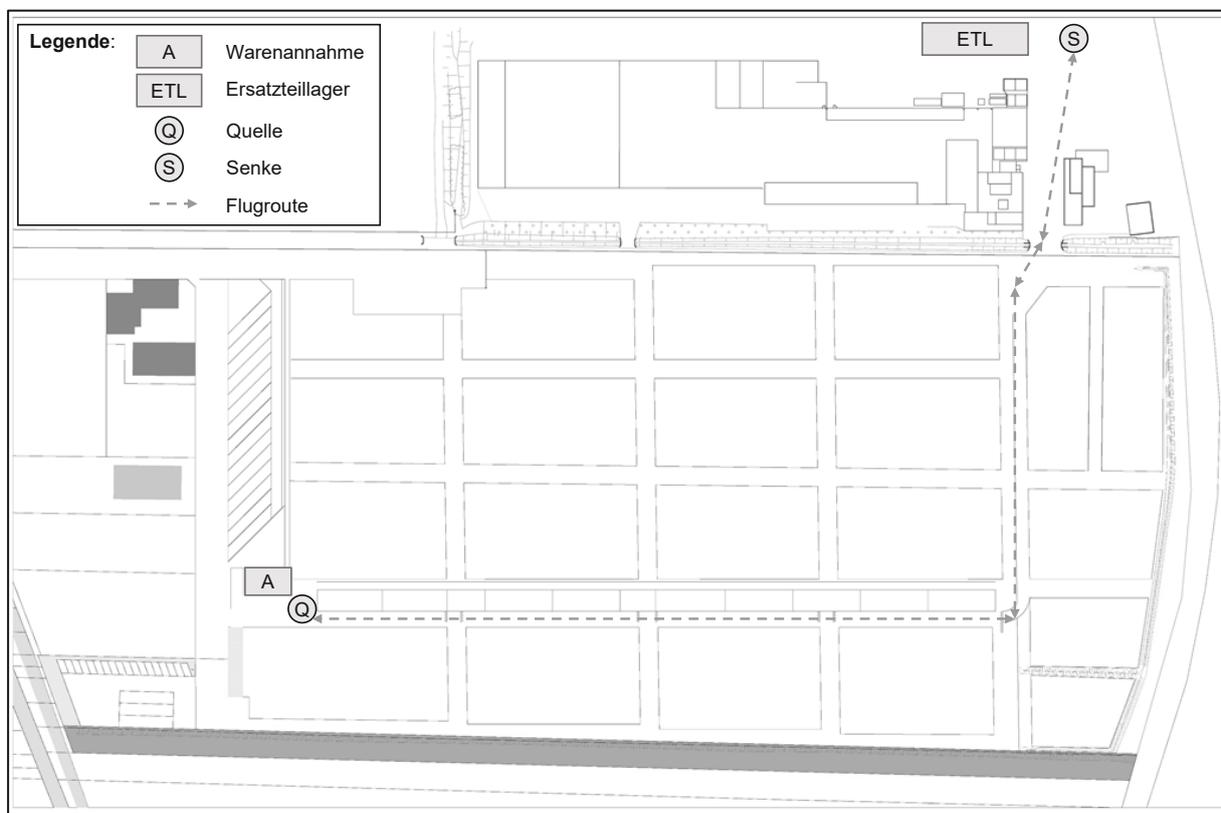


Abbildung 41: Werkslayout mit Quellen und Senken sowie festgelegter Flugroute (Werksleiter, Fallbeispiel 1, persönliche Korrespondenz, Wien, 05.06.2021)

2. Prozessentwicklung

In der Analysephase wird auch überprüft, ob die bestehenden intralogistischen Logistikprozesse mit dem angestrebten Drohnentransport für die Klein- und Ersatzteillieferungen kompatibel sind. Aufgrund des neuartigen Technologieeinsatzes im Unternehmen sind im Vorfeld Prozessabläufe für den automatisierten Transport festzulegen und in der Organisation zu etablieren. Aufgrund der in Kapitel 5.2.2 des Vorgehensmodells definierten Bedingungen liegt der Hauptfokus bei der Prozessentwicklung auf der Prozessstabilität der Drohne im operativen Betrieb. Zur visuellen Darstellung wird auf die Swimlane-Prozessdarstellung zurückgegriffen, um ein einheitliches Verständnis zu schaffen. Der entwickelte Prozess für die automatisierte Materialbereitstellung mittels Drohne ist in Abbildung 42 dargestellt.

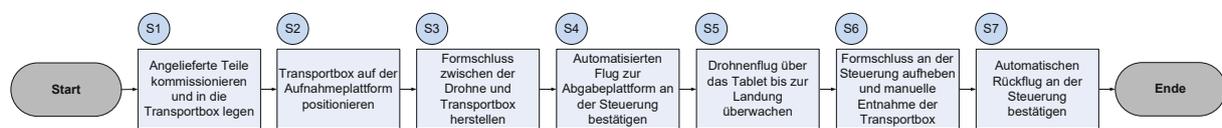


Abbildung 42: Prozessablauf für die automatisierte Materialbereitstellung mittels Drohne (eigene Darstellung)

Der Prozessverantwortliche ist ein Fachexperte in der Logistikabteilung mit spezieller Drohnenausbildung, wobei die Steuerungsoperationen am Controller erfolgen. Neben dem operativen Prozess sind gleichzeitig Sicherheitsabläufe zu bestimmen (siehe Prozessentwicklung in Schritt 3 des Vorgehensmodells) und in das Sicherheitskonzept des Unternehmens zu integrieren.

3. Transportgutklassifizierung

Die am Produktionsstandort angelieferten Klein- und Ersatzteile variieren in ihren Abmessungen und Produkteigenschaften, wodurch im Vorfeld gemäß der Punkte 3.1 bis 3.5 des Fragenkatalogs eine Selektion bzw. Gruppierung der transportfähigen Güter mittels Drohne erfolgt. Die jeweiligen Produkteigenschaften werden in einem Transportdatenblatt (siehe Tabelle 26) festgehalten und dienen der Nachverfolgbarkeit und Transparenz. Das zu transportierende Produktspektrum beeinflusst die Technologieauswahl der Drohne in Bezug auf die Traglast sowie die geforderten Anforderungskriterien an die Transportaufnahmeverrichtung hinsichtlich des Transportvolumens. Die unterschiedlich realisierbaren Schlichtmuster der Produkte im standardisierten Ladungsträger sind bei der Güterselektion zu berücksichtigen.

Eine Auswahl regelmäßig angelieferter Transportgüter für die Instandhaltung im Fallbeispiel 1 ist Tabelle 26 zu entnehmen:

Tabelle 26: Transportdatenblatt und Güterdefinition (eigene Darstellung)

Transportdatenblatt Güterdefinition							
Pos.	Positionsbezeichnung	Beschreibung Teil 1		Beschreibung Teil 2		Beschreibung Teil 3	
1	Artikelklassifizierung	Elektrische Kleinteile		Elektrisches Bauteil		Schüttgut	
2	Werkstoffart	Kunststoff		Kunststoff und Metall		Metall	
3	Gewicht	65 g		208 g		131 g	
4	Geometrieabmessungen (L x B x H) inkl. Abbildung						
		(eigene Darstellung) 110 x 85 x 40 mm		(eigene Darstellung) 85 x 75 x 35 mm		(eigene Darstellung) 90 x 60 x 45 mm	
5	Erschütterungsempfindlich	<input checked="" type="radio"/> Nein	<input type="radio"/> Ja	<input checked="" type="radio"/> Nein	<input type="radio"/> Ja	<input checked="" type="radio"/> Nein	<input type="radio"/> Ja
6	Gefahrgut	<input checked="" type="radio"/> Nein	<input type="radio"/> Ja	<input checked="" type="radio"/> Nein	<input type="radio"/> Ja	<input checked="" type="radio"/> Nein	<input type="radio"/> Ja
7	Temperaturbeständig	<input type="radio"/> Nein	<input checked="" type="radio"/> Ja	<input type="radio"/> Nein	<input checked="" type="radio"/> Ja	<input type="radio"/> Nein	<input checked="" type="radio"/> Ja
8	Stapel- u. Schlichtfähigkeit	<input type="radio"/> Nein	<input checked="" type="radio"/> Ja	<input type="radio"/> Nein	<input checked="" type="radio"/> Ja	<input type="radio"/> Nein	<input checked="" type="radio"/> Ja

Schritt 2 | Transporttechnologiebewertung: Auswahl einer geeigneten Drohne für den automatisierten Materialtransport

Anhand der Auswertungen des Fragebogens und der Layoutbetrachtung inklusive der definierten Flugroute ergeben sich Anforderungskriterien für die Transporttechnologieauswahl. Mithilfe des entwickelten morphologischen Kastens im Vorgehensmodell (siehe Kapitel 5.3.1) lassen sich die unternehmensspezifischen Anforderungskriterien mit möglichen Lösungsvarianten verknüpfen. Dabei wird eine Selektion von am Markt verfügbaren Technologiekonzepten hinsichtlich der definierten Anforderungen gegenübergestellt und zur Entscheidungsfindung methodisch bewertet.

In Tabelle 27 sind die unternehmensspezifischen, definierten Anforderungskriterien unterschiedlichen Lösungsvarianten gegenübergestellt. Die spezifischen Kriterien werden zunächst nach Erfüllungsgrad in unbedingte Anforderung oder optionale Ausführungsformen unterteilt. Damit lassen sich zwingende Forderungen des Unternehmens aufzeigen.

Wie im Grundlagenteil 2.2.3 und in der technologischen Eingrenzung in Kapitel 2.3.1 erläutert, werden aufgrund der geforderten Wendigkeit und Effektivität in baulich verwinkelten Einsatzbereichen ausschließlich Multicopter betrachtet.

Es werden daher die drei am Markt etablierten Drohnenvarianten Quadro-, Hexa- und Octocopter mit möglichen Ausprägungsformen verknüpft und durch eine Punktlinie verbunden. Da in der Zielsetzung (siehe Kapitel 6.1.2) festgelegt wurde, dass ausschließlich handelsübliche Drohnen für den automatisierten Materialtransport im Unternehmen eingesetzt werden sollen, wird auf Sonderbauformen nicht näher eingegangen.

Tabelle 27: Verknüpfung von Anforderungskriterien mit möglichen Lösungsvarianten mittels morphologischen Kastens (eigene Darstellung)

Legende		Morphologischer Kasten zur Verknüpfung von Anforderungskriterien mit Lösungsvarianten			
Grad der Erfüllung	Symbol				
Anforderung	A				
Optional	O				
Anforderungskriterien	Varianten	Quadrocopter	Hexacocter	Octocopter	A/O
Outdoor-Einsatz	Ja	Ja	Nein	-	A
Wasserbeständigkeit	Ja	Ja	Nein	Teilweise	A
Geringes Eigengewicht	$1 \text{ kg} \leq w < 3 \text{ kg}$	$1 \text{ kg} \leq w < 3 \text{ kg}$	$3 \text{ kg} \leq w < 5 \text{ kg}$	$5 \text{ kg} \leq w \leq 10 \text{ kg}$	A
Geringe Investitionskosten	$1.000 \text{ €} \leq x < 5.000 \text{ €}$	$1.000 \text{ €} \leq x < 5.000 \text{ €}$	$5.000 \text{ €} \leq x < 10.000 \text{ €}$	$10.000 \text{ €} \leq x \leq 30.000 \text{ €}$	A
RTK-Kompatibilität	Ja	Ja	Nein	-	A
Traglast	$0 \text{ kg} \leq y < 1 \text{ kg}$	$0 \text{ kg} \leq y < 1 \text{ kg}$	$1 \text{ kg} \leq y < 3 \text{ kg}$	$3 \text{ kg} \leq y \leq 6 \text{ kg}$	A
Automatisierte Flüge	Ja	Ja	Nein	-	A
Hohe Flugreichweite	VLOS	VLOS	BVLOS	Kombiniert	O
Lange Flugzeit	$10 \text{ min} \leq z < 20 \text{ min}$	$10 \text{ min} \leq z < 20 \text{ min}$	$20 \text{ min} \leq z < 30 \text{ min}$	$30 \text{ min} \leq z \leq 60 \text{ min}$	O
Fallschirm-Kompatibilität	Ja	Ja	Nein	-	A
Kamera-Adaptierbarkeit	Ja	Ja	Nein	Integriert	O

Die drei identifizierten Lösungsansätze aus Tabelle 27 unterscheiden sich nach ihren Anforderungskriterien und den Ausprägungsmöglichkeiten und dienen als Basis für die entwickelte methodische Nutzwertanalyse. Mit dieser Bewertungsmethodik soll schlussendlich eine fundierte Entscheidung hinsichtlich der präferierten Drohne getroffen werden.

Für die Nutzwertanalyse werden dieselben Einflusskriterien wie für den morphologischen Kasten herangezogen. Die Gewichtung und Berechnung der einzelnen Drohnenkategorien erfolgt gemäß den in Kapitel 5.3.1 festgelegten Formeln (siehe Formel 1 und Formel 2). Nachdem sämtliche Teilergebnisse pro Einflusskriterium bestimmt sind, wird die höhere Gesamtsumme als valides Entscheidungskriterium für die Drohnenauswahl herangezogen. Die finale Gegenüberstellung der Drohnenkonzepte ist in Tabelle 28 ersichtlich.

Tabelle 28: Technologievergleich und Rangordnung (eigene Darstellung)

Bewertungskriterien						Nutzwertanalyse zur Bewertung von industriellen Multicoptern für den intralogistischen Materialtransport					
Grad der Erfüllung	--	-	0	+	++						
Punktwertung	1	2	3	4	5						
Anforderungskriterien	Gewichtung [g _j]	Quadrocopter		Hexacocter		Octocopter					
		Grad der Erfüllung [TN _{ij}]	Gewichteter Teilnutzwert [TE _i]	Grad der Erfüllung [TN _{ij}]	Gewichteter Teilnutzwert [TE _i]	Grad der Erfüllung [TN _{ij}]	Gewichteter Teilnutzwert [TE _i]				
Outdoor-Einsatz	13	4	52	4	52	4	52				
Wasserbeständigkeit	10	4	40	2	20	4	40				
Geringes Eigengewicht	5	4	20	2	10	2	10				
Geringe Investitionskosten	13	4	52	2	26	2	26				
RTK-Kompatibilität	10	4	40	4	40	4	40				
Traglast	10	3	30	5	50	5	50				
Automatisierte Flüge	13	5	65	5	65	5	65				
Hohe Flugreichweite	5	3	15	4	20	5	25				
Lange Flugzeit	5	3	15	3	15	4	20				
Fallschirm-Kompatibilität	10	5	50	4	40	4	40				
Kamera-Adaptierbarkeit	6	4	24	4	24	4	24				
Gesamtnutzwert [GN_i]	100		403		362		392				
Rangordnung			1		3		2				

Zwischenresümee und Argumentation für die Drohnenauswahl

Basierend auf den Anforderungskriterien und den jeweiligen Gewichtungswerten ergibt sich die Rangordnung gemäß Tabelle 28. Der Quadrocopter erzielt die höchste Gesamtsumme (Rang 1), gefolgt vom Octocopter (Rang 2) und dem Hexacocter (Rang 3). Insbesondere beim Eigengewicht und bei den Investitionskosten schneidet der Quadrocopter besser ab als die alternativen Bauformen.

Alle drei Transporttechnologiekonzepte sind für den Einsatz im Außenbereich geeignet, wobei gemäß den Unternehmenszielen und den Antworten auf die Fragen 3.1 bis 3.5 des Fragenkatalogs die Traglast und der Schutz gegenüber Wassereintritt beim Quadrocopter für den Anwendungsfall zweckmäßiger ist. Da Landeplattformen mit integrierter Energieversorgung zum automatischen Laden der Drohne am Werksgelände positioniert werden sollen, stellt die gegenüber den Alternativlösungen geringere Flugzeit des Quadrocopters kein Ausschlusskriterium dar. Um eine durchgängige Drohnenverfügbarkeit im operativen Betrieb zu gewährleisten, werden in Schritt 4 des Vorgehensmodells notwendige Anforderungskriterien für eine geeignete Lande- und Übergabepattform mit integriertem induktiven Ladesystem erstellt.

Wie bereits oben dargelegt, erfordern das höhere Eigengewicht und das maximal zulässige Abfluggewicht des Hexa- und Octocopters mehr Fachkompetenzen für den Betrieb der Drohne, die mit einer höheren Sicherheitsklasse beim Genehmigungsverfahren (Modellschritt 3) der Luftfahrtbehörde einhergehen.

Da der Quadrocopter die unternehmensbezogenen Anforderungskriterien bei gleichzeitig geringeren Anschaffungskosten und höherer Flexibilität bei verwinkelten Werksflächen größtenteils abdeckt, wird für den automatisierten Materialtransport am Werksgelände im Fallbeispiel 1 diese Drohnenbauform gewählt. Es handelt sich dabei um das Drohnenmodell DJI Matrice 210 RTK V2. Es wird explizit auf das Modell mit integriertem RTK-System zurückgegriffen, um die notwendigen Positionsgenauigkeiten für die automatisierte Transportgutaufnahme zu gewährleisten. Die vertikalen und horizontalen Abweichungen sind mit dieser Systemfunktionalität lediglich 1–2 cm.

Schritt 3 | Formulierung eines Lastenhefts für die luftfahrtrechtliche Betriebsbewilligung in Österreich

Aufgrund der formulierten Zielsetzung (siehe Kapitel 6.1.2) und des definierten Einsatzgebiets (siehe Schritt 1 – Analysephase) muss für den Betrieb der gewählten Drohne aus Modellschritt 2 ein erweitertes Genehmigungsverfahren bei der Luftfahrtbehörde durchlaufen werden. Daher ist ein SORA-Prozessverfahren nach europäischer Gesetzgebung gemäß den detailliert beschriebenen Schritten aus Kapitel 5.4 und der Abbildung 34 durchzuführen. Folgende Schritte sind laut SORA-Prozess zu durchlaufen:

1. Konzeptbeschreibung – ConOps
2. Erfassung der Bodenrisikoklasse – GRC
3. Finale Bestimmung des Bodenrisikos
4. Erfassung der Luftrisikoklasse – ARC
5. Bestimmung des Restrisikos in der Luft
6. Anforderungen an die taktische Einsatzrisikominimierung – TMPR
7. Bestimmung des endgültigen spezifischen Sicherheits- und Zuverlässigkeitsniveaus – SAIL
8. Erfassung der operativen Sicherheit – OSO
9. Berücksichtigung angrenzender Einsatzgebiete und Lufträume
10. Definition des ganzheitlichen Sicherheitsprogramms

Wegen der Antwort auf die Frage 1.2 des Fragenkatalogs (siehe Modellschritt 1 – Analysephase) ist im dritten Schritt des SORA-Prozesses (Finale Bestimmung des Bodenrisikos) ein ERP-(Emergency Response Plan-)Prozess (siehe Abbildung 43) für unvorhergesehene Missionsabweichungen zu entwickeln. Dieser Prozess umfasst Vorgehensweisen und Trainingszyklen für Besatzungsmitglieder, um im Extremfall die notwendigen Handlungen automatisiert durchführen zu können.

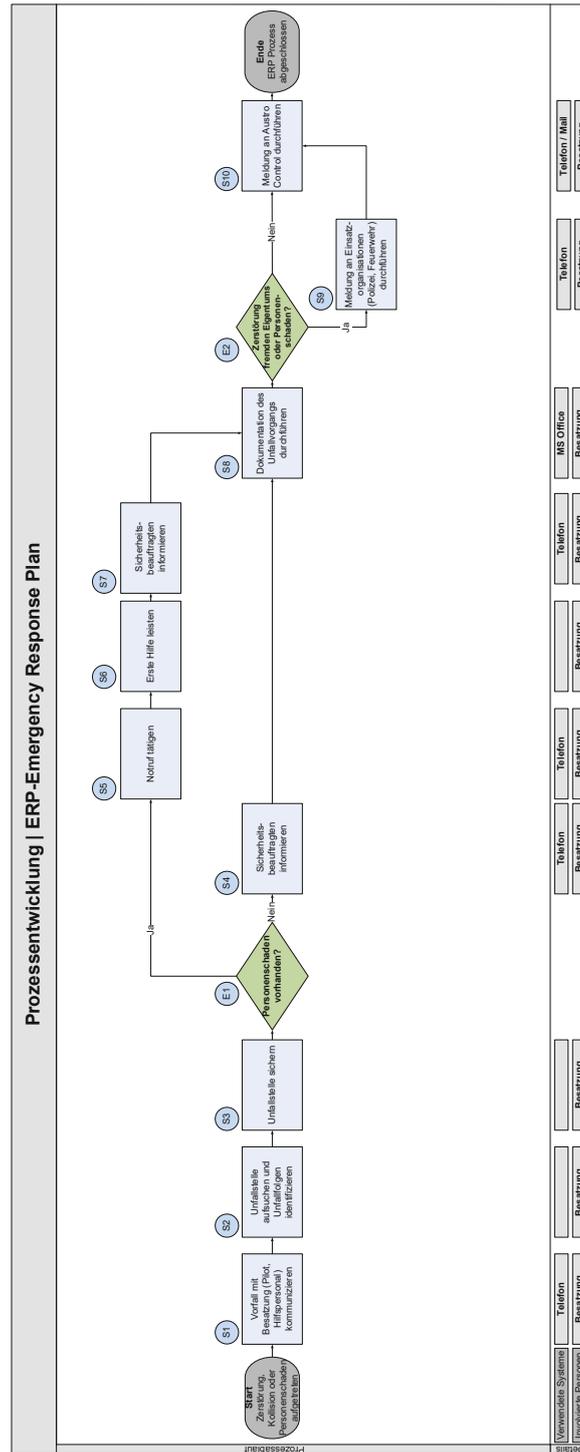


Abbildung 43: Prozessentwicklung ERP – Emergency Response Plan (eigene Darstellung)

Anhand der SAIL-Klassifizierung aus dem SORA-Prozessschritt 7 zur Bestimmung des Sicherheits- und Zuverlässigkeitsniveaus müssen im darauffolgenden Schritt 8 die Operational Safety Objectives (OSO) bewertet werden. Hierbei ist für OSO-Nummern (OSO#8, OSO#11, OSO#21), die eine mittlere (medium) Robustheit besitzen müssen, ein Nachweis mittels Prozessentwicklung zu erbringen. Nachfolgend sind die drei entwickelten Prozesse abgebildet:

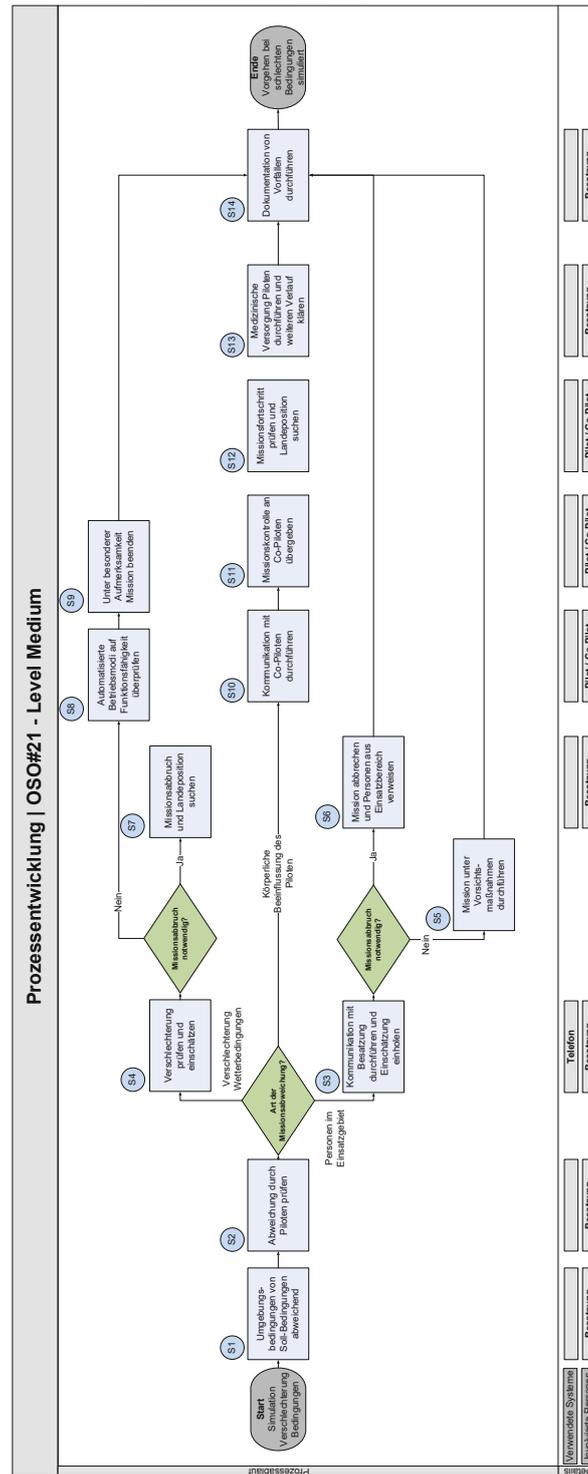


Abbildung 46: Prozessentwicklung OSO#21 (eigene Darstellung)

Nachdem sämtliche Schritte des SORA-Prozesses erfolgreich durchlaufen und die zuvor entwickelten Prozesse sowie Dokumente aus der Analysephase und Drohnenselektion in einem unternehmensspezifischen Lastenheft gemäß den definierten Strukturen aus Kapitel 5.4 konsolidiert und detailliert beschrieben wurden, erfolgt der Einreichprozess für die Betriebsgenehmigung bei der Luftfahrtbehörde.

Schritt 4 | Zusammenführung von Drohne, Aufnahmevorrichtung und Landeplattform: Definition einer Anforderungsliste

Neben der methodischen Auswahl einer Drohne für den intralogistischen Materialtransport ist es zwingend notwendig, diese mit Zusatzkomponenten für den spezifischen Anwendungsfall auszustatten, die einerseits den automatisierten Aufnahme- und Abgabeprozess des Transportguts ermöglichen und andererseits eine dauerhafte Einsatzfähigkeit der Drohne durch gezielte Landefunktionalitäten gewährleisten. Abhängig von den definierten Anforderungskriterien aus der Analysephase (Modellschritt 1) und der gewählten Drohne (Modellschritt 2) sowie den daraus resultierenden rechtlichen Voraussetzungen (Modellschritt 3) werden die Anforderungskriterien für eine Transportaufnahmeeinheit sowie der Lande- und Übergabeplattform mithilfe einer Anforderungsliste festgelegt.

In Tabelle 29 und Tabelle 30 sind die Anforderungskriterien nach unbedingten Unternehmensanforderungen und angestrebten Unternehmenswünschen unterteilt. Die bei Mehrfachauswahl zutreffenden Kriterien werden mit Kreisen markiert. Die für den anwendungsspezifischen Einsatz geforderten Ausprägungen werden manuell festgelegt und sind durch eine farbliche Markierung gekennzeichnet.

Tabelle 29: Anforderungsliste für die Aufnahmevorrichtung im Fallbeispiel 1 (eigene Darstellung)

Legende		Anforderungsliste für die Auslegung einer Transportaufnahmevorrichtung		
Grad der Relevanz	Symbol			
Forderung	F			
Wunsch	W			
Anforderungskategorie	Eigenschaften	Ausprägung	F/W	Anmerkung
1. Geometrie	Länge x Breite x Höhe	185 x 60 x 50 mm	F	Abhängig von den Aufhängepunkten der gewählten Drohne (vgl. Schritt 2)
	2. Werkstoff	Witterungsbeständig	Indoor Outdoor	F
Materialart		Kunststoff Metall Holz	F	
3. Energie	Stromstärke	≤ 1,0 Ampere	F	Abhängig von der gewählten Drohne (vgl. Schritt 2)
	Betriebsspannung	≤ 5,0 Volt	F	Abhängig von Energiebereitstellung und Ansteuerungsart
	Bezugsquelle	Drohnenbatterie Externe Batterie	F W	Abhängig von der Traglast der Drohne (vgl. Schritt 2)
4. Ansteuerung und Fixierung	Ansteuerungsart	Servomotor Elektromagnetik Pneumatik	F	Abhängig von rechtlichen und technischen Anforderungen (vgl. Schritt 3)
		Halteprinzip	kraftschlüssig formschlüssig Vakuum magnetisch	
5. Signale	erfolgreiche Ansteuerung und Fixierung	Lichtanzeige akustisch	W	
	Betriebsmodus	manuell autonom	W	
6. Kräfte	Traglast	≥ 3,0 kg	F	Abhängig von der Aufhängung und Traglast der Drohne (vgl. Schritt 2)
	Eigengewicht	≤ 0,5 kg	F	
7. Fertigung	Verfahren	3D-Druck Spritzgießen Stoffschlüssige Verbindung	F	Abhängigkeit von gewählten Werkstoff
		keine scharfen Kanten	erforderlich	
8. Kosten	Herstellungskosten	minimal	W	
9. Sicherheit	keine Gefahren für den Operator	mechanisch elektrisch	F	
10. Kontrolle	Zulassung	SORA-Prozess	F	Abhängig von lokaler Gesetzeslage (vgl. Schritt 3)
11. Gebrauch	Geräuscharm	erforderlich	F	
	Zuverlässigkeit	erforderlich	F	
12. Sonstige Kriterien	Systemstabilität	erforderlich	F	
	Schließpräzision	erforderlich	F	

Tabelle 30: Anforderungsliste für eine Landeplattform im Fallbeispiel 1 (eigene Darstellung)

Legende		Anforderungsliste für die Auslegung einer Landeplattform		
Grad der Relevanz	Symbol			
Forderung	F			
Wunsch	W			
Anforderungskategorie	Eigenschaften	Ausprägung	F/W	Anmerkung
1. Geometrie	Länge x Breite x Höhe	1000 x 1000 x 500 mm	F	Abhängig von der Drohne (vgl. Schritt 2) und der Transportbox
	Außenmaß Gleitfläche	≥ 1500 mm	F	
	Innenmaß Gleitfläche	≤ 285 mm	F	
	Zentriergenauigkeit	erforderlich	F	
2. Werkstoff	Witterungsbeständig	Indoor	F	Abhängig von Use-Case (vgl. Schritt 1)
		Outdoor		
	Materialart	Kunststoff	F	Abhängig von Einsatzort (vgl. Schritt 1)
		Metall		
Oberflächenbeschaffenheit	Holz	F	Beeinträchtigung der Sensorik vermeiden	
	Gleitfähig			
3. Energie	Energieversorgung	230 Volt	F	Abhängig von Einsatzland (vgl. Schritt 1)
	Energiebereitstellung für Drohne	Induktion	F	Abhängig von der gewählten Drohne (vgl. Schritt 2)
		Ladekabel		
	Energiebereitstellung für Plattform	Batterie	F	
Ladekabel				
4. Transport	Bereitstellung Transportbox	Generator	F	
		manuell		
5. Signale	Ladestatus	automatisiert	W	
		Lichtanzeige		
6. Kräfte	Traglast Plattform	≥ 10 kg	F	Abhängig von Drohne, Transportgut und Energiebereitstellung
	Eigengewicht Plattform	≤ 8 kg	F	Abhängig von Material
7. Fertigung	Verfahren	3D-Druck	F	Abhängigkeit von gewählten Werkstoff
		Spritzgießen		
		Stoffschlüssige Verbindung		
8. Kosten	keine scharfen Kanten	erforderlich	F	Abhängig von Material
	Herstellungskosten	minimal	W	
9. Sicherheit	keine Gefahren für den Operator	mechanisch	F	
		elektrisch		
		stoffbezogen		
10. Ergonomie	Bedienbarkeit	Entnahmeposition der Transportbox	F	
		Entnahmehöhe nicht über Schulterhöhe	F	
11. Sonstige Kriterien	Zentrierfähigkeit	erforderlich	F	Gewährleistung der Zentrierung
	Systemstabilität	erforderlich	F	
	Ladefähigkeit	vorhanden	F	

Wie im Kapitel 5.5 dargelegt, genügen aktuelle Transportaufnahmesysteme sowie Lande- und Übergabepattformen nicht den geforderten unternehmensspezifischen Anforderungen. Da diese spezifischen Systeme nach aktuellem Stand nicht frei am

Markt erwerbbar sind, wird unter Berücksichtigung der zuvor definierten Anforderungskriterien im folgenden Abschnitt exemplarisch eine Umsetzungsvariante gemäß den von Taschner et al. (vgl. 2022, S. 4–5) definierten Entwicklungsphasen entworfen und baulich umgesetzt. Dabei wird auf den in Kapitel 5.5.1 beschriebenen Produktentwicklungsprozess nach der VDI-Richtlinie 2221 (siehe Abbildung 36) für die Umsetzung referenziert.

1. Transportaufnahmevorrichtung

Die Vorrichtung besteht aus einem Ober- und Unterteil, die gemäß der geforderten Fixierung aus Tabelle 29 formschlüssig ineinandergreifen. Die Unterkonstruktion der Aufnahmevorrichtung wird auf der Transportbox mit Schrauben verbunden. Das Gegenstück wird an festgelegten Aufnahmepunkten an der Drohne über einen Bajonettverschluss befestigt und bietet eine ausreichende Haltekraft von mindestens 30 N gegenüber auftretenden Zugkräften. Der Schließmechanismus wird über einen handelsüblichen elektrischen Servomotor P-S3107 gesteuert. Die Betriebsspannung des Motors beträgt 4,8 V und wird über eine Schnittstelle an der Drohne bereitgestellt. Die Stellgeschwindigkeit und Ansteuerungsfrequenz des Motors muss an das Aufnahmeprinzip angepasst werden, da ansonsten der Gelenkshebel im Führungselement (Bauteil A in Abbildung 47) verkeilt. Mittels eines Funktionsfelds am Steuerungscontroller des Piloten wird der Mechanismus bei manueller Betätigung automatisch ausgelöst. Das Schließen und Öffnen zwischen den beiden Teilen erfolgt durch die gezielte Ansteuerung der integrierten Gelenkshebel. Für die Konstruktion der Transportaufnahmevorrichtung wird das CAD-Programm Catia V5 (Dassault Systèmes) verwendet.

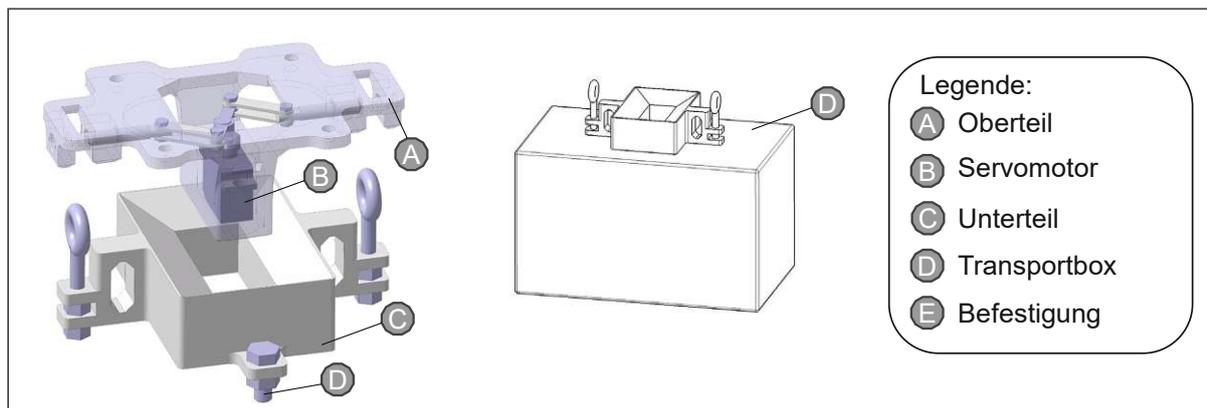


Abbildung 47: Entwurf der Transportaufnahmevorrichtung inklusive Transportbox (eigene Darstellung in Anlehnung an Taschner et al. 2022, S. 4)

Der Servomotor und die Gelenkshebel sind durch eine robuste Konstruktion vor Fremdeinwirkungen geschützt. Wesentlich für die geforderten Bauteilanforderungen (siehe Tabelle 29) sind das Gewicht und die Robustheit der Konstruktion, weshalb ein 3D-Druckverfahren für die Leichtbauweise verwendet wird. Da sich das

Gesamtgewicht auf die Bauteilkonstruktion und die standardisierte Transportbox aufteilt, ist eine geometrieoptimierte Konstruktion der Aufnahmevorrichtung nötig, um das maximal zulässige Gesamtgewicht der Drohne beim Materialtransport nicht zu überschreiten und möglichst viel Last transportieren zu können.

Die Bauteiloberfläche im Führungsbereich (Bauteil A in Abbildung 47) des Gelenkshebels soll gemäß der Anforderungsliste eine hohe Feinheit aufweisen, da eine zu grobe Oberflächenstruktur zu Verhakungen während des Schließvorgangs führen würde. Die Oberflächenbeschaffenheit wird durch die Düsengröße und die Druckgeschwindigkeit des 3D-Druckers beeinflusst. Zur Sicherstellung der Einsatzfähigkeit der Transportaufnahmevorrichtung im industriellen Umfeld wird nach der Entwurfsphase ein Prototyp hergestellt (siehe Abbildung 48).

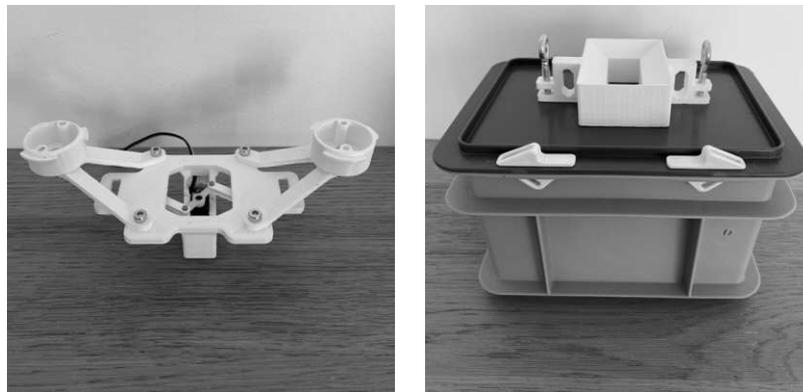


Abbildung 48: Einsatzfähige Prototypenbauteile (eigene Darstellung)

Dabei werden die Zentrierfähigkeit der beiden Bauteile und das Öffnungs- sowie Schließprinzip manuell getestet. Basierend auf den Erkenntnissen werden unter realen Flugbedingungen² (siehe Abbildung 49) die Funktionen der Drohne sowie die mechanischen Belastungen und die Flugeigenschaften der Konstruktion überprüft. Die Ergebnisse fließen in die Überarbeitung der finalen Transportaufnahmevorrichtung ein.

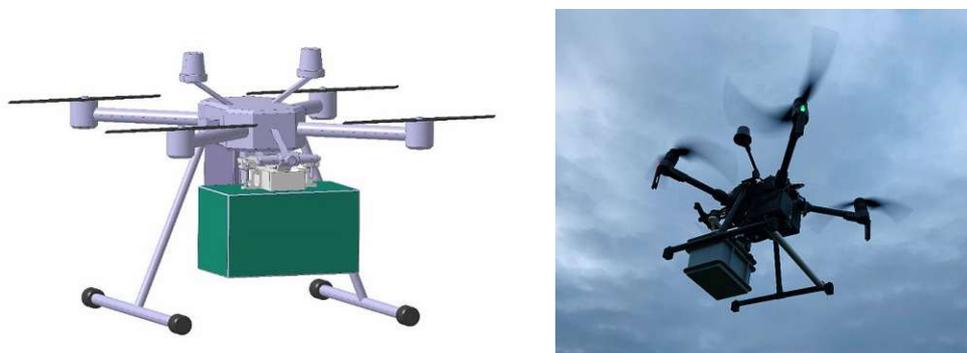


Abbildung 49: Funktionsfähige Aufnahmevorrichtung (eigene Darstellung)

² Die Drohnenflüge wurden auf Basis einer Sondergenehmigung für Forschungszwecke im Zeitraum 01.01.2021 – 31.12.2021 mit einer von Fraunhofer Austria zur Verfügung gestellten Drohne am Werksgelände des Unternehmens durchgeführt.

2. Landeplattform

Das wesentliche Ziel des Vorhabens ist es, die Drohne in vier Richtungen effizient und reproduzierend bei Landemanövern zu zentrieren, um die automatisierte Aufnahme der Transportbox zu gewährleisten. Auf Basis der im Stand der Wissenschaft und Technik beschriebenen Erkenntnisse von Lieret et al. (vgl. 2019, S. 1014) und des Verbesserungsbedarfs in Bezug auf die Positioniergenauigkeit der Drohne während Landemanövern werden die Plattformen mit zusätzlichen Positionierungsschrägen ausgestattet. Die bauliche Dimensionierung der schrägen Gleitflächen resultiert aus der minimal auftretenden horizontalen Positionsabweichung der gewählten Drohne aus Modellschritt 2. Zusätzlich wird eine Querstrebe zwischen den Aufstandsbeinen der Drohne entworfen, um die Positionierung in Längsrichtung zu verbessern.

Die Plattformen sollen gemäß den definierten Anforderungen mit einer induktiven Ladeeinheit ausgestattet werden, damit die Drohne während der Verweildauer auf der Plattform geladen werden kann, was zu einer längeren Einsatzdauer im operativen Betrieb führt. Diese Funktionalität ist ein weiterer Grund für die geforderte Zentrierung, da die induktive Empfängerspule auf einem Aufstandsbein der Drohne im kreisrunden Bereich der induktiven Übertragungseinheit auf der Plattform überlappen muss. In Abbildung 50 wird die konzipierte Landeplattform in der Entwurfsphase mit einem schematischen Drohnenmodell dargestellt. Für die Modellentwicklung werden die Originalmaße laut Herstellerdatenblatt verwendet.

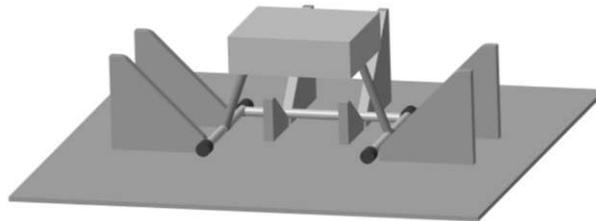


Abbildung 50: Entwurfsphase der Landeplattform (eigene Darstellung)

Nach der Entwurfsphase wird eine Prototypenausführung (siehe Abbildung 51) der Landevorrichtung erstellt, um die Funktionsfähigkeit im definierten Anwendungsfall unter realen Bedingungen zu prüfen. Hierbei werden die Gleiteigenschaften der Aufstandsbeine und der zusätzlich angebrachten Querstrebe an der Drohne überprüft. Um eine gesicherte Aussage zur Funktionalität der Plattform machen zu können, wird eine repräsentative Testanzahl an Landemanövern durchgeführt. Es werden manuell und automatisiert durchgeführte Landungen getestet. Zusätzlich wird die Drohne aus diversen Anflugwinkeln gelandet, um die Zentrierfähigkeit und Positionierung bei maximalen Abweichungen zu testen.

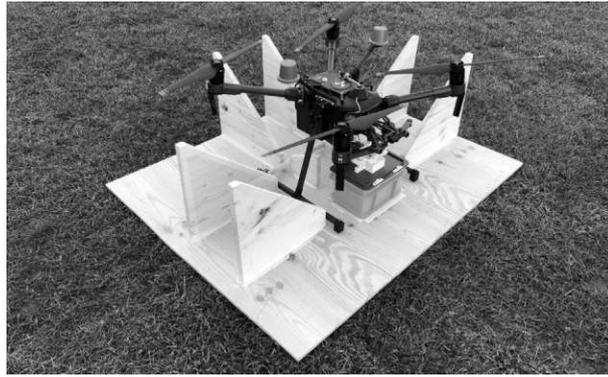


Abbildung 51: Prototypentest unter realen Umfeldbedingungen (eigene Darstellung)

Neben den Gleiteigenschaften wird in dieser Phase die induktive Übertragungsfähigkeit der integrierten Ladeeinheit überprüft. Die einzelnen Bauteile, aus denen das induktive Ladesystem besteht, sind in Abbildung 52 dargestellt, wobei die Funktionsfähigkeit überprüft wird. Die Stromversorgung des Transmitters (Bauteil A) erfolgt über eine konventionelle Steckdose; der nutzbare Eingangsspannungsbereich des Bauteils liegt zwischen 90 und 264 VAC (Volt Wechselspannung). Die Verbindung zwischen der Transmitterspule (Bauteil B) und dem Transmitter wird über ein zweipoliges Koaxialkabel sichergestellt. Die Übertragung der Spannung wird an der Drohne über die Empfängerspule (Bauteil C) realisiert. Die Spule ist direkt mit dem Bordladergerät (Bauteil D), das die übertragungsfähige Spannung an die Batterie reguliert, verbunden. Der Ausgangsspannungsbereich des Ladergeräts in Richtung Drohnenbatterie beträgt 12–36 VDC (Volt Gleichspannung).



Abbildung 52: Systembauteile induktive Ladeeinheit (eigene Darstellung)

Die Transmitterspule (Bauteil B) wird in die Grundplatte der Landeplattform integriert. Um die Wetterbeständigkeit des elektrischen Bauteils sicherzustellen, wird der Bereich mit einer PMMA-(Polymethylmethacrylat-)Kunststoffplatte geschützt. Für die Bestimmung der maximal zulässigen Plattenwandstärke wird eine Testserie mit unterschiedlichen Dicken durchgeführt, um die jeweils übertragenen Ampere und Volt für einen nicht negativ beeinflussten induktiven Ladezyklus zu bestimmen. Pro Versuchslauf wird die Plattendicke um 2 Millimeter erhöht. Die maximale Wandstärke

beträgt bei der Testserie 16 Millimeter, da es ab dieser Wandstärke zu einem signifikanten Abfall der Übertragungsleistung kommt. Die PMMA-Plattendicke für die finale Ausführungsform beträgt 2 Millimeter. Es ist anzumerken, dass eine erhöhte Plattendicke und eine dadurch verringerte Stromstärke zu einer wesentlichen Verlängerung des induktiven Ladezyklus führt. In Tabelle 31 ist die durchgeführte Versuchsreihe mit den angezeigten Ergebnissen am Transmitter dargelegt.

Tabelle 31: Versuchsreihe der induktiven Ladeeinheit mit unterschiedlichen Wandstärken (eigene Darstellung)

Nr.	Wandstärke [mm]	Ampere [A]	Volt [V]
1	Ohne Platte	4,9 – 5,0 A	23,1 V
2	2 mm	4,7 – 4,9 A	23,1 V
3	4 mm	4,4 – 4,6 A	23,1 V
4	6 mm	4,3 – 4,4 A	23,1 V
5	8 mm	3,8 – 4,0 A	23,1 V
6	10 mm	3,8 – 4,0 A	23,1 V
7	12 mm	3,8 – 4,0 A	23,1 V
8	14 mm	3,7 – 4,0 A	23,1 V
9	16 mm	3,6 – 3,9 A	23,1 V

Die Ergebnisse der Testflüge und der induktiven Ladetests fließen in die Konzeptionierung und Umsetzung der finalen Landeplattform in Abbildung 53 ein. Alle Einzelteile der Landeplattform sind auf den industriellen Einsatz ausgelegt und werden aus Aluprofilen gefertigt, um gegen Umwelteinflüsse resistent zu sein. Die einzelnen Komponenten der induktiven Ladeeinheit werden zum Schutz unter der Landevorrichtung – umgeben von einem robusten Gehäuse – positioniert.



Abbildung 53: Konstruktionsdarstellung der finalen Landeplattform (eigene Darstellung)

Wie in der Anforderungsliste definiert und in der Abbildung 54 ersichtlich, wird das Grundgestell der Landeplattformen aus Aluminium-Nutenprofilen mit Abmessungen von 40 x 40 mm (Höhe x Breite) und dazugehörigen Würfelverbindern an den Eckstellen ausgeführt, wobei die Verbindung der Einzelteile mittels selbstschneidenden S8 x 25 mm Senkkopfschrauben erfolgt.

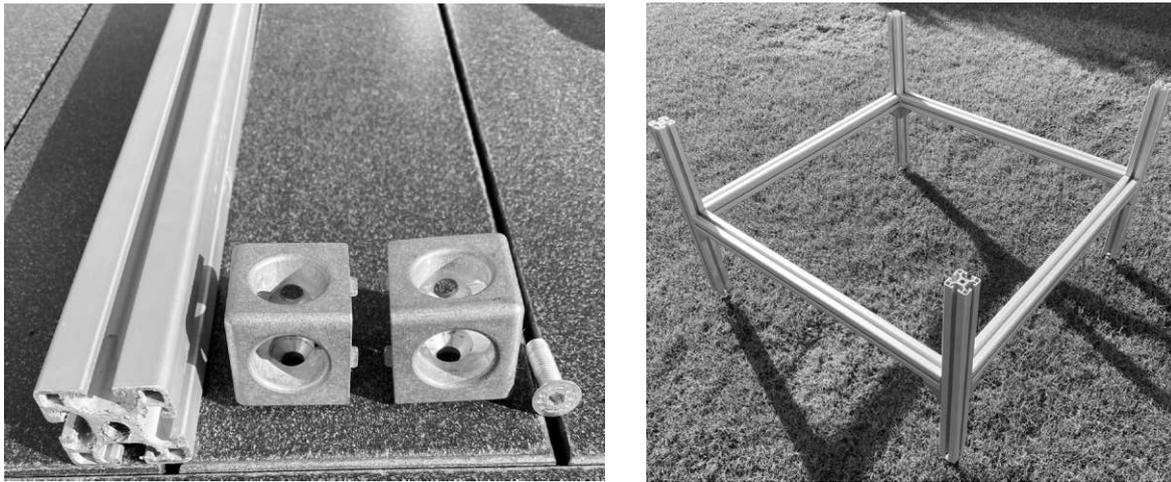


Abbildung 54: Einzelteile und Grundgestell der Landeplattform (eigene Darstellung)

Die beiden Plattformen sind mit Holzplatten, die gegen Witterungseinflüsse behandelt wurden, verkleidet. Das linke Foto in der Abbildung 55 zeigt die Landeplattform, die als Ladestation für die Drohne dienen soll, mit der Ausnehmung für die induktive Senderspule. Im Zwischenraum der Plattform wird der Transmitter positioniert und mit der eingelassenen Spule über ein koaxiales Kabel verbunden. Zur Überprüfung der Steuerung des induktiven Ladegeräts wird zusätzlich eine Schiebetüre in die Frontseite integriert. Das rechte Foto in Abbildung 55 zeigt die zweite verkleidete Plattform, die als Abgabestation der Transportbox dienen soll.



Abbildung 55: Verkleidungen der zwei Landeplattformen (eigene Darstellung)

Für die endgültige Ausführung der beiden Plattformen werden jeweils drei Aluminiumteilstücke mit einer Wandstärke von 2 Millimeter als Gleitflächen auf den Grundplatten fixiert (siehe Abbildung 56). Für zukünftige Adaptierungsmöglichkeiten des Systems wird auf der zweiten Plattform eine Ausnehmung in den Aluminiumgleitflächen integriert (siehe rechtes Foto in Abbildung 56), um auch an dieser Landeplatform das induktive Ladesystem zu implementieren. Durch diese

Erweiterung der Systemarchitektur kann der Ladeprozess der Drohne auch auf der Landeposition durchgeführt werden. Das ermöglicht eine variable Ausweitung an Landeplattformen am Werksgelände, da kein Rückflug zu einer fixen Ladestation notwendig ist.



Abbildung 56: Finale Ausführung der zwei Landeplattformen (eigene Darstellung)

Nach abgeschlossenen Baumaßnahmen wird das gesamte System unter realen Umfeldbedingungen am Werksgelände³ des Unternehmens final überprüft. Dazu wird der automatisierte Materialtransport zwischen den beiden Plattformen simuliert sowie die induktive Ladefunktionalität geprüft. Alle Bestandteile des Systemaufbaus, die im Fallbeispiel 1 für den automatisierten Materialtransport eingesetzt werden, sind in Abbildung 57 dargestellt.

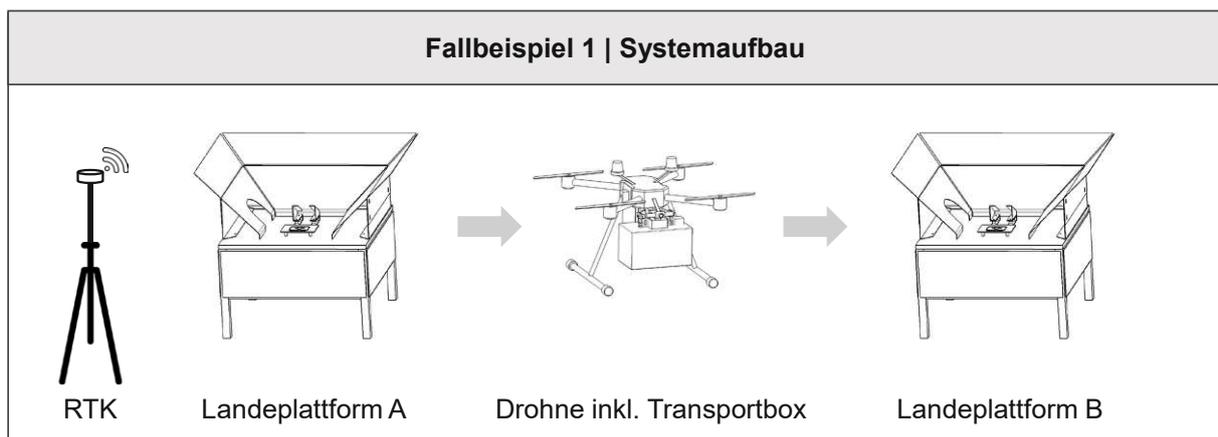


Abbildung 57: Ganzheitlicher Systemaufbau in Fallbeispiel 1 (eigene Darstellung)

Wie bereits in der Layoutbetrachtung in Abbildung 41 eingezeichnet, werden die beiden Plattformen gemäß ihrer Quelle-und-Senke-Beziehung am Werksgelände

³ Die Drohnenflüge erfolgten mit einer Sondergenehmigung für Forschungszwecke im Zeitraum 01.01.2021 – 31.12.2021 mit einer von Fraunhofer Austria zur Verfügung gestellten Drohne.

aufgestellt. Die endgültige Ausführung der Aufnahme- und Abgabepattform für das Fallbeispiel 1 ist in Abbildung 58 abgebildet.



Abbildung 58: Aufnahmeplattform (links) inklusive Drohne sowie Abgabepattform (rechts) an festgelegten Positionen am Werksgelände (eigene Darstellung)

3. Zusatzteile

In diesem Abschnitt werden zusätzliche Bauteile auf der Drohne und an der Landeplattform beschrieben, die einen wesentlichen Beitrag zur optimalen Funktionalität leisten. Um die im Stand der Wissenschaft und Technik identifizierte und in der Konzeptions- und Entwurfsphase beschriebene Problematik der fehleranfälligen Zentrierung bei autonomen Landemanövern zu beseitigen, wird eine Querstrebe (Bauteil B in Abbildung 59) aus Kunststoff zwischen den beiden Aufstandsbeinen der Drohne angebracht. Zudem wird das Bauteil an eigens entwickelte Aufstandsbeine (Bauteil A) mit integrierten Befestigungsvorrichtungen mittels Steckverbindung formschlüssig verbunden. Durch diese Adaptierung wird eine optimale Zentrierung in Längsrichtung erreicht, die für die Aufnahme der Transportbox erforderlich ist. Die Oberflächenbeschaffenheit der Strebe erfüllt die notwendigen Eigenschaften, um an den angebrachten zwei Schrägen auf der Landeplattform entlangzugleiten.



Abbildung 59: Befestigungsvorrichtung für die Querstrebe (eigene Darstellung)

Neben der Sicherstellung der Zentrierfähigkeit auf der Landevorrichtung wird der Hohlraum der Querstrebe als Kabelführung für die auf der Drohne befindliche induktive Ladeeinheit genutzt. Aufgrund der Massenverteilung, die wesentlich die Flugeigenschaft beeinflusst, wird das Bordladegerät auf dem gegenüberliegenden Aufstandsbein der Empfängerspule angebracht. Dafür wird eine Vorrichtung (Bauteil C in Abbildung 59), bestehend aus zwei Haltepunkten und integrierter Grundplatte, entwickelt (siehe Abbildung 60). Diese Haltevorrichtung wird mit dem Gehäuse der Ladeeinheit über eine Klebeverbindung verbunden. Die variable Positionierung entlang des Aufstandsbeins (siehe Abbildung 59) gewährleistet eine optimale Führung des zweipoligen Verbindungskabels zwischen der Empfängerspule und dem Bordladegerät, wodurch das Beschädigungsrisiko des Kabels während des Flugs wesentlich reduziert wird.



Abbildung 60: Befestigungsvorrichtung für die Ladeeinheit (eigene Darstellung)

Wie oben beschrieben, dienen die speziell angefertigten Aufstandsbeine sowohl als Haltevorrichtung für die Querstrebe als auch zur Gewährleistung der notwendigen Gleiteigenschaften an den abgeschrägten Flächen der Landeplattform. Im Zuge der finalen Umsetzung werden insgesamt vier Bauteile mit einer hohen Oberflächengüte im 3D-Druckverfahren angefertigt, um den Oberflächenwiderstand beim Gleitvorgang erheblich zu reduzieren. Die original angebrachten Aufstandsbeine auf der Drohne bestehen aus einem Gummimaterial und sind im Gegensatz zu den konzipierten Bauteilen nicht für das Gleiten entlang der Flächen geeignet. In Abbildung 61 sind die einzelnen Komponenten ersichtlich, wobei nur zwei Aufstandsbeine auf der Drohne eine Steckverbindung für die Querstrebe aufweisen.



Abbildung 61: Konstruktion der optimierten Aufstandsbeine für die Drohne (eigene Darstellung)

Um die geforderte Präzision bei der selbstständigen Zentrierung der Aufnahmevorrichtung zur Aufnahme der Transportbox zu erreichen, wird eine plattenförmige Ablagefläche mit einem 3 Millimeter hohen Begrenzungsrahmen

gemäß den Abmessungen des Ladungsträgers konstruiert. Als zusätzliche Hilfestellung zur ordnungsgemäßen Positionierung der Transportbox bei manueller Bestückung und proaktiven Fehlervermeidung wird ein Piktogramm in die Platte integriert (siehe Abbildung 62).



Abbildung 62: Ablagefläche mit integriertem Piktogramm (eigene Darstellung)

Basierend auf den Erkenntnissen der Einsatzflüge werden auch Erhöhungselemente aus Kunststoff (Bauteil A in Abbildung 63) für die auf den Landeplattformen mittig angebrachten Aluminiumgleitflächen (Bauteil B) entworfen, um auftretende Ungenauigkeiten in der Positioniergenauigkeit bei Landemanövern auszugleichen.

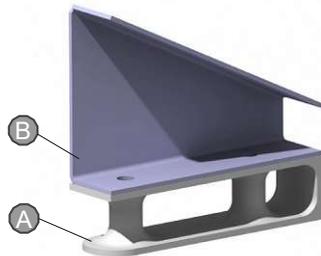


Abbildung 63: Erhöhungselement für die mittig angebrachten Gleitflächen (eigene Darstellung)

Diesbezüglich wird nach absolviertem Ausführungsschritt 7 in der dargelegten Abbildung 36 des Produktentwicklungsprozesses eine Iterationsschleife zu Schritt 5 durchgeführt, um die Erweiterungselemente zu entwerfen und an die finale Konstruktion anzupassen. In Abbildung 64 ist die Landeplattform mit allen zusätzlich montierten Bauteilen ersichtlich. Die Anbringung bzw. Demontage der Erweiterungsflächen wird über eine Steckverbindung auf den bereits bestehenden Gleitflächen realisiert.



Abbildung 64: Erweiterungselemente für die Gleitflächen (eigene Darstellung)

Schritt 5 | Validierung des wirtschaftlichen Nutzens

Zur fundierten Entscheidungsfindung der Wirtschaftlichkeit einer potenziellen Drohnenimplementierung im Unternehmen wird im abschließenden Schritt 5 gemäß den entwickelten Kostenbewertungsmethoden aus Kapitel 5.6 der wirtschaftliche Nutzen bewertet.

Für die Ermittlung der Transportzeiten wird auf die definierte Flugroute im Fallbeispiel (siehe Abbildung 41) aus Schritt 1 referenziert, wobei die einzelnen Zeitaufwände der Tätigkeitsschritte der Drohne zeitlich erhoben werden. Diesbezüglich werden die berechneten Zeitwerte unter Bezugnahme der Formel 3 in Tabelle 32 festgehalten. Die Wegstrecke zwischen Quelle und Senke im Fallbeispiel 1 ist mit 500 Meter festgelegt, wobei der Prozess beim Wareneingang sowohl startet als auch endet. Die Fluggeschwindigkeit der Drohne wird auf 7 m/s festgelegt und eine maximale Flughöhe von 35 Meter für den Warentransport definiert. Die resultierende Gesamtdauer für einen Transportflug beläuft sich auf 232 Sekunden, die in die anschließende Kalkulation der erforderlichen Transportmittelanzahl einfließt.

Tabelle 32: Berechnung der Transportzeit für eine Drohne (eigene Darstellung)

Berechnung der Transportzeit für einen Drohnentransport				
Formelzeichen	Beschreibung	Häufigkeit	Zeitdauer	Gesamtzeit
t_{steigen}	Zeit zum Erreichen der definierten Flughöhe [s]	2	15	30
t_{landen}	Zeit für ein Landemanöver auf der Plattform aus der definierten Flughöhe [s]	2	20	40
t_{flug}	Zeit für die zurückgelegte Wegstrecke in Abhängigkeit der Fluggeschwindigkeit [s]	2	71	142
t_{greifer}	Zeitdauer für das Öffnen bzw. Schließen des Greifmechanismus [s]	2	10	20
$t_{\text{m_sek}}$	Gesamtdauer je Transport [s/n]			232

Neben der kalkulierten Gesamtdauer für einen Transport fließen weitere unternehmensspezifische Inputparameter (Arbeitstage pro Jahr, Arbeitsstunden pro Tag, Materialgewicht je Bedarf etc.) in die abschließende Kalkulation (siehe Kapitel 5.6.3) der erforderlichen Drohnenanzahl zur Bewältigung der logistischen Aufgabe ein.

Die Tabelle 33 zeigt unter Ausnutzung der entwickelten Formel 4, dass für den Materialbedarf im Anwendungsfall drei Transporte pro Stunde mit der gewählten Drohne anfallen, wobei die Tragfähigkeit mit zwei Kilogramm angenommen wird. Eine durchschnittliche Dauer eines Transports beträgt 3,9 Minuten gemäß der Berechnung in Tabelle 32 und liefert in der anschließenden Kalkulation 23.107 Minuten für die Gesamttransportzeit pro Jahr. Die resultierenden Transporte pro Jahr betragen 5.976. Anhand der erforderlichen drei Transporte pro Stunde und der Gesamtdauer für einen Transport bezogen auf eine Stunde resultiert eine erforderliche Drohne im Anwendungsfall, um die logistischen Transportaufträge zu erfüllen.

Tabelle 33: Ermittlung erforderlicher Transportmittel im Fallbeispiel 1 (eigene Darstellung)

Ermittlung erforderlicher Transportmittellanzahl			
Inputparameter			
Arbeitstage pro Jahr	249	Kurzbeschreibung Anwendungsfall: Automatisierter Klein- und Ersatzteiltransport von der Warenannahme zum Ersatzteillager am weitläufigen Werksgelände.	
Arbeitsstunden pro Tag	8		
Materialgewicht je Bedarf [kg/Bedarf]	1,5		
Materialbedarf pro Stunde [Bedarf/h]	3		
Spezifikationen Anwendungsfall	Drohne		siehe Formel bzw. Tabelle
	Wegstrecke [m]	Zeitdauer [s]	
Gesamtwegstrecke ohne Last	500	71	Formel 3 auf Seite 101
Gesamtwegstrecke mit Last	500	71	
Positive Höhenüberwindung bis Flughöhe	35	30	
Negative Höhenüberwindung für Landung	35	40	
Lastaufnahme		10	Tabelle 18 auf Seite 102
Lastabgabe		10	
Gesamtdauer je Transport [n/s]		232	
Auswertung Anwendungsfall			
Transporte pro Stunde [n/h]	3		
Gesamtdauer je Transport [min]	3,9		
Transporte pro Jahr [n/a]	5.976		
Gesamttransportzeit pro Jahr [min]	23.107		
Anzahl erforderlicher Transportmittel	1		

Aufbauend auf der ermittelten Transportmittellanzahl werden analog zu der entwickelten Kostenkalkulation⁴ in Kapitel 5.6.3 die Betriebs- als auch Gesamtkosten pro Jahr für den Drohneneinsatz in Tabelle 34 ermittelt.

Tabelle 34: Ermittlung der Betriebs- und Gesamtkosten für den Drohneneinsatz im Fallbeispiel 1 (eigene Darstellung)

Kostenkalkulation für den Drohnentransport				
Position	Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit	Kostensatz
1	Ermittlung der Investitionskosten			
1.1	Transportmittel	$K_{Transportmittel}$	€	7.929
1.2	Hardware (Sensorik, Plattform, Greifer etc.)	$K_{Hardware}$	€	2.640
1.3	Ladestation	$K_{Ladestation}$	€	2.404
1.4	Ersatzbatterieset	$K_{Batterie}$	€	2.264
1.4	Sicherheitsfallschirm	$K_{Fallschirm}$	€	2.500
1.5	Gesamtinvestitionshöhe	$G_{Investition}$	€	17.736
2	Ermittlung der jährlichen Fixkosten			
2.1	Kalkulatorische Abschreibung	A_{Jahr}	€/a	3.547
2.2	Kalkulatorische Zinskosten	K_{Zinsen}	€/a	709
2.3	Fixkosten pro Jahr	K_{Fix}	€/a	4.257
3	Ermittlung der jährlichen variablen Kosten			
3.1	Instandhaltungsmaßnahmen	$K_{Instandhaltung}$	€/a	1.774
3.2	Energiekosten	$K_{Energie}$	€/a	322
3.3	Variable Kosten pro Jahr	$K_{Variabel}$	€/a	2.095
4	Betriebskosten pro Jahr	$K_{Betrieb}$	€/a	6.352
5	Personalkosten	$K_{Personal}$	€/a	14.100
6	Gesamtkosten pro Jahr	K_{Gesamt}	€/a	20.452

Bei den ausgewiesenen Kostensätzen werden, wie im Vorgehensmodell angenommen, für Instandhaltungsmaßnahmen 10 Prozent der

⁴ Für die Ermittlung der Investitionskosten der Drohne dienen eingeholte Angebote des Autors im Jahr 2022 im Zuge eines Ausschreibungsverfahrens.

Gesamtinvestitionshöhe eingeplant. Bei den Energiekosten wird auf die Annahme von 4980 Entladungen pro Jahr für die Drohne referenziert. Bei den Personalkosten wird mit dem im Modell angesetzten Prozentsatz von 30 Prozent für einen vollzeitbeschäftigten Mitarbeiter kalkuliert, da das Fachpersonal neben der Drohnenüberwachung zusätzliche wertschöpfende Tätigkeiten während des Arbeitstags durchführt.

Um abschließend eine vergleichende Betrachtungsweise der Transportkosten für die Drohne und die eingegrenzten Alternativsysteme aus der Vorabprüfung darzustellen, müssen sowohl die Transportzeiten als auch Kosten für diese Systeme herangezogen werden. Zur Gegenüberstellung der benötigten Zeiten je Transportmittel für die Transportroute wird die in Kapitel 5.6 beschriebene MTM-Methode für die Zeiterhebung der konventionellen Transportmittel eingesetzt. Diesbezüglich zeigt Tabelle 35 eine exemplarische MTM-Bewertung für die Berechnung der Transportzeit für einen Stapler als Transportalternative. Die Vorkommissionierung der Transportgüter und das Beladen des Transportfahrzeugs stehen dabei nicht im Betrachtungsfokus. Die Übergabe der Materialien im Ersatzteillager wird ebenfalls nicht bewertet. Der Übergabeprozess der Güter endet mit dem Auf- und Absteigen (S11) des Staplerfahrers an der Übergabestation. Es wird eine Zeitdauer pro Transport von 316,1 Sekunden mit der Methode erhoben.

Tabelle 35: Berechnung der Transportspielzeit für einen Stapler (eigene Darstellung)

MTM-Bewertung Berechnung der Transportspielzeit für einen Stapler								
Schritt	Kode	Beschreibung	TMU	Anzahl	Häufigkeit	A x H	Gesamt TMU	Sekunden
S1	AZA	Aufsteigen des Staplerfahrers	220	1	0,5	0,5	110	4,0
S2	AZT	Türe öffnen und schließen	100	1	1,0	1	100	3,6
S3	AZS	Sicherheitsgurt anlegen	175	1	0,5	0,5	87,5	3,2
S4	AZM	Motor starten	90	1	0,5	0,5	45	1,6
S5	AZF	Feststellbremse lösen	120	1	0,5	0,5	60	2,2
S6	ABJ	Joystickschaltung betätigen	10	1	1,0	1	10	0,4
S7	SFAS	Mit Stapler zur Senke fahren (Außenbereich)	7	500	1,0	500	3500	126,0
S8	SFKS	Kurve 90 Grad 2x (stabile Fahrt)	16	2	1,0	2	32	1,2
S9	SFVB	Verzögerung Start und Stopp (beladener Zustand)	56	1	1,0	1	56	2,0
S10	AZM	Motor ausschalten und starten	90	1	1,0	1	90	3,2
S11	AZA	Auf- und Absteigen des Staplerfahrers	220	1	1,0	1	220	7,9
S12	AZT	Türe öffnen und schließen	100	2	1,0	2	200	7,2
S13	AZF	Feststellbremse ziehen und lösen	120	1	1,0	1	120	4,3
S14	AZS	Sicherheitsgurt an- und ablegen	175	1	1,0	1	175	6,3
S15	ABJ	Joystickschaltung betätigen	10	1	1	1	10	0,4
S16	SFAS	Mit Stapler zur Quelle zurückfahren (Außenbereich)	7	500	1	500	3500	126,0
S17	SFKS	Kurve 90 Grad 2x (stabile Fahrt)	16	2	1,0	2	32	1,2
S18	SFVB	Verzögerung Start und Stopp (unbeladener Zustand)	30	1	1,0	1	30	1,1
S19	AZM	Motor ausschalten	90	1	0,5	0,5	45	1,6
S20	AZF	Feststellbremse ziehen	120	1	0,5	0,5	60	2,2
S21	AZS	Sicherheitsgurt ablegen	175	1	0,5	0,5	87,5	3,2
S22	AZT	Türe öffnen und schließen	100	1	1,0	1	100	3,6
S23	AZA	Absteigen des Staplerfahrers	220	1	0,5	0,5	110	4,0
t_{Stapler} - Zeitdauer pro Transportspiel mit Stapler [s/n]								316,1

Für das ebenfalls näher betrachtete Lastenfahrrad ergibt sich für eine durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit von 15 km/h und einen Zeitzuschlag für das Auf- und Absteigen (jeweils 40 Sekunden) eine Gesamttransportzeit von 320 Sekunden für die zurückgelegte Wegstrecke von 1000 Meter.

In Tabelle 36 sind die drei Transportsysteme für den spezifischen Anwendungsfall gegenübergestellt. Dabei wird auf die bis dahin ermittelten Transportzeiten zurückgegriffen, um einerseits die Anzahl an erforderlichen Transportmitteln im Detail zu überprüfen und diese anschließend kostentechnisch zu berechnen. Innerhalb des variablen Kostenblocks für die Drohne können unter anderem Versicherungsgebühren, Unfallversicherung, Anmeldegebühren bei der Luftfahrtbehörde einbezogen werden. Bei den Personalkosten wird ausschließlich auf die operativen Zeitdauern mit dem hinterlegten Produktivkostenstundensatz des Mitarbeiters referenziert. Es kann gezeigt werden, dass die Gesamtkosten pro Jahr für den Drohneneinsatz im Vergleich zum Einsatz eines Gabelstaplers um 49 Prozent niedriger sind. Gegenüber dem Lastenfahrrad weist die Drohne um fünf Prozent niedrigere Kosten auf.

Tabelle 36: Vergleichende Betrachtungsweise der eingegrenzten Transportmittel (eigene Darstellung)

Vergleichende Betrachtungsweise der eingegrenzten Transportmittel				
Inputparameter				
Arbeitstage pro Jahr [d/a]	249	Informationen: Die Inputparameter der Transportzeiten sind den jeweiligen Zeiterhebungsmethoden zu entnehmen.		
Arbeitsstunden pro Tag [h/d]	8			
Materialgewicht je Bedarf [kg/Bedarf]	1,5			
Materialbedarf pro Stunde [Bedarf/h]	3			
Gesamtdauer je Transport Drohne [s/n]	232			
Gesamtdauer je Transport Stapler [s/n]	316,1			
Gesamtdauer je Transport Lastenfahrrad [s/n]	320			
Auswertung		Drohne	Stapler	Lastenfahrrad
Transporte pro Stunde [n/h]	3	3	3	3
Transporte pro Jahr [n/a]	5.976	5.976	5.976	5.976
Gesamttransportzeit pro Jahr [min]	23.107	31.484	31.872	31.872
Anzahl erforderlicher Transportmittel [-]	1	1	1	1
Gesamtinvestitionshöhe [€]	17.736	55.374	6.199	6.199
Kalkulatorische Abschreibung [€/a]	3.547	11.075	1.240	1.240
Kalkulatorische Zinskosten [€/a]	709	2.215	248	248
Fixkosten pro Jahr [€/a]	4.257	13.290	1.488	1.488
Variable Kosten pro Jahr [€/a]	2.095	7.749	643	643
Betriebskosten pro Jahr [€/a]	6.352	21.038	2.131	2.131
Personalkosten pro Jahr [€/a]	14.100	19.211	19.448	19.448
Gesamtkosten pro Jahr [€/a]	20.452	40.249	21.579	21.579

Neben dem Gesamtkostenvergleich pro Jahr ist die Ermittlung der Transportkosten in Abhängigkeit der durchzuführenden Transportanzahl pro Jahr im Anwendungsfall von Relevanz. Diesbezüglich wird auf die definierte Formel 14 und Formel 15 aus dem Vorgehensmodell referenziert, um die Drohne und Vergleichsobjekte

gegenüberzustellen. Die Abbildung 65 zeigt die resultierenden Kosten für einen Transport je Transporttechnologie in Abhängigkeit der durchzuführenden Transportanzahl pro Jahr. Zur besseren Darstellungsform des Kurvenverlaufs wird die Abszisse und Ordinate für die Datenreihe angepasst.

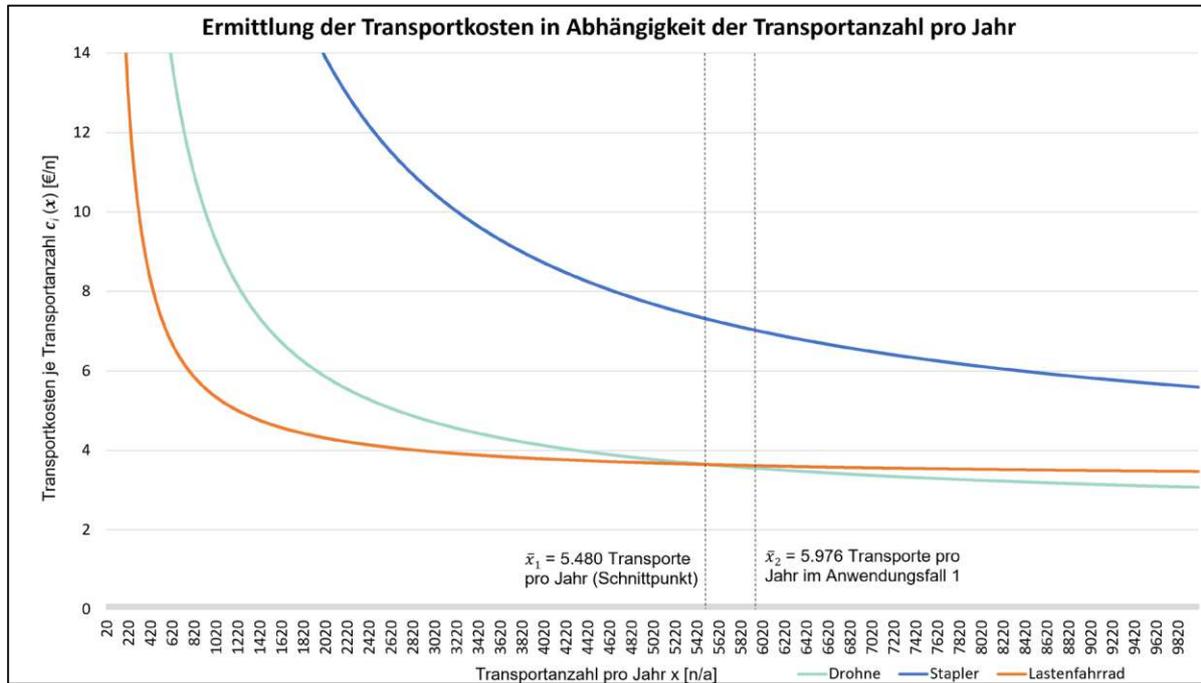


Abbildung 65: Ermittlung der Transportkosten in Abhängigkeit der Transportanzahl pro Jahr (eigene Darstellung)

Die Grafik zeigt einerseits den erstmaligen Schnittpunkt \bar{x}_1 zwischen der Drohne und dem Lastenfahrrad bei 5.480 Transporten pro Jahr. Ab diesem Zeitpunkt fallen für einen Drohnentransport geringere Transportkosten an. Zusätzlich wird der Kostenvergleich bei der ermittelten Transportanzahl von 5.976 pro Jahr im Anwendungsfall gemäß der Tabelle 36 aufgezeigt. Anhand der Schnittlinie \bar{x}_2 ergeben sich für die Drohne 3,55 Euro pro Transport bei dem ermittelten Bezugswert von 5.976 Transporten im Jahr. Demgegenüber entfallen auf den Transport mit einem Lastenfahrrad 3,61 Euro pro Transport. Der Einsatz eines Staplers für den Materialtransport liegt bei 7,01 Euro pro Transport bezogen auf den Referenzwert im Beobachtungszeitraum.

Es zeigt sich außerdem, dass aufgrund der geringeren Investitionskosten für das Lastenfahrrad die Kurve sehr schnell im Gegensatz zur Drohne und Stapler abfällt. Da jedoch der Drohnentransport einen geringeren Personeneinsatz erfordert und außerdem eine geringere Transportzeit aufweist, lässt sich ab dem aufgezeigten Schnittpunkt \bar{x}_1 ein Kostenvorteil realisieren. Wenn die Gesamtdauer des Drohnenflugs t_{Drohne} durch eine Erhöhung der Fluggeschwindigkeit oder eine Reduktion der Flughöhe minimiert werden kann, ist eine Verschiebung des Schnittpunkts weiter nach links möglich. Außerdem wird darauf hingewiesen, dass zur

Vergleichbarkeit für alle Transporttechnologien die gleiche Route gemäß der Flug- und Routenplanung im Schritt 1 gewählt wurde. Durch die Ausnutzung der direkten Luftlinie ist mit der Drohne gegenüber den Vergleichsobjekten eine deutliche Zeitreduktion und somit Kostensenkung realisierbar.

6.2 Zusammenfassende Erkenntnisse aus dem Fallbeispiel

Im Zuge der Vorabprüfung zur Vorselektion prädestinierter Transportmittel zeigt sich, dass anhand der definierten Anforderungskriterien und der Zielsetzung des Anwendungsfalls einzelne Transportmittel für die Erfüllung der logistischen Transportaufgabe geeigneter sind als Vergleichsobjekte. Bezugnehmend auf die Einordnung des Anwendungsszenarios lässt sich die technologische Vorselektion effektiv anwenden, um darauf aufbauend eine überschlagsmäßige Kostenkalkulation zur wirtschaftlichen Abschätzung der Transportmittel durchzuführen. Neben der Ermittlung der erforderlichen Transportmittellanzahl werden die Betriebskosten und Gesamtkosten pro Jahr aufgezeigt, anhand der eine Entscheidung zur weiterführenden Detailprüfung eines potenziellen Drohneneinsatzes getroffen werden kann.

Innerhalb der Analysephase im ersten Modellschritt des Vorgehensmodells werden die notwendigen Informationen und Daten des Unternehmens für die weiterführenden Modellschritte erhoben. Mit Hilfe eines entwickelten morphologischen Kastens wird die Einordnung des Anwendungsszenarios gegenüber Alternativszenarien darstellbar. Darauf aufbauend werden mittels standardisierten Fragenkatalogs unternehmensspezifische Anforderungen, Informationen und daraus notwendige Konsequenzen für das Unternehmen aufgezeigt. Darauf aufbauend erfolgt die Prozessentwicklung für den Drohnentransport. Nach abgeschlossener Flug- und Routenplanung werden die Transportgüter anhand eines entwickelten Transportdatenblatts klassifiziert. Die Dokumente und Ergebnisse fließen in eine konsolidierte Anforderungsmappe ein, die als Basis für die weiterführenden Modellschritte dient.

Die ausgewerteten Antworten aus dem Fragenkatalog fließen in die Anforderungen für die Technologiebewertung im zweiten Modellschritt ein. Zur Verknüpfung der Unternehmensanforderungen mit vorhandenen Lösungskonzepten wird ein morphologischer Kasten verwendet. Die daraus resultierenden Eingrenzungen bilden die Basis für die Nutzwertanalyse zur Drohnenauswahl. Im Fallbeispiel erreicht ein Quadrocopter die meisten Gesamtpunkte gegenüber den Alternativdrohnen. Da eine hohe Flexibilität und Manövrierbarkeit auf beengtem Raum und kurze Flugdistanzen am Werksgelände gefordert werden, erweist sich die Octocopter-Bauform trotz des zweiten Rangs als nicht zweckdienlich für den Anwendungsfall. Insbesondere beim

Eigengewicht und den Investitionskosten schneidet der Quadrocopter besser als die Vergleichsbauformen ab.

Aufbauend auf der Technologiebewertung erfolgt im dritten Modellschritt die Formulierung eines Lastenhefts für die Betriebsbewilligung bei der Luftfahrtbehörde. Die gebündelten Informationen aus der im ersten Schritt erstellten Anforderungsmappe fließen in die Konzeptbeschreibung ein. Aufgrund der spezifischen Zielsetzung des Unternehmens und des Einsatzgebiets sowie der daraus resultierenden Drohnenkategorie muss im Fallbeispiel ein erweitertes Risikobewertungsverfahren nach dem SORA-Prozess durchlaufen werden. Dafür sind auch gezielte Notfallprozesse zu entwickeln.

Bei der Festlegung der Anforderungskriterien für die Aufnahmevorrichtung und Landeplattform im vierten Modellschritt zeigt sich generell, dass die Eigenschaften und Ausprägungen vom Einsatzzweck und der gewählten Drohne aus dem Modellschritt 2 abhängen. Beispielsweise beeinflussen die Drohnenabmessungen die Geometrie der Transportaufnahmevorrichtung und die Gleitflächen der Land- und Übergabepattform. Außerdem bestimmt die Aufhängung an der Drohne die maximale Traglast, die wesentlich für den intralogistischen Materialtransport ist. Anhand der entwickelten Anforderungslisten ist eine Bauteilfertigung realisierbar. Basierend auf den spezifischen Anforderungen des Unternehmens an die Transportaufnahmevorrichtung und Landeplattform für den automatisierten Materialtransport mit einer Drohne wurden die Bauteile baulich umgesetzt und unter realen Umfeldbedingungen erfolgreich erprobt. Die im Fallbeispiel durchgeführten technologischen Testverfahren unter realen Umfeldbedingungen zeigen, dass ein RTK-System zur Erhöhung der Positionsgenauigkeit durch die ausschließliche Verwendung von Batterien eine wesentlich instabilere Systemleistung als mit einer dauerhaften Energieversorgung aufweist. Die dadurch verursachten Systemabstürze und Unterbrechungen der Satellitenverbindung führten zu einer fehlerhaften Zentrierung bei den Landemanövern an der Landeplattform im Zuge der Belastungstests. Der Grund dafür war der notwendige Neustart des Systems und die damit einhergehende Neukalibrierung mit den Satelliten, wodurch falsche Referenzwerte von der Drohne für die Positionsbestimmung herangezogen wurden. Durch die Verwendung eines alternativen RTK-Systems mit einer dauerhaften Stromversorgung wird eine Unterbrechung der Satellitenverbindung und eine damit einhergehende Neukalibrierung aufgrund eines Batteriewechsels vermieden. Außerdem zeigt sich, dass im Fallbeispiel die hoch gestapelten Produkte im Blocklager das Kommunikationssignal teilweise abschirmen, was die Positionsgenauigkeit der Drohne negativ beeinflusst.

Die Validierung des wirtschaftlichen Nutzens im fünften Modellschritt ergibt, dass insbesondere die Personalkosten, Zeitaufwände pro Transport, zurückgelegten

Wegstrecken je Routenführung und Wetterbedingungen am Einsatzort relevante Einflusskriterien für die Transportkosten sind. Je länger die Wegestrecke ist, desto mehr kann die Drohne ihren Geschwindigkeitsvorteil und geringeren Personeneinsatz gegenüber den Alternativsystemen ausnutzen. Durch die Ausnutzung des direkten Luftwegs sind außerdem weitere Zeiteinsparungen und somit geringere Transportkosten für den Drohneneinsatz erzielbar. Eine Erhöhung der Geschwindigkeit oder eine geringere Flughöhe reduziert die Gesamtdauer des Drohnenflugs wesentlich. Damit kann der Schnittpunkt \bar{x}_1 der Kostenkurven in Abbildung 65 weiter nach links verschoben werden, womit weniger Transporte für die Drohne notwendig sind, um einen Kostenvorteil gegenüber den Alternativsystemen zu erreichen. Aufgrund des höheren Windaufkommens am Einsatzort im Fallbeispiel wird ein Korrekturfaktor für die maximal möglichen Transportflüge pro Jahr angenommen. Falls dieser Faktor reduziert werden kann, sind mehr Drohnenflüge im Betrachtungszeitraum möglich, was wiederum die Transportkosten der Drohne reduziert. Im Hinblick auf den zunehmenden Fachkräftemangel erweist sich die Auslagerung logistischer Transportaufgaben auf die Drohne als mögliches Alternativkonzept, insbesondere wenn der operative Mitarbeiter in der Zwischenzeit eine wertschöpfende Tätigkeit durchführen kann. Zusätzlich erweist sich das Lastenfahrrad als Vergleichsobjekt für eine höhere Transportintensität nicht zweckdienlich, da eine qualifizierte Fachkraft durch den personenabhängigen Transport gebunden wird.

Die Anwendbarkeit des entwickelten Vorgehensmodells wird durch die Validierung im Fallbeispiel untermauert und zeigt die Übertragbarkeit auf unterschiedliche unternehmensspezifische Anforderungskriterien. Damit liefert das Modell eine technologische und wirtschaftliche Bewertungsfähigkeit, die als Entscheidungs- und Unterstützungsfähigkeit für Unternehmen bei der Einführung von Drohnen für den intralogistischen Materialtransport dient.

7 Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick

Das in dieser Arbeit entwickelte Vorgehensmodell ermöglicht Unternehmen die technologische und wirtschaftliche Bewertungsfähigkeit sowie eine standardisierte Herangehensweise bei der Einführung von Drohnen für den intralogistischen Materialtransport unter Berücksichtigung unternehmensspezifischer, prozessualer, rechtlicher und technologischer Anforderungen. Die Modellschritte werden in einem industrienahen Fallbeispiel angewendet, wobei eine Transportaufnahmeverrichtung und Landeplattform zur automatisierten Materialübergabe anhand der definierten Anforderungslisten exemplarisch umgesetzt wird. In diesem Abschnitt werden die Forschungsfragen aus Kapitel 4.2 beantwortet und es wird die daraus abgeleitete Forschungshypothese falsifiziert. Zusätzlich werden die Anforderungen an das Vorgehensmodell (siehe Kapitel 4.3) in Kapitel 7.2 evaluiert. Abschließend wird in Kapitel 7.3 der weiterhin notwendige Forschungsbedarf im Themenbereich erläutert.

7.1 Diskussion der Forschungsfragen und der Hypothese

Nachfolgend werden die drei Forschungsfragen aus Abschnitt 4.2 beantwortet:

1. *Unter welchen Rahmenbedingungen erweist sich der automatisierte Drohneneinsatz für den logistischen Materialtransport am Werksgelände als kosteneffiziente Ergänzungslösung zu konventionellen Transporttechnologien?*

Anhand der Ergebnisse des Fallbeispiels lässt sich zeigen, dass wesentliche Faktoren vorliegen, bei denen der automatisierte Drohneneinsatz eine effiziente Alternativlösung zu herkömmlichen Transporttechnologien darstellt.

In Bezug auf die Personalkosten zeigt sich, dass durch den automatisierten Klein- und Ersatzteiletransport der Drohne bei höheren Transportdistanzen geringere Kosten während des Transports im Vergleich zu Alternativsystemen entstehen, da der Drohnenpilot ausschließlich für die Überwachung zuständig ist.

Bei der Ermittlung der Transportzeit lässt sich zeigen, dass die Drohne insbesondere bei weiten Distanzen ihren Geschwindigkeitsvorteil gegenüber herkömmlichen Transportmitteln (z. B. Stapler oder Lastenfahrzeug) ausspielen kann. Eine zusätzliche Zeitersparnis ist durch die Ausnutzung des direkten Luftwegs am Werksgelände und einer höheren Fluggeschwindigkeit bei den Transportprozessen realisierbar. Besonders durch die Realisierung automatisierter Aufnahme- und Abgabeprozesse mithilfe einer speziellen Transportaufnahmeverrichtung in Kombination mit einer Lande- und Übergabepattform, die die Funktionsweisen des Greifers wesentlich unterstützt, kann der Materialtransport zeit- und kosteneffizient abgewickelt werden. Dieser Kostenvorteil spiegelt sich im Fallbeispiel anhand der ermittelten Transportkosten in Abhängigkeit der Transportanzahl pro Jahr wider.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Kosten pro Transport für die Drohne umso geringer sind, je längere Wegstrecken am Werksgelände zurückgelegt werden müssen und je kürzer die dafür benötigte Zeit ausfällt. Dies ist einerseits durch eine höhere Fluggeschwindigkeit oder geringere Flughöhe realisierbar, wobei die Mindestflughöhe mit den Werksstrukturen (siehe Modellschritt 1) abzugleichen ist. Der wirtschaftliche Nutzen der Drohne für Materialtransporte wird außerdem von den Personalkosten für die alternativ eingesetzten Transportfahrzeuge sowie den maximal möglichen Transportflügen der Drohne, die unter anderem von den Wetterbedingungen am Einsatzort abhängen, bestimmt.

In Ergänzung zu den Ergebnissen des Fallbeispiels zeigt sich, dass im Hinblick auf den wachsenden Fachkräftemangel die Auslagerung von nicht wertschöpfenden Transportaufgaben auf personenunabhängige Transportsysteme (z. B. Drohnen) eine attraktive Alternativlösung darstellt. Insofern es sich bei den Transporten um anlagenkritische Klein- und Ersatzteile handelt und der Anlagenausfall aufgrund der Stillstandzeit höhere Kosten als der Transport mit einer Drohne verursacht, stellt der automatisierte Drohnentransport eine kosteneffiziente und attraktive Materialbereitstellungsstrategie dar.

2. Welches Vorgehen lässt sich zur technologischen und wirtschaftlichen Bewertung und Eignungsprüfung eines potenziellen Drohneneinsatzes unter Berücksichtigung alternativer Transporttechnologien sinnvoll anwenden?

Zur Darstellung des technologischen als auch wirtschaftlichen Nutzens eines drohnenbasierten Materialtransports am Werksgelände für spezifische Transportgüter ist es notwendig, anhand unternehmensspezifischer Anforderungskriterien existierende Transporttechnologien inklusive Drohnen zu bewerten und einzugrenzen. Das heißt, dass vor einer Detailprüfung des Drohneneinsatzes eine wirtschaftliche Voranalyse mit den eingegrenzten Transporttechnologien durchgeführt werden muss, die ausgehend von den unternehmensspezifischen Inputparametern hinsichtlich der logistischen Aufgabe eine fundierte Aussage über die Sinnhaftigkeit tiefergehender Umsetzungsmaßnahmen liefert.

Nach abgeschlossener Vorselektion relevanter Transportmittel sind notwendige Informationen und Daten innerhalb der Analysephase zu erheben. Die Informations- und Datengewinnung wird durch den entwickelten Fragenkatalog unterstützt, anhand dessen notwendige Handlungsmaßnahmen für die Modellschritte ableitbar sind. Die Erhebung der unternehmensspezifischen Informationen für den Drohneneinsatz umfassen neben dem Einsatzgebiet, den logistischen Unternehmensprozessen, der Flug- und Routenplanung auch die Klassifizierung des Artikelspektrums, welches für den drohnenbasierten Transport relevant ist. Die frühzeitige Quantifizierung von Einflussgrößen sowie deren möglichen Konsequenzen stellt sicher, dass notwendige

technologische und rechtliche Maßnahmenschritte im Zuge der Detailprüfung zielgerecht umgesetzt werden. Die Einordnung des Anwendungsszenarios anhand definierter Attribute und Ausprägungsformen ermöglicht es in späterer Folge, den wirtschaftlichen Nutzen des Drohnentransports im Vergleich zu Alternativsystemen gegenüberzustellen und zu bewerten. Die im letzten Schritt durchgeführte Validierung der Wirtschaftlichkeit in Bezug auf die resultierenden Gesamt- und Transportkosten beim Einsatz einer Drohne für den automatisierten Materialtransport bildet die schlussendliche Entscheidungsbasis für den potenziellen Drohneneinsatz.

3. Welche unternehmensspezifischen, luftfahrtrechtlichen und technologischen Voraussetzungen sowie Prozessschritte muss ein Vorgehensmodell aufweisen, um den drohnenbasierten Materialtransport am Werksgelände zu etablieren?

Für die luftfahrtrechtliche Betriebsbewilligung eines Drohneneinsatzes im industriellen Umfeld ist es notwendig, unternehmensspezifische Informationen und Daten sowie Restriktionen im Anwendungsbereich zu erheben. Diesbezüglich dient der entwickelte Fragenkatalog als Analysewerkzeug, um sowohl rechtliche, infrastrukturelle und materialspezifische Voraussetzungen zu erheben und Prozessschritte im Zuge des Vorgehensmodells anzustoßen. Anhand der wiedergegebenen Antworten im Fragenkatalog und den daraus resultierenden Konsequenzen lässt sich der aktuelle Entwicklungsstand des Unternehmens im Hinblick auf die Drohnenexpertise aufzeigen.

In der Analysephase sind die rechtlichen Anforderungen für den Einsatzzweck zu bestimmen, um die notwendigen Informationen und Dokumente aufzubereiten. Zur Erfüllung der luftfahrtrechtlichen Voraussetzungen sind außerdem das Einsatzgebiet und dessen Umfeldbedingungen zu definieren. Hierbei müssen Flugbeschränkungszonen in der Gebietsklassifizierung beachtet und detaillierte Beschreibungen des Anwendungsszenarios formuliert werden. Nach der allgemeinen Gebietsklassifizierung ist eine Detailbetrachtung des Werkslayouts inklusive Flug- und Routenplanung erforderlich. Potenzielle Gefahren im Einsatzgebiet sind zu identifizieren und müssen in die Flugroutenplanung einbezogen werden. Eine detaillierte Kennzeichnung von Quellen, Senken und Flugkorridoren am Werksgelände dient als weiterer Kompetenznachweis für das Risikobewertungsverfahren bei der Luftfahrtbehörde.

Sofern keine Prozessentwicklungen für die Abwicklung des Drohneneinsatzes im Unternehmen vorliegen, müssen diese ebenfalls aufbereitet werden. Das beinhaltet die Prozessabwicklung sowohl für den Normalbetrieb mit der Drohne als auch für Notfallsituationen. Insbesondere die Entwicklung eines validen Sicherheitskonzepts für den drohnenbasierten Materialtransport stellt die Grundlage für die luftfahrtrechtliche Betriebsgenehmigung dar.

Die außerdem notwendige Transportgutklassifizierung, bei der das Produktspektrum des Unternehmens für den Drohnentransport nach Größe, Gewicht und theoretischem Schlichtmuster klassifiziert wird, beeinflusst sowohl die technologische Einsatzklasse der Drohne als auch die unternehmensspezifische Anforderungskriterien für eine Transportaufnahmevorrichtung sowie Lande- und Übergabeplattform. Aus den bestehenden Konzepten aus dem Stand der Wissenschaft und Technik lassen sich technologische Anforderungskriterien an die Bauteile ableiten.

Besonders die Ansteuerung der Transportaufnahmevorrichtung und die Fixierung des Transportguts sind entscheidend für die Funktionalität des Systems. Die Geometrieigenschaften für den Greifmechanismus werden vor allem von der gewählten Drohne aus der durchgeführten Technologiebewertung im Vorgehensmodell beeinflusst. Zur Gewährleistung der funktionsgerechten Transportgutübergabe ist es zwingend erforderlich, die Anforderungen an die Landeplattform mit denen der Aufnahmevorrichtung abzugleichen. Das bedeutet, dass die Funktionseigenschaften der Plattform den automatisierten Aufnahme- und Abgabeprozess sowie die Zentrierfähigkeit der Drohne bei Landemanövern unterstützen müssen.

Somit ergeben sich gemäß den in dieser Dissertation entwickelten Anforderungslisten folgende Anforderungskategorien für die Bauteile:

- Geometrie
- Werkstoff
- Energie
- Ansteuerung und Fixierung
- Signale
- Kräfte
- Fertigung
- Kosten
- Sicherheit
- Kontrolle
- Gebrauch
- Transport
- Ergonomie
- Sonstige Kriterien

Mithilfe der standardisierten Anforderungslisten ist damit eine selektive Auswahlmöglichkeit und Parameterdefinition der spezifischen Anforderungen der Unternehmen möglich. Darauf aufbauend können weiterführende Konzeptions- und Entwicklungsschritte innerhalb eines Produktentwicklungsprozesses (z. B. gemäß VDI- Richtlinien 2221) angestoßen werden.

Die Forschungshypothese, die nachfolgend falsifiziert wird, lautet:

Die Nutzung von automatisierten Drohnentransporten am Werksgelände für spezifische Transportgüter stellt für Unternehmen eine zusätzliche technologische und wirtschaftliche Ergänzungslösung in der Abwicklung logistischer Transportaufgaben dar.

Durch die Verwendung von spezifischen Transportaufnahmevorrichtungen in Kombination mit funktionsunterstützenden Lande- und Übergabeplattformen, die eine

automatisierte Materialaufnahme und -übergabe mit einer für den Materialtransport ausgelegten Drohne ermöglichen, steht Unternehmen eine kosteneffiziente Alternativlösung für logistische Transportaufgaben gegenüber herkömmlichen Transportmitteln zur Verfügung. Insbesondere bei Eilaufträgen für Klein- und Ersatzteile, die über eine längere Distanz am Werksgelände transportiert werden müssen, erzielt der automatisierte Drohnentransport durch die geringeren Personalkosten und Transportzeiten unter Ausnutzung des direkten Luftwegs einen Mehrwert gegenüber den für den Anwendungsfall eingegrenzten Transporttechnologielösungen. Die nutzbare Traglast, realisierbare Flugreichweite und eingesetzte Drohnenanzahl sind wesentliche Einflusskriterien für die Erfüllung der logistischen Transportaufgabe im Unternehmen.

Unter Ausnützung der Distanzüberbrückung per Luftweg und der automatisierten Prozessabwicklung kann außerdem der wertschöpfende Tätigkeitsanteil im operativen Betrieb gesteigert werden, da der operative Verantwortliche den Drohnentransport einzig überwachen muss. Zusätzlich können stark frequentierte Verkehrswege am Werksgelände durch die Ausnutzung des Luftwegs entlastet und Eiltransporte zeiteffizienter zum Abgabeort transportiert werden. Je nach unternehmensspezifischem Anwendungsfall und gewählter Flugroute ist eine wesentliche Zeitreduktion mit der Drohne erzielbar. Besonders bei der Überbrückung von Höhenunterschieden und stark verbauten Infrastrukturen stellt der Drohnentransport eine sinnhafte Alternativlösung für Unternehmen dar.

Anhand der durchgeführten Validierung des wirtschaftlichen Nutzens zeigt sich außerdem, dass durch die Beeinflussung der zurückgelegten Wegstrecke, der Fluggeschwindigkeit und des automatisierten Auf- und Abgabeprozesses der Transportgüter die Gesamtdauer je Transport wesentlich reduziert werden kann. Die damit erzielbaren geringeren Transportkosten in Abhängigkeit der durchzuführenden Transportanzahl im Jahr zeigen, dass die Drohne eine legitime Alternativlösung zu konventionellen Transporttechnologien darstellt.

7.2 Evaluierung der Anforderungen an das Vorgehensmodell

Die in Kapitel 4.3 definierten Anforderungen an das Vorgehensmodell werden nach der Anwendung des Vorgehensmodells in diesem Abschnitt auf ihren Erfüllungsgrad hin überprüft.

Anforderung 1 | Branchenneutrale Anwendbarkeit

Die einzelnen Schritte des Vorgehensmodells sind so aufgebaut, dass branchenunabhängige Spezifikationen erhoben und definiert werden können. Sowohl

der allgemeingültige Fragenkatalog zur Erhebung der unternehmensspezifischen Anforderungen als auch die darauf aufbauende Technologiebewertung ermöglichen eine branchenneutrale Selektion geeigneter Transporttechnologien inklusive prädestinierter Drohnenbauformen für den jeweiligen Anwendungsfall. Die rechtlichen Genehmigungsschritte für die Betriebsbewilligung sind durch die definierten Handlungsmaßnahmen individuell an den Einsatzzweck anpassungsfähig. Die methodische Vorgehensweise bei der Anforderungsdefinition für eine Transportaufnahmevorrichtung und Landeplattform ermöglicht eine branchenunabhängige Definition der Anforderungen.

Anforderung 2 | Definition des Einsatzbereiches

Durch die Einbettung praxistauglicher Werkzeuge und Bewertungsverfahren wird im Vorgehensmodell die Bewertungsfähigkeit des Einsatzbereiches sowie der gewählten Routenführung am Werksgelände hinsichtlich potenzieller Risiken gewährleistet. Durch die Definition von Rahmenbedingungen auf Basis der Auswertungen des unternehmensspezifischen Fragenkatalogs für den Einsatz der Drohne am Werksgelände sind notwendige technologische und rechtliche Handlungsschritte ableitbar. Damit lässt sich das definierte Einsatzgebiet hinsichtlich Flugbeschränkungsgebieten und Sperrzonen im österreichischen Luftraum bewerten und dient als Grundlage für die definierten Maßnahmenschritte des luftfahrtrechtlichen Betriebsbewilligungsverfahrens.

Anforderung 3 | Transportgutklassifizierung

Durch die Klassifizierung des transportfähigen Artikelspektrums je nach Anwendungsfall ist die Eingrenzung und Selektion geeigneter Transporttechnologien in der Vorselektion des Vorgehensmodells möglich. Darauf aufbauend erfolgt in der Analysephase im ersten Modellschritt eine artikelspezifische Transportgutbewertung, um die Eignungsfähigkeit für den Drohnentransport zu analysieren. Dabei erfolgt eine Klassifizierung nach Gewicht, Größe und möglichem Schichtmuster im standardisierten Ladungsträger. Das entwickelte Transportdatenblatt ermöglicht eine detaillierte Aufbereitung der Produktparameter, was zu einer eindeutigen Zuordnung und Nachverfolgbarkeit der logistischen Transporte führt.

Anforderung 4 | Auswahl geeigneter Transporttechnologien

Unter Bezugnahme definierter Anforderungskriterien an ein Transportmittel werden im Zuge der technologischen Vorabprüfung prädestinierte Transporttechnologien für den spezifischen Anwendungsfall ausgeschlossen, die aufgrund ihrer Eigenschaften und Fähigkeiten nicht für das Anwendungsszenario geeignet sind. Neben der technologischen Selektion erfolgt eine wirtschaftliche Abschätzung der eingegrenzten Transporttechnologien, um eine Entscheidungsgrundlage für die potenzielle

Detailprüfung des Drohneneinsatzes bereitzustellen. Darauf aufbauend erfolgt im zweiten Schritt des Vorgehensmodells eine Transporttechnologiebewertung mit dem Fokus auf verschiedene Drohnenkonzepte. Durch den Einsatz geeigneter Bewertungsmethoden (z. B. Nutzwertanalyse) sind am Markt verfügbare Drohnen gemäß den unternehmensspezifischen Anforderungskriterien bewertbar. Die dadurch erzielte Rangordnung bildet eine valide Entscheidungsbasis für die Auswahl der Drohne für den Anwendungsfall.

Anforderung 5 | Bezugnahme auf rechtliche Rahmenbedingungen

Neben der unternehmensspezifischen Informations- und Datenerhebung in der Analysephase und den daraus aufbereiteten Dokumenten und Prozessentwicklungen dient die Transporttechnologiebewertung inklusive der gewählten Drohnenkategorie als Grundlage für das luftfahrtrechtliche Betriebsbewilligungsverfahren. Diese Informationen werden zur Risikoabschätzung des Anwendungsfalls und als Kompetenznachweis des Unternehmens für den geplanten Drohneneinsatz herangezogen. Je nach quantifizierter Einsatzkategorie der Drohne gewährleisten die definierten rechtlichen Handlungsschritte im Modell die schrittweise Umsetzung. Der stufenweise Prozessablauf für ein erweitertes Risikobewertungsverfahren umfasst zwingende Prozessentwicklungen und Dokumente, die schlussendlich in die Aufbereitung des Lastenhefts einfließen. Das finale Dokument dient dem Unternehmen als Grundlage für den Genehmigungsprozess bei der Luftfahrtbehörde.

Anforderung 6 | Bereitstellung praxistauglicher Werkzeuge

Mithilfe der einzelnen Schritte des Vorgehensmodells und der entwickelten technologischen als auch wirtschaftlichen Bewertungsverfahren ist es Anwendern möglich, einen potenziellen Drohneneinsatz im Unternehmen auf Basis valider Entscheidungsgrundlagen gegenüber konventionellen Transportalternativen zu bewerten und anhand definierter Handlungsmaßnahmen im Unternehmen einzuführen. Außerdem wird durch die Definition spezifischer Anforderungskriterien für eine Transportaufnahmeeinheit zur automatisierten Auf- und Abgabe von Transportgütern eine bauteiltechnische Umsetzung ermöglicht.

7.3 Weiterer Forschungsbedarf

Aufgrund der rasanten Entwicklungen innerhalb der Drohnentechnologie steigt auch diesbezüglich der Forschungsbedarf in diesem Themenbereich stetig. Ergänzend zu den beantworteten Forschungsfragen aus dem vorangegangenen Kapitel 7.1 existiert weiterhin ein Forschungsbedarf im Themenbereich der Drohnentechnologie, der in zukünftigen Forschungsarbeiten adressiert werden soll.

Ansätze zur Materialbereitstellung mit Drohnen über die Werksgrenzen hinaus besitzen enormes Zukunftspotenzial. Aktuelle Vorhaben, um BVLOS-Missionen in Österreich durchzuführen, sind äußerst komplex und verlangen ein erhebliches Fachwissen. Dementsprechend ergibt sich hier ein Forschungsbedarf, um sowohl geeignete Drohnen inklusive Sicherheitssystemen für diesen Anwendungszweck einsetzen zu können als auch die rechtlichen Rahmenbedingungen dafür zu schaffen. Insbesondere die rechtlichen Schritte und die daraus resultierenden Handlungsmaßnahmen sind für einen unkomplizierten Einsatz in Unternehmen zukünftig zu standardisieren.

Ein weiterer Forschungsbedarf zielt auf die gleichzeitige Nutzung von mehreren Drohnen am Werksgelände ab, um vordefinierte Transportaufträge und Arbeiten selbstständig durchzuführen. Die Arbeitsweise kann sowohl eigenständig und autonom operierend erfolgen als auch automatisiert durch einen Drohnenpiloten von einer Kontrollstation aus gesteuert bzw. überwacht werden. Bei autonom operierenden Drohnenschwärmen müssen die internen Logistikprozesse mit Methoden der künstlichen Intelligenz abgeglichen werden, damit die Technologie die Unternehmensanforderungen erfüllt.

Die Verknüpfung mehrerer Quellen und Senken am Werksgelände als auch außerhalb des Unternehmensumfeldes, um Materialtransporte zwischen den Aufnahme- und Abgabepunkten noch effizienter durchführen zu können, sollte ebenfalls Thema zukünftiger Forschungen sein. Die Konzeptionierung und Entwicklung automatisierter Paketstationen, die sowohl als Landeplattform als auch Kurzfristdepot fungieren, könnte ebenfalls Thema weiterer Forschungsarbeiten sein. Damit soll Unternehmen eine weitere Zustellmethode für Kundenaufträge bereitgestellt werden, um Transporte auf der letzten Meile kosteneffizient abzuwickeln. Diesbezüglich müssen die rechtlichen Rahmenbedingungen noch weiter präzisiert werden.

Auch die Akkuleistung der am Markt verfügbaren Drohnen könnte Basis für zukünftige Studien sein. Um den wirtschaftlichen Nutzen von Drohnen gegenüber Alternativsystemen zukünftig weiter zu verdeutlichen, müssen die realisierbaren Flugzeiten in der Luft verlängert und die Ladedauer am Boden wesentlich verkürzt werden. Verschiedene Ladeprinzipien, wie das im Vorgehensmodell eingesetzte

induktive Ladesystem auf der Landeplattform, sind für zukünftige Anwendungsfelder anzupassen und weiterzuentwickeln. Durch längere Flugzeiten bei gleichzeitig steigender Traglast der Drohnen sind Effizienzsteigerungen in der Materialbereitstellung realisierbar. Leistungsfähigere Akkusysteme würden außerdem bei höheren Traglasten weniger Energie verbrauchen, womit weitere Anwendungsgebiete im logistischen Kontext erschlossen werden können.

Abschließend lässt sich festhalten, dass mit kosteneffizienteren, leistungsfähigeren und selbstständig kooperierenden Drohnen Unternehmen zukünftig eine weitere Alternativlösung zur Materialbereitstellung in unterschiedlichen Branchen und Anwendungsfeldern vorliegt. Damit wäre das bestehende Potenzial von Drohnen auf weitere industrielle Anwendungsfälle übertragbar.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prozessmodell in der Design-Science-Research-Methode.....	8
Abbildung 2: Struktureller Aufbau der Arbeit.....	10
Abbildung 3: Aufbau des Kapitels Theoretische Grundlagen und Eingrenzung des Forschungsbereichs	11
Abbildung 4: Materialflussebenen.....	13
Abbildung 5: Transportansätze für logistische Aufgaben.....	13
Abbildung 6: Logistik Trend Radar und Einführungshorizont von Drohnen	15
Abbildung 7: Entscheidungsbaum zur Auswahl von Drohneneinsatzklassen.....	17
Abbildung 8: Aufbau und Funktion einer Fallschirmlösung.....	21
Abbildung 9: Luftraumbeschränkungen in Österreich.....	22
Abbildung 10: VLOS und BVLOS Einsatzreichweiten	24
Abbildung 11: Übersicht der Drohnen Einsatzkategorien	27
Abbildung 12: Unterteilung der Kategorie Open	29
Abbildung 13: Thematische Eingrenzung	33
Abbildung 14: Materialflussebenen in der Intralogistik.....	36
Abbildung 15: Prozessablauf konventioneller Transport versus Drohnentransport ...	38
Abbildung 16: Gegenüberstellung von manuellem Transport versus Drohnentransport in der Automobilindustrie	40
Abbildung 17: Bewertungsmodell als Entscheidungsgrundlage für den Technologieeinsatz.....	41
Abbildung 18: Ganzheitliche Systemarchitektur	48
Abbildung 19: Funktionsprinzip der Transportaufnahme	48
Abbildung 20: Positionsausgleich und selbständige Zentrierung.....	49
Abbildung 21: Gestaltung der Transportaufnahme	50
Abbildung 22: Konzeption Transportaufnahmevorrichtung.....	51
Abbildung 23: Systemkonfiguration und Funktionsprinzip	52
Abbildung 24: Greifmechanismus mit Scherenglieder	53
Abbildung 25: Funktionsprinzip des Greifmechanismus	53
Abbildung 26: Kategorisierung von Plattfortmtypen.....	56
Abbildung 27: Automatisierte Bestückungsautomaten	58
Abbildung 28: Trichterplattform.....	59
Abbildung 29: Trichterbauweise der Landeplattform inklusive Fördertechnik.....	60
Abbildung 30: Durchführungsschritte des entwickelten Vorgehensmodells.....	70
Abbildung 31: Geografische Standortanalyse.....	78
Abbildung 32: Verwendete Symbole im Swimlane-Darstellungsformat	79
Abbildung 33: Layoutanalyse und Flugroutenplanung.....	81
Abbildung 34: SORA-Prozess für die Zulassung der Kategorie Specific	88
Abbildung 35: Einflussfaktoren in einem Produktentwicklungsprozess	93
Abbildung 36: Prozessschritte des Produktentwicklungsprozesses	94

Abbildung 37: Exemplarischer Ausschnitt aus einer befüllten Anforderungsliste am Beispiel einer Transportaufnahmeverrichtung	99
Abbildung 38: Zeiten bei einem Transportflug mit einer Drohne.....	101
Abbildung 39: Exemplarische Ermittlung der Transportkosten in Abhängigkeit der Transportanzahl pro Jahr	110
Abbildung 40: Geografische Standortanalyse.....	119
Abbildung 41: Werklayout mit Quellen und Senken sowie festgelegter Flugroute.	120
Abbildung 42: Prozessablauf für die automatisierte Materialbereitstellung mittels Drohne.....	121
Abbildung 43: Prozessentwicklung ERP – Emergency Response Plan	126
Abbildung 44: Prozessentwicklung OSO#8	127
Abbildung 45: Prozessentwicklung OSO#11	128
Abbildung 46: Prozessentwicklung OSO#21	129
Abbildung 47: Entwurf der Transportaufnahmeverrichtung inklusive Transportbox.	133
Abbildung 48: Einsatzfähige Prototypenbauteile	134
Abbildung 49: Funktionsfähige Aufnahmeverrichtung	134
Abbildung 50: Entwurfsphase der Landeplattform	135
Abbildung 51: Prototypentest unter realen Umfeldbedingungen.....	136
Abbildung 52: Systembauteile induktive Ladeeinheit.....	136
Abbildung 53: Konstruktionsdarstellung der finalen Landeplattform	137
Abbildung 54: Einzelteile und Grundgestell der Landeplattform	138
Abbildung 55: Verkleidungen der zwei Landeplattformen.....	138
Abbildung 56: Finale Ausführung der zwei Landeplattformen.....	139
Abbildung 57: Ganzheitlicher Systemaufbau in Fallbeispiel 1	139
Abbildung 58: Aufnahmeplattform (links) inklusive Drohne sowie Abgabepattform (rechts) an festgelegten Positionen am Werksgelände	140
Abbildung 59: Befestigungsvorrichtung für die Querstrebe	140
Abbildung 60: Befestigungsvorrichtung für die Ladeeinheit.....	141
Abbildung 61: Konstruktion der optimierten Aufstandsbeine für die Drohne.....	141
Abbildung 62: Ablagefläche mit integriertem Piktogramm	142
Abbildung 63: Erhöhungselement für die mittig angebrachten Gleitflächen	142
Abbildung 64: Erweiterungselemente für die Gleitflächen	142
Abbildung 65: Ermittlung der Transportkosten in Abhängigkeit der Transportanzahl pro Jahr	147

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Artefakt Typen.....	7
Tabelle 2: Auszug aus dem entwickelten Trainingsbuch	31
Tabelle 3: Auszug aus dem entwickelten Flugbuch.....	31
Tabelle 4: Qualitative Einordnung ausgewählter Ansätze zur Einführung, Auswahl und den Betrieb von Drohnen.....	44
Tabelle 5: Modellvergleich von Transportaufnahmesystemen.....	46
Tabelle 6: Detailanalyse der relevanten Modellansätze für die Transportaufnahme ..54	
Tabelle 7: Modellvergleich identifizierter Lande- und Übergabepattformtypen	57
Tabelle 8: Anforderungskriterien für die Vorselektion von Transportmitteln hinsichtlich ihrer Eignungsfähigkeit	72
Tabelle 9: Wirtschaftliche Abschätzung verschiedener Transportmittel.....	72
Tabelle 10: Morphologischer Kasten zur Einordnung des Anwendungsszenarios	75
Tabelle 11: Fragenkatalog zur Ermittlung der unternehmensspezifischen Informationen und Daten	76
Tabelle 12: Transportdatenblatt mit beispielhaften Beschreibungen	82
Tabelle 13: Morphologischer Kasten zur Verknüpfung von Anforderungskriterien mit möglichen Lösungsvarianten	83
Tabelle 14: Durchführung einer Nutzwertanalyse für den Transporttechnologievergleich.....	85
Tabelle 15: Anforderungsliste für eine Transportaufnahmeeinrichtung	97
Tabelle 16: Anforderungsliste für eine Landeplattform	98
Tabelle 17: Durchschnittliche Personalkosten je Qualifikationsprofil in Österreich..	100
Tabelle 18: Berechnung der Transportzeit für einen Drohnentransport.....	102
Tabelle 19: Ermittlung erforderlicher Transportmittel für den Anwendungsfall	104
Tabelle 20: Kostenkalkulation für exemplarische Transportmittel.....	105
Tabelle 21: Exemplarische Ermittlung der Transportzeit mittels MTM-Bewertung am Beispiel eines Staplers	111
Tabelle 22: Vorselektion von Transportmitteln im Fallbeispiel 1	114
Tabelle 23: Wirtschaftliche Abschätzung der eingegrenzten Transportmittel im Fallbeispiel 1.....	115
Tabelle 24: Einordnung des Anwendungsszenarios.....	116
Tabelle 25: Fragebogen im Zuge der Analysephase	117
Tabelle 26: Transportdatenblatt und Güterdefinition.....	122
Tabelle 27: Verknüpfung von Anforderungskriterien mit möglichen Lösungsvarianten mittels morphologischen Kastens	123
Tabelle 28: Technologievergleich und Rangordnung	124
Tabelle 29: Anforderungsliste für die Aufnahmeeinrichtung im Fallbeispiel 1.....	131
Tabelle 30: Anforderungsliste für eine Landeplattform im Fallbeispiel 1.....	132

Tabelle 31: Versuchsreihe der induktiven Ladeinheit mit unterschiedlichen Wandstärken	137
Tabelle 32: Berechnung der Transportspielzeit für eine Drohne.....	143
Tabelle 33: Ermittlung erforderlicher Transportmittel im Fallbeispiel 1	144
Tabelle 34: Ermittlung der Betriebs- und Gesamtkosten für den Drohneneinsatz im Fallbeispiel 1.....	144
Tabelle 35: Berechnung der Transportspielzeit für einen Stapler	145
Tabelle 36: Vergleichende Betrachtungsweise der eingegrenzten Transportmittel .	146

10 Formelverzeichnis

Formel 1: Gewichteter Teilnutzwert je Anforderungskriterium	85
Formel 2: Berechnung des Gesamtnutzwerts für die Drohnenauswahl	86
Formel 3: Berechnung Transportzeit je Drohnenflug	101
Formel 4: Berechnung der Transporte pro Stunde	103
Formel 5: Berechnung der Transporte pro Jahr	103
Formel 6: Berechnung der erforderlichen Transportmittelanzahl	103
Formel 7: Ermittlung der Gesamtinvestitionshöhe	104
Formel 8: Jährliche Abschreibungen für Investitionsgüter	106
Formel 9: Jährliche Zinskosten für beanspruchtes Fremdkapital	106
Formel 10: Berechnung der Ladezyklen pro Jahr in Abhängigkeit der maximalen Flugzeit, Arbeitsstunden und Arbeitstage pro Jahr	106
Formel 11: Berechnung der Kosten pro Ladevorgang für Drohnen	107
Formel 12: Berechnung der jährlichen Personalkosten in Abhängigkeit der Gesamttransportzeit pro Jahr	107
Formel 13: Kosten über die Abschreibungsdauer	108
Formel 14: Transportkosten je Transportanzahl pro Jahr am Beispiel einer Drohne	109
Formel 15: Transportkosten je Transportanzahl am Beispiel eines Staplers	110

10.1 Formelzeichen

TE_i ... Gewichteter Teilnutzwert für das jeweilige Anforderungskriterium
g_j ... Gewichtung des Bewertungskriteriums
TN_{ij} ... Grad der Erfüllung je Anforderungskriterium und Drohnenvariante
GN_i ... Gesamtnutzwert für die jeweilige Drohnenvariante
g_j ... Gewichtung des Bewertungskriteriums
t_{Tm_sek} ... Gesamtdauer je Transport [s/n]
$t_{Steigen}$... Zeit zum Erreichen der definierten Flughöhe [s]
t_{Landen} ... Zeit für ein Landemanöver auf der Plattform aus der definierten Flughöhe [s]
t_{Flug} ... Zeit für die zurückgelegte Wegstrecke in Abhängigkeit der Fluggeschwindigkeit [s]
$t_{Greifer}$... Zeitdauer für das Öffnen bzw. Schließen des Greifmechanismus [s]
$c_{Drohne}(x)$... Transportkosten je Transportanzahl [€/n]
c_{MA} ... Produktivkostenstundensatz Personal [€/h]
$c_{Stapler}(x)$... Transportkosten je Transportanzahl [€/n]
c_{ED} ... Energiekosten Drohne pro Transportspiel [€/n]
c_{ES} ... Energiekosten Stapler pro Transportspiel [€/n]
x ... Laufvariable (Transportanzahl) [n/a]

z ... Einflussfaktor Wetterbedingungen [1]
t_{Stapler} ... Zeitdauer pro Transportspiel mit Stapler [s/n]
$x_{\text{Transporte}_h}$... Transporte pro Stunde [n/h]
$x_{\text{Transporte}_a}$... Transporte pro Jahr [n/a]
m_{gBedarf} ... Materialgewicht je Bedarf [kg/Bedarf]
Tf_{Tm} ... Transportfähigkeit des Transportmittels [kg]
A_{Jahr} ... Jährliche Abschreibungen [€/a]
$G_{\text{Investition}}$... Gesamtinvestitionshöhe [€]
$K_{\text{Transportmittel}}$... Investitionskosten Transportmittel [€]
K_{Hardware} ... Investitionskosten Hardware [€]
$K_{\text{Ladestation}}$... Investitionskosten Ladestation [€]
K_{Batterie} ... Investitionskosten Batterie [€]
$K_{\text{Fallschirm}}$... Investitionskosten Fallschirm [€]
$L_{\text{Wirtschaftlich}}$... Wirtschaftliche Lebensdauer [n]
K_{Zinsen} ... Kalkulatorische Zinskosten [€/a]
Z_{Kapital} ... Zinssatz [%]
K_{Gesamt} ... Gesamtkosten pro Jahr [€/a]
K_{Betrieb} ... Betriebskosten pro Jahr [€/a]
K_{Personal} ... Personalkosten pro Jahr [€/a]
$t_{\text{Investition}}$... Amortisationszeit [a]
$I_{\text{Investition}}$... Investitionen [€]
$E_{\text{Einsparung}}$... Einsparungen [€/a]
$t_{\text{Maximalwert}}$... Maximalwert an vordefinierten Perioden [a]
$t_{\text{Investition}}$... Anzahl an ermittelten Perioden [a]
At_{Jahr} ... Arbeitstage pro Jahr [d/a]
As_{Tag} ... Arbeitsstunden pro Tag [h/d]
s_{Anzahl} ... Anzahl erforderlicher Transportmittel [-]
s_{Flug} ... Gesamtwegstrecke mit und ohne Last [m]
h_{Steigen} ... Positive Höhenüberwindung bis Flughöhe [m]
h_{Landen} ... Negative Höhenüberwindung für Landung [m]
$E_{\text{Entladungen}}$... Entladungen Batterie [Ladungen/a]
t_{Batterie_h} ... Flugzeit pro Ladung [h/Ladung]
$K_{\text{Batterieladung}}$... Kosten pro Ladung [€/Ladung]
E_{Batterie} ... Energie Batterie [kWh/Ladung]
K_{Strom} ... Strompreis [€/kWh]

11 Abkürzungsverzeichnis

A	Ampere
AC	Wechselspannung
ARC	Air Risk Class
BVLOS	Beyond Visual Line of Sight
bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer Aided Design
ConOps	Concept of Operations
DC	Gleichspannung
DSRM	Design-Science-Research-Methode
DJI	Da-Jiang Innovations Science and Technology Co., Ltd
EASA	European Union Aviation Safety Agency
ERP	Emergency Response Plan
ETL	Ersatzteillager
EVLOS	Extended visual line of sight
etc.	et cetera
EU	Europäische Union
FFG	Forschungsförderungsgesellschaft
FTS	Fahrerlose Transportsysteme
g	Gramm
GPS	Global Positioning System
GRC	Ground Risk Class
h	Stunde
JARUS	Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems
kg	Kilogramm
km/h	Kilometer pro Stunde
LiDAR	Light Detection and Ranging
m	Meter
mm	Millimeter
max.	maximal
min	Minute
MTM	Methods Time Measurement
N	Newton
NATO	North Atlantic Treaty Organization
Nr.	Nummer
o.S.	ohne Seitenangabe
OSO	Operational Safety Objectives
PMMA	Polymethylmethacrylat
QR-Code	Quick-Response Code
ROI	Return on Investment

RTK	Real Time Kinematic
SAIL	Specific Assurance and Integrity Levels
SORA	Specific Operational Risk Assessment
STS	Standardszenarien
TMU	Time Measurement Unit
TMPR	Tactical Mitigation Performance Requirement and Robustness Levels
u.a.	unter anderem
UAS	Unmanned aerial system
UAV	Unmanned aerial vehicle
V	Volt
VAC	Volt Wechselspannung
VDC	Volt Gleichspannung
vgl.	vergleiche
VLOS	Visual Line of Sight
WLAN	Wireless Local Area Network
z. B.	zum Beispiel
%	Prozent

12 Literaturverzeichnis

- Al-Obaidi, M. R.; Wan Hasan, W. Z.; Mustafa, M. A.; Azis, N. (2020): Charging Platform of Chess-Pad Configuration for Unmanned Aerial Vehicle (UAV). In: *Applied Sciences* 10 (8365), S. 1–13. DOI: 10.3390/app10238365.
- Antonini, R.; Fici, G.; Gaspardone, M. (2017): Landing platform for an unmanned aerial vehicle. Veröffentlichungsnr: US2017217323A1.
- Antwork: Drone delivery network for medical service. [Online] https://www.antwork.link/build/pages/product_en.html [28.08.2020].
- Arbeitsmarktservice: AMS-Gehaltskompass. [Online] <https://www.gehaltskompass.at/suche/> [22.06.2022].
- Atakuru, T.; Samur, E. (2018): A robotic gripper for picking up two objects simultaneously. In: *Mechanism and Machine Theory* 121, S. 583–597. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2017.10.027.
- Aurambout, J.P.; Gkoumas, K.; Ciuffo, B. (2019): Last mile delivery by drones: an estimation of viable market potential and access to citizens across European cities. In: *Eur. Transp. Res. Rev.* 11 (1). DOI: 10.1186/s12544-019-0368-2.
- Austro Control (2020): Dronespace. Luftraum Übersicht Österreich. [Online] <https://map.dronespace.at/> [15.04.2020].
- Austro Control (2022): EU Regulativ. [Online] https://dronespace.at/eu_regulativ [22.10.2022].
- AVSS (2021): Urban Air Mobility. [Online] <https://www.avss.co/about-us/> [28.05.2021].
- Balzert, H.; Schäfer, C.; Schröder, M.; Kern, U. (2010): Wissenschaftliches Arbeiten. Wissenschaft, Quellen, Artefakte, Organisation, Präsentation. 1. Aufl., 3. Nachdr. Herdecke, Witten: W3L-Verl. (Soft skills).
- Benarbia, T.; Kyamakya, K. (2022): A Literature Review of Drone-Based Package Delivery Logistics Systems and Their Implementation Feasibility. In: *Sustainability* 14 (1), S. 360. DOI: 10.3390/su14010360.
- Bestaoui Sebbane, Y. (2018): Intelligent autonomy of UAVs. Advanced missions and future use. First edition. Boca Raton FL: Taylor & Francis Group; CRC Press, Taylor & Francis Group (Chapman & Hall/CRC artificial intelligence and robotics, no. 3).
- Bichler, K.; Krohn, R.; Riedel, G.; Schöppach, F. (2010): Beschaffungs- und Lagerwirtschaft. Praxisorientierte Darstellung der Grundlagen, Technologien und Verfahren. 9. Auflage. Wiesbaden: Gabler.

- Brocke, J.; Hevner, A.; Maedche, A. (2020): Design Science Research. Cases. 1st ed. 2020. Cham: Springer International Publishing; Imprint: Springer.
- Büchi, R. (2018): Das große Buch der Drohnen: Grundlagen – Technik – Flugpraxis: Vth, Verlag für Technik und Handwerk neue Medien GmbH.
- Burghardt, M. (2018): Projektmanagement. Leitfaden für die Planung, Überwachung und Steuerung von Projekten. 10., überarbeitete und erweiterte Auflage. Erlangen: Publicis Publishing.
- Campi, T.; Cruciani, S.; Maradei, F.; Feliziani, M. (2019): Innovative Design of Drone Landing Gear Used as a Receiving Coil in Wireless Charging Application. In: *Energies* 12 (18), S. 1–20. DOI: 10.3390/en12183483.
- Chae, H.; Park, J.; Song, H.; Kim, Y.; Jeong, H. (2015): The IoT based automate landing system of a drone for the round-the-clock surveillance solution. In: 2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). 2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Busan, 2015: IEEE, S. 1575–1580.
- Chung, S. H.; Sah, B.; Lee, J. (2020): Optimization for drone and drone-truck combined operations: A review of the state of the art and future directions. In: *Computers & Operations Research* 123, S. 1–29. DOI: 10.1016/j.cor.2020.105004.
- Delfmann, W.; Dangelmaier, W.; Günthner, W.; Klaus, P.; Overmeyer, L.; Rothengatter, W. et al. (2011): Positionspapier zum Grundverständnis der Logistik als wissenschaftliche Disziplin. In: T. Wimmer und T. Grosche (Hg.): Flexibel - sicher - nachhaltig. 28. Deutscher Logistik-Kongress. Hamburg: DVV Media Group GmbH.
- DHL (2022): Logistik Trendradar. [Online] <https://www.dhl.com/global-en/home/insights-and-innovation/insights/logistics-trend-radar.html> [22.09.2022].
- DIN 5452-1:2018-03: Luft- und Raumfahrt – Unbemannte Luftfahrzeugsysteme (UAS) – Teil 1: Begriffe.
- Ding, X.; Guo, P.; Xu, K.; Yu, Y. (2019): A review of aerial manipulation of small-scale rotorcraft unmanned robotic systems. In: *Chinese Journal of Aeronautics* 32 (1), S. 200–214. DOI: 10.1016/j.cja.2018.05.012.
- DJI (2022): DJI - Der Marktführer im Bereich ziviler Drohnen. [Online] <https://www.dji.com/at> [03.03.2022].
- Doks Innovation (2020): Mit delivAIRy® vollautomatisch durch die Luft. [Online] <https://www.doks-innovation.com/delivairy/> [29.08.2020].
- Drone Rescue Systems (2020): Parachute Safety Solution. [Online] <https://dronerescue.com/> [07.04.2020].

- Duric, J.; Jovanovic, S.; Sibalija, T. (2018): Improving the efficiency of the warehouse storage process with the use of drones. In: *International Journal Advanced Quality* (Vol. 46 No. 3-4), S. 46–51.
- EASA (2017): Introduction of a regulatory framework for the operation of drones. NPA 2017-05 (A), S. 15.
- EASA (2019a): Acceptable Means of Compliance (AMC) and Guidance Material (GM) to Commission Implementing Regulation (EU) 2019/947.
- EASA (2019b): Standard scenarios for UAS operations in the 'specific' category. Opinion No 05/2019.
- EASA (2021): Drones - regulatory framework background | EASA. [Online] <https://www.easa.europa.eu/easa-and-you/civil-drones-rpas/drones-regulatory-framework-background> [13.09.2021].
- E-Control (2022): Was kostet eine kWh Strom? [Online] <https://www.e-control.at/konsumenten/strom/strompreis/was-kostet-eine-kwh> [27.06.2022].
- Emery, J.R. (Hg.) (2016): The Possibilities and Pitfalls of Humanitarian Drones. *Ethics & International Affairs* (30/2), S.153-156.
- Erceg, A.; Erceg, B.; Vasilj, A. (2017): Unmanned aircraft systems in logistics - legal regulation and worldwide examples toward use in croatia. *Business Logistics in Modern Management*. Osijek.
- Eskandaripour, H.; Boldsaikhan, E. (2023): Last-Mile Drone Delivery: Past, Present, and Future. In: *Drones* 7 (2), S. 77. DOI: 10.3390/drones7020077.
- ETH Zürich (2013): Neuer Software-Algorithmus macht Quadrocopter sicherer. [Online] <https://ethz.ch/de/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2013/12/neuer-software-algorithmus-macht-quadrocopter-sicherer.html> [02.11.2020].
- Europäische Kommission (2019a): Delegierte Verordnung (EU) 2019/ 945 der Kommission über unbemannte Luftfahrzeugsysteme und Drittlandbetreiber unbemannter Luftfahrzeugsysteme.
- Europäische Kommission (2019b): Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 der Kommission über Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge. C/2019/3824.
- Europäische Union (2018): Verordnung (EU) 2018/1139 des europäischen Parlaments und des Rates - vom 4. Juli 2018.

- European Commission (2020): Drone infographics: A look into the aviation of the future - Mobility and Transport - European Commission. [Online] https://ec.europa.eu/transport/modes/air/drones-infographics_de [24.03.2020].
- Feldhusen, J.; Grote, K.H. (2013): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Fleischer, B.; Theumert, H. (2009): Entwickeln - Konstruieren - Berechnen. Komplexe praxisnahe Beispiele mit Lösungsvarianten. 2., verb. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (Vieweg + Teubner Studium).
- Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML (2020): DelivAIRy. [Online] https://www.iml.fraunhofer.de/de/abteilungen/b1/verpackungs_und_handelslogistik/innovationen/DelivAIRy1.html [28.08.2020].
- Friedrich, A. (2013): Hybrides Vorgehensmodell der innerbetrieblichen Fördersystemwahl. Entwicklung und Überprüfung eines Modells zur Unterstützung von Planungs- und Investitionsentscheidungen für Fördersysteme im betriebsinternen Materialfluss kleiner und mittelständischer Unternehmen. Dissertation, Universität Leipzig.
- Fritsch, B. (2020): Potenziale und Voraussetzungen für den innerbetrieblichen Einsatz von Drohnen zum Materialtransport. Hannover. [Online] https://www.bvl.de/files/1951/2125/2131/Abschlussbericht_DroMaTra_20200626_FrBoeFrSto.pdf [12.02.2023].
- Fritsch, B.; Namneck, A.; Schwab, A.; Kirchner, L.; Stonis, M. (2020): Wirtschaftlichkeitsbewertung von Drohnen zum innerbetrieblichen Materialtransport. In: *Logistics Journal* Vol. 2020.
- Fritsch, B.; Stonis, M. (2019): Drohnen zum Materialtransport. In: *ZWF* 114 (9), S. 584–587. DOI: 10.3139/104.112134.
- Furmann, R.; Furmannová, B.; Więcek, D. (2017): Interactive Design of Reconfigurable Logistics Systems. In: *Procedia Engineering* 192, S. 207–212. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.036.
- Galimov, M.; Fedorenko, R.; Klimchik, A. (2020): UAV Positioning Mechanisms in Landing Stations: Classification and Engineering Design Review. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 20 (13). DOI: 10.3390/s20133648.
- Garrido-Jurado, S.; Muñoz-Salinas, R.; Madrid-Cuevas, F. J.; Marín-Jiménez, M. J. (2014): Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. In: *Pattern Recognition* 47 (6), S. 2280–2292. DOI: 10.1016/j.patcog.2014.01.005.

- Geis, C.; Schuster, I.; Bierhals, R.; Badke-Schaub, P.; Birkhofer, H. (2007): Transfer of CRM training into product design. In: *Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED 07*.
- Giones, Ferran; Brem, Alexander (2017): From toys to tools: The co-evolution of technological and entrepreneurial developments in the drone industry. In: *Business Horizons* 60 (6), S. 875–884. DOI: 10.1016/j.bushor.2017.08.001.
- Godzdanker, R.; Valavanis, K.P.; Rutherford, M.J. (2014): Intelligent self-leveling docking system. Veröffentlichungsnr: US2014124621A1.
- Gudehus, T. (2012a): Logistik 1. Grundlagen, Verfahren und Strategien. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Gudehus, Timm (2012b): Logistik 2. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Heutger, M.; Kückelhaus, M. (2014): Unmanned aerial vehicle in logistics. A DHL perspective on implications and use cases for the logistics industry. [Online] https://www.dhl.com/content/dam/downloads/g0/about_us/logistics_insights/DHL_TrendReport_UAV.pdf [23.03.2020].
- Hevner, A.; Chatterjee, S. (2010): Design Research in Information Systems. Theory and Practice. Boston, MA: Springer Science+Business Media LLC (Integrated Series in Information Systems, 22).
- Hevner, A. R. (2007): A three cycle view of design science research. In: *Scandinavian Journal of Information System* (19 (2)), S. 87–92.
- Hevner, A.R.; March, S.T.; Park, J.; Ram, S. (2004): Design Science in Information Systems Research. In: *MIS Quarterly* (28), S. 75–105.
- Hompel, M. ten; Heidenblut, V. (2011): Taschenlexikon Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Hou, T.; Yang, X.; Aiyama, Y.; Liu, K.; Wang, Z.; Wang, T. et al. (2019): Design and experiment of a universal two-fingered hand with soft fingertips based on jamming effect. In: *Mechanism and Machine Theory* 133, S. 706–719. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2018.12.013.
- Huber, Walter (2018): Industrie 4.0 kompakt – Wie Technologien unsere Wirtschaft und unsere Unternehmen verändern. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Institut für Integrierte Produktion Hannover (2019): Indoor-Einsatz von Drohnen zum Materialtransport. IPH klärt Randbedingungen für den Drohneneinsatz in der Intralogistik. [Online] https://www.iph-hannover.de/de/presse/pressemitteilungen/?we_objectID=5313 [02.01.2020].

- Jankulik, E.; Pfiff, R. (2009): Praxisbuch Prozessoptimierung : Management- und Kennzahlensysteme als Basis für den Geschäftserfolg: Erlangen: Publicis.
- Jarrell, T. (2019): Motor failure does not have to crash your quadcopter. Motor failure does not have to crash your quadcopter. [Online] <https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/2019/april/26/this-failsafe-can-save-the-day-if-your-drone-loses-a-motor> [07.04.2020].
- Jiang, Z. (2019): An Autonomous Landing and Charging System for Drones. Master of Engineering in Electrical Engineering and Computer Science. Massachusetts Institute of Technology.
- Johannesson, P.; Perjons, E. (2014): An introduction to design science. 1. Aufl. Heidelberg: Springer.
- Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems (2019): JARUS guidelines on Specific Operations Risk Assessment (SORA). JAR-DEL-WG6-D.04, S. 1–30.
- Kapetanović, N.; Oreč, M.; Mišković, N.; Ferreira, F. (2022): Landing Platform for Autonomous Inspection Missions in Mariculture Using an ASV and a UAV. In: *IFAC-PapersOnLine* 55 (31), S. 130–135. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.10.420.
- Kellermann, R.; Biehle, T.; Fischer, L. (2019): Drones for parcel and passenger transportation: A literature review. In: *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives* 4, S. 1–13.
- Kempkens, W. (2019): Drohnen ersetzen Transporte auf dem Boden. [Online] <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/luftfahrt/drohnen-ersetzen-transporte-auf-dem-boden/> [09.04.2020].
- Kessens, C. C.; Thomas, J.; Desai, J. P.; Kumar, V. (2016): Versatile aerial grasping using self-sealing suction. In: 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Stockholm, Sweden, 16.05.2016 - 21.05.2016: IEEE, S. 3249–3254.
- Kim, D.; Oh, P. Y. (2018): Toward Lab Automation Drones for Micro-plate Delivery in High Throughput Systems. In: 2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Dallas, TX, 12.06.2018 - 15.06.2018: IEEE, S. 279–284.
- Kim, J.-H.; Song, C.-U. (2018): Three-phase wireless power transfer system and three-phase wireless chargeable unmanned aerial vehicle system based on the same. Veröffentlichungsnr: US10081263B2.
- Kirchner, E. (2020): Werkzeuge und Methoden der Produktentwicklung. Von der Idee zum erfolgreichen Produkt. 1. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

- Kirschstein, T. (2020): Comparison of energy demands of drone-based and ground-based parcel delivery services. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 78, S. 1–18.
- Kong, X.; Zhong, R.; Zhao, Z.; Shao, S.; Li, M.; Lin, P. et al. (2020): Cyber physical ecommerce logistics system: An implementation case in Hong Kong. In: *Computers & Industrial Engineering* 139, S. 1–15. DOI: 10.1016/j.cie.2019.106170.
- Kühn, M. (2013): Stabilisierung und Verbesserung des Multicopter-Flugverhaltens anhand einer Simulation. Bachelorarbeit. Freie Universität Berlin.
- Landrock, H.; Baumgärtel, A. (2018): Die Industriedrohne – der fliegende Roboter. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Lemardelé, C.; Estrada, M.; Pagès, L.; Bachofner, M. (2021): Potentialities of drones and ground autonomous delivery devices for last-mile logistics. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 149, S. 1–51. DOI: 10.1016/j.tre.2021.102325.
- Li, H.; Yao, J.; Wei, C.; Zhou, P.; Xu, Y.; Zhao, Y. (2021): An untethered soft robotic gripper with high payload-to-weight ratio. In: *Mechanism and Machine Theory* 158, S. 104226. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104226.
- Li, Y.; Liu, M.; Jiang, D. (2022): Application of Unmanned Aerial Vehicles in Logistics: A Literature Review. In: *Sustainability* 14 (21), S. 14473. DOI: 10.3390/su142114473.
- Lieret, M.; Kogan, V.; Doll, S.; Franke, J. (2019): Automated in-house transportation of small load carriers with autonomous unmanned aerial vehicles. In: *2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering*, S. 1010–1015.
- Lieret, M.; Lukas, J.; Nikol, M.; Franke, J. (2020a): A lightweight, low-cost and self-diagnosing mechatronic jaw gripper for the aerial picking with unmanned aerial vehicles. In: *Procedia Manufacturing* 51, S. 424–430. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.10.060.
- Lieret, M.; Tauscher, M.; Lallinger, M.; Franke, J. (2020b): Localization and grasping of small load carriers with autonomous unmanned aerial vehicles. In: T. Schüppstuhl, K. Tracht und D. Henrich (Hg.): *Annals of scientific society for assembly, handling and industrial robotics*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 241–250.
- Lindemann, U. (2009): *Methodische Entwicklung technischer Produkte*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

- Löffler, C. (2014): Autonome Flugdrohne. Evaluierung möglicher Systeme und praktische Implementierung einer Hinderniserkennung. Dipl.-Arb. Techn. Univ., Wien. Computertechnik.
- Loianno, G.; Kumar, V. (2018): Cooperative Transportation Using Small Quadrotors Using Monocular Vision and Inertial Sensing. In: *IEEE Robot. Autom. Lett.* 3 (2), S. 680–687. DOI: 10.1109/LRA.2017.2778018.
- Luo, Z.; Gu, R.; Poon, M.; Liu, Z.; Lim, A. (2022): A last-mile drone-assisted one-to-one pickup and delivery problem with multi-visit drone trips. In: *Computers & Operations Research* 148, S. 1–16. DOI: 10.1016/j.cor.2022.106015.
- Macrina, G.; Di Puglia Pugliese, L.; Guerriero, F.; Laporte, G. (2020): Drone-aided routing: A literature review. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 120, S. 1–25. DOI: 10.1016/j.trc.2020.102762.
- Magana, E.J.C.; Esteban-Campillo, D.; Scarlatti Jimenez, D.; Caballero, F. (2014): Device and method for use with unmanned aerial vehicles. Veröffentlichungsnr: US2014319272A1.
- Maghazei, O.; Lewis, M.; Netland, T. (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, O.; Netland, T. (2020): Drones in manufacturing: exploring opportunities for research and practice. In: *JMTM* 31 (6), S. 1237–1259. DOI: 10.1108/JMTM-03-2019-0099.
- Mahony, R.; Kumar, V.; Corke, P. (2012): Multirotor Aerial Vehicles: Modeling, Estimation, and Control of Quadrotor. In: *IEEE Robot. Automat. Mag.* 19 (3), S. 20–32. DOI: 10.1109/MRA.2012.2206474.
- March, S.T.; Smith, G.F. (1995): Design and natural science research on information technology. In: *Decision Support System* 15, S. 251–266.
- Martin, H. (2014): Transport- und Lagerlogistik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Martin, H. (2016): Transport- und Lagerlogistik. Systematik, Planung, Einsatz und Wirtschaftlichkeit. 10. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Matternet: Matternet unveils new Station Safe and secure drone delivery portal for hospital campuses. [Online] <https://mtrr.net/> [28.08.2020].
- Merkert, R.; Bushell, J. (2020): Managing the drone revolution: A systematic literature review into the current use of airborne drones and future strategic directions for their effective control. In: *Journal of air transport management* 89, S. 1–10. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2020.101929.

- Minnick, D.J.; Goldey, J.; Michel, K.; DeWhitt, S.; Jonesm, K.; Mann, J. (2017): Systems and Methods for Uav Docking and Recharging. Veröffentlichungsnr: US2018237161A1.
- Mohsan, S.; Othman, N.; Li, Y.; Alsharif, M.; Khan, M. (2023): Unmanned aerial vehicles (UAVs): practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends. In: *Intelligent service robotics*, S. 1–29. DOI: 10.1007/s11370-022-00452-4.
- Morlock, Friedrich; Kreggenfeld, Niklas; Louw, Louis; Kreimeier, Dieter; Kuhlenkötter, Bernd (2017): Teaching Methods-Time Measurement (MTM) for Workplace Design in Learning Factories. In: *Procedia Manufacturing* 9, S. 369–375. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.04.033.
- Moshref-Javadi, M.; Winkenbach, M. (2021): Applications and Research avenues for drone-based models in logistics: A classification and review. In: *Expert Systems with Applications* 177, S. 114854. DOI: 10.1016/j.eswa.2021.114854.
- Mueller, M. W.; D'Andrea, R. (2014): Stability and control of a quadrocopter despite the complete loss of one, two, or three propellers. In: *2014 IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA)*, S. 45–52. DOI: 10.1109/ICRA.2014.6906588.
- Namuduri, K.; Chaumette, S.; Kim, J.; Sterbenz, J. (2018): UAV networks and communications. Cambridge: Cambridge University Press.
- Nato Naval Armaments Group (2007): Standardization agreement: UAV systems airworthiness requirements (USAR) for north atlantic treaty organizations (NATO) military UAV systems. STANAG 4671, S. 8–11.
- Österreichische MTM-Vereinigung (2022): Ein System vorbestimmter Zeiten zur Analyse und Optimierung menschlicher Arbeit. [Online] <https://mtm.expert/> [31.07.2022].
- Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.H. (2005): Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer (Springer-Lehrbuch).
- Palafox, P.; Garzón, M.; Valente, J.; Roldán, J. J.; Barrientos, A. (2019): Robust Visual-Aided Autonomous Takeoff, Tracking, and Landing of a Small UAV on a Moving Landing Platform for Life-Long Operation. In: *Applied Sciences* 9 (2661), S. 1–21. DOI: 10.3390/app9132661.
- Peppers, K.; Rothenberger, M.; Tuunanen, T.; Vaezi, R. (2012): Design science research evaluation. In: *International Conference on Design Science Research in Information Systems*: Springer Berlin Heidelberg.

- Peppers, K.; Tuunanen, T.; Rothenberger, M.; Chatterjee, S. (2007): A design science research methodology for information system research. In: *Journal of management information systems* 24 (3), S. 45–78.
- Perez-Grau, F. J.; Martinez-de Dios, J. R.; Paneque, J. L.; Acevedo, J. J.; Torres-González, A.; Viguria, A. et al. (2021): Introducing autonomous aerial robots in industrial manufacturing. In: *Journal of Manufacturing Systems* 60, S. 312–324. DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.06.008.
- Pfohl, H.C. (2018): *Logistiksysteme. Betriebswirtschaftliche Grundlagen*. 9., neu bearbeitete und aktualisierte Auflage. Berlin: Springer Vieweg.
- Poll, D. (2017): *Drohnen in die Intralogistik: Geflügelter Lieferservice*. [Online] <https://www.produktion.de/trends-innovationen/drohnen-in-die-intralogistik-geflugelter-lieferservice-108.html> [02.01.2020].
- Pounds, P. E. I.; Bersak, D. R.; Dollar, A. M. (2011): Grasping from the air: Hovering capture and load stability. (ICRA 2011) ; Shanghai, China, 9 - 13 May 2011, S. 2491–2498. DOI: 10.1109/ICRA.2011.5980314.
- PricewaterhouseCoopers (2018): *Drones impact on the UK economy*. [Online] <https://www.pwc.co.uk/intelligent-digital/drones/Drones-impact-on-the-UK-economy-FINAL.pdf> [23.03.2020].
- Qi, J.; Kang, J.; Lu, X. (2017): Design and research of UAV autonomous grasping system. In: *2017 IEEE International Conference of Unmanned Systems (ICUS)*, S. 126–131. DOI: 10.1109/ICUS.2017.8278328.
- Ramdhani, A.; Ramdhani, M.; Amin, A. (2014): Writing a Literature Review Research Paper: A step-by-step approach. In: *International Journal of Basic and Applied Science* (Vol. 03, No. 01), S. 47–56.
- Rangarajan, M. (2018): *The Good, Bad, and AI Side of Using Drones for Asset Inspections*. [Online] <https://www.tcs.com/blogs/the-good-bad-ai-side-drone-use-for-asset-inspections> [08.04.2020].
- Ruggiero, F.; Lippiello, V.; Ollero, A. (2018): Aerial Manipulation: A Literature Review. In: *IEEE Robotics and Automation Letters* 3.3 3 (3), S. 1957–1964. DOI: 10.1109/LRA.2018.2808541.
- Schlick, C.; Bruder, R.; Luczak, H. (2018): *Arbeitswissenschaft*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Schuh, G.; Klappert, S. (2011): *Technologiemanagement*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

- Schüttler, T. (2014): Satellitennavigation. Wie sie funktioniert und wie sie unseren Alltag beeinflusst. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint; Springer Vieweg.
- Scott, J.; Scott, C. (2017): Drone Delivery Models for Healthcare. In: *Hawaii International Conference on System Sciences; HICSS* (5), S. 3297–3304.
- SEAT S.A. (2022): SEAT liefert Fahrzeugteile per Drohne. [Online] <https://www.seat.de/ueber-seat/news/unternehmen/seat-liefert-fahrzeugteile-per-drohne> [08.07.2022].
- Setty, K.; van Niekerk, T.; Stopforth, R. (2020): Generic gripper for an unmanned aerial vehicle. In: *Procedia CIRP* 91, S. 486–488. DOI: 10.1016/j.procir.2020.02.203.
- Simic, M.; Bil, C.; Vojisavljevic, V. (2015): Investigation in Wireless Power Transmission for UAV Charging. In: *Procedia Computer Science* 60, S. 1846–1855. DOI: 10.1016/j.procs.2015.08.295.
- Smith, A.; Dickinson, J. E.; Marsden, G.; Cherrett, T.; Oakey, A.; Grote, M. (2022): Public acceptance of the use of drones for logistics: The state of play and moving towards more informed debate. In: *Technology in Society* 68, S. 1–10. DOI: 10.1016/j.techsoc.2022.101883.
- Stavenuiter, R. A.J.; Birglen, L.; Herder, J. L. (2017): A planar underactuated grasper with adjustable compliance. In: *Mechanism and Machine Theory* 112, S. 295–306. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.08.001.
- Sullivan-Nightengale, D. (2015): Unmanned Aerial Systems: Risks & Opportunities in the Workplace. In: *Professional Safety* (60/3).
- Taschner, P.; Gruber, A.; Hayek, M.; Stein, S.; Sihm, W. (2021): Development of a drone transport concept in cooperation with a crowd sourcing delivery model for an efficient material transport. In: Proceedings of the 26th International Conference on Production Research. Taiwan, 18.-21.07.2021.
- Taschner, P.; Lehner, A.; Sihm, W. (2022): Mechatronic gripper system and delivery platform for the autonomous cargo transport with unmanned aerial vehicles. In: Proceedings of Transport Research Arena (TRA) Conference. Lisbon, 14.-17.11.2022.
- Tomic, T.; Schmid, K.; Lutz, P.; Domel, A.; Kassecker, M.; Mair, E. et al. (2012): Toward a Fully Autonomous UAV: Research Platform for Indoor and Outdoor Urban Search and Rescue. In: *IEEE Robot. Automat. Mag.* 19 (3), S. 46–56. DOI: 10.1109/MRA.2012.2206473.
- Um, J.S. (2019): Drones as Cyber-Physical Systems. Singapore: Springer Singapore.

- Vaishnavi, V.; Kuechler, W. (2015): Design science research methods and patterns. Innovating information and communication technology. Second edition. Boca Raton: CRC Press LLC.
- Valavanis, K.; Oh, P.; Piegl, L. (2010): Unmanned Aircraft Systems. International Symposium on Unmanned Aerial Vehicles. Berlin: Springer.
- VDI 2221-1:2019-11: Entwicklung technischer Produkte und Systeme.
- VDI 2519-01:2001-12: Vorgehensweise bei der Erstellung von Lasten-/Pflichtenheften.
- VDI 2689:2019-02: Leitfaden für Materialflussuntersuchungen.
- VDI 2695:2010-03: Ermittlung der Betriebskosten für Diesel- und Elektro-Gabelstapler.
- VDI 2710-1:2007-08: Ganzheitliche Planung von Fahrerlosen Transportsystemen.
- VDI/VDE 3694:2014-04: Lastenheft/Pflichtenheft für den Einsatz von Automatisierungssystemen.
- Vlahovic, N.; Knezevic, B.; Batalic, P. (2016): Implementing Delivery Drones in Logistics Business Process: Case of Pharmaceutical Industry. In: *World Academy of Science, Engineering and Technology* (Vol:10, No:12,), S. 4026–4033.
- Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten (Hg.) (2017): Handbuch Industrie 4.0 Bd.3. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Wagner, K. W.; Patzak, G. (2019): Performance Excellence. Der Praxisleitfaden zum effektiven Prozessmanagement. 3. Auflage. München: Hanser.
- Wang, L.; Zhang, D. (2017): Auto charging platform for unmanned aerial vehicle. Veröffentlichungsnr: CN106542109A.
- Wang, W.; Yu, C. Y.; Abrego Serrano, P. A.; Ahn, S.-H. (2020): Shape Memory Alloy-Based Soft Finger with Changeable Bending Length Using Targeted Variable Stiffness. In: *Soft robotics* 7 (3), S. 283–291. DOI: 10.1089/soro.2018.0166.
- Wannenwetsch, H. (2014): Integrierte Materialwirtschaft, Logistik und Beschaffung. 5., neu bearb. Aufl. Berlin: Springer Vieweg (Springer-Lehrbuch).
- Wenqing, L. (2016): Automatic charging device of contact unmanned aerial vehicle. Veröffentlichungsnr: CN205811623U.
- WiBotic (2020): Wireless Power Solutions for Robotic Systems. [Online] <https://www.wibotic.com/> [06.04.2020].
- WKO (2022): Brutto-Netto-Tabelle Angestellte und Arbeiter 2022. [Online] <https://www.wko.at/service/arbeitsrecht-sozialrecht/brutto-netto-tabelle-angestellte-und-arbeiter-2022.html> [22.06.2022].

- Wöltje, J. (2008): Betriebswirtschaftliche Formeln. 1. Auflage. München: Haufe Verlag (Taschenguide).
- Wrycza, P.; Rotgeri, M.; Hompel, M. ten (2017): Spielzeitreduktion autonomer Drohnen für den Transport eiliger Güter durch den Einsatz automatisierter Lastaufnahmemittel im Kontext eines ganzheitlich automatisierten Gesamtsystems.
- Wu, N.; Chacon, C.; Hakl, Z.; Petty, K.; Smith, D. (2019): Design and implementation of an unmanned aerial and ground vehicle recharging system. In: *IEEE National Aerospace and Electronics Conference (NAECON)*, S. 163–168. DOI: 10.1109/NAECON46414.2019.
- Wubben, J.; Fabra, F.; Calafate, C. T.; Krzeszowski, T.; Marquez-Barja, J. M.; Cano, J.; Manzoni, P. (2019): Accurate Landing of Unmanned Aerial Vehicles Using Ground Pattern Recognition. In: *Electronics* 8 (1532), S. 1–16. DOI: 10.3390/electronics8121532.
- Yi, Y.; Zhongjing, Z.; Chao, S.; Kuan, Z.; Mengyin, F. (2017): Vehicle-mounted hoisting fixed platform of rotor-wing type unmanned aerial vehicle. Veröffentlichungsnr: CN106904288A.
- Yoo, H. D.; Chankov, S. M. (2018): Drone-delivery Using Autonomous Mobility: An Innovative Approach to Future Last-mile Delivery Problems. In: *2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering & Engineering Management*, S. 1216–1220.
- Zang, Z.; Ma, J.; Li, C.; Wang, H.; Jing, R.; Shi, Y. (2020): A design of Automatic UAV Dock Platform System. In: *J. Phys.: Conf. Ser.* 1650 (2), S. 1–7. DOI: 10.1088/1742-6596/1650/2/022068.
- Zhang, X.; Qiu, L.; Ding, P. (2019): Foot frame sleeve for unmanned aerial vehicle, connecting component, and charging system and method for unmanned aerial vehicle. Veröffentlichungsnr: WO2019061519A1.
- Zhao, N.; Luo, Y.; Wang, G.; Shen, Y. (2022): A deployable articulated mechanism enabled in-flight morphing aerial gripper. In: *Mechanism and Machine Theory* 167, S. 104518. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2021.104518.

12.1 Eigene unveröffentlichte Quellen

Philipp, Wrycza: persönliche Korrespondenz, Fraunhofer Gesellschaft – Institut für Materialfluss und Logistik IML, 29.09.2021

Jorge Luis Marinez, Gilbert: persönliche Korrespondenz, SEAT S.A, 20.10.2021

13 Anhang

Anhang 1: Publikationsverzeichnis des Autors (eigene Darstellung)

Titel	Autoren	Journal/Konferenz	Zusammenhang mit der Dissertation
Development of a drone transport concept in cooperation with a crowd sourcing delivery model for an efficient material transport	Patrick Taschner Alexander Gruber Matthias Hayek Sandra Stein Wilfried Sihm	Proceedings of the 26th International Conference on Production Research 2021	Diese Veröffentlichung befasst sich mit der notwendigen Anforderungsanalyse zur Bestimmung der transportierenden Güter und stellt außerdem die zeitliche Betrachtungsweise der Transportaufträge mittels MTM-Methode für Stapler und Drohne dar.
Mechatronic gripper system and delivery platform for the autonomous cargo transport with unmanned aerial vehicles	Patrick Taschner Andreas Lehner Wilfried Sihm	Proceedings of Transport Research Arena (TRA) Conference 2022 paper in publication	Die Veröffentlichung stellt bestehende Konzepte in der Wissenschaft und Technik im Hinblick auf die automatisierte Transportgutaufnahme dar. Zusätzlich wird auf die Vorgangsweise zur Entwicklung der Transportaufnahmeeinheit eingegangen.
Development of a fully automated parcel locker for the transshipment of parcels from unmanned aerial vehicles to crowd members	Patrick Taschner Matthias Hayek Michael Scsepka Tobias Walk Christian Karner Sandra Stein Martin Riester	Transportation Research Part C: Emerging Technologies Special issue: Innovative models and methods for managing transport logistics 2023 paper under review	Diese Veröffentlichung beleuchtet den Stand der Technik und Wissenschaft im Bereich von Lande- und Übergabeplattformen in Kooperation mit den Anforderungen der Transportaufnahmeeinheit auf der Drohne für die automatisierte Aufnahme von spezifischen Transportgütern.

Anhang 2: Sicherheitscheckliste zur präventiven Fehlervermeidung (eigene Darstellung)

Sicherheitscheckliste		
		Datum:
Vor dem Start		
I	Dokumente	
a.	Kopie Betriebsbewilligungsbescheid	
b.	Kopie Luftfahrtsnachweis	
c.	Kopie medizinische Tauglichkeit	
d.	Sichtbarkeit des Datenschilds auf der Drohne	
e.	Haftpflichtversicherungsnachweis	
f.	Betriebsaufzeichnungen (Flugbuch)	
II	Meteorologische Bedingungen	
a.	Windstärke, Windrichtung	
b.	Wolkenbedeckung, Niederschlag	
c.	Sichtbedingungen, Lichtverhältnisse	
III	Tageszeiten (Tag/Nacht)	
a.	Mo bis Fr 08:00-18:00 oder Sa 08:00-14:00 Uhr	
b.	Nach Morgendämmerung / vor Abenddämmerung	
IV	Örtliche Gegebenheiten	
a.	Hindernisse und Personen identifiziert	
b.	Angemessene Rückkehrflughöhe für FailSafe RTH	
V	Luftraumstruktur überprüfen	
a.	Flugverkehrsvorschriften beachtet	
b.	Luftraumbeschränkungen beachtet	
VI	Betriebstüchtigkeit Piloten	
a.	Kein Einfluss durch Alkohol oder Medikamente	
Montage Drohne		
VII	Überprüfung Bauteile	
a.	Propeller eingerastet	
b.	Kamera und Sensorik befestigt	
c.	Akkus betriebsbereit	
d.	Sicht- und Ultraschallsensoren nicht blockiert	
e.	Fallschirm kontrolliert	
f.	Überprüfung auf Beschädigungen	
g.	Kompass kalibriert (falls notwendig)	
VIII	Reichweitenprobe	
a.	Signalübertragung überprüft	
Unterschrift Pilot		

14 Curriculum Vitae

Persönliche Daten

Name	Dipl.-Ing. Patrick Taschner
Staatsangehörigkeit	Österreich
Geburtsdatum und Geburtsort	20.12.1991, Wien

Beruflicher Werdegang

01/2022 – Heute	Projektleiter in der Fachgruppe Digitale Logistik und Automatisierung, Geschäftsbereich Logistik- und Supply Chain Management, Fraunhofer Austria Research GmbH, Wien
07/2019 – 12/2021	Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Fachgruppe Digitale Logistik und Automatisierung, Geschäftsbereich Produktions- und Logistikmanagement, Fraunhofer Austria Research GmbH, Wien
05/2019 – 07/2019	Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Fachgruppe Intralogistik und Materialwirtschaft, Geschäftsbereich Produktions- und Logistikmanagement, Fraunhofer Austria Research GmbH, Wien
02/2018 – 05/2019	Hilfswissenschaftlicher Mitarbeiter in der Fachgruppe Intralogistik und Materialwirtschaft, Geschäftsbereich Produktions- und Logistikmanagement, Fraunhofer Austria Research GmbH, Wien

Akademische Laufbahn

2020 – 2023	Doktoratsstudium der Technischen Wissenschaften Wirtschaftsingenieurwesen – Maschinenbau, Technische Universität Wien
2012 – 2019	Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen – Maschinenbau, Technische Universität Wien Bachelorstudium Wirtschaftsingenieurwesen – Maschinenbau, Technische Universität Wien