

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 20261 N

Thema

Potenziale und Voraussetzungen für den innerbetrieblichen Einsatz von Drohnen zum Materialtransport

Berichtszeitraum

01.11.2018 - 31.10.2020

Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik e.V. – BVL

Forschungseinrichtung(en)

Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH

Hannover, 15.11.2020

Ort, Datum

Benjamin Fritsch

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und
Projektleiter der Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

Thema.....	1
Berichtszeitraum.....	1
Forschungsvereinigung	1
Forschungseinrichtung(en).....	1
1. Zusammenfassung	3
2. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung.....	3
3. Gegenüberstellung angestrebter Teilziele und erzielter Ergebnisse.....	4
4. Erzielte Ergebnisse.....	6
4.1 Analyse von technischen sowie rechtlichen Rahmenbedingungen und Ableitung von Use-Cases für Drohnen.....	6
4.2 Ableitung von technischen, rechtlichen und betrieblichen Hindernissen des Drohneneinsatzes für den innerbetrieblichen Materialtransport	11
4.3 Ableitung von Anforderungen an die Fabrik des anwendenden KMU für den innerbetrieblichen Materialtransport mit einer Drohne	13
4.4 Ableitung von Anforderungen an die Drohnenhersteller für den innerbetrieblichen Materialtransport mit einer Drohne	15
4.5 Wirtschaftliche und logistische Potentialabschätzung des innerbetrieblichen Drohneneinsatzes für definierte Use-Cases	16
4.6 Implementierung der Ergebnisse in einen Softwaredemonstrator	24
4.7 Projektmanagement und Dokumentation	27
5. Verwendung der Zuwendung	27
6. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	27
7. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen	28
8. Veröffentlichungen und Transfermaßnahmen	29
9. Durchführende Forschungsstelle	32
10. Förderhinweis	33
Anhang.....	34
Anhang 1: Morphologischer Kasten.....	34
Anhang 2: Zugrunde gelegte Daten der Fördermittel.....	35
Anhang 3: Risiken und Hindernisse.....	36
Anhang 4: Betriebliche sowie rechtliche Hindernisse.....	38
Anhang 5: Risk-Map Schaden (Wahrscheinlichkeit und Auswirkung)	39
Anhang 6: Zusammenfassung Kriterien der Nutzwertanalyse.....	43
Anhang 7: Anforderungen Fabrik.....	44
Anhang 8: Anforderungen Drohne.....	46
Literaturverzeichnis	47

1. Zusammenfassung

Bisher existierte aufgrund der Neuheit der Drohnentechnologie keine Vorarbeit, welche Potentiale und Anforderungen an den innerbetrieblichen Einsatz von Drohnen¹ zum Materialtransport untersucht. Somit konnten KMU keine fundierten Entscheidungen treffen, ob der Einsatz von Drohnen für bestimmte Anwendungsfälle für sie möglich bzw. praktikabel und sinnvoll sein kann. Daher wurden im Forschungsprojekt zunächst die rechtlichen, technischen und betrieblichen Rahmenbedingungen und Hindernisse des Einsatzes von Drohnen für den innerbetrieblichen Materialtransport im Produktionsbetrieb identifiziert. Da für die Verwendung von Drohnen innerhalb von Fabriken besondere Voraussetzungen gelten, wurde zunächst ein Überblick über die technischen Eigenschaften bisheriger Transportdrohnen geschaffen. Auf Basis der Rahmenbedingungen wurden im Folgenden technische, betriebliche und rechtliche Hindernisse und Risiken, wie bspw. die geringe Akkulaufzeit, die Aufwirbelung von Staub oder das Überfliegen von Fabrikmitarbeitern identifiziert und bewertet. Aus den identifizierten und bewerteten Hindernissen und Risiken wurden Anforderungen an die Fabrik bzw. Produktion sowie an zukünftige Drohnen für den innerbetrieblichen Einsatz von Drohnen zum Materialtransport abgeleitet. Zur Abschätzung des wirtschaftlichen und logistischen Potentials des Einsatzes von Drohnen für den innerbetrieblichen Materialtransport wurde ein Vorgehen entwickelt. Zur Übersichtlichkeit und für einen einfachen Zugang zu den Ergebnissen, wurden diese in einen Softwaredemonstrator implementiert. Der Softwaredemonstrator wurde dann mit Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses (PA) validiert.

Durch die Eingabe von unternehmensindividuellen Werten kann nun der logistische und wirtschaftliche Nutzen des Einsatzes von Drohnen zur Materialbereitstellung aufwandsarm ermittelt werden. Insgesamt zeigt sich, dass Drohnen eine sinnvolle Ergänzung zu bestehenden Fördermitteln darstellen. Vor allem für kleine, leichte und dringende Transportaufgaben sind diese besonders geeignet.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

2. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Infolge der Globalisierung und der Dynamik in der Technologieentwicklung nimmt der Kostendruck stetig zu [Pfo18]. Transportkosten verursachen dabei einen erheblichen Anteil an den Materialfluss- und Logistikkosten und besitzen damit unmittelbar auch Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit eines Unternehmens [Fis97]. Zudem sind ungeplante Materialtransporte für fehlendes Material oder Ersatzteile bei Reparaturen aufgrund der geringen Transportintensität sowie häufig langen Transportstrecken sehr zeit- und kostenaufwändig [Wan14]. Der Optimierung des innerbetrieblichen Transports kommt deshalb eine immer größer werdende Bedeutung zu. Um diesen

¹ Der Begriff Drohne ist eine umgangssprachliche Bezeichnung für unbemannte Fluggeräte. Derzeit besteht keine einheitliche und rechtlich anerkannte Definition von Drohnen [Chr18]. In der Literatur werden bspw. folgende Begriffe verwendet: Multikopter, Remotely Operated Aircraft (ROA), Remotely Piloted Vehicle (RPV), Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Remotely Piloted Aircraft (RPA) und Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS). Im Dokument wird jedoch aus Gründen der Vereinfachung und in Anlehnung an das Antragsdokument der Begriff Drohne einheitlich verwendet.

Herausforderungen begegnen zu können, sind viele Unternehmen auf der Suche nach erfolgversprechenden Wegen zur Optimierung ihrer Transporttechnik [Arn08].

Drohnen im Sinne von unbemannten Multikoptern mit mehreren Rotoren stellen eine innovative Fördertechnik zum innerbetrieblichen Materialtransport dar. Die Drohnentechnologie gehört zu den bedeutenden technologischen Innovationen der vergangenen Jahre. Die Drohnentechnologie eröffnet neue, bislang unbekannte Perspektiven in zahlreichen Anwendungsfeldern [Chr18]. Mit der Steigerung der Produktqualität dringen Drohnen auf ein professionelles Niveau in wirtschaftlich relevante Einsatzgebiete vor [Lan18]. Durch die Nutzung des Luftraums ergeben sich mit Drohnen neue Transportwege. Güter können teilweise schneller als mit konventionellen Flurfördermitteln transportiert werden [Wry17]. Der aktuelle technische Entwicklungsstand von Drohnen (z. B. Sicherheitssysteme gegen Kollision oder Absturz, autonome Flugfunktionen sowie mögliches Transportgewicht) ließe grundsätzlich den Einsatz im Produktionsbetrieb zu. Eine Bewegung in der dritten Dimension und die Nutzung des bisher ungenutzten Luftraumes durch Drohnen innerhalb von Fabriken wurde bisher aber nur in Pilotanwendungen getestet [Pol17]. Dem konkreten Einsatz von Drohnen im Produktionsbetrieb von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) stehen noch Risiken und Hindernisse entgegen (z. B. Staubaufwirbelung, Akkulaufzeit, Rentabilität, Rechtslage). Ungeklärt ist weiterhin, welche rechtlichen und somit auch versicherungstechnischen, technischen und betrieblichen Voraussetzungen von Drohnenherstellern und anwendenden KMU für den Einsatz im Produktionsbetrieb geschaffen werden müssen. Nicht zuletzt besteht Unklarheit darüber, welche wirtschaftlichen und logistischen Potentiale dadurch entstehen.

Bisher konnten KMU daher keine fundierte Entscheidung treffen, ob der Einsatz von Drohnen für den innerbetrieblichen Materialtransport in bestimmten Anwendungsfällen für sie möglich bzw. praktikabel und sinnvoll ist.

Aus den genannten Defiziten ergab sich die Notwendigkeit der Untersuchung von Potentialen und Anforderungen an den Einsatz von Drohnen.

3. Gegenüberstellung angestrebter Teilziele und erzielter Ergebnisse

Das Forschungsvorhaben basierte auf der Hypothese, dass durch eine Erforschung der Rahmenbedingungen und die Ableitung von Handlungsempfehlungen der Einsatz von Drohnen zum innerbetrieblichen Materialtransport bei KMU gefördert und beschleunigt wird.

Das abgeleitete Forschungsziel war daher die Identifikation von Potentialen und Voraussetzungen für den innerbetrieblichen Einsatz von Drohnen zum Materialtransport. Das Vorhaben sollte damit erstmalig klären, ob der innerbetriebliche Einsatz von Drohnen zum Materialtransport für bestimmte Anwendungsfälle in KMU praktikabel bzw. sinnvoll sein kann.

Teilziel 1

- Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag: Als erstes Teilziel sind Rahmenbedingungen und Hindernisse des Einsatzes von Drohnen für den innerbetrieblichen Materialtransport im Produktionsbetrieb zu ermitteln. Diese sind in rechtlicher, technischer und betrieblicher Dimension zu identifizieren und zu bewerten.

- Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens: Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden den Rahmenbedingungen und Hindernisse gemeinsam mit dem PA analog einer Fehlermöglichkeits-Einflussanalyse ermittelt. Zur besseren Übersichtlichkeit wurden die ermittelten Hindernisse und daraus folgende Risiken zusätzlich in Flugphasen unterteilt. Die Bewertung der Auftretenswahrscheinlichkeit sowie des Schadensausmaßes wurde im Vergleich zum ursprünglich beschriebenen Vorhaben tiefer differenziert. Zusätzlich zu dem ursprünglich im Antrag geforderten allgemeinen Schadensausmaß wurde eine Unterteilung vorgenommen. Dazu wurden in Absprache mit dem PA die Schadenskategorien *Prozess*, *Drohne als technisches Gerät* selbst, das *Transportgut* sowie der *Schaden für den Menschen* als Mitarbeiter ermittelt und bewertet. Für die rechtliche, technische und betriebliche Dimension wurde jeweils ein Ishikawa-Diagramm zur übersichtlichen Darstellung erstellt. Das erste Teilziel wurde erreicht.

Teilziel 2

- Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag: Auf Basis der identifizierten Hindernisse und Rahmenbedingungen aus Teilziel 1 sind Veränderungen aufzuzeigen, die ein KMU in seiner Fabrik vornehmen muss, um den Materialtransport via Drohne zu ermöglichen. Da auch Drohnen technische Hindernisse aufweisen, sind analog Anforderungen an Drohnen zu formulieren sodass diese den Hindernissen entgegenwirken und damit den Bedingungen entsprechen.
- Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens: Für die Erfüllung des zweiten Teilziels wurden die aus Teilziel 1 ermittelten und bewerteten technischen, rechtlichen und betrieblichen Rahmenbedingungen und Hindernisse in konkrete Anforderungen an Fabrik sowie das Fluggerät Drohne selbst überführt. Dazu wurde gemeinsam mit Vertretern von Fabrikbetreibern, Drohnenanbietern, Versicherungen und Berufsgenossenschaften sowie Beratungsunternehmen im Rahmen des PA zusammengearbeitet. Zur Dokumentation dieser Anforderungen wurde für Fabrik sowie Drohne je eine Anforderungsliste als Lastenheft erstellt. Das Lastenheft an die Fabrik wurde zusätzlich unterteilt in kurzfristige Sofortmaßnahmen und Langzeitmaßnahmen. Eine Begründung wurde den Anforderungsformulierungen nicht gesondert hinzugefügt, da automatisch eine Verletzung der Anforderung in den Auswirkungen des Fehlers und damit im Schaden mündet. Im Wesentlichen zeigt sich, dass eine Begegnung von Drohne und Mitarbeiter aktuell das höchste wahrgenommene Sicherheitsrisiko darstellt. Daher zielt hier die Mehrheit der Maßnahmen auf die Reduzierung ebendieses Risikos ab. Das zweite Teilziel wurde erreicht.

Teilziel 3

- Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag: Teilziel 3 stellt ein Vorgehen zur wirtschaftlichen und logistischen Potentialabschätzung des Einsatzes von Drohnen für den innerbetrieblichen Materialtransport und dessen Validierung anhand von fünf definierten Use-Cases dar. Für die Potentialabschätzung sind für Anschaffung, Einrichtung und Betrieb die jeweils benötigten Kostenarten sowie der Nutzen identifiziert. Durch branchentypische Eingabewerte können KMU im Folgenden betriebswirtschaftliche Kennzahlen ermitteln und so die Wirtschaftlichkeit des innerbetrieblichen Materialtransports über Drohnen abschätzen.
- Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens: Für die Erreichung von Teilziel 3 wurden Nutzwertanalyse und statische Investitionsrechenverfahren verknüpft. Somit konnte ein

Vorgehen der wirtschaftlichen und logistischen Potentialabschätzung entwickelt werden, welches mit einfachen Mitteln und ohne tief detaillierte Datenaufnahme eine erste Indikation zur Vorteilhaftigkeit des Einsatzes von Drohnen zum innerbetrieblichen Materialtransport geben kann. Branchentypische Eingabewerte konnten im Rahmen des Forschungsprojektes nicht ermittelt werden, da Daten wie bspw. Stillstandskosten von den Unternehmen geheim gehalten werden. Anstatt branchentypischer Eingabewerte wurde jedoch im Vorgehen eine individuelle Möglichkeit geschaffen. So können Nutzer unternehmensspezifische Werte bei der Potentialermittlung eingeben. Diese Werte werden bei der Berechnung mitberücksichtigt. Die geschickte Koppelung von quantitativen und qualitativen Methoden zur Wirtschaftlichkeitsbewertung zeigt im Allgemeinen, dass Drohnen vor allem in Use-Cases mit kleinen, leichten und/oder dringend benötigten Teilen für den Materialtransport im Kostenvorteil sind. Das dritte Teilziel wurde erreicht.

Teilziel 4:

- Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag: Ein Softwaredemonstrator macht die Ergebnisse aus Teilziel 3 den produzierenden KMU anwendbar. Durch die Eingabe von unternehmensindividuellen und fallspezifischen Werten kann ein KMU den logistischen und wirtschaftlichen Nutzen des Einsatzes von Drohnen zum Materialtransport aufwandsarm ermitteln.
- Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens: Zur Erreichung von Teilziel 4 wurden die Ergebnisse in einen Softwaredemonstrator übertragen, sodass es Vertretern von KMU als Anwender möglich ist, die Ergebnisse der ersten drei Teilziele leicht und aufwandsarm für den eigenen Anwendungsfall anzuwenden. Anschließend wurde der Softwaredemonstrator durch den PA getestet und an entsprechenden Stellen angepasst bzw. verbessert. Das vierte Teilziel und somit das Gesamtziel des Projektes wurden erreicht.

4. Erzielte Ergebnisse

4.1 Analyse von technischen sowie rechtlichen Rahmenbedingungen und Ableitung von Use-Cases für Drohnen

Als Ergebnis des ersten Arbeitspaketes liegt ein morphologischer Kasten mit möglichen technischen Eigenschaften von Drohnen zum Materialtransport vor. Beispielhaft ist ausschnittsweise in Tabelle 1 eine von einem Mitglied des PA zum Materialtransport genutzte Drohne in den entwickelten morphologischen Kasten eingeordnet. Der morphologische Kasten in vollständiger Ausprägung befindet sich in Anhang 1.

Zusätzlich wurden die notwendigen Versicherungen zur Haftpflicht sowie weiteren möglichen Versicherungen (wie bspw. Versicherung gegen Betriebsausfall) ermittelt. Nach Absprache mit dem PA sind darüber hinaus aktuell keine weiteren obligatorischen Versicherungen beim Drohneneinsatz bekannt. Das Analyseergebnis bezüglich der rechtlichen Aspekte wurde mit der Liste in Tabelle 2 zu betroffenen Rechtsgrundlagen dargelegt (ohne Gewähr). Die Gesetze und deren Inhalt sind dabei eingeordnet in Rubriken. Diese sind allgemeine, übergeordnete Gesetze sowie Gesetze und Richtlinien, die speziell indoor in Fabriken gelten sowie outdoor, sobald außerhalb von Gebäuden geflogen wird.

Tabelle 1: Ausschnitt des morphologischen Kastens zu technischen Merkmalen von Drohnen (mit beispielhaft eingeordneter Drohne eines PA-Mitgliedes)

Technik	Ausprägungen			
Maximales Abfluggewicht	<0,25 kg	0,25-2 kg	2-5 kg	5-25 kg
Maximale Zuladung	<0,1 kg	0,1-1 kg	1-2,5 kg	>3 kg
Batterielaufzeit ohne Zuladung	<15 min	15-25 min	25-35 min	>35 min
Batterielaufzeit mit max. Zuladung	<5 min	5-15 min	15-25 min	>25 min
Höchstgeschwindigkeit	<5 m/s	5-10 m/s	10-15 m/s	>15 m/s
Automatisierte Steuerung	Ja		Nein	
Batterieaufladung	Manueller Wechsel		Automatischer Wechsel	Ladestation
Lastwechsel	Manuell		Automatisch	Stationär
Bauweise	Ausprägungen			
Drohnerdurchmesser	<500 mm	500-1000 mm		
Propellerdurchmesser	<200 mm			

Allgemein ist festzuhalten, dass wie auch zur Zeit der Antragstellung bisher keine einheitliche Rechtsgrundlage für den Betrieb von Drohnen innerhalb von Fabriken existiert. Die ermittelten Gesetze und Richtlinien geben daher lediglich eine Hilfe zur Orientierung, welche Rechtsgrundlagen prinzipiell existieren.

Tabelle 2: Gesetze und Richtlinien den Drohnenflug betreffend

	Bezeichnung
Allgemeine, übergeordnete Gesetze	BDSG – Bundesdatenschutzgesetz
	BattG – Batteriegesetz
	DeIVO (EU) 2019/945
	DVO (EU) 2019/947
Außenbereich	Deutsche Flugsicherung NfL
	LuftVG – Luftverkehrsgesetz
	Luft-VO Luftverkehrsordnung
	LuftVZO – Luftverkehrszulassungsordnung
	Verordnung des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI, 2017) „Neue Drohnenverordnung“
	Verordnung zur Regelung des Betriebs von unbemannten Fluggeräten vom 30. März 2017
Innenbereich / Fabrik	ArbSchG – Arbeitsschutzgesetz
	ArbStättV – Arbeitsstättenverordnung
	BetrSichV – Betriebssicherheitsverordnung
	Maschinenrichtlinie 2006/42/EG

Als Use-Cases wurden in Zusammenarbeit mit dem PA fünf Transportaufgaben erarbeitet, die mit unterschiedlichen Fördermittelalternativen bearbeitet werden können. Dabei handelt es sich um die fünf Use-Cases

- Materialtransport vom Zwischenlager an Montagelinie,
- Überwindung von Hindernissen bei Umbau,
- Transport zwischen zwei Fertigungsschritten,
- Fehlteiltransport mit Umschlag sowie
- Eiltransport eines Fehlteils aus Ersatzteillager in Produktionshalle.

Für eine bessere Vergleichbarkeit in den Ergebnissen wurde diesen Use-Cases ein Szenario zugrunde gelegt, welches eine Vergleichbarkeit der einzelnen Use-Cases ermöglicht. Für die Drohne wird im Szenario angenommen, dass Lastaufnahme sowie -abgabe automatisiert erledigt wird. Für das zugrunde gelegte Szenario wurde zudem ein Hallenlayout konstruiert, welches eine Produktionshalle mit den Maßen 130 x 170 Metern wie in Bild 1 zeigt.

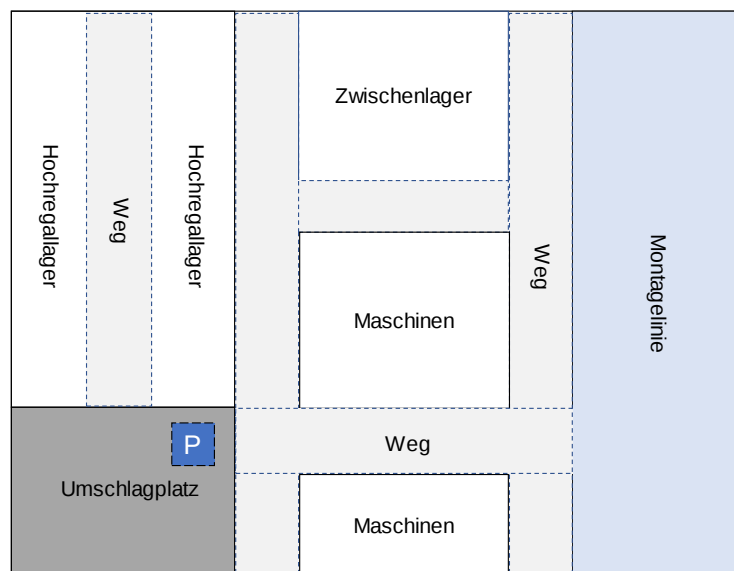


Bild 1: Basisszenario Hallenlayout für Use-Cases

Das linke Drittel der Halle besteht aus einem Hochregallager, welches sich bis zur 30 Meter hohen Hallendecke erstreckt. Unterhalb des Lagers befindet sich ein Umschlag- sowie ein Parkplatz. Dort werden Teile aus dem Hochregallager umgeschlagen und von dort aus an ihren Weiterverarbeitungsplatz befördert. Der Parkplatz (Punkt P) wird als Startplatz der Fördermittel zu Beginn jeder Transportaufgabe angenommen. Der mittlere Teil der Halle besteht aus einem kleineren Zwischenlager und zwei Maschinenanlagen, die mit Straßen miteinander verbunden sind. Das rechte Drittel der Produktionshalle stellt eine Montagelinie dar.

Es werden zunächst drei Anwendungsfälle präsentiert, bei denen es sich um Kostenfälle handelt. Anschließend werden zwei Dringlichkeitsfälle beschrieben. Punkt Q stellt dabei die Quelle, Punkt S die Senke jeder Transportaufgabe dar. Die Strecke der konventionellen Transportlösung ist in den Use-Cases hellblau im Layout gekennzeichnet, der Weg der Drohne hellgrün. Die zugrunde gelegten technischen Daten der in der Bewertung verwendeten Fördermittel sind in Anhang 2 nachzuvollziehen.

Use-Case 1: Materialtransport vom Zwischenlager an Montagelinie

Für Use-Case 1 wird ein Transportprozess aus der regulären Fertigung angenommen. Es soll eine Palette mit 10 Kleinteilen aus dem Zwischenlager an die Montagelinie befördert werden (siehe Bild 2). Die Teile wiegen jeweils fünf Kilogramm. Insgesamt besitzt das Fördergut ein Gewicht von 50 Kilogramm. Die Anzahl der Transporte hängt von der maximalen Traglast des Fördermittels ab, da angenommen wird, dass eine Pufferung des Transportguts im Zwischenlager möglich ist. Es können also sowohl alle 10 Teile auf einmal als auch einzeln transportiert werden.



Bild 2: Transportwege von Use-Case 1

Der Ablauf der konventionellen Transportlösung sieht dabei wie folgt aus: Nach Auftragseingang begibt sich ein Mitarbeiter mit einem Elektro-Gabelstapler vom Parkplatz zur Quelle, nimmt das Transportgut auf und fährt zur Senke an der Montagelinie. Dort wird das Gut abgeliefert und der Mitarbeiter fährt wieder zurück zum Parkplatz. Damit gilt die Transportaufgabe als erledigt. Der wesentliche Unterschied zwischen Prozessablauf konventionell bzw. mit Drohne ist, dass der Prozess mit Drohne wie im Szenario beschrieben automatisiert abläuft.

Use-Case 2: Überwindung von Hindernissen bei Umbau

Die Ausgangssituation des zweiten Anwendungsfalls ist Use-Case 1 identisch. Die Quelle sowie die Senke befinden sich am gleichen Ort.

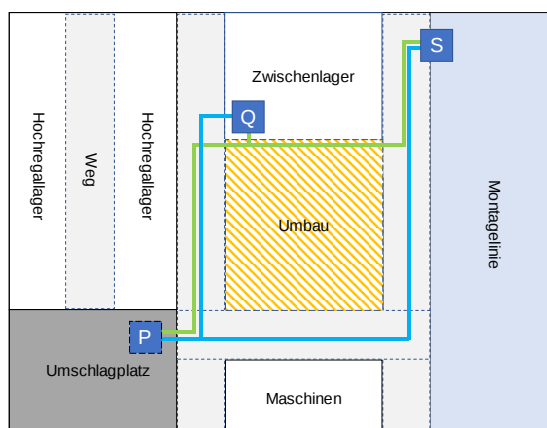


Bild 3: Transportwege von Use-Case 2

In Use-Case 2 soll jedoch nur ein Bauteil mit einem Gewicht von fünf Kilogramm aus dem Zwischenlager an die Montagelinie transportiert werden. Außerdem wird in diesem Use-Case angenommen, dass die mittlere Maschinenanlage umgebaut wird. Der Umbau beschränkt die Nutzung des Wegs zwischen Maschine und Zwischenlager, sodass konventionelle, bodengebundene Fördermittel einen Umweg fahren müssen. Für den Transport mit Drohne hingegen ist es möglich, die Hindernisse auf dem Weg zu überfliegen, um die Senke auf dem schnellsten Weg zu erreichen (siehe Bild 3). Als konventionelles Fördermittel wird ein Elektro-Schlepper verwendet.

Use-Case 3: Transport zwischen zwei Fertigungsschritten

Der Anwendungsfall des Use-Case 3 beschreibt eine Transportaufgabe zwischen zwei Fertigungsschritten.



Bild 4: Transportwege von Use-Case 3

Dabei soll ein fünf Kilogramm schweres Bauteil von einer Maschine zur nächsten transportiert werden. Als konventionelle Transportlösung wird die Förderaufgabe von einem Fahrerlosen Transportsystem (FTS) durchgeführt. Entgegen der vorherigen Anwendungsfälle befinden sich die Fördermittel zu Beginn der Transportaufgabe bereits an der Quelle und können das Fördergut direkt aufnehmen. Nach Fahrt bzw. Flug zur Senke und Abgabe des Transportguts begibt sich das Fördermittel wieder zur Quelle und ein Transportzyklus ist vollzogen. Die Strecke zwischen Quelle und Senke liegt dabei für beide Fördermittelalternativen bei 60 Metern (siehe Bild 4).

Use-Case 4: Fehlteiltransport mit Umschlag

Im vierten Use-Case handelt es sich um einen Dringlichkeitsfall (siehe Bild 5). Ein fünf Kilogramm schweres Fehlteil soll schnellstmöglich von seinem Lagerplatz aus dem Hochregallager aus 10 Meter Höhe an die Montagelinie transportiert werden. Die Drohne startet ebenfalls von Punkt U.

Die Drohne fliegt nach Eingang des Eilauftrags zum Lagerplatz des Teils, entnimmt es automatisch mit einem Greifarm aus dem Regal und bringt es auf dem schnellsten Weg zur Senke an die Montagelinie. Die zurückzulegende Distanz zwischen Quelle und Umschlagplatz beträgt dabei 100 Meter und zwischen Umschlagplatz und Senke 120 Meter für Drohne als auch für die Fördermittelalternative.

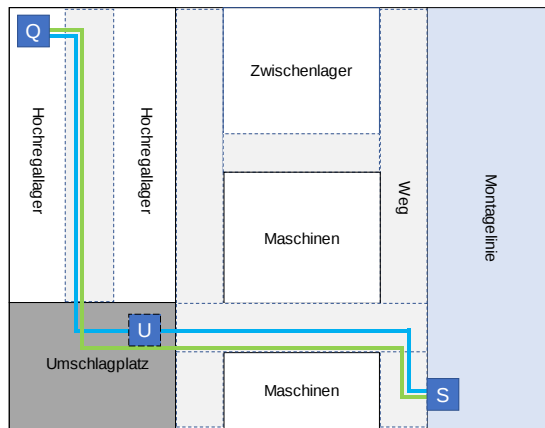


Bild 5: Transportwege von Use-Case 4

Use-Case 5: Eiltransport eines Fehlteils aus Ersatzteillager in Produktionshalle

Der letzte betrachtete Use-Case unterscheidet sich von den vorherigen, da es sich hierbei um eine Transportaufgabe outdoor und damit außerhalb der Fabrik handelt. Ein Fehlteil soll aus einem Ersatzteillager in eine andere Produktionshalle gebracht werden (siehe Bild 6). Zwischen Quelle und Senke liegt jedoch eine weitere Produktionshalle. Diese muss von dem Outdoor-Schlepper umfahren werden. Die Entfernung liegt dabei bei 600 Metern. Die Drohne hingegen kann die Fabrik überfliegen, um zur Senke zu gelangen, sodass sie nur eine Strecke von 300 Metern zurücklegen muss. Die Drohne nimmt dabei eine Flughöhe von 50 Metern auf, um die Halle zu überfliegen. Der Weg der Drohne wurde zudem so gewählt, dass sich die Drohne möglichst kurz über Straßen aufhält, um das Unfallrisiko für andere Verkehrsteilnehmer zu minimieren.

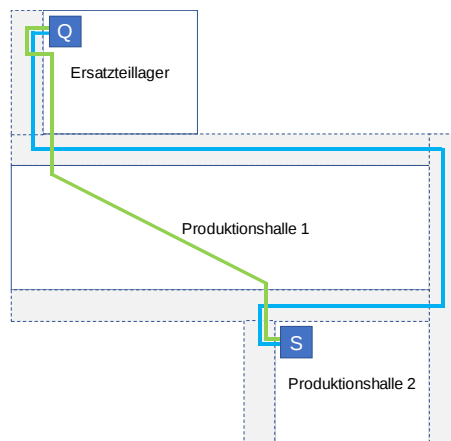


Bild 6: Transportwege von Use-Case 5

4.2 Ableitung von technischen, rechtlichen und betrieblichen Hindernissen des Drohneneinsatzes für den innerbetrieblichen Materialtransport

Als Ergebnis von Arbeitspaket 2 sind die Hindernisse in einer Liste nach dem Vorbild von Tabelle 3 zusammengefasst. Die Hindernisse setzen sich aus einem potentiellen Fehler und dessen Bewertung nach dem Vorbild einer Risikobewertung zusammen. Dazu besteht diese Bewertung aus

dem Schadensausmaß des Fehlers und dessen Auftretenswahrscheinlichkeit. Das Schadensausmaß (in Tabelle die Spalten „S_x“) auf die Bereiche Prozess, Transportgut, Drohne sowie Mensch ist qualitativ zwischen 1 (geringes Ausmaß) und 3 (hohes Schadensausmaß) bewertet. In Absprache mit dem PA wurden diese hinsichtlich ihrer Wahrscheinlichkeit (in Tabelle 3 Spalte „Wahrscheinlichkeit“) auf einer Skala von 1 (vernachlässigbar) bis 5 (maximal) qualitativ bewertet. Die in Tabelle 3 dargestellte Übersicht stellt zugleich die Grundlage für die Entwicklung von Maßnahmen hinsichtlich Gestaltung der Produktionsumgebung (siehe Abschnitt 4.3) sowie der Drohne (siehe Abschnitt 4.4) dar. Die vollständige Auflistung befindet sich in Anhang 3.

Tabelle 3: Ausschnitt identifizierter und bewerteter Fehler

Nr.	Flugphase	Potenzielle(r) Fehler	S_Prozess	S_Drohne	S_Transportg	S_Mensch	Wahrsch
101	Start der Drohne	Versetzen der Drohne beim Start		1	2	2	3
102	Start der Drohne	Greifen in rotierende Rotorblätter		2		2	3
103	Start der Drohne	Fliegen in den eigenen Wirbelring		1		2	3
104	Start der Drohne	Start der Drohne wird nicht wahrgenommen		1	2	2	3
201	Lastaufnahme	Transportgut zu schwer	2				4
202	Lastaufnahme	Transportgut zu groß(-flächig)	3				4
203	Lastaufnahme	Unsachgemäße Befestigung des Transportgutes			2	1	2
204	Lastaufnahme	Fehler bei Teileerkennung (automatisierte Be-/Entladung)		1	2		2
205	Lastaufnahme	Außermittiger Schwerpunkt	1				4
301	Flug outdoor	Flug bei ungeeigneter Witterung		2			3
302	Flug outdoor	Flug bei ungeeigneter Witterung			3		3
303	Flug outdoor	Fliegen bei Gegenwind	1				4
304	Flug outdoor	Fliegen gegen Wind mit Geschwindigkeiten über den max. Windwiderstand		2	2	1	2
305	Flug outdoor	Kontrollverlust durch auftretende Turbulenzen beim Fliegen im Wind		2	2	1	3
306	Flug outdoor	Kontrollverlust durch Thermik bei Flug über Industrieschornsteine/-dächer		2	2	1	4
401	Flug indoor	Absturz während des Schwebens		2	2	2	1
402	Flug indoor	Kollision von Drohnen		2	2	2	2
403	Flug indoor	Lautstärke der Drohne störend für Mitarbeiter	1				2
404	Flug indoor	Beschädigung des Transportgutes durch die Drohne			2		1
405	Flug indoor	Kontaktverlust innerhalb der Fabrikhalle	2	1			
406	Flug indoor	Thermisch bedingter Schaden am Transportgut während des Fluges					
407	Flug indoor	Mitarbeiter ist nicht in der Lage, die Drohne sinnvoll einzusetzen					
408	Flug indoor	Kollision mit dem Tor beim Hindurchfliegen					
		Versetzen der Drohne durch Luftzug					

Zur durchgängigen Bezeichnung sind die Risiken und Hindernisse mit einer Nummer als Index versehen, wie in der ersten Spalte der Tabelle 3 zu sehen. Das erste Zeichen der Nummer ist dabei mit der Flugphase verknüpft (Bsp.: Phase Start mit der Nummer 1xx). Die beiden folgenden Zeichen sind steigend mit den jeweiligen Risiken und Hindernissen durchnummeriert. Bspw. ist ein mögliches *Versetzen der Drohne beim Start* in der Phase *Start* als erstes Hindernis der Phase (x01) dann mit der Nummer 101 indiziert.

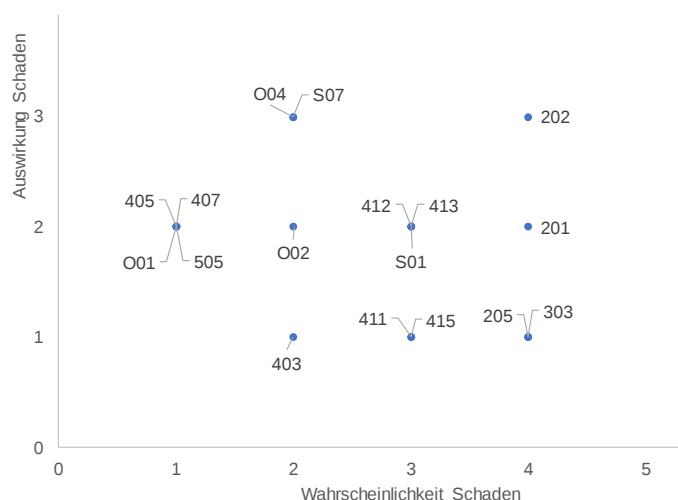


Bild 7: Risk-Map für Hindernisse im Prozess

Zur Übersicht über die technischen, rechtlichen und betrieblichen Hindernisse wurden diese in Ishikawa-Diagramme überführt (siehe Anhang 4). Die Ishikawa-Diagramme zu den rechtlichen sowie betrieblichen Hindernissen befinden sich. Die Visualisierung der Risiken nach dem Vorbild einer Risk-Map befindet sich in Anhang 5. Dazu wurde das Schadensausmaß auf die Ordinatenachse und die Auftrittswahrscheinlichkeit auf die Abszissenachse abgetragen. Anhand des Beispiels der potentiellen Schadensauswirkungen am Menschen in Bild 7 ist somit auch visuell eine Priorisierung möglich. Die Risiken mit der höchsten Priorität befinden sich im Bereich der höchsten Auswirkung sowie der höchsten Auftrittswahrscheinlichkeit (also „oben rechts“). Das Hindernis „Transportgut zu groß(-flächig)“ mit der Nummer 202 hat im Beispiel im Hinblick auf den Prozess also die höchste Priorität.

4.3 Ableitung von Anforderungen an die Fabrik des anwendenden KMU für den innerbetrieblichen Materialtransport mit einer Drohne

Es wurde Tabelle 4 mit den oben genannten Kriterien erstellt, in welcher zu jeder Flugphase und jedem Risiko eine entsprechende Maßnahme zu Erfüllung der Anforderung zugeordnet ist. In detaillierter Form und den Risiken und Hindernissen aus Abschnitt 4.2 zugeordnet sind diese in im Lastenheft in Anhang 7 zu erkennen. Dort sind diese zusätzlich detailliert unterteilt in direkt umsetzbare Sofortmaßnahmen und in Langzeitmaßnahmen. Die Langzeitmaßnahmen dauern nach Absprache mit dem PA länger in der Umsetzung bzw. bringen einen erhöhten Aufwand mit sich als Sofortmaßnahmen. Sind sowohl Sofort- als auch Langzeitmaßnahmen als Anforderungen erfüllt, so ist nach Rücksprache mit dem PA eine solide Basis für den Drohneneinsatz geschaffen. Dem Risiko/Hindernis mit dem Index 101 „Versetzen der Drohne beim Start“ sind so bspw. die Maßnahmen *Vorflugcheckliste vor jedem Start abarbeiten* und *Spezielle Start-/Landebereiche (windgeschützt, ausreichend Abstand)* zugeordnet. Die Anforderungen an die Fabrik sind hier in Tabelle 4 zur einfacheren Übersicht in Bereiche geclustert. Diese Bereiche betreffen die Mitarbeiter, Verhaltensregeln im Umgang mit Drohnen sowie den Akku und die daraus resultierende Brandgefahr. Zum Flug sind dazu Regeln zur Durchführung sowie zur Routenführung als Anforderungen entwickelt worden. Abschließend sind besondere Gestaltungsrichtlinien aufgezeigt, die für Fabriken gelten, wenn darin Drohnen zum Einsatz kommen sollen.

Tabelle 4: Anforderungen für die Fabrik in Maßnahmen geclustert

	Maßnahme	Details
Mitarbeiter	Fördern der Mitarbeiterakzeptanz und -qualifikation	Anreize schaffen
		Qualifizierung der Mitarbeiter
		Frühzeitige Einbindung der Mitarbeiter
	Persönliche Schutzausrüstung je nach Gefährdung	Gehörschutz für Mitarbeiter
		Handschuhe
Verhaltensregeln im Umgang	Rotorkäfig erst öffnen, wenn Rotoren nicht mehr drehen	
	Minimale Sicherheitsabstände zu Menschen	
	Konsequentes Verfolgen der rechtlichen Entwicklungen bzgl. Drohnen	

	Überprüfung der Ladung vor dem Start (Vorflugcheckliste)	
	Vor dem Start auf lose Teile überprüfen (Vorflugcheckliste)	
	Backup-Pilot für Übernahme der Steuerung im Ernstfall	
	Zulässiges Maximalgewicht festlegen, große Lasten aufteilen	
	Ausweichen auf andere Fördermittel, wenn:	Transportgut zu groß(-flächig) Keine Drohne verfügbar Keine Aufstiegserlaubnis
Akku und Brandgefahr	Akku nach jeder Nutzung laden	
	Akkutausch nach vorgegebener Betriebszeit	
	Lagerung der Akkus	Regelmäßige Überprüfung
		Gegen Kurzschluss sichern
		Trockene Lagerung
		Bereitstellen von Löschsand Akkus innerhalb eines Temperaturbandes kontrolliert lagern (bspw. Raumtemperatur)
Flugregeln	Flug nur in funkbaren Bereichen	
	Schnelles Starten	
	Fluggenehmigung (outdoor) abhängig von Wetter	
	Gegen den Wind landen	
	Unter Aufsicht/manuell durch Tore fliegen	
Flugroute	Risikoadaptierte Routenplanung	
	(Alternative) Landeorte vor Flugstart über gesamte Flugroute festlegen	
	Prozessbedingtes Warten auf festem Platz (nicht schwebend)	
	Drohnenkorridor - Drohnen-Bereiche in ausreichender Höhe ausweisen	
	Start- / Landebereiche angemessen gestalten	Windgeschützt Ausreichend Abstand Landefläche von Drohnen frei von Hindernissen Landeplatz auf Lochblech oder erhöhter Position
Fabrikgestaltung	Schutz der Verkehrswege	Netze über Arbeitsbereichen Ggf. Anpassen des Layouts
	Sicherstellung Funkkontakt	Redundante Systeme zur Positionierung Wenn notwendig, Verstärken des Signals zur Basis
	Zusätzliche Ein-/Ausgangsklappen für Drohnen	Automatische Öffnungs-/Schließmechanismen an Toren
	Einrichtung von Wartepätzen	
	Ausgewiesene Start-/Landeplätze	

4.4 Ableitung von Anforderungen an die Drohnenhersteller für den innerbetrieblichen Materialtransport mit einer Drohne

Als Ergebnis von Arbeitspaket 4 ist analog zu Abschnitt 4.3 eine Liste der Anforderungen entstanden, in welcher jeder Flugphase und den dazugehörigen Risiken Maßnahmen bzgl. der Drohne zugeordnet sind. Tabelle 5 enthält die konkreten Anforderungen an die Drohne in der Übersicht. Diese Anforderungen sind geclustert in die Bereiche Konstruktion, Energiequelle (Akku), Systeme an der Drohne sowie Anforderungen für das Handling des Transportgutes. Diese Anforderungen sind hier verkürzt und in der Übersicht dargestellt. Eine Zuordnung der Anforderungen an die Drohne zu den zu vermeidenden Risiken findet sich im Lastenheft in Anhang 8. Dem in Abschnitt 4.2 genannten Risiko/Hindernis mit dem Index 101 (*Versetzen der Drohne beim Start*) ist so bspw. die Maßnahme *Rotorschutz* zugeordnet.

Tabelle 5: Anforderungen an Drohnen

	Anforderung
Konstruktiv	Rotorschutz für Drohnen
	Not-Landung unabhängig von restlicher Drohnen-Steuerung
	Thermischer Schutz von Drohne und Transportgut gegen extreme Temperaturen
	Drohnen mit min. IP-Schutzklasse von x5 (bei Nutzung outdoor)
	Richtwert für den Zusammenhang der maximal zulässigen Windgeschwindigkeit und der damit technisch möglichen, maximalen Geschwindigkeit der Drohne $v_{max,Drohne}$: $v_{max,Wind} \leq 0,5 * v_{max,Drohne}$
Energieversorgung (Akkumulator)	Temperaturüberwachung
	Redundante Energieversorgung
	Akkuaustausch nach vorgegebener Zeit
	Redundanz
	Akkumanagement
	Gegen Kurzschluss gesicherte Akkus bei Wechsel und Lagerung
Systeme	Redundante Systeme zur Positionierung
	Manuelle Steuerung, manuelle Eingabe Flugdaten
	Schnittstellen anpassen
	Zusätzliche Kommunikationseinheit mit Toren
	Redundante Flugsteuerung
	Kollisionsvermeidungssystem
	Sensorik/Aktorik: • sensorischer Kollisionsschutz, • optische/akustische Warnsignale, • FailSafe
Transportgut	Standardisierte Transportboxen
	Vorbeugung von Verrutschen (Ladungssicherung)
	Segmentierung in Transportbox (Ladungssicherung)
	Automatisierte Ladung und Sicherung des Transportguts

4.5 Wirtschaftliche und logistische Potentialabschätzung des innerbetrieblichen Drohneneinsatzes für definierte Use-Cases

Zur Ermittlung der Potentiale in wirtschaftlicher sowie auch logistischer Hinsicht wurde eine erweiterte Potentialbewertung entwickelt. Die monetär bewertbaren, logistischen Potentiale wurden in der Kostenvergleichsrechnung berücksichtigt. Dies betrifft im Wesentlichen die Kosten, die entstehen, wenn eine Produktion stillsteht. Nicht monetär bewertbare Potentiale darüber hinaus werden in einer Nutzwertanalyse bewertet. Insgesamt gilt es auf Basis der Kostenvergleichsrechnung und der Nutzwertanalyse eine Entscheidung zu treffen, welches Fördermittel für den bewerteten Anwendungsfall das wirtschaftlichere ist und einen größeren Nutzen für das Unternehmen aufweist. Existiert eine Alternative, die im Vergleich gleichzeitig den höchsten Nutzen und die niedrigsten Kosten aufweist, handelt es sich um die bessere Alternative. Ist dies nicht der Fall, geben Kostenvergleichsrechnung und Nutzwertanalyse zumindest eine Entscheidungsgrundlage und es wird individuell entschieden. Der Ablauf der erweiterten Potentialbewertung ist in Bild 8 zusammengefasst. Die Elemente der Kostenvergleichsrechnung sowie der Nutzwertanalyse werden nun im Einzelnen genauer vorgestellt.

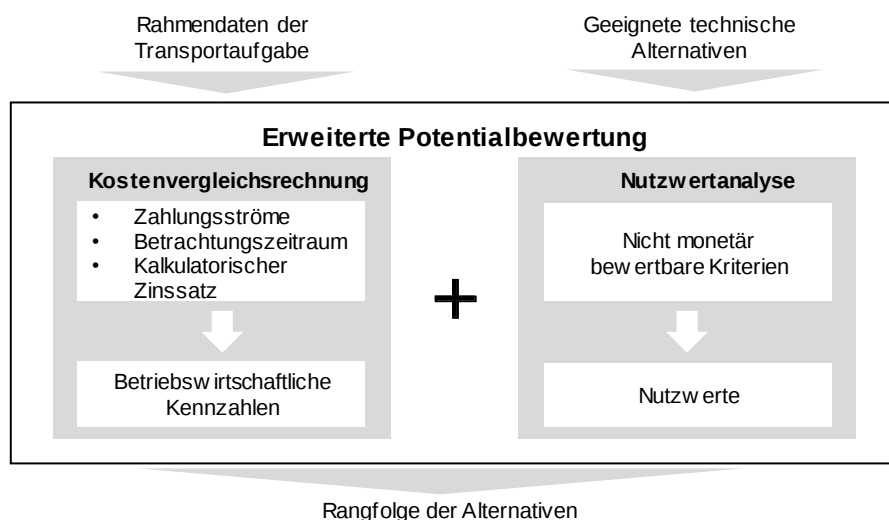


Bild 8: Ablauf der erweiterten Potentialbewertung in Anlehnung an [Ull05]

Kostenvergleichsrechnung

Bei der Berücksichtigung der Kosten ist es wichtig, dass alle anfallenden Kosten, auch die indirekten Kosten, die mit der Anschaffung der Flurfördermittel verbunden sind, berücksichtigt werden und in die Berechnung mit einfließen. Zudem müssen alle Kosten beachtet werden, die den Betrieb der Fördermittel ermöglichen. Um eine Ganzheitlichkeit der Kostenbetrachtung zu gewährleisten, ist es demnach sinnvoll eine Einteilung in Kostengruppen vorzunehmen. Es wird deshalb zwischen den Kostengruppen Investitionskosten, Betriebskosten und Arbeitskosten unterschieden.

Die *Investitionskosten* enthalten alle mit der Anschaffung des Transportsystems verbundenen Auszahlungen. Darin enthalten sind Kosten für die Fahrzeugsteuerung, Sicherheitseinrichtungen, Batterien, Batterieladegerät, Sensorik am Fahrzeug zur Standortbestimmung und Lageerfas-

sung, Einrichtungen zur Datenübertragung am Fahrzeug, Lastaufnahmemittel und ggf. Bedienelemente. Außerdem werden hier kalkulatorischen Abschreibungen und kalkulatorische Zinsen berücksichtigt. Dabei wird eine lineare Abschreibung vorausgesetzt. Hierbei sei vorausgesetzt, dass die Anschaffungskosten den Wiederbeschaffungskosten entsprechen. Im vorliegenden Fall wird das Fördermittel über die Nutzungsdauer komplett abgeschrieben und weist am Ende der Nutzungsdauer keinen Liquidationserlös auf.

Das Bundesministerium der Finanzen gibt in seiner Norm AfA-Tabelle für allgemein verwendbare Anlagegüter eine Nutzungsdauer für die verschiedenen Anlagegüter vor. Unter dem Punkt Fahrzeuge wird für sonstige Beförderungsmittel (Elektrokarren, Stapler, Hubwagen usw.) ein Abschreibungszeitraum von acht Jahren vorgegeben. Für Drohnen ist eine Abschreibung nicht konkret geregelt. Da es sich bei Drohnen jedoch ebenfalls um (Luft-)Fahrzeuge handelt wird eine Nutzungsdauer von acht Jahren angenommen [Bun00]. Die kalkulatorischen Zinsen sind das Ergebnis der Multiplikation aus kalkulatorischem Zinssatz und durchschnittlich gebundenem Kapital. Das durchschnittlich gebundene Kapital ist der Betrag, den das betrachtete Investitionsobjekt im Durchschnitt in den einzelnen Jahren bindet. Der kalkulatorische Zinssatz hängt davon ab, ob die Investition nur mit Eigenkapital oder mit Eigen- und Fremdkapital finanziert ist. Im vorliegenden Fall wird davon ausgegangen, dass die Fördermittel aus reinem Eigenkapital finanziert werden. In diesem Fall ergibt sich der Zinssatz aus Basiszinssatz und einem Risikozuschlag [Bec16]. Die Deutsche Bundesbank berechnet nach den gesetzlichen Vorgaben des § 247 Abs. 1 BGB den Basiszinssatz und veröffentlicht seinen aktuellen Stand im Bundesanzeiger. Dieser liegt für das Jahr 2019 bei -0,88 % [Deu18]. Der Risikozuschlag liegt in Deutschland laut einer Studie von KPMG bei 6,5 % [Cas18]. Es ergibt sich somit für die Bewertung ein kalkulatorischer Zinssatz von 5,62 %.

Die *Betriebskosten* enthalten die Energie- und Instandhaltungskosten. Die Energiekosten beinhalten den Stromverbrauch für die Ladung der Fahrzeugbatterie. Der Industriestrompreis in Deutschland lag im Jahr 2017 bei durchschnittlich 0,761 €/kWh [Bre18]. Dieser Strompreis dient als Rechengrundlage für die Errechnung der Energiekosten der Fördermittel.

Die *Instandhaltungskosten* setzen sich aus Wartungs- und Reparaturkosten des Fördermittels zusammen. Dazu zählen sowohl vorbeugende Kosten wie Inspektion mit Reinigung und ggf. Schmierung, als auch ausfallbedingte Kosten wie Instandsetzung mit Austausch, Reparatur und Ausbesserung. Im vorliegenden Fall wird von einer durchschnittlichen Beanspruchung der Fördermittel ausgegangen, für die sich ein Erfahrungswert von 10 % der Investitionssumme ergibt [VDI 2695]. Für die Drohne wurden nach Rücksprache mit einem Mitglied des PA für die Kostenvergleichsrechnung ein Wert von 90.000 € je Jahr berücksichtigt.

Die *Arbeitskosten* beinhalten alle durch das Personal entstehenden Kostenarten. Dies betrifft jedoch nur das Personal, das unmittelbar für den laufenden Betrieb des Transportsystems erforderlich ist, mit Ausnahme des Instandhaltungspersonals, welches separat berücksichtigt wird. Diese Arbeitskosten setzen sich im Wesentlichen zusammen aus den Bruttolöhnen und -gehältern, den gesetzlichen und tariflichen sozialen Aufwendungen, den Lohnnebenkosten und den Lohngemeinkosten. Laut einer Umfrage liegt das Durchschnittsjahresgehalt für Lagerarbeiter in Deutschland für das Jahr 2019 bei 29.200 Euro [Ste19]. Zuzüglich der Sozialversicherungsbeiträge etc. ergibt sich somit für den Arbeitgeber eine Gesamtbelastung von ca. 35.000 Euro pro Jahr [Ima19].

Da es möglich ist, dass die zu bewertenden Fördermittel eine unterschiedliche Förderleistung aufweisen, wird bei dem vorliegenden Bewertungsansatz zwischen den zwei Anwendungsfällen Kosten- und Dringlichkeitsfällen unterschieden. Kostenfälle fassen die Anwendungsbeispiele zusammen, bei denen Drohnen in der regulären Fertigung eingesetzt werden sollen. Um die Fördermittelalternativen miteinander zu vergleichen, wird eine Kostenaussage je Transportspiel getroffen. Neben der regulären Fertigung kommt es in der Produktion zusätzlich vor, dass bspw. falsche oder beschädigte Komponenten an die Montagelinie geliefert werden. Dies führt häufig zu Wartezeiten oder gar kostenintensiven Produktionsstillständen [Wry17]. Bei diesen Dringlichkeitsfällen wird davon ausgegangen, dass die Puffer der nachfolgenden Prozessschritte nach Nichterfüllung der Förderaufgabe innerhalb von zwei Minuten erschöpft sind. Dies führt folglich zu einem Produktionsstopp. Um diesen Stillstand in Geldeinheiten umzurechnen, fließt die zusätzliche Zeitaufwendung als Umsatzverlust unter dem Kriterium Auslastungsverlustkosten mit in die Bewertung ein. In Tabelle 6 sind alle relevanten Kostenarten mit den dazugehörigen Kostengruppen zusammengefasst.

Tabelle 6: Kostengruppen und -arten der Kostenvergleichsmethode

Kostengruppe	Kostenart
Investitionskosten	Anschaffungskosten
	Kalkulatorische Abschreibungen
	Kalkulatorische Zinsen
Betriebskosten	Energiekosten
	Wartungskosten
	Reparaturkosten
Arbeitskosten	Personalkosten des Anlagenbetriebs
Zeitkosten	Auslastungsverlustkosten

Nutzwertanalyse

Für die Nutzwertanalyse wurden die Kriterien von bestehenden Bewertungen kombiniert, um eine Ganzheitlichkeit an qualitativen Kriterien zu erfüllen. Dabei wird hier jedes Kriterium mit der gleichen Gewichtung bewertet, um die Objektivität der Bewertung zu gewährleisten. Es wird eine Skalierung der Erfüllungsgrade von eins bis drei Punkten verwendet. Ein Punkt entspricht dabei der niedrigsten, drei Punkte der höchsten Bewertung. In Anhang 6 sind alle Auswahlkriterien der Nutzwertanalyse mit einer kurzen Erläuterung zusammengefasst.

Das Kriterium *Automatisierungsgrad* ermöglicht eine Aussage über das notwendige Maß manuellen Eingreifens und den damit verbundenen Personalaufwand. Er erlaubt zudem eine Aussage über die Möglichkeiten einer kontrollierten Materialflussverfolgung der transportierten Güter. Fördermittel wie Drohnen und Fahrerlose Transportfahrzeuge haben im Vergleich zu manuell betriebenen Gabelstaplern oder Schleppern hier einen Vorteil, weil sie vollständig automatisiert betrieben werden können.

Die *Integrierbarkeit in automatische Systeme* hängt mit dem Automatisierungsgrad zusammen. Generell gilt: Je höher der Automatisierungsgrad, desto besser ist die Integrierbarkeit der Fördermittel [Hom18]. Manuell bediente Fördermittel wie Kräne oder Flurförderzeuge können teilweise integriert werden, wenn Fahrer durch Datenkommunikation Anweisungen erhalten.

Das Kriterium *Flexibilität bei Layoutänderung* zeigt auf, welcher Aufwand für die Änderungen der Fahrwege oder Anordnung der Maschinen betrieben werden muss. Die Flexibilität bei Layoutänderungen von Fördermitteln, die an Schienen o. ä. gebunden sind, wie z. B. Regalbediengeräte, ist sehr gering.

Die *Flexibilität bei Änderung der Förderleistung* ermöglicht eine Aussage, welche Fördersysteme problemlos z. B. durch Ergänzung eines zusätzlichen Gerätes auch höhere Materialflussintensitäten bewältigen können und welche nach Auslegung des Fördermittels nur schwierig auf Steigerungen des Güteraufkommens reagieren können.

Mit dem Kriterium *Erweiterungsfähigkeit* wird ausgesagt, wie einfach eine bestehende Fördertechnik auf angrenzende Bereiche expandiert werden kann. Zu beachten sind hierbei vor allem der Maschinenbau und die Steuerungstechnik der Fördermittel [Hom18].

Das Kriterium *Störbehandlung und Notbetrieb* sagt aus, wie viel Arbeitsaufwand eine Störung des Fördermittels verursacht und ob ein Notbetrieb ohne das gestörte Fahrzeug möglich ist. Wenn ein Notbetrieb bei einer Störung nicht möglich ist, wird ein Punkt vergeben. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn Wege komplett durch das Fördermittel versperrt werden. Ist die Störbehebung mit größerem Aufwand verbunden (bspw. durch externe Mechaniker) wird das Kriterium mit zwei Punkten bewertet.

Ergonomie ist ebenso ein relevantes Bewertungskriterium für die Fördermittelauswahl. Ergonomisch gestaltete Lastübergabepattformen verringern die physische Belastung für Mitarbeiter am Arbeitsplatz und tragen zur Humanisierung der Arbeitswelt bei.

Die *Pufferfähigkeit* gibt an, inwieweit ein Fördermittel als Puffer eingesetzt werden kann.

Das Kriterium *Sicherheit gegen Unfall* gibt an, inwiefern Gefahren durch den Transport von Gütern für andere Verkehrsteilnehmer und Gegenstände entstehen. Dies betrifft sowohl Gefährdungen von Personen als auch Beschädigungen von Arbeitsmitteln wie z. B. Maschinen, anderen Fördermitteln oder Lagerregalen. Schwerwiegende Gefahren machen präventive Maßnahmen notwendig. Dies ist bspw. der Fall, wenn Auffangnetze für herabstürzende Waren installiert werden müssen, um Beschädigungen zu vermeiden, wie es beim Einsatz von Drohnen denkbar ist.

Die Kenntnis der *Flächennutzung* ermöglicht eine Aussage, wieviel der Hallenfläche ausschließlich oder teilweise von der Fördertechnik belegt wird. Zudem wird bei diesem Kriterium der Grad der Hindernisbildung bewertet. Dieser gibt Auskunft inwieweit die Fördertechniken nicht nur auf Bodenniveau, sondern auch im Raum, Hindernisse für andere Fördertechniken oder Arbeitsmittel bilden. Bei der Bewertung dieses Kriteriums sind flurfreie Fördermittel im Vorteil.

Unter dem Kriterium *ökologische Gesichtspunkte* werden Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des Fördermittels am Durchschnitt ausgerichtet bewertet. Ebenso wird hier der Verschleiß der Bauteile des Fördermittels berücksichtigt.

Die Fähigkeit des Fördermittels zum *Überwinden von Steigungen* kann z. B. in mehrgeschossigen Gebäuden von großem Vorteil sein und macht ansonsten häufig zusätzlich erforderliche Aufzüge o. ä. überflüssig, die in der Regel einen Einbruch der Systemleistung bewirken [Hom18]. Aber auch das Überwinden von mehreren Höhenniveaus innerhalb einer Produktionshalle kann von Vorteil sein, wenn dadurch Hubstationen eingespart werden können. Werden Hubstationen benötigt, um Steigungen zu überwinden, ist das Fördermittel bspw. mit zwei Punkten zu bewerten.

Der Einsatz moderner, zukunftsorientierter Technologien verschafft dem Unternehmen ein *Technologievorsprung* und hat positive Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens. Dies betrifft sowohl den betrieblichen Leistungsprozess als auch die Imagewirkung nach außen [VDI 2710]. Die Spannweite der Bewertung bewegt sich dabei von Standardlösung über innovative Transportlösung bis hin zum Aufsehen in der Öffentlichkeit bspw. durch Veröffentlichungen von Zeitungsartikeln.

Bewertung Use-Case 1: Materialtransport vom Zwischenlager an Montagelinie

Von der Quelle bis zur Senke sind 90 Meter zurückzulegen. Die Distanz vom Parkplatz bis zur Quelle belaufen sich ebenfalls auf 90 Meter. Die Drohne steigt nach automatisierter Transportgutaufnahme auf eine Höhe von 10 Metern, um keine anderen Verkehrsteilnehmer zu behindern. Aus den technischen Datenblättern der Fördermittel errechnen sich Transportspielzeiten von 1,9 Minuten für die konventionelle Transportlösung mit dem Elektro-Stapler und 8,5 Minuten für die Drohnenlösung. Die Lastaufnahme- und -abgabezeiten der Drohne werden dabei mit jeweils 10 Sekunden angenommen [Wry17]. Aus der Kostenvergleichsmethode ergeben sich bei einem Betrachtungszeitraum von acht Jahren Gesamtkosten von knapp über 45.000 Euro pro Jahr für die Stapler-Variante. Für die Alternative mit der Drohne ergeben sich Jahresgesamtkosten von knapp über 95.000 Euro (siehe Tabelle 1; die angegebenen Kosten sind stets als Nettopreise zu verstehen.).

Tabelle 7: Kostenvergleichsrechnung von Use-Case 1

		Drohne	Stapler
1	Investitionskosten (einmalig)		
1.1	Transportfahrzeug	4.789,08 €	37.814,00 €
1.2	Zusätzliche Hard- und Software	25.210,92 €	
1.3	Ersatzbatterie-Set	3.862,18 €	
1.4	Batterieladegerät	293,28 €	1.500,00 €
1.5	Anhänger		
1.6	Gesamtinvestitionssumme	34.155,46 €	39.314,00 €
2	Betriebskosten (jährlich)		
2.1	Kalkulatorische Abschreibungen	4.269,43 €	4.914,25 €
2.2	Kalkulatorische Zinsen	959,77 €	1.104,72 €
2.3	Energiekosten	410,16 €	526,00 €
2.4	Instandhaltungskosten	90.000,00 €	3.781,40 €
3	Arbeitskosten (jährlich)		
3.1	Personalkosten des Anlagenbetriebs		35.000,00 €
4	Gesamtkosten pro Jahr (aus 2 und 3)	95.639,36 €	45.326,38 €

Die Kostenaussagen der konventionellen Fördermittel basieren dabei auf Informationen von Fördermittelherstellern. Die Kosten der bewerteten Drohne belaufen sich auf Informationen aus Experteninterviews mit Projektpartnern aus der Drohnenbranche (Punkt 1.1, 1.2 und 2.2) sowie aus Preiskatalogen von Drohnenherstellern (Punkt 1.3, 1.4 und 2.1) [DJI19]. Um einen durchgängigen Flugbetrieb der Drohne zu ermöglichen, werden bei einer Ladezeit von 110 Minuten und einer durchschnittlichen Batterielaufzeit von ca. 25 Minuten vier Ersatzbatteriesets benötigt. Dies ergibt somit Kosten in Höhe von 3.862,18 Euro für Ersatzbatterien. Unter Punkt 1.2 werden alle Kosten zusammengefasst, die für zusätzliche Teile und Programme ausgegeben werden müssen wie z. B. den Greifarm oder die Sensorik.

Indem nun die Gesamtkosten pro Jahr durch die Anzahl der möglichen Fördermittelalternative geteilt werden, werden die Kosten pro Transportspiel für jede Fördermittelalternative erhalten. Beim Stapler liegen diese bei 0,87 Euro pro Transportspiel und bei der Drohne deutlich höher bei 8,47 Euro (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8: Kostenübersicht von Use-Case 1

	Stapler	Drohne
Zeit pro Transportspiel [min]	1,85	8,50
Anzahl Transportspiele pro Jahr	51.892	11.294
Kosten pro Jahr [€]	45.326,38	95.639,36
Kosten pro Transportspiel [€]	0,87	8,47

Bei der Berechnung für Use-Case 1 der Nutzwerte der Fördermittelalternativen ergibt sich ein Nutzwert von 67 % für den Stapler. Der Nutzwert der Drohne liegt bei 82 %. Der Nutzer kann sich hier je nach Positionierung entscheiden, welche Lösung bevorzugt wird.

Bewertung Use-Case 2: Überwindung von Hindernissen bei Umbau

Aus dem Kostenvergleich ergeben sich für Transportlösung mit dem Schlepper eine Zeit pro Transportspiel von 3,28 Minuten und Jahresgesamtkosten in Höhe von knapp 40.000 Euro. Daraus ergeben sich Transportspielkosten von 1,35 Euro. Bei der Drohne liegen die Kosten pro Transportspiel etwas niedriger bei 1,20 Euro (siehe Tabelle 9). Aus der Nutzwertanalyse ergibt sich ein Erfüllungsgrad von 69 % für den Elektro-Schlepper, also 13 % weniger als der der Drohnenalternative. Für Use-Case 2, die Überwindung von Hindernissen während eines Umbaus ist die Drohne also vorteilhaft.

Tabelle 9: Kostenübersicht von Use-Case 2

	Schlepper	Drohne
Zeit pro Transportspiel [min]	3,28	1,20
Anzahl Transportspiele pro Jahr	29.273	80.000
Kosten pro Jahr [€]	39.490,95	95.639,36
Kosten pro Transportspiel [€]	1,35	1,20

Bewertung Use-Case 3: Transport zwischen zwei Fertigungsschritten

Das FTS braucht für ein Transportspiel 254 Sekunden. Die Drohne erledigt einen Zyklus der Transportaufgabe aufgrund der deutlich höheren Fortbewegungsgeschwindigkeit innerhalb von 43 Sekunden. Daraus ergeben sich beim FTS mit Jahresgesamtkosten von 16.878,40 Euro

Transportspielkosten von 0,74 Euro. Bei der Drohne belaufen sich die Kosten bei unveränderten Gesamtkosten pro Jahr auf 0,71 Euro pro Transportspiel (siehe Tabelle 10). Der Nutzwert für das FTS liegt bei diesem Anwendungsfall bei 79 % und somit fast so hoch wie bei der Drohne (82 %). Die Drohnenlösung ist im skizzierten Fall also knapp vorteilhaft gegenüber der Vergleichslösung FTS.

Tabelle 10: Kostenübersicht von Use-Case 3

	FTS	Drohne
Zeit pro Transportspiel [min]	4,24	0,71
Anzahl Transportspiele pro Jahr	22.667	135.000
Kosten pro Jahr [€]	16.878,40	95.639,36
Kosten pro Transportspiel [€]	0,74	0,71

Bewertung Use-Case 4: Fehlteiltransport mit Umschlag

Die Entfernung zwischen Quelle und Umschlagplatz beträgt dabei 100 Meter und zwischen Umschlagplatz und Senke 120 Meter für beide Fördermittelalternativen. Da es sich hierbei um einen Dringlichkeitsfall handelt, wird davon ausgegangen, dass es nach Nichterfüllung der Transportaufgabe innerhalb von zwei Minuten zu einem Produktionsstopp kommt. Der zusätzliche Zeitaufwand fließt dann unter dem Kriterium Auslastungsverlustkosten mit 10,42 Euro pro Minute in den Kostenvergleich mit ein. Bei dieser Förderaufgabe wird angenommen, dass ein Fehlteil einmal am Tag vorkommt.

Die Transportspielzeit der konventionellen Transportlösung liegt bei insgesamt 173 Sekunden. Die Drohne benötigt für ein Transportspiel nur 57 Sekunden. In den Kostenvergleich fließen somit zusätzliche Auslastungsverlustkosten von 1.840,87 Euro für die konventionellen Fördermittel. Insgesamt ergeben sich für die konventionelle Transportlösung somit Kosten von 94.930,71 Euro pro Jahr (siehe Tabelle 11).

Tabelle 11: Kostenübersicht von Use-Case 4

	Konvent. Fördermittel	Drohne
Gesamttransportzeit pro Jahr [min]	1.922,22	637,04
Auslastungsverlustkosten [€]	1.840,87	-
Gesamtkosten pro Jahr [€]	94.930,71	95.639,36

Um den Gesamtnutzwert der konventionellen Fördermittelalternative zu bestimmen, wird der Mittelwert der Nutzwerte des Schmalgangstaplers und des Schleppers gebildet. Somit ergibt sich ein Gesamtnutzwert von 60 % für die herkömmliche Transportlösung. Mit dem Nutzwert der Drohnen von 82 % ergibt sich also erst nach Positionierung des Nutzers eine Präferenz.

Bewertung Use-Case 5: Eiltransport eines Fehlteils aus Ersatzteillager in Produktionshalle

Für diesen Anwendungsfall wird eine Transporthäufigkeit der 5 kg von zweimal je Tag angenommen. Der Outdoor-Sitzschlepper benötigt für die Abwicklung der Transportaufgabe 159 Sekunden. Somit ergeben sich für den Kostenvergleich Auslastungsverlustkosten von 2.750,88 Euro für die herkömmliche Förderalternative. Insgesamt liegen damit die Gesamtkosten pro Jahr bei

48.756,77 Euro, was in etwa der Hälfte der Kosten der Drohne entspricht (siehe Tabelle 12). Aus der Nutzwertanalyse resultiert ein Nutzwert für den Outdoor-Schlepper von 67 %.

Tabelle 12: Kostenübersicht von Use-Case 5

	Outdoor-Schlepper	Drohne
Gesamttransportzeit pro Jahr [min]	532,00	229,63
Auslastungsverlustkosten [€]	2.750,88	-
Gesamtkosten pro Jahr [€]	48.756,77	95.639,36

Fazit der Potentialanalyse

Insgesamt konnte im Rahmen der definierten Use-Cases gezeigt werden, dass die Drohne in Sachen Erreichbarkeit von schwer zugänglichen Bereichen und Nutzung der dritten Dimension von Vorteil sein kann. Die größten Vorteile bieten sich nach Betrachtung der Use-Cases, wenn die zu transportierenden Gegenstände klein und leicht sind. Vor allem im Fall von Dringlichkeit können Drohnen von großem Vorteil sein. Besonders hervorstechend in der Bewertung sind die angenommenen Kosten der Instandhaltung einer Drohne von 90.000 € je Jahr, welche im Vergleich zu 10 % des Fahrzeugpreises bei konventionellen Fördermitteln sehr hoch erscheinen. Basierend auf den verfügbaren Angaben aus Interviews musste bei den Berechnungen von dem Wert ausgegangen werden. Hier ist davon auszugehen, dass sich diese Kosten mit dem Drängen weiterer Wettbewerber auf den Markt mit Transportdrohnen und weiterer Entwicklung in Zukunft noch senken werden.

4.6 Implementierung der Ergebnisse in einen Softwaredemonstrator

Der Softwaredemonstrator beinhaltet die Logik aus den Ergebnissen der Wirtschaftlichkeitsbewertung und Potentialbetrachtung des vorangegangenen Kapitels. Das in Bild 9 ersichtliche Dashboard bildet für den Nutzer eine Übersicht über die grundlegenden Daten und Einstellmöglichkeiten sowie die Möglichkeit der Dateneingabe.

IPH BEWERTUNGSTOOL für Drohnen im innerbetrieblichen Materialtransport



Bild 9: Dashboard des Softwaredemonstrators in der Übersicht

Im oberen Bereich „Input“ besteht die Möglichkeit der Dateneingabe und Auswahl grundlegender Einstellungen. Getrennt durch einen grauen Balken befindet sich im unteren Teil des Dashboards der Bereich „Output“, in welchem die Datenauswertung auf einen Blick geschehen kann. Neben einer kostenstellenbasierten Aufstellung der einzelnen Kosten ist zudem auch die Zusammensetzung der Kosten grafisch dargestellt.

Input

Transportprozess	Konventionelles Fördermittel	Schlepper
	Flughöhe indoor [m]	5
	Materialgewicht [kg/Bedarf]	3
	Materialbedarf [Bedarfe/h]	10
Zusätzliche Daten	Strompreis [€/kWh]	0,0761
	Kalkulatorischer Zinssatz	5,62
	Durchlaufzeitkosten [€/min]	10,42
	Arbeitstage pro Jahr	200
	Arbeitsstunden pro Tag	8
	Puffer bis Produktionsstopp [s]	120
Daten auf Standard zurücksetzen		

Bild 10: Basisdaten

In der Inputmaske sind alle Informationen der Transportaufgabe einzugeben. Die Eingabe beläuft sich dabei auf die vier Bereiche Basisdaten, Use-Case-Daten sowie die Auswahl des zugrundeliegenden Basis-Use-Case und des Fördermittels. Alle Felder, die ausgefüllt werden müssen, sind hellgrau markiert. Auf Basis der Fördermittel und des zugrundeliegenden Basis-Use-Case sind diese Felder vorausgefüllt. Im Bereich zusätzliche Daten sind ergänzende Informationen für die Wirtschaftlichkeitsrechnung einzugeben. Diese Daten basieren auf den Ausführungen in Abschnitt 4.5 und können mit dem Button „Daten auf Standard zurücksetzen“ zurückgesetzt werden.

Im Bereich Fördermittel ist das konventionelle Fördermittel für die Transportaufgabe per Klick auf das entsprechend gewünschte konventionelle Fördermittel auszuwählen, mit dem die Drohne verglichen werden soll (im Beispiel in Bild 10 und Bild 11 ein Schlepper). Eine Übersicht aller Fördermittel mit den technischen Daten ist auf dem Tabellenblatt „DatenFördermittel“ zu finden. Dort können zusätzliche Daten wie der Mengendurchsatz oder auch durchschnittliche Geschwindigkeiten mit/ohne Last festgelegt werden. Im Bereich der Basisdaten kann das Gewicht des Transportguts festgelegt werden. Die maximale Traglast der Drohne ist als Ausgangswert auf 5 kg festgelegt und kann bei Bedarf auf dem Tabellenblatt „DatenFördermittel“ angepasst werden.

USE CASE 5		Drohne		Schlepper	
		Strecke [m]	Dauer [s]	Strecke [m]	Dauer [s]
Streckenzeit	Längenüberwindung ohne Last	400	40	600	166
	Längenüberwindung mit Last	400	40	600	240
	pos. Höhenüberwindung	100	20		
	neg. Höhenüberwindung	100	33		
Arbeitsspielzeiten	Auftragseingang		0		20
	Lastaufnahme		10		5
	Lastabgabe		10		5
Zeit pro Transportspiel			153		436
Transporte/h		10		10	
Zeit pro Transportspiel [min]		2,56		7,27	
Anzahl Transportspiele pro Jahr		16.000		16.000	
Gesamttransportzeit pro Jahr [min]		40.889		116.308	
Nutzwert		82%		69%	
Benötigte Transportfahrzeuge		1		2	

Bild 11: Dateneingabe Use-Case

Der zugrundeliegende Basis-Use-Case kann durch einen Klick auf den entsprechenden Use-Case im Bereich „Use-Case“ gewählt werden. Hiermit werden die in dem Use-Case hinterlegten Wegstrecken und Gegebenheiten in das Feld „Use-Case-Daten“ gefüllt (siehe Bild 11). Diese Wegstrecken können durch Änderung der grau hinterlegten Felder jederzeit angepasst werden. Im Feld rechts daneben wird nach Eingabe der Strecke jeweils die Transportdauer angezeigt, die

das jeweilige Fördermittel benötigt, um diese Strecke zurückzulegen. Außerdem können zu der Fahrtzeit noch zusätzliche Zeitaufwendungen für Auftragseingang, Lastaufnahme sowie Lastabgabe angegeben werden. In der letzten Zeile dieses Bereichs wird die Gesamtzeit pro Transportspiel angezeigt. Die Daten über die Geschwindigkeit der Fördermittel werden aus dem Tabellenblatt „DatenFördermittel“ entnommen.

Liegt das eingegebene Gewicht über dieser maximalen Traglast, wird davon ausgegangen, dass eine Drohne das Transportgut in mehreren Zyklen zur Senke befördern kann. Ist die Transportintensität nicht mehr von nur einem Fördermittel in der entsprechenden Zeit zu bewerkstelligen, wird die Anzahl der benötigten Fördermittel auf Basis der Daten des Fördermittels sowie der Förderaufgabe automatisch ermittelt.

Output



Bild 12: Outputmaske

Im linken oberen Bereich der Bild 12 der Outputmaske sind die Ergebnisse des Kostenvergleichs zusammengefasst. Bei Dringlichkeitsfällen wird dieser Bereich um den Kostenpunkt Auslastungsverlustkosten ergänzt. Die Kosten belaufen sich dabei auf die im Reiter Kosten eingetragenen Kostenstellen.

Im rechten Bereich der Outputmaske werden wichtige Kennzahlen der Bewertung zusammengefasst und es werden die Kosten und die jeweiligen Nutzwerte der Fördermittel visualisiert. Auf Grundlage der Kosten und Nutzwerte der bewerteten Fördermittel kann eine fundierte Aussage darüber getroffen werden, welches Fördermittel das wirtschaftlichere der beiden für die Transportaufgabe ist. Die Nutzwerte belaufen sich dabei auf Angaben aus dem Tabellenblatt NWA. Hier können Änderungen der Teilnutzwerte oder der Gewichtung vorgenommen werden.

Im unteren Bereich der Outputmaske werden zwei Kennzahlen visualisiert. Zum einen wird die Zusammensetzung der Investitionskosten der bewerteten Fördermittel in einem Balkendiagramm darstellt, zum anderen werden die Anteile der Jahresgesamtkosten ausgegeben. Einen einfachen Überblick über alle Berechnungen gibt das Diagramm „Gesamtpotential“. Das Diagramm ist so zu lesen, dass eine Variante des Fördermittels hin zum Koordinatenursprung die besser geeignete Variante ist.

Die restlichen Tabellenblätter dienen zur Berechnung von Kennzahlen für andere Arbeitsblätter. Sie können stets ausgeblendet bleiben.

Der Softwaredemonstrator kann von allen interessierten Unternehmen oder Personen über die IPH-Homepage angefragt werden.

4.7 Projektmanagement und Dokumentation

Die erzielten Ergebnisse wurden während der Projektlaufzeit dokumentiert und veröffentlicht. Die Veröffentlichungen erfolgten durch Artikel in Fachzeitschriften sowie bei der Vorstellung auf unterschiedlichen Veranstaltungen. Die Dokumentation unterstützt die Anwendung des Softwaredemonstrators und hilft damit bei der Verbreitung der Ergebnisse über den PA hinaus. Eine Auflistung der Veröffentlichungen sowie der Transfermaßnahmen ist in Kapitel 8 zu finden.

5. Verwendung der Zuwendung

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)
 - 1 wissenschaftlicher Mitarbeiter (TV-L 13) mit besonderen Kenntnissen im Bereich Produktionslogistik für 19 Monate
 - 1 wissenschaftlicher Mitarbeiter (TV-L 13) mit besonderen Kenntnissen im Bereich Produktionslogistik für 4 Monate
- Hilfskräfte (Einzelansatz A.3 des Finanzierungsplans)
 - wissenschaftliche Hilfskräfte als Unterstützung bei der Projektbearbeitung für 24 Monate für 1673 Stunden
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)
 - Keine Geräte angeschafft
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)
 - Keine Leistungen Dritter in Anspruch genommen

6. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die *Notwendigkeit* der geleisteten Arbeit begründet sich durch eine große Praxisrelevanz. Nach Gesprächen mit Unternehmen wird deutlich, dass speziell KMU mit den Anforderungen von Drohnen selbst und deren Auswirkung auf die Fabrik überfordert sind. Daher gehen sie auf externe Berater zu oder verwerfen die Entscheidung für den Einsatz von Drohnen, ohne die Potentiale betrachtet zu haben. Diese Forschungslücke schließt sich mit den ermittelten Voraussetzungen und fallspezifisch zu ermittelnden Potentialen. Da speziell beim Einsatz von Drohnen im innerbetrieblichen Bereich ein neuer Forschungsbereich betreten wird, war eine detaillierte Bearbeitung und eine Vielzahl von Diskussionen mit Experten unabdingbar.

Die *Angemessenheit* der einzelnen Arbeitsschritte ergibt sich aus der sachgemäßen Bearbeitung der Teilziele. Da als Ergebnis ein Softwaredemonstrator bereitgestellt wurde, welcher Unternehmen bei Vorbereitung des Materialtransports mit Drohnen unterstützt und damit direkt in der Industrie angewandt wird, ist die gründliche Bearbeitung und das Verwenden von wissenschaftlichen Methoden wichtig und für den Softwaredemonstrator ein grundlegender Faktor. Die Ergebnisse mussten somit auch in entsprechender Programmierform vorliegen.

Die geleistete Arbeit entspricht dem begutachteten sowie bewilligten Antrag und war daher für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen.

7. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen

Die Forschungsergebnisse liefern praxisorientierte Lösungen für die Unternehmen. Mit Hilfe der entwickelten erweiterten Potentialbewertung können Drohnenanwender und -anbieter grundlegend die Potentiale des Drohneneinsatzes im Materialtransport einschätzen. Die notwendigen Voraussetzungen sind erstmals einfach ersichtlich und können im Sinne eines Lastenheftes zur ersten Bewertung und Vorbereitung der eigenen Gegebenheiten zu Rate gezogen werden, um diese drohnentauglich zu gestalten. Darüber hinaus kann der Drohneneinsatz mit der erweiterten Potentialbewertung qualitativ sowie quantitativ einschätzend bewertet werden. Somit bekommen produzierende KMU sowie Drohnenanbieter und -dienstleister Planungssicherheit bzgl. der Investitionen in und des Einsatzes von Drohnen. Der im Forschungsvorhaben entwickelte Softwaredemonstrator operationalisiert die Ergebnisse und gewährleistet eine aufwandsarme Nutzung, ohne die Notwendigkeit zusätzlicher Recherchetätigkeiten oder Berater.

Die Transfermaßnahmen fördern hierbei die Verbreitung und Nutzung der Ergebnisse. Dabei wurden insbesondere durch die Publikation der Ergebnisse in Fachzeitschriften, die Mitarbeit in Branchengremien sowie die Darstellung der Ergebnisse auf Informationsveranstaltungen ein großer Nutzerkreis adressiert. Der Nutzerkreis der Projektergebnisse besteht grundsätzlich aus produzierenden Unternehmen verschiedener Branchen, die aufgrund neuer Möglichkeiten mit der Nutzung der dritten Dimension im Materialtransport den Einsatz von Drohnen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und Potentiale prüfen wollen. Je nach Betreibermodell der Drohnen sind auch Logistikdienstleister ein großer Teil der Nutzer, wenn diese Drohnen bspw. als Service im Materialtransport anbieten. Da der innerbetriebliche Einsatz von Drohnen derzeit noch als Innovation anzusehen ist, stellt die Unternehmensberatungsindustrie einen weiteren, wesentlichen Nutzer der Projektergebnisse dar. Nicht zuletzt sind zudem Versicherungen als Nutzer relevant, da diese die Risiken anhand der Projektergebnisse nun besser bewerten können. Sie zählen daher ebenfalls zum potenziellen Nutzerkreis.

Durch die Zusammenarbeit mit dem PA wurden erste Anwendungsmöglichkeiten direkt genutzt und validiert. Für KMU entsteht unmittelbarer und mittelbarer Nutzen aus dem Forschungsvorhaben. Folgender **unmittelbarer Nutzen** ergibt sich durch die Umsetzung der Projektergebnisse:

- Produzierende KMU sowie Logistikdienstleister (Anwender) können mit Hilfe der entwickelten Methode eine höhere Planungssicherheit in Bezug auf die Investitionen in Drohnen zum Materialtransport erzielen. Dabei werden örtliche Gegebenheiten einbezogen und eine wirtschaftliche Abwägung gegenüber konventionellen Fördermitteln ermöglicht. Somit wird langfristig die Wettbewerbsfähigkeit der in Deutschland ansässigen Unternehmen gesichert, indem das Anlagekapital optimal eingesetzt wird.
- Anwender wie auch Versicherer können die Ergebnisse des Forschungsvorhabens durch die Systematisierung der Risiken und Hindernisse nutzen. Durch die Bewertung werden die Risiken besser vergleichbar und die Objektivität steigt. Darüber hinaus sind die den Risiken zugeordneten Maßnahmen als Anforderungen an Fabrik und Drohne geclustert und übersichtlich aufbereitet. Somit profitieren vor allem KMU von den Forschungsergebnissen, für die eine teure Beratung hinsichtlich Drohnenfähigkeit und notwendiger Maßnahmen aufgrund fehlenden Kapitals nicht in Frage kommt.

Folgender **mittelbarer Nutzen** ergibt sich durch die Umsetzung der Ergebnisse:

- Für Hersteller und Anbieter von Drohnen kann eine schnellere Verbreitung der neuen Technologie bei Nutzung des Softwaredemonstrators von Vorteil sein. Durch die Bereitstellung einer Wissensbasis mit spezifischen Technologien haben KMU unmittelbaren Zugang zu Voraussetzungen sowie Wirtschaftlichkeitsabschätzungen und können deren Vorteile aufwandsarm einschätzen. Somit profitieren langfristig ebenfalls Hersteller und Anbieter von Drohnen von den Forschungsergebnissen.
- Durch die Mitarbeit in Branchengremien (VDMA) können die Projektergebnisse nahtlos in Richtlinien und Whitepaper fließen. Somit bilden die Projektergebnisse eine Grundlage für weiterführende Untersuchungen am Thema und werden einem noch größeren Nutzerkreis im deutschen Maschinen- und Anlagenbau zugänglich gemacht.

Obwohl die bisherigen technischen Lösungen für innerbetriebliche Transportdrohnen nur die Bewältigung von Traglasten von geringen Lasten ermöglichen, ist es eine Frage der Weiterentwicklung dieser Luftfahrzeuge, bis auch schwerere Ladungen und damit größere Lasten auf dem Luftweg transportiert werden können [Wel19]. Ähnliches gilt für die Batterieenergiedichte. Mit der Entwicklung von immer leistungsfähigeren Akkus, auch in anderen Branchen und Technologien, wird wahrscheinlich die Batterielaufzeit und somit die Wirtschaftlichkeit der Drohnen in Zukunft erhöht werden können. Es wird zwar abzuwarten sein, inwiefern die Drohnenverordnung in der Praxis Anwendung findet. Mit der Steigerung der Produktqualität ist jedoch davon auszugehen, dass auch zukünftig zunehmend neue Anwendungsfälle zum innerbetrieblichen Materialtransport mit Drohnen realistisch und wirtschaftlich werden.

8. Veröffentlichungen und Transfermaßnahmen

Erste Schritte zum Ergebnistransfer sind während der Projektlaufzeit durchgeführt worden. Weitere Maßnahmen zur Verwertung und Verbreitung der Projektergebnisse sind im Anschluss an das Projekt vorgesehen. Über den Austausch zwischen Forschungsstelle und den Unternehmen des PA sowie weiteren interessierten Unternehmen hat bereits ein erster Wissenstransfer stattgefunden. Dieser ist die Basis für die praktische Umsetzbarkeit der Ergebnisse. Die Mitglieder des PA bestanden aus Fabrikbetreibern, Logistikdienstleistern und -beratungsunternehmen sowie Drohnenanbietern, Versicherungen und Berufsgenossenschaften.

Die bereits durchgeführten und noch geplanten Transfermaßnahmen sind dem Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft in Tabelle 13 sowie Tabelle 14 zu entnehmen.

Tabelle 13: Ergebnistransfer in die Wirtschaft (spezifisch durchgeführte Transfermaßnahmen)

Maßnahme	Ziele	Rahmen	Zeitraum
Information der Unternehmen des PA	Unmittelbarer Ergebnistransfer in die Wirtschaft, Fortschrittsberichte, Diskussionen, Abstimmungen und Erfahrungsaustausch innerhalb des PA	Erste Sitzung des PA	April 2019
		Zweite Sitzung des PA	November 2019
		Datenaufnahme, Diskussionen zu Rahmenbedingungen und Voraussetzungen	01/2019-12/2019

Gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	Unmittelbarer Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Vorstellungen der Projektergebnisse bei interessierten Unternehmen vor Ort	kontinuierlich und auf Anfrage
Publikation der Projektergebnisse im Internet	Informationstransfer und Austausch mit Interessenten aus Industrie und Wissenschaft	Einrichtung der Projekt-Homepage	01/2019
		Pressemitteilung: Indoor-Einsatz von Drohnen zum Materialtransport	02/2019
Wissenschaftliche Publikation in Fachzeitschriften oder sonstigen gedruckten Veröffentlichungen	Nationaler Ergebnistransfer	Publikation: Fritzsche B.; Stonis, M.: Drohnen zum Materialtransport - Voraussetzungen und Wirtschaftlichkeit. In: ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Carl Hanser Verlag, 114 Jg. (2019), H 9, S. 584-587. ISSN 0032-678X	09/2019
		Publikation: Fritzsche B.: Drohnen unterstützen künftig Transporte in Unternehmen. In: VDI Technik und Leben, VDI Verein Deutscher Ingenieure, Bezirksverein Hannover e.V., (2020), H 2, S. 15-22. ISSN 1433-9897	05/2020
Vorträge und Präsentationen	Nationaler Ergebnistransfer	Vorstellung der aktuellen Projektergebnisse auf dem Koptertag der Region Hannover	09/2019
		Vorstellung und Diskussion von Rahmenbedingungen im VDMA Arbeitskreis „Drohnen in der Intralogistik“	09/2019
		Vorstellung des Projektes auf dem Deutschen Logistikkongress der BVL	10/2019
Integration der Projektergebnisse in Verbandsarbeit	Indirekter Wissenstransfer in die Industrie	Mitgründung und Zuarbeit der VDMA-Arbeitsgemeinschaft „Industrial Drone Solutions“	04/2020 ff.
Beratung von Unternehmen	Direkter Wissenstransfer in die Industrie	Erhaltung des Wissens und direkter Wissenstransfer in die Industrie	fortlaufend
Akademische Lehre	Qualifizierung von Studenten	Betreuung der Bachelorarbeit: „Risikoanalyse und Ableitung von Handlungsempfehlungen für den innerbetrieblichen Einsatz von Drohnen zum Materialtransport“; Gladis, V., Leibniz Universität Hannover	02/2019-08/2019
		Betreuung der Bachelorarbeit: „Analyse von Transportprozessen zur Eignung von Drohnen zum innerbetrieblichen Materialtransport“; Mischer, F., Leibniz Universität Hannover	04/2019-07/2019
		Betreuung der Masterarbeit: „Risikoanalyse und Ableitung von Anforderungen zu Einführung und Betrieb von Drohnen als Transportsystem“; Bubar, D., Leibniz Universität Hannover	03/2019-09/2019

		Betreuung der Masterarbeit: „Wirtschaftlichkeitsbewertung von Drohnen zum innerbetrieblichen Materialtransport“; Schwab, A., Leibniz Universität Hannover	03/2019-09/2019
		Betreuung der Masterarbeit: „Wirtschaftlichkeitsanalyse über den gesamten Lebenszyklus von innerbetrieblichen Transportsystemen am Beispiel Drohne“; Tran, D.T., Leibniz Universität Hannover	03/2019-09/2019
		Anstellung von studentischen Hilfskräften	01/2019-12/2019

Tabelle 14: Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft (spezifisch geplante Transfermaßnahmen)

Maßnahme	Ziele	Rahmen	Zeitraum
Veröffentlichung zur Information der interessierten Öffentlichkeit	Information der interessierten Öffentlichkeit und Wissenstransfer in die Wirtschaft	Weitere Beiträge in Fachzeitschriften (z. B. VDE-Journal oder Logistics Journal) Geplante Themen: Drohnen als Unterstützung im Transport Kostenbewertung und Potentialermittlung von Drohnen im Transport	01/2021
Ansprache potenziell interessierter Unternehmen außerhalb des PA	Unmittelbarer Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Vorstellung der Projektergebnisse bei interessierten Unternehmen vor Ort Besuch auf der Hannover Messe sowie Tag der Logistik	11/2020 ff.
Akademische Lehre und berufliche Weiterbildung	Qualifizierung von Studenten	Integration der Ergebnisse in Lehrveranstaltungen des IPH	11/2020 ff.
Integration der Projektergebnisse in Verbandsarbeit	Indirekter Wissenstransfer in die Industrie	Mitarbeit in der VDMA-Arbeitsgemeinschaft „Industrial Drone Solutions“	11/2020 ff.
Nutzung des Software-Demonstrators in eigenen Fabrikplanungsprojekten	Effizienzsteigerung der eigenen Fabrikplanung und Fördermittelauswahl	IPH, Fabrikplanungsprojekte	11/2020 ff.

9. Einschätzung der Realisierbarkeit der geplanten Maßnahmen

Das Verfahren zur anwendungsfallabhängigen Potentialabschätzung von Drohnen im Materialtransport bietet KMU die Möglichkeit aufwandsarm eine Investitionsentscheidung zu treffen bzw. die aktuell verwendeten Systeme zu hinterfragen. Die Anwendung der entwickelten Methode ist für KMU einfach. Für die Nutzung sind keine zusätzlichen Investitionen (z. B. Gerätebeschaffungen, Beratungsleistungen) nötig. Der in diesem Vorhaben entwickelte Softwaredemonstrator ermöglicht durch die Nutzung von Standardsoftware (Excel) eine aufwandsarme Anwendung der Ergebnisse. Dies ist insbesondere für KMU mit begrenzten Ressourcen relevant.

10. Durchführende Forschungsstelle

Das IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH ist eine gemeinnützige Forschungseinrichtung, die eng mit der Universität Hannover kooperiert. Die Gesellschafter des IPH, Prof. Behrens, Prof. Overmeyer und Prof. Nyhuis, sind gleichermaßen Inhaber produktionstechnischer Lehrstühle an der Universität Hannover. Die Gliederung des IPH in die drei Abteilungen „Prozesstechnik“, „Produktionsautomatisierung“ und „Logistik“ spiegelt die Ausrichtung dieser Lehrstühle wider.

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

Leiter der Forschungsstelle IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH

Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis

Geschäftsführender Gesellschafter des IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH, Hollerithallee 6, 30419 Hannover, Tel.: 0511/27976-119

Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer

Geschäftsführender Gesellschafter des IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH, Hollerithallee 6, 30419 Hannover, Tel.: 0511/27976-119

Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens

Geschäftsführender Gesellschafter des IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH, Hollerithallee 6, 30419 Hannover, Tel.: 0511/27976-119

Dr.-Ing. Malte Stonis

Koordinierender Geschäftsführer des IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH, Hollerithallee 6, 30419 Hannover, Tel.: 0511/27976-119

Projektleiter

M.Sc. Benjamin Fritzsch

Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung Logistik des IPH

11.Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 20261 N der Bundesvereinigung Logistik (BVL) e. V. wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Für die Förderung sei an dieser Stelle gedankt.

Anhang

Anhang 1: Morphologischer Kasten

Technik	Ausprägungen			
Maximales Abfluggewicht	<0,25 kg	0,25-2 kg	2-5 kg	5-25 kg
Maximale Zuladung	<0,1 kg	0,1-1 kg	1-2,5 kg	>3 kg
Batterielaufzeit ohne Zuladung	<15 min	15-25 min	25-35 min	>35 min
Batterielaufzeit mit max. Zuladung	<5 min	5-15 min	15-25 min	>25 min
Höchstgeschwindigkeit	<5 m/s	5-10 m/s	10-15 m/s	>15 m/s
autonome Steuerung	Ja		Nein	
Batterieaufladung	Manueller Wechsel	Automatischer Wechsel	Ladestation	
Lastwechsel	Manuell		Automatisch	
Bauweise	Ausprägungen			
Drohnendurchmesser	<500 mm	500-1000 mm	1000-1500 mm	>1500 mm
Rotordurchmesser	<200 mm	200-300 mm	300-500 mm	>500 mm
Rotoranzahl	4	5	6	8
Sicherheit	Ausprägungen			
Rotorschutz	Ja		Nein	
IP-Schutzklasse (gegen Feuchtigkeit aus: ...)	≤X3 (kein relevanter Schutz gegen Niederschlag)	X4 (Spritzwasser)	X5 (Strahlwasser / leichter Regen)	X6 (schweres Strahlwasser / starker Regen)
Windstabilität	<20 km/h	20-30 km/h	30-40 km/h	>40 km/h
Redundanz der Flugsteuerung	Einfach	Zweifach	Dreifach	
Fallschirm	Ja		Nein	
Failsafe	Ja		Nein	
Geofencing	Ja		Nein	

Anhang 2: Zugrunde gelegte Daten der Fördermittel

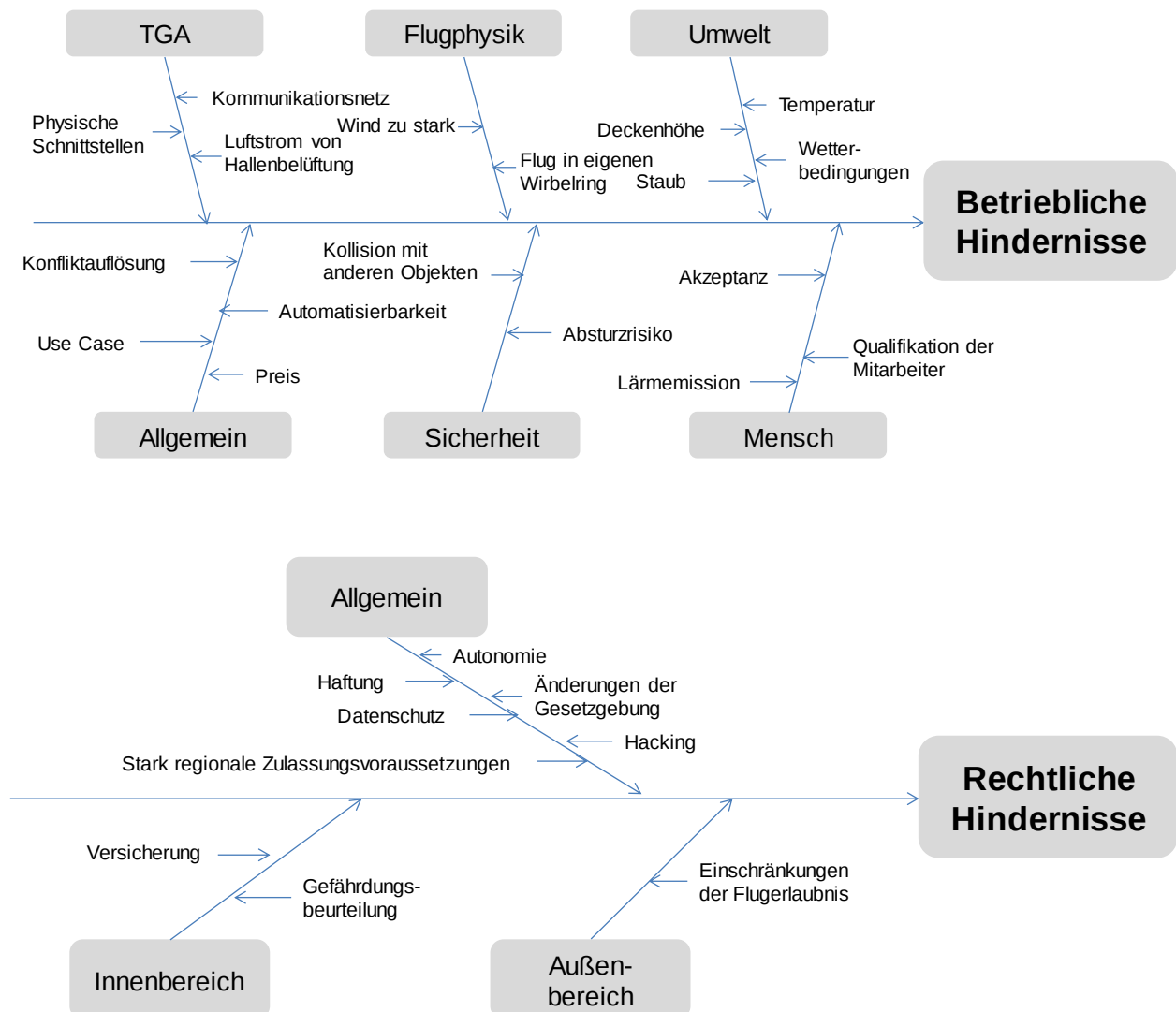
Fördermittel	Drohne	Schlepper	Stapler	Schmalgangstapler	FTS	Outdoor-Schlepper
						
	DJI Matrice 600 Pro (modifiziert)	Toyota Tracto Elektro-Sitzschlepper 2,0 t (4CBT2)	Toyota Traigo 48, 3-Rad Elektro 1,5 t (8FBE15T)	Toyota BT Vector Schmalgangstapler Man-down 1,5 t (VRE150)	Jungheinrich ERC 215a	Jungheinrich EZS 7280
Modell						
Max. Geschwindigkeit	m/s	3,61	4,44	3,89	0,47	6,94
Durchschn. Geschwindigkeit ohne Last (indoor)	m/s	3,61	4,44	3,89	0,47	6,94
Durchschn. Geschwindigkeit mit Last (indoor)	m/s	2,50	4,44	2,92	0,47	6,94
Durchschn. Geschwindigkeit ohne Last (outdoor)	m/s		4,44	3,89		6,94
Durchschn. Geschwindigkeit mit Last (outdoor)	m/s		4,44	2,92		6,94
Aufstiegsgeschwindigkeit mit/ ohne Last	m/s					
Abstiegsgeschwindigkeit mit/ ohne Last	m/s					
Tragfähigkeit	kg	2000	1500	1500	1500	2000
Batterienkapazität	Ah	129,0	500,0	620,0	375,0	620,0
Batterienennspannung	V	48,0	48,0	48,0	24,0	48,0
Entladungen pro Jahr	1/a	200	200	200	200	200
Kosten pro Ladevorgang	€	0,68	2,63	3,26	0,99	3,26
Batterieladefzeit ohne Last	min					
Batterieladefzeit mit Last	min					
Ladezeit	min					
Nutzungsdauer	a	8	8	8	8	8
Fahrzeug	€	15.919,00	37.814,00	70.000,00	65.000,00	40.000,00
Zusätzliche Hard- u. Software	€	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ersatzbatterie-Set	€	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Batterieladegerät	€	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00
Anhänger	€	630,25	0,00	0,00	0,00	0,00

Anhang 3: Risiken und Hindernisse

Risiko	Flugphase	Potenzielle(r) Fehler	Schaden als Fehlerfolge	Fehlerursache
101	Start der Drohne	Versetzen der Drohne beim Start	Kollisionen/Absturz	Drohne wird durch einen Windstoß versetzt
102	Start der Drohne	Greifen in rotierende Rotorblätter	Schnittverletzungen, Rotorbruch	Mitarbeiter trägt keine Handschuhe, Rotorblätter sind ungeschützt
103	Start der Drohne	Fliegen in den eigenen Wirbelring	Drohne unkontrollierbar, Kollisionen möglich	Erzeugen und fliegen in den eigenen Wirbelring
104	Start der Drohne	Start der Drohne wird nicht wahrgenommen	Kollision mit Mitarbeiter	Fehlende Aufmerksamkeit, fehlendes Signal
201	Lastaufnahme	Transportgut zu schwer	Transportgut kann nicht transportiert werden	Nichtbeachten der maximalen Zuladung
202	Lastaufnahme	Transportgut zu groß(-flächig)	Transportgut kann nicht transportiert werden	Nichtbeachten der maximalen Maße des Transportguts
203	Lastaufnahme	Unsaugmäßige Befestigung des Transportgutes	Beschädigung/Herunterfallen des Transportgutes	Technische Fehler bei Beladung
204	Lastaufnahme	Fehler bei Teilerkennung (automatisierte Be-/Entladung)	Beschädigung von Greifern/Transportgut	Technische Defekte des Be-/Entladesystems
205	Lastaufnahme	Außerordentlich schwerer Punkt	Start unmöglich, erhöhter Energieverbrauch	Transportgut verrutscht während Flug
301	Flug outdoor	Flug bei ungeeigneter Witterung	Beschädigung der Drohne durch Feuchtigkeit	Hohe Luftfeuchtigkeit / Regen / Hagel / Sturm
302	Flug outdoor	Flug bei ungeeigneter Witterung	Beschädigung des Transportgutes durch die Witterung	Fehlender Schutz des Transportgutes durch Drohne oder Verpackung
303	Flug outdoor	Fliegen bei Gegenwind	Geschwindigkeitseinbußen, erhöhter Energieverbrauch	Windanfälligkeit von Drohnen
304	Flug outdoor	Fliegen gegen Wind mit Geschwindigkeiten über den max. Windwiderstand	Kollisionen/Absturz	Nichtbeachten der maximalen Windgeschwindigkeit
305	Flug outdoor	Kontrollverlust durch auftretende Turbulenzen beim Fliegen im Wind	Kollision mit Gegenständen oder Menschen in der Nähe	Starke Wirkung der Steuersignale beim Fliegen mit dem Wind / Turbulenzen
306	Flug outdoor	Kontrollverlust durch Thermik bei Flug über Industriefachwerke/-dächer	Kontrollverlust/Kollision mit Gebäuden/Absturz	Verwirbelungen durch Thermik und horizontal wehenden Wind
401	Flug indoor	Absturz während des Schwebens	Beschädigung von Drohne und Transportgut	Besondere Belastung des Akkus durch Schweben mit Transportgut
402	Flug indoor	Kollision von Drohnen	Absturz, Beschädigung von Drohne und/oder Transportgut	Steuerungsfehler, Ausfall von Steuerungssystemen
403	Flug indoor	Lautstärke der Drohne störend für Mitarbeiter	Sinkende Produktivität	Von Rotoren verursachtes Geräusch
404	Flug indoor	Beschädigung des Transportgutes durch die Drohne	Finanzielle Einbußen	Transportgut kann beispielsweise in Rotor gelangen
405	Flug indoor	Kontaktverlust innerhalb der Fabrikhalle	Keine Kommunikation mit der Drohne mehr möglich	Zu dicke Hallenwände
406	Flug indoor	Thermisch bedingter Schaden am Transportgut während des Fluges	Finanzielle Einbußen	Überflug von Fertigungsbereichen mit zu hoher Temperatur
407	Flug indoor	Mitarbeiter ist nicht in der Lage, die Drohne sinnvoll einzusetzen	Sinkende Produktivität	Fehlende Schulungen oder fehlende Eignung des Mitarbeiters
408	Flug indoor	Kollision mit dem Tor beim Hindurchfliegen	Beschädigung von Drohne/Transportgut	Unregelmäßiges Schließen und Öffnen des Tores
409	Flug indoor	Versetzen der Drohne durch Luftzug	Kollision/Absturz	Windzug bei Flug nah an offenen Türen
410	Flug indoor	Flug zu nah an der Decke - "heransaugen"	Kontrollverlust, Kollision mit Deckenausstattung	Zu geringe Distanz nach oben, "Heransaugen" an Decke
411	Flug indoor	Flug nah an der Decke	Drohne muss Umwege fliegen/stetig ausweichen	TGA wie Rohre oder Heizsysteme an der Decke / Steuerung

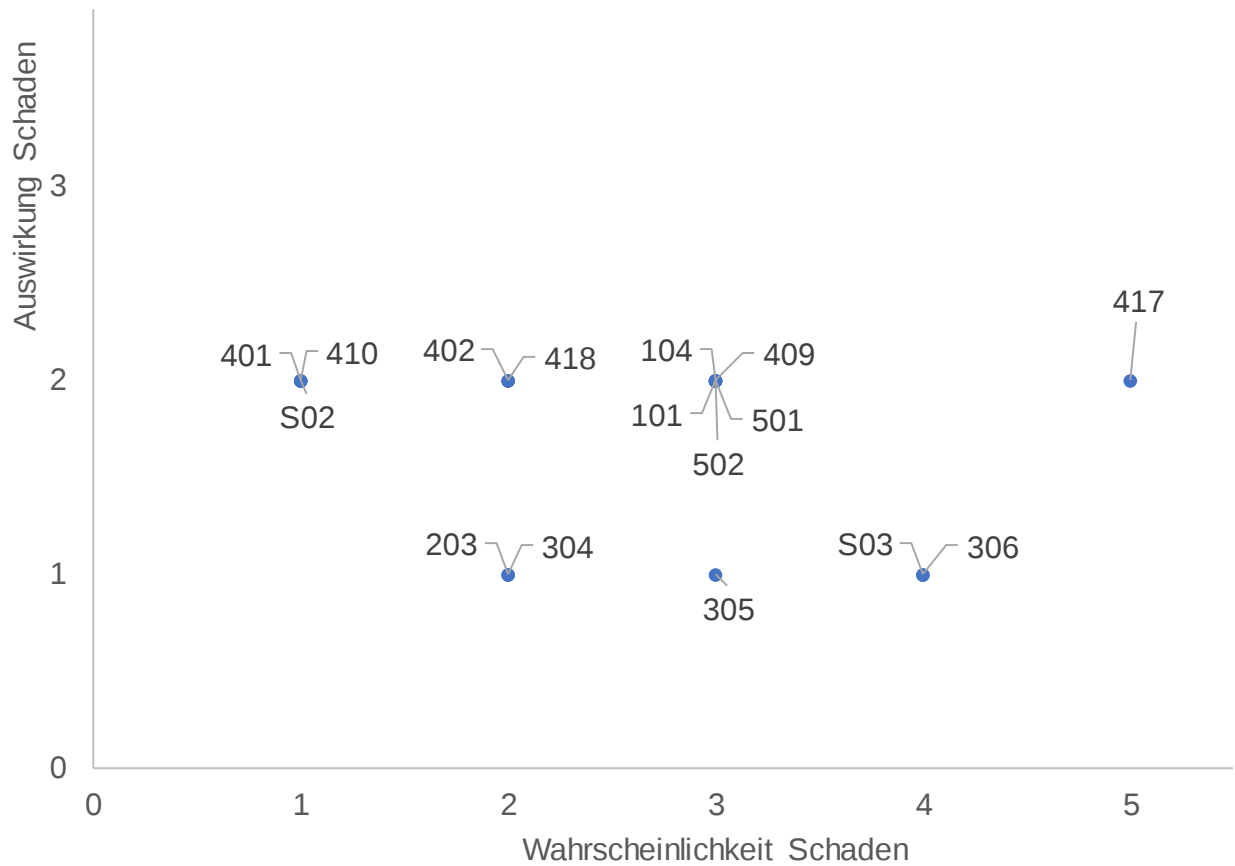
Risiko	Flugphase	Potenzielle(r) Fehler	Schaden als Fehlerfolge	Fehlerursache
412	Flug indoor	Überfliegen der Produktionsbereiche durch zu geringe Deckenhöhe kaum möglich	Ausweichrouten notwendig	Zu geringe Hallenhöhe
413	Flug indoor	Engstellen im Hallenlayout erfordern ständiges Ausweichen	Verzögerungen im Transport	Enges Stützenraster
414	Flug indoor	Ungesichertes Überfliegen von Menschen	Herabfallende Gegenstände verletzen Mitarbeiter	Lose Bauteile der Drohne oder schlecht befestigtes Transportgut / Fehlende Absicherung
415	Flug indoor	Störungen infolge des Durchfliegens von Arbeitsplätzen	Sinkende Produktivität	Behindern oder Ablenkung der Mitarbeiter durch die Drohne
416	Flug indoor	Störungen infolge des Durchfliegens von Arbeitsplätzen	Schnittverletzung durch Rotorblätter	Nahes Fliegen an Mitarbeitern / Unachtsamkeit der Mitarbeiter
417	Flug indoor	Unerwartet auftretende Hindernisse	Kollisionen möglich durch plötzliche Ausweichmanöver	Ständige Veränderung / Bewegung im Betrieb
418	Flug indoor	Bedienfehler durch Mitarbeiter	Kollisionen möglich	Abrutschen vom Steuerknüppel / schlecht geschultes Personal
501	Landung/Lastabgabe	Versetzen der Drohne beim Landen im Außenbereich	Kollisionen möglich	Drohne wird durch keinen Windstoß versetzt
502	Landung/Lastabgabe	Fliegen in den eigenen Wirbelring	Drohne unkontrollierbar, Kollisionen möglich	Schneller vertikaler Sinkflug
503	Landung/Lastabgabe	Außerplanmäßiges Landen indoor	Betriebseinrichtungen werden beschädigt	Positionsverlust, Probleme bei der Standortbestimmung
504	Landung/Lastabgabe	Griff in rotierende Rotorblätter bei manueller Transportgutabnahme	Schnittverletzungen, Rotorbruch	Fehlender Schutz der Rotorblätter, Mitarbeiter wartet nicht bis Rotoren stehen
505	Landung/Lastabgabe	Verspätetes Ankommen des Transportgutes am Zielort	Sinkende Produktivität	Fehler im logistischen Transportablauf
O01	Organisation	Keine Drohne verfügbar	Verzögerungen	Alle Drohnen in Wartung/Luft, keine geladenen Akkus verfügbar
O02	Organisation	Fehlende Akzeptanz durch Mitarbeiter	Sinkende Produktivität	Mangelnde Kommunikation mit Mitarbeitern im Vorfeld
O03	Organisation	Nachteilige Änderungen in der Gesetzgebung	Notwendigkeit neuer Genehmigungen, Einschränkungen der Betriebserlaubnis	Zukünftige Ge- und Verbote bzgl. Drohnen
O04	Organisation	Keine Aufstiegserlaubnis	Drohne nicht nutzbar	Fehlende Planung, keine Genehmigung im Vorfeld eingeholt
S01	System	Implementieren der Drohnentechnologie gelingt nicht	Probleme in der Kommunikation	Bspw. Schnittstellenprobleme zw. Software-Systemen, Indoor-Navigation unmöglich, ...
S02	System	Beschädigung des Akkus durch hohe Temperaturen während des Fluges	Spontaner Absturz	Über-/Durchflug von Fertigungsbereichen mit extremer Temperatur
S03	System	Akkuausfall/-ladezustand zu gering	Transportgut kann nicht transportiert werden, Notlandung	Hohe Energieaufnahme Drohne durch Wind/Last/niedrige Außentemperatur/..
S04	System	Stromverluste beim Laden führen zur Erwärmung des Akkus	Akkubrand	Innerer Widerstand des Akkus zu hoch (bspw. durch Alterung)
S05	System	Zu heiße Lagerung der Akkus	Akkus blähen sich auf/nicht mehr verwendbar	Reaktion der chemischen Zusammensetzung des Akkus auf Hitze
S06	System	Kurzschluss der Akkus	Akkubrand	Mechanische Beschädigung oder Zusammentreffen von Gegenständen mit dem Akku
S07	System	Hacken der Drohne	Zu-/Angriff auf Firmennetzwerk/Drohne	Fehlende IT Sicherheit

Anhang 4: Ishikawa-Diagramme der betrieblichen sowie rechtlichen Hindernisse

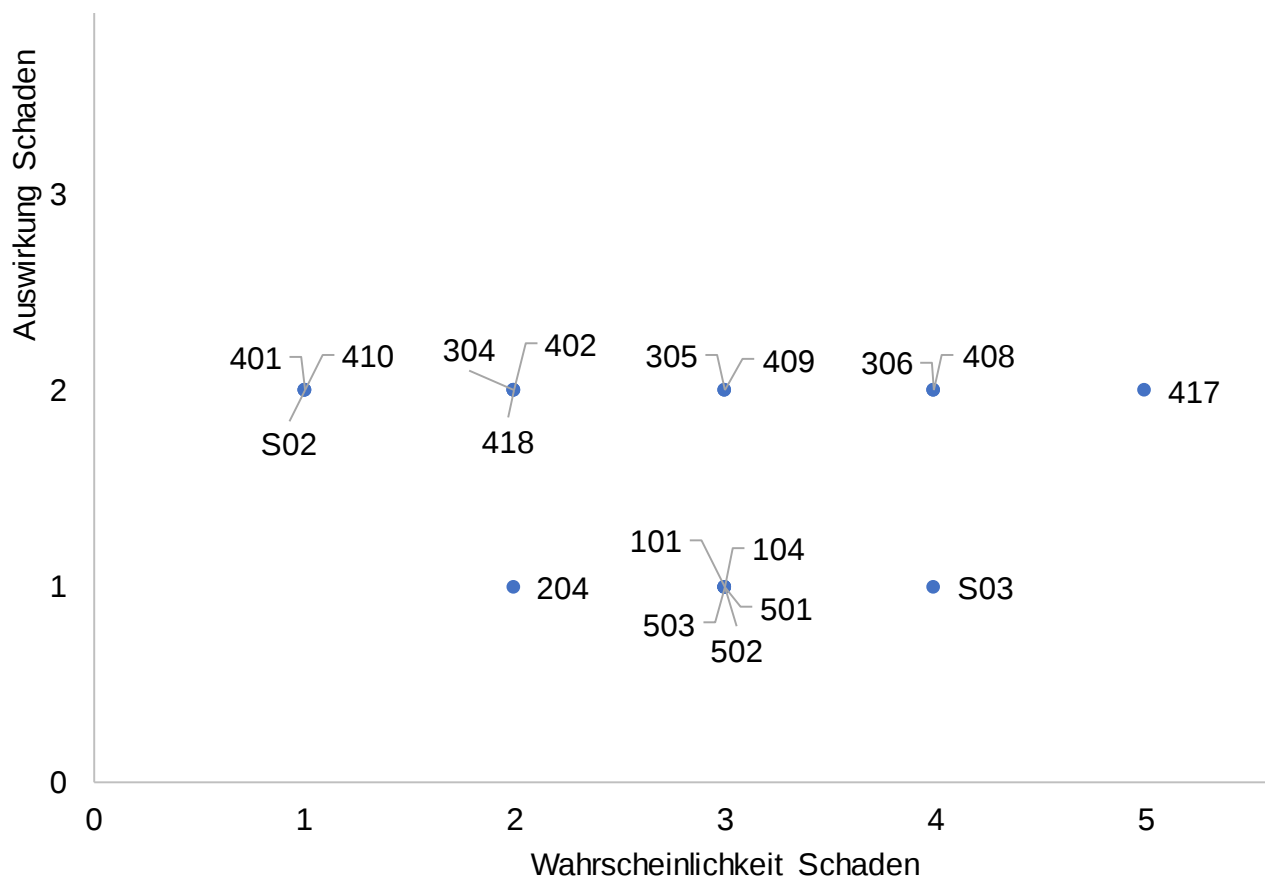


Anhang 5: Risk-Maps der Hindernisse (Wahrscheinlichkeit und Auswirkung)

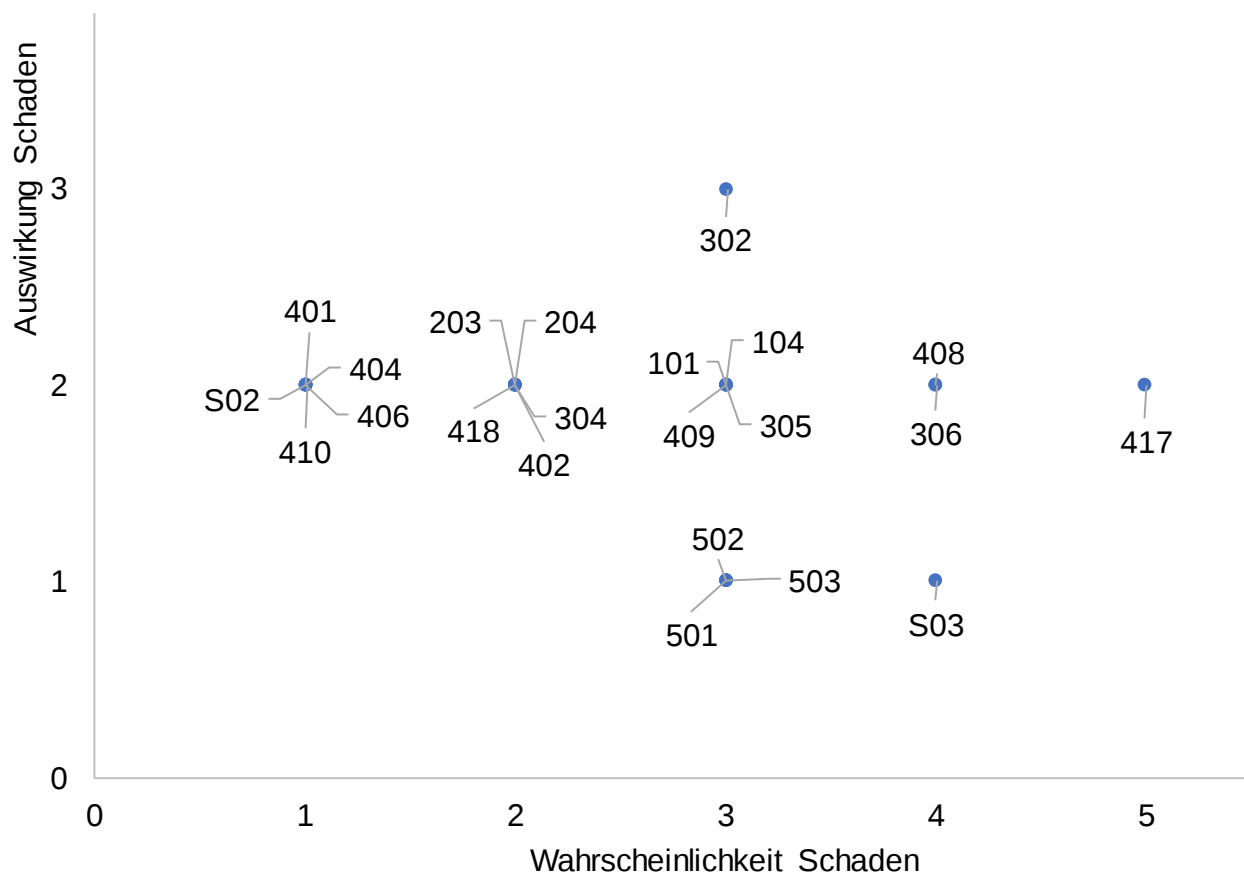
Risiken für den Menschen



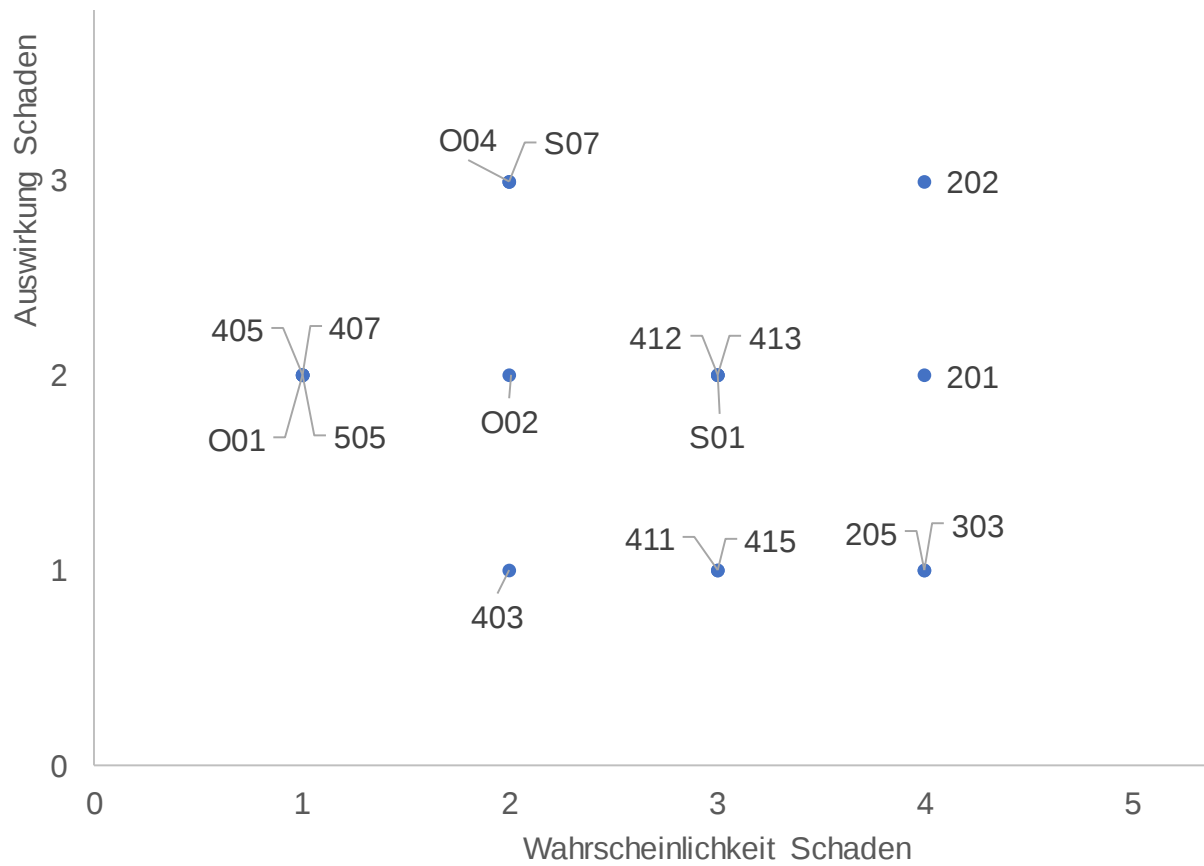
Risiken für die Drohne als Fluggerät



Risiken für das Transportgut



Risiken für den Prozess



Anhang 6: Zusammenfassung Kriterien der Nutzwertanalyse

Kategorie	Kriterium	Erläuterung
Flexibilität	Automatisierungsgrad	Notwendiges Maß manuellen Eingreifens und Personalaufwand
	Integrierbarkeit in automatische Systeme	Proportionaler Zusammenhang mit Automatisierungsgrad
	Flexibilität bei Layoutänderung	Aufwand für Änderung der Fahrwege
	Flexibilität bei Änderung der Förderleistung	Skalierbarkeit der Stückzahlen pro Zeiteinheit
	Erweiterungsfähigkeit	Fähigkeit bestehende Fördertechnik auf angrenzende Bereiche zu expandieren
	Störbehandlung und Notbetrieb	Arbeitsaufwand für Behebung einer Störung und Möglichkeit eines Notbetriebs
Dispositiver Nutzen	Ergonomie	Physische Belastung für Mitarbeiter
	Pufferfähigkeit	Möglichkeit der Nutzung des Flurfördermittels als Puffer
	Sicherheit gegen Unfall	Gefahrenentstehung durch Gütertransport für andere Verkehrsteilnehmer und Gegenstände
Technisches Leistungsvermögen	Flächennutzung	Belegungsgrad der Hallenfläche der Fördertechnik auf Bodenniveau und im Raum
	Ökologische Gesichtspunkte	Energieverbrauch, Verschleiß und Schadstoffemissionen des Flurfördermittels
	Überwinden von Steigungen	Notwendigkeit von Aufzügen o. ä. zur Überwindung des Höhenniveaus
Sonstiger Nutzen	Technologievorsprung	Modernität und Zukunftsorientierung des Flurfördermittels mit Auswirkung auf betriebliche Leistungsprozesse und Image

Anhang 7: Lastenheft an die Fabrik

Sofortmaßnahmen

Nr.	Flugphase	Potenzielle(r) Fehler	Sofortmaßnahmen
101	Start der Drohne	Versetzen der Drohne beim Start	Vorflugcheckliste vor jedem Start abarbeiten, Spezielle Start-/Landebereiche (windgeschützt, ausreichend Abstand)
102	Start der Drohne	Greifen in rotierende Rotorblätter	Handschuhe, Schutzbrille
103	Start der Drohne	Fliegen in den eigenen Wirbelring	Schnelles Starten
201	Lastaufnahme	Transportgut zu schwer	Zulässiges Gewicht festlegen, große Lasten aufteilen
202	Lastaufnahme	Transportgut zu groß(-flächig)	Ausweichen auf andere Transportmittel
203	Lastaufnahme	Unsachgemäße Befestigung des Transportgutes	Überprüfung der Ladung vor dem Start (Vorflugcheckliste)
204	Lastaufnahme	Fehler bei Teileerkennung (automatisierte Be-/Entladung)	Manuelle Ladung
301	Flug outdoor	Flug bei ungeeigneter Witterung	Fluggenehmigung (outdoor) abhängig von Wetter
303	Flug outdoor	Fliegen bei Gegenwind	Fluggenehmigung (outdoor) abhängig von Wetter
304	Flug outdoor	Fliegen gegen Wind mit Geschwindigkeiten über den max. Windwiderstand	Fluggenehmigung (outdoor) abhängig von Wetter
305	Flug outdoor	Kontrollverlust durch auftretende Turbulenzen beim Fliegen im Wind	Fluggenehmigung (outdoor) abhängig von Wetter
306	Flug outdoor	Kontrollverlust durch Thermik bei Flug über Industrieschornsteine/-dächer	Alternativrouten
401	Flug indoor	Absturz während des Schwebens	Warten auf festem Platz (nicht schwebend)
402	Flug indoor	Kollision von Drohnen	Backup-Pilot für Übernahme der Steuerung im Ernstfall
403	Flug indoor	Lautstärke der Drohne störend für Mitarbeiter	Gehörschutz für Mitarbeiter
405	Flug indoor	Kontaktverlust innerhalb der Fabrikhalle	Flug nur in funkbaren Bereichen
406	Flug indoor	Thermisch bedingter Schaden am Transportgut während des Fluges	Alternativrouten
407	Flug indoor	Mitarbeiter ist nicht in der Lage, die Drohne sinnvoll einzusetzen	Vorflugcheckliste, Fördern der Mitarbeiterakzeptanz und -qualifikation, frühzeitige Einbindung der Mitarbeiter
408	Flug indoor	Kollision mit dem Tor beim Hindurchfliegen	Unter Aufsicht/manuell durch Tore fliegen
409	Flug indoor	Versetzen der Drohne durch Luftzug	Alternativrouten
410	Flug indoor	Flug zu nah an der Decke - "heransaugen"	Drohnen-Bereiche in ausreichender Höhe ausweisen, ggf. Umwege
411	Flug indoor	Flug nah an der Decke	Drohnen-Bereiche in ausreichender Höhe ausweisen, ggf. Umwege
412	Flug indoor	Überfliegen der Produktionsbereiche durch zu geringe Deckenhöhe kaum möglich	Drohnen-Bereiche in ausreichender Höhe ausweisen, ggf. Umwege
414	Flug indoor	Ungesichertes Überfliegen von Menschen	Vor dem Fliegen auf lose Teile überprüfen (Vorflugcheckliste)
415	Flug indoor	Störungen infolge des Durchfliegens von Arbeitsplätzen	Alternativrouten
417	Flug indoor	Unerwartet auftretende Hindernisse	Alternativrouten
418	Flug indoor	Bedienfehler durch Mitarbeiter	Fördern der Mitarbeiterakzeptanz und -qualifikation
501	Landung/Lastabgabe	Versetzen der Drohne beim Landen im Außenbereich	Spezielle Start-/Landebereiche (windgeschützt, ausreichend Abstand), Gegen den Wind landen
502	Landung/Lastabgabe	Fliegen in den eigenen Wirbelring	Gesicherte Start-/Landebereiche
503	Landung/Lastabgabe	Außerplanmäßiges Landen indoor	(Alternative) Landeorte vor Flugstart für Flugroute festlegen
504	Landung/Lastabgabe	Griff in rotierende Rotorblätter bei manueller Transportgutabnahme	Rotorkäfig erst öffnen wenn Rotoren nicht mehr drehen, Tragen von Handschuhen
505	Landung/Lastabgabe	Verspätetes Ankommen des Transportgutes am Zielort	Ausweichen auf andere Transportmittel
O01	Organisation	Keine Drohne verfügbar	Ausweichen auf andere Transportmittel
O02	Organisation	Fehlende Akzeptanz durch Mitarbeiter	Fördern der Mitarbeiterakzeptanz und -qualifikation, frühzeitige Einbindung der Mitarbeiter
O03	Organisation	Nachteilige Änderungen in der Gesetzgebung	Verfolgen der rechtlichen Entwicklungen bzgl. Drohnen
O04	Organisation	Keine Aufstiegserlaubnis	Ausweichen auf andere Transportmittel
S02	System	Beschädigung des Akkus durch hohe Temperaturen während des Fluges	Alternativrouten
S03	System	Akkuausfall/-ladezustand zu gering	Akku nach jeder Nutzung laden, Akkutauch nach vorgegeb. Zeit
S04	System	Stromverluste beim Laden führen zur Erwärmung des Akkus	Bereitstellen von Löschsand
S05	System	Zu heiße Lagerung der Akkus	Trockene Lagerung, Raumtemperatur, regelmäßige Überprüfung
S06	System	Kurzschluss der Akkus	Gegen Kurzschluss gesicherte Akkus bei Wechsel und Lagerung, Bereitstellen von Löschsand

Langfristmaßnahmen

Nr.	Flugphase	Potenzielle(r) Fehler	Langzeitmaßnahmen
103	Start der Drohne	Fliegen in den eigenen Wirbelring	Spezielle Start-/Landebereiche (windgeschützt, ausreichend Abstand)
104	Start der Drohne	Start der Drohne wird nicht wahrgenommen	Drohnenkorridor
303	Flug outdoor	Fliegen bei Gegenwind	Schutz der Verkehrswege (Bsp. Überdachung)
304	Flug outdoor	Fliegen gegen Wind mit Geschwindigkeiten über den max. Windwiderstand	Schutz der Verkehrswege (Bsp. Überdachung)
305	Flug outdoor	Kontrollverlust durch auftretende Turbulenzen beim Fliegen im Wind	Schutz der Verkehrswege (Bsp. Überdachung)
401	Flug indoor	Absturz während des Schwebens	Einrichtung von Warteplätzen, ausgewiesene Start-/Landepunkten, Netze über Arbeitsbereichen
402	Flug indoor	Kollision von Drohnen	Drohnenkorridor, Netze über Arbeitsbereichen
403	Flug indoor	Lautstärke der Drohne störend für Mitarbeiter	Wenn möglich größerer Abstand zwischen Drohne und Mitarbeiter
405	Flug indoor	Kontaktverlust innerhalb der Fabrikhalle	Verstärken des Signals zur Basis
407	Flug indoor	Mitarbeiter ist nicht in der Lage, die Drohne sinnvoll einzusetzen	Qualifizierung der Mitarbeiter
408	Flug indoor	Kollision mit dem Tor beim Hindurchfliegen	Zusätzliche Ein-/Ausgangsklappen für Drohnen
409	Flug indoor	Versetzen der Drohne durch Luftzug	Automatische Öffnungs-/Schließmechanismen der Tore
410	Flug indoor	Flug zu nah an der Decke - "heransaugen"	Netze über Arbeitsbereichen, Drohnenkorridor
411	Flug indoor	Flug nah an der Decke	Drohnenkorridor
412	Flug indoor	Überfliegen der Produktionsbereiche durch zu geringe Deckenhöhe kaum möglich	Drohnenkorridor
413	Flug indoor	Engstellen im Hallenlayout erfordern ständiges Ausweichen	Anpassen des Layouts
414	Flug indoor	Ungesichertes Überfliegen von Menschen	Drohnenkorridor, Netze über Arbeitsbereichen
415	Flug indoor	Störungen infolge des Durchfliegens von Arbeitsplätzen	Drohnenkorridor
417	Flug indoor	Unerwartet auftretende Hindernisse	Drohnenkorridor, Netze über Arbeitsbereichen
418	Flug indoor	Bedienfehler durch Mitarbeiter	Netze über Arbeitsbereichen
501	Landung/Lastabgabe	Versetzen der Drohne beim Landen im Außenbereich	Landefläche von Drohnen frei von Hindernissen, Begrenzungen für Sicherheitsabstände zu Menschen
502	Landung/Lastabgabe	Fliegen in den eigenen Wirbelring	Landepunkt auf Lochblech oder erhöhter Position
503	Landung/Lastabgabe	Außerplanmäßiges Landen indoor	Start- / Landebereiche angemessen gestalten, redundante Systeme zur Positionierung, Drohnenkorridor
505	Landung/Lastabgabe	Verspätetes Ankommen des Transportgutes am Zielort	Optimierung logistischer Prozesse
O01	Organisation	Keine Drohne verfügbar	Erhöhung des Bestands an Drohnen, Planung optimieren, Anforderungen priorisieren
O02	Organisation	Fehlende Akzeptanz durch Mitarbeiter	Schulung, Anreize schaffen
O03	Organisation	Nachteilige Änderungen in der Gesetzgebung	Befolgen neuer Ge- und Verbote
O04	Organisation	Keine Aufstiegserlaubnis	Erfüllen der Auflagen zur Erteilung einer Erlaubnis
S01	System	Implementieren der Drohnentechnologie gelingt nicht	Projektplanung
S03	System	Akkuausfall/-ladezustand zu gering	Drohnen nur im Einzeltransport, Netze über Arbeitsbereichen
S05	System	Zu heiße Lagerung der Akkus	Akkus innerhalb eines Temperaturbandes kontrolliert lagern
S06	System	Kurzschluss der Akkus	Schulung der Mitarbeiter
S07	System	Hacken der Drohne	Erhöhen der Cybersicherheit

Anhang 8: Lastenheft an die Drohne

Nr.	Potenzielle(r) Fehler	M_Konstruktion/Aufbau_Drohne
101	Versetzen der Drohne beim Start	Rotorschutz für Drohnen
102	Greifen in rotierende Rotorblätter	Rotorschutz für Drohnen
104	Start der Drohne wird nicht wahrgenommen	Optische/akustische Warnsignale
203	Unsachgemäße Befestigung des Transportgutes	Standardisierte Transportboxen
205	Außermittiger Schwerpunkt	Vorbeugung von Verrutschen (Ladungssicherung), Segmentierung in Transportbox
301	Flug bei ungeeigneter Witterung	Drohnen mit min. IP-Schutzklasse von X5
302	Flug bei ungeeigneter Witterung	Standardisierte Transportboxen
303	Fliegen bei Gegenwind	Auswahl Vmax,Drohne (Richtwert: Max. Windgeschwindigkeit = Vmax,Drohne/2)
304	Fliegen gegen Wind mit Geschwindigkeiten über den max. Windwiderstand	Auswahl Vmax,Drohne (Richtwert: Max. Windgeschwindigkeit = Vmax,Drohne/2)
305	Kontrollverlust durch auftretende Turbulenzen beim Fliegen im Wind	Auswahl Vmax,Drohne (Richtwert: Max. Windgeschwindigkeit = Vmax,Drohne/2)
402	Kollision von Drohnen	Redundante Flugsteuerung, FailSafe, Kollisionsvermeidungssystemen
404	Beschädigung des Transportgutes durch die Drohne	Ladungssicherung, Segmentierung in Transportbox (Ladungssicherung), automatisierte Ladung und Sicherung des Transportguts
406	Thermisch bedingter Schaden am Transportgut während des Fluges	Thermischer Schutz von Drohne und Transportgut gegen extreme Temperaturen
408	Kollision mit dem Tor beim Hindurchfliegen	Zusätzliche Kommunikationseinheit mit Tor
416	Störungen infolge des Durchfliegens von Arbeitsplätzen	Rotorschutz
417	Unerwartet auftretende Hindernisse	Rotorschutz, sensorischer Kollisionsschutz
418	Bedienfehler durch Mitarbeiter	Automatisierte Be-/Entladung
503	Außerplanmäßiges Landen indoor	redundante Systeme zur Positionierung
504	Griff in rotierende Rotorblätter bei manueller Transportgutabnahme	Rotorschutz
S01	Implementieren der Drohnentechnologie gelingt nicht	Manuelle Steuerung, manuelle Eingabe Flugdaten, Schnittstellen anpassen
S02	Beschädigung des Akkus durch hohe Temperaturen während des Fluges	Thermischer Schutz von Drohne und Transportgut gegen extreme Temperaturen, Temperaturüberwachung, redundante Akkus
S03	Akkuausfall/-ladezustand zu gering	Akkuaustausch nach vorgegeb. Zeit austauschen, Redundanz der Akkus, Akkumanagement
S04	Stromverluste beim Laden führen zur Erwärmung des Akkus	Temperaturüberwachung, Akkumanagement
S06	Kurzschluss der Akkus	Gegen Kurzschluss gesicherte Akkus bei Wechsel und Lagerung
S07	Hacken der Drohne	Not-AUS unabhängig von restlicher Drohnen-Steuerung

Literaturverzeichnis

- [Arn08] Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A. et al.: Handbuch Logistik. 3. Aufl., Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [Bec16] Becker, H. P.: Investition und Finanzierung. 7., aktualisierte Auflage, Springer Gabler, Wiesbaden, 2016.
- [Bre18] Breitskopf, A.: Industriestrompreise in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2017.
- [Bun00] Bundesministerium der Finanzen: AfA-Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagegüter. 2000.
- [Cas18] Castedello, M.; Schöniger Stefan: Cost of Capital Study 2018. <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/ch/pdf/cost-of-capital-study-2018.pdf>, 20.08.2019.
- [Chr18] Christen, M.; Guillaume, M.; Jablonowski, M. et al.: Zivile Drohnen – Herausforderungen und Perspektiven. vdf, 2018.
- [Deu18] Deutsche Bundesbank: Bekanntgabe des Basiszinssatzes zum 1. Januar 2019: Basiszinssatz bleibt unverändert bei -0,88 %. In: Bundesanzeiger, 2018.
- [DJI19] DJI: MATRICE 600 PRO - Unkomplizierte Professionalität. <https://store.dji.com/de/category/matrice-600?from=shop>, 13.08.2019.
- [Fis97] Fischer, W.; Dittrich, L.: Materialfluß und Logistik. Springer, Berlin, Heidelberg, 1997.
- [Hom18] Hompel, M. ten; Schmidt, T.; Dregger, J.: Materialflusssysteme. 4. Auflage, Springer Vieweg, Berlin, 2018.
- [Ima19] Imacc: Lohnnebenkosten Arbeitgeber 2019. <https://www.imacc.de/arbeitgeberanteil-rechner/#wie-hoch-ist-der-arbeitgeberanteil-in-prozent>, 11.07.2019.
- [Lan18] Landrock, H.; Baumgärtel, A.: Die Industriedrohne - der fliegende Roboter. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2018.
- [Pfo18] Pfohl, H.-C.: Logistiksysteme. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2018.
- [Pol17] Poll, D.: Drohnen in der Intralogistik, Geflügelter Lieferservice. <https://www.produktion.de/trends-innovationen/drohnen-in-die-intralogistik-gefluegelter-lieferservice-108.html>.
- [Ste19] StepStone GmbH: Lagerarbeiter/in Gehälter in Deutschland. <https://www.stepstone.de/gehalt/Lagerarbeiter-in.html>, 05.09.2019.

- [Ull05] Ullrich, G.: Die Wirtschaftlichkeit des FTS und seiner Konkurrenten: 13. Heidelberger Flurförderzeug-Tagung. Wirtschaftlichkeit, Sicherheit, Technik ; Tagung Heidelberg, 8. und 9. März 2005, VDI-Verl., Düsseldorf2005, S. 155–164.
- [VDI 2695] VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik: Ermittlung der Betriebskosten für Diesel- und Elektro-Gabelstapler. 2010.
- [VDI 2710] VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik: Analyse der Wirtschaftlichkeit Fahrerloser Transportsysteme (FTS). 2011.
- [Wan14] Wannenwetsch, H.: Integrierte Materialwirtschaft, Logistik und Beschaffung. 5., neu bearb. Aufl., Springer Vieweg, Berlin, 2014.
- [Wel19] Weller, W.: Vorschlag einer Drohnen-basierten Verkehrslösung. <https://edoc.hu-berlin.de/handle/18452/20560>, 12.08.2019.
- [Wry17] Wrycza, P.; Rotgeri, M.; Hompel, M. ten: Spielzeitreduktion autonomer Drohnen für den Transport eiliger Güter durch den Einsatz automatisierter Lastaufnahmemittel im Kontext eines ganzheitlich automatisierten Gesamtsystems. In: Logistics Journal Proceedings, 2017. Jg. (2017), H. 10, S. 1–9.