



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Fakultät Life Sciences

Analyse der Gefährdungen durch kommerzielle und private Drohnennutzung im städtischen Bereich

Bachelorarbeit

Im Studiengang Hazard Control

Vorgelegt von

Jan Henrik Möller



Hamburg

Am 15.05.2024

Gutachter: Prof. Dr. Karsten Loer (HAW Hamburg)

Gutachter: Prof. Dr. Clemens Gause (Northern Business School, Verband für Sicherheitstechnik e.V.)

Inhalt

1 Einleitung	6
2. Überblick.....	7
2.1 Kommerzielle Drohnen (Commercial Drones).....	7
2.1.1 Konfigurationen	7
2.2 Anwendungsbereiche	8
2.3 Stand der Technik	10
2.4 EU-Drohnenverordnung	12
2.4.1 Lufträume und U-Spaces	13
2.5 Nachfrage Drohnenlieferung	15
2.6 Betrachtetes Szenario	18
3. Gefährdungen	19
3.1 Ermittlung der Gefährdungen	19
3.1.1 Bewegte Transport- und Arbeitsmittel.....	19
3.1.2 Ungeschützt bewegte Maschinenteile	20
3.1.3 Unkontrolliert bewegte Teile.....	20
3.1.4 Physikalisch-chemische Gefährdungen	21
3.1.5 Einatmen von Gefahrstoffen	22
3.1.6 Brennbare Feststoffe	22
3.1.7 Folgegefährdungen durch Absturz	23
3.2 Art der Gefährdungsbeurteilung	23
4. Prozessstruktur	23
4.1 Inaktiv	24
4.2 Aktiv	24
4.3 Gefährdungen in den Prozessschritten	25
4.3.1 Vorbereitung.....	25
4.3.2 Start	25
4.3.3 Flug	26
4.3.4 Absetzen	26
4.3.5 Aufladen von Akkus	26
4.4 Ursachen für Fehler – Fehlerbäume	27
4.5 Schaden an Personen (mechanische Einwirkung)	27
4.5.1 Kollision – Drohne mit Person	27
4.5.2 Absturz von Drohne	28
4.5.3 Herabfallende Fracht	28
4.5.4 Kontakt mit Rotoren	29

4.6 Schaden an Personen (Brand)	29
4.6.1 Brand oder Explosion des Akkus durch technische Ursache	29
4.6.2 Brand oder Explosion des Akkus durch Fehlbedienung	29
4.7 Gefährdungsszenarien	29
4.8 Bewertungszahlen	32
5 Risikobewertung	34
5.1 Laden (Gewerbe)	35
5.1.1 Brand und/oder Explosion (technische Ursache)	35
5.1.2 Brand und/oder Explosion (operative Ursache)	36
5.2 Flugvorbereitung (Gewerbe)	37
5.2.1 Brand und/oder Explosion	37
5.3 Start (Gewerbe)	37
5.3.1 Kollision Drohne mit Person	37
5.3.2 Berührung mit Rotoren	38
5.3.3 Absturz von Drohne	39
5.3.4 Herabfallende Fracht	40
5.3.5 Brand und/oder Explosion nach Absturz auf Gebäude	41
5.4 Laden (Kleingewerbe)	42
5.4.1 Brand und/oder Explosion (technische Ursache)	42
5.4.2 Brand und/oder Explosion (operative Ursache)	43
5.5 Flugvorbereitung (Kleingewerbe)	44
5.5.1 Brand und/oder Explosion	44
5.6 Start (Kleingewerbe)	44
5.6.1 Kollision Drohne mit Person	45
5.6.2 Berührung mit Rotoren	45
5.6.3 Absturz von Drohne	45
5.6.4 Herabfallende Fracht	46
5.6.5 Brand und/oder Explosion nach Absturz auf Gebäude	46
5.7 Flug	47
5.7.1 Absturz von Drohne	47
5.7.2 Herabfallende Fracht	47
5.7.3 Brand und/oder Explosion nach Absturz auf Gebäude]	48
5.8 Absetzen (urban)	48
5.8.1 Absturz von Drohne	48
5.8.2 Herabfallende Fracht	48
5.8.3 Brand und/oder Explosion nach Absturz auf Gebäude	49

5.9 Absetzen (suburban).....	49
5.9.1 Absturz von Drohne	49
5.9.2 Herabfallende Fracht	49
5.9.3 Brand und/oder Explosion nach Absturz auf Gebäude	50
6. Ergebnisse und Maßnahmen	51
6.1 Absturz von Drohne	52
6.1.1 Substitution	52
6.1.2 Technische Schutzmaßnahmen	52
6.1.3 Organisatorische Maßnahmen	53
6.2 Brand und/oder Explosion (technische Ursache)	53
6.2.1 Substitution	53
6.2.2 Technische Schutzmaßnahmen	54
6.2.3 Organisatorische Maßnahmen	54
6.3 Herabfallende Fracht	54
6.3.1 Substitution	54
6.3.2 Technische Schutzmaßnahmen	55
6.3.3 Organisatorische Maßnahmen	55
6.4 Brand und/oder Explosion (Fehlbedienung)	55
6.4.1 Substitution	55
6.4.2 Technische Schutzmaßnahmen	55
6.4.3 Organisatorische Maßnahmen	56
6.5 Brand und/oder Explosion nach Absturz auf Dach.....	56
6.5.1 Substitution	56
6.5.2 Technische Schutzmaßnahmen	56
6.6 Kollision Drohne mit Person	56
6.6.1 Substitution	56
6.6.2 Technische Schutzmaßnahmen	56
6.6.3 Organisatorische Maßnahmen	57
6.7.1 Substitution	57
6.7.2 Technische Schutzmaßnahmen	57
6.7.3 Organisatorische Maßnahmen	58
7. Diskussion	59
Zusammenfassung	62
Literaturverzeichnis	63
Eidesstattliche Erklärung	71
Verzeichnisse	72

Abbildungsverzeichnis	72
Tabellenverzeichnis	72
Anhänge.....	74
Anhang 1 – Formblatt zur Ermittlung der Gefährdungen	74
Anhang 2 – Brand von Lithium-Ionen-Akkus	75
Anhang 3 - Fehlerbäume Personenschaden.....	76
Anhang 4 – AIS-Level für Drohnenabstürze.....	78
Anhang 5 – Auswertung PFMEA	79
Anhang 6 - Fehlerbaum Mechanische Gefährdung für Sachwerte	80
Anhang 7 – PFMEA Formblatt zur Bewertung der Risiken für Sachwerte.....	81

1 Einleitung

Mit dem rasanten Fortschritt der Drohnentechnologie eröffnen sich immer mehr Anwendungen für die kommerzielle Nutzung von Drohnen (Cohn et al. 2017). Während diese Entwicklung viele Vorteile bietet, wie z. B. verbesserte Lieferdienste, Lieferung von Medikamenten, Einsatz in der Landwirtschaft und erweiterte Überwachungs- und Kontrollmöglichkeiten in der Industrie sowie Unterstützung von Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS), birgt sie auch Risiken. Schätzungen zufolge werden im Jahr 2050 bis zu 7 Millionen privat und 400.000 kommerziell genutzte Drohnen den europäischen Luftraum füllen (SESAR 2017). Mit zunehmender Anzahl von Drohnen steigt aber auch die Wahrscheinlichkeit von Fehlfunktionen und Kollisionen. Tödliche Unfälle mit Drohnen haben gezeigt, wie schwer die Folgen eines Drohnenabsturzes für Personen am Boden sein können (Dalamagkidis et al. 2008; Hänsenberger 2017). Der zeitgleiche Einsatz von mehreren Tausend Drohnen über den dichtbesiedelten Gebieten europäischer Großstädte stellt folglich eine Extremsituation mit erheblichen Risiken dar. Derzeit liegen nur sehr wenige umfassende Untersuchungen der Gefährdungen durch kommerzielle Nutzung von Drohnen im urbanen Bereich vor. Gutiérrez Castro und Ventas García (2021) sehen trotz für den europäischen Luftraum vorgeschlagener Lösungsansätze zukünftig große Herausforderungen für die Luftsicherheit und die Koordination der großen Menge von Drohnen.

Darauf aufbauend konzentriert sich diese Arbeit am Beispiel der Stadt Hamburg auf die potentiellen Gefahren, die mit der kommerziellen Nutzung von Drohnen in Städten verbunden sind. Sie untersucht die Sicherheitsrisiken sowie geeignete Maßnahmen zur Reduktion dieser. Ziel ist es, mithilfe von Methoden aus der Arbeitssicherheit und der Zuverlässigkeitstechnik Grundlagen für einen sicheren und effizienten Einsatz von kommerziellen Drohnen in europäischen Großstädten zu schaffen. Um dies umzusetzen und eine schlüssige Herleitung der Ergebnisse zu liefern, ist die Arbeit wie folgt gegliedert:

- 2: Überblick über den derzeitigen Stand der Technik und Eingrenzung des betrachteten Szenarios.
- 3: Ermittlung der im betrachteten Szenario vorliegenden Gefährdungen.
- 4: Erstellen einer Prozessstruktur zur Untersuchung des betrachteten Szenarios.
- 5: Bewertung der in den einzelnen Prozessschritten vorliegenden Risiken.
- 6: Auswertung der Ergebnisse und Festlegung von geeigneten Maßnahmen zur Reduzierung inakzeptabler Risiken.
- 7: Diskussion der Ergebnisse.

2. Überblick

2.1 Kommerzielle Drohnen (Commercial Drones)

Bei den weitläufig unter der Bezeichnung „Drohnen“ bekannten Fluggeräten handelt es sich um unbemannte, ferngesteuert oder autonom agierende Luftfahrzeuge (Englisch: UAS = Unmanned Aerial System). Unter dem Begriff „Commercial Drone“ (kommerzielle Drohne) werden bestimmte Arten von UAS verstanden, die zur Erfüllung von Dienstleistungen genutzt werden.

2.1.1 Konfigurationen

Bei „Drohne“ bzw. UAS handelt es sich um einen Überbegriff für Luftfahrzeuge mit unterschiedlicher Größe und Konfiguration, die spezifisch für ihre Einsatzzwecke optimiert wurden.

Multicopter

Die im zivilen Bereich wahrscheinlich am weitesten verbreitete Bauform (Tkáč und Mésároš 2019). Multicopter besitzen mehr als einen Rotor. Hierbei sind Anordnungen von vier, sechs oder auch acht Rotoren geläufig (Quadro-, Hexa-, bzw. Octocopter), die an einem kreuz-, H- oder sternförmigen Rumpf angebracht sind (DGUV 2020a) (**Abb. 1**). Diese dem Hubschrauber ähnliche Funktionsweise ermöglicht es, sowohl senkrecht zu starten und zu landen als auch in der Luft zu verharren (Tkáč und Mésároš 2019)..Durch den Gebrauch von mehreren Rotoren ist es möglich, das Fluggerät in allen drei Achsen präzise zu steuern. Mehrere kleine Rotoren haben gegenüber einem einzelnen großen Rotor den Vorteil, dass sie nicht sehr weit über den Rumpf der Drohne herausragen. Aufgrund dieser Eigenschaften wird diese Art von UAS häufig für Fotografie bzw. Filmaufnahmen verwendet (Boon et al. 2017). Zudem sind Multicopter sehr gut in ihrer Größe skalierbar und reichen von kleinen handtellergrößen Geräten bis hin zu Flugtaxi. Durch den Einsatz mehrerer paarweise entgegengesetzt rotierender Rotoren wird zudem die notwendige Komplexität des Fluggerätes verringert. Im Gegensatz zu Starrflügel-UAS sind keine Star- und Landebahnen notwendig (Vergouw et al. 2016). Der Nachteil dieser Konfiguration liegt in der relativ geringen Akkulaufzeit von 20-30 Minuten (Yinka-Banjo und Ajayi, 2019; Tkáč und Mésároš 2019).

Helikopter

Bei dieser Art von UAS handelt es sich um ferngesteuerte oder auch autonom agierende Hubschrauber (**Abb. 2**). Wie auch schon bei den Starrflüglern reicht diese Bauart von Modellhubschraubern bis hin zu für den autonomen Einsatz umgebaute Spezialversionen regulärer Hubschrauber. Sie sind senkrechtstart- und landefähig (Tkáč und Mésároš 2019).

Starrflügel-UAS (engl.: Fixed-wing drone)

Unter Starrflügel-UAS werden alle Arten von Drohnen zusammengefasst, deren Auftriebsflächen sich nicht zwecks Generierung von Auftrieb bewegen müssen. Sie können einen regulären Rumpfqerschnitt mit

separatem Rumpf und Tragflügeln (**Abb. 3**) oder eine Nurflügel-Konfiguration aufweisen (Tkáč und Mésároš 2019). Sie umfassen eine große Bandbreite an Luftfahrzeugen von ferngesteuerten Modellfliegern, über militärische UAS wie der MQ-9 Predator, bis hin zu für den (teil-)autonomen Betrieb umgebaute Flugzeuge. Reine Starrflügel-UAS sind im kommerziellen Bereich eher selten anzutreffen, da sie entweder eine ausreichend lange Start- und Landebahn benötigen oder speziell angefertigte Startkatapulte (Tkáč und Mésároš 2019). Der Vorteil dieser UAS liegt verglichen mit Quadcoptern und Helikoptern in deutlich längerer Einsatzzeit, größerem Einsatzradius und der Fähigkeit größere Lasten zu tragen (Vergouw et al. 2016; Boon et al. 2017; Tkáč und Mésároš 2019).

Hybrid

Hybride Konfigurationen vereinen die festen Tragflügel eines Starrflüglers mit der Rotorkonfiguration eines Multicopters (**Abb. 4**). Hierdurch wird eine Kombination der Vorteile beider Konfigurationen erreicht: Die Effizienz und damit einhergehende Einsatzdauer und Reichweite einer Starrflügel-Drohne und die Senkrechtstart- und Landefähigkeit eines Multicopters (Vergouw et al. 2016; Tkáč und Mésároš 2019).



Abbildung 1: Multicopter-UAS (DJI 2024).



Abbildung 2: Helikopter-UAS (UST 2024a).



Abbildung 3: Hybrid-US (UST 2024b).



Abbildung 4: Starrflügel-UAS (UAVOS 2024).

2.2 Anwendungsbereiche

Die Einsatzmöglichkeiten von kommerziellen und privaten Drohnen sind vielfältig. Mögliche und bereits umgesetzte Anwendungen in diesen Bereichen umfassen Werbung, Luftbildaufnahmen, Landvermessung, meteorologische Messungen, Wildtierzählung, Transportlogistik, Inspektionsflüge (Bahnstrecken,

Gebäude, Stromtrassen, Windkraftanlagen, Kühltürme), das Ausliefern von Paketen und Lebensmitteln und der Transport von Personen (DGUV 2020a; Cohn et al. 2017; Eskandaripour und Boldsai Khan 2023). 2016 wurde durch das Single European Sky ATM Research Programme (SESAR 2017) eine Studie zur Zukunft der Drohnennutzung in Europa durchgeführt. Diese Studie legte die Jahre 2035 und 2050 als Referenzpunkte fest, auf die das Wachstum des Drohnensektors in Europa projiziert wird. Dabei wurden die Anwendungszwecke in die Sektoren Agriculture, Energy, Public Safety & Security, E-Commerce & Delivery und Mobility eingeteilt und auf die voraussichtliche Nachfrage hin untersucht (**Tab. 1**).

Tabelle 1: Voraussichtliche Anzahl genutzter UAS in der EU in den Jahren 2035 und 2050 (SESAR 2017).

Voraussichtliche Anzahl UAS		
Sektor	2035	2050
Agriculture	150000	145000
Energy	30000	35000
Public Safety & Security	60000	50000
E-Commerce & Delivery	70000	95000
Mobility	100	12000

Da sich diese Arbeit auf die Gefährdung durch kommerzielle und private Nutzung im öffentlichen urbanen Bereich beschränkt, werden die Sektoren Agriculture (nicht urban, nicht im öffentlichen Raum), Energy (weder kommerziell noch privat, nur eingeschränkt im öffentlichen Raum) und Public Safety & Security (weder kommerziell noch privat) nicht weiter betrachtet. Der Bereich Mobility wird nicht betrachtet, da er sich durch den direkten Transport von Personen und die dadurch bedingten Richtlinien der Drohnenkategorie „Zulassungspflichtig“ (Durchführungsverordnung (EU) 2019/947, 2019), sowie Gefährdungen und Größe der benötigten UAVs stark von den anderen Bereichen unterscheidet. Es liegt zudem nahe, dass E-Commerce & Delivery (Internethandel und Lieferdienste) den größten Anteil der Flugbewegungen ausmachen werden. Im Jahr 2023 wurden in Deutschland ca. 3,9 Mrd. Pakete zugestellt (Bundesnetzagentur, 2023). Wird auch nur ein kleiner Anteil der Zustellungen durch Drohnen getätigt, ist immer noch von mehreren tausend Flugbewegungen auszugehen. Zudem ist es denkbar, dass sowohl große Fast-Food-Ketten als auch gastronomisches Kleingewerbe dazu übergehen, Fahrradkurier auf Grund wirtschaftlicher Überlegungen durch Lieferdrohnen zu ersetzen (Doole et al. 2020). Dies würde die Anzahl per Drohne beförderter Güter im Luftraum deutscher Städte noch weiter erhöhen.

In Anbetracht dieser Überlegungen wird sich dazu entschieden, den Sektor E-Commerce & Delivery als stellvertretenden Benchmark für kommerziell und privat genutzter Drohnen im urbanen Bereich anzuwenden. Hierfür werden gezielt die Bereiche der Paketzustellung und der Food Delivery betrachtet,

da diese den größten Anteil gelieferter Produkte ausmachen werden. Zudem kann angenommen werden, dass die ermittelten Gefährdungen größtenteils auch auf andere Bereiche anwendbar sind, in denen Fracht per Drohne transportiert wird.

2.3 Stand der Technik

In den vergangenen Jahren gab es weltweit mehrere Anläufe, den Einsatz von Lieferdrohnen zu testen. Zu diesen Projekten gehören unter anderem Amazon Prime Air, Alphabet Wing und Zipline. Das DHL Parcelcopter Projekt wird nicht betrachtet, da es 2021 eingestellt wurde (Landmesser, 2021). In Vorbereitung auf die Gefährdungsanalyse werden die von diesen Unternehmen genutzten Drohnen auf folgende Eigenschaften untersucht:

- Gewicht
- Nutzlast
- Geschwindigkeit
- Reichweite
- Art der Ladungssicherung (intern oder extern?)
- Grenzwert für Niederschlag
- Grenzwert für Wind
- Lieferzeit

Amazon Prime Air

Die zum Konzern Amazon gehörende Frachtfluggesellschaft Prime Air hat sich zum Ziel gesetzt, Drohnenlieferungen innerhalb von 30 Minuten nach Bestellung des Produktes zu ermöglichen. Die ersten Tests liefen 2016 in Cambridge, USA an (Amazon Autor 2018). Seitdem wurden mehrere Drohnenmodelle an verschiedenen Standorten getestet. Das bis dato erfolgreichste Modell ist die MK27-2 (**Tab. 2**), die über den Zeitraum von fast einem Jahr an zwei Standorten in Texas und Kalifornien eingesetzt wurde und somit Präzedenzfälle für den Einsatz und die Arbeitsabläufe liefert (Amazon 2024a). Ende 2023 wurde mit der MK30 (**Tab. 3**) (**Abb. 5**) ein Nachfolger vorgestellt, dessen Grenzwerte laut Amazon über denen der MK27-2 liegen. Konkrete Werte sind noch nicht veröffentlicht, allerdings wird die Möglichkeit eines Einsatzes bei leichtem Regen genannt. Da es sich bei der Quelle nicht um eine wissenschaftliche Quelle handelt, ist nicht ersichtlich, ob „light rain“ hierbei in der meteorologischen Bedeutung von 2,5 mm/h (Helmholtz-Zentrum 2023) oder umgangssprachlich genutzt wird. Sowohl die MK27-2 als auch die MK30 sind Hexacopter-Starrflügel-Hybride und tragen die Fracht in einem innenliegenden Frachtraum. Zum finalen Ausliefern wird die Fracht in einem gepolsterten Paket aus ca. 3 Metern Höhe abgeworfen. Diese Methode ist für den suburbanen Raum vorgesehen, da das Ziel ist, Pakete in Vorgärten bzw. Gärten abzuwerfen (Amazon Staff 2024b). Für den urbanen Raum ist diese Methode nicht praktikabel, da die Drohne auf eine Höhe absinken muss, in der aufgrund von Bebauung und Bepflanzung mit einer hohen Dichte von Hindernissen zu rechnen ist.

Table 2: Technische Daten MK27-2 (Amazon Autor 2018; Amazon Staff 2022a; Amazon Staff 2022b, FAA 2022).

Gewicht [kg]	40	Art der Ladungssicherung	innen
Nutzlast [kg]	2,2	Grenzwert Niederschlag [mm/h]	0
Geschwindigkeit [km/h]	80	Grenzwert Wind [m/s]	7,8
Reichweite [km]	24	Lieferzeit [min]	<60 ¹

Table 3: Technische Daten MK30 (Amazon Staff 2022b; Amazon Staff 2023a; Amazon Staff 2023b; Amazon Staff 2024a; Amazon Staff 2024b)

Gewicht [kg]	geringer als MK27-2	Art der Ladungssicherung	innen
Nutzlast [kg]	2,2	Grenzwert Niederschlag [mm/h]	"leichter Regen"
Geschwindigkeit [km/h]	keine Angabe	Grenzwert Wind [m/s]	keine Angabe
Reichweite [km]	48	Lieferzeit [min]	30-60 ¹

¹ Das angestrebte Ziel liegt bei 30 Minuten Lieferzeit. Erreichte Lieferzeit bei Tests liegt noch bei 60 Minuten (Amazon 2018; Amazon 2023c; Amazon 2024a).

Zipline International Inc.

Zipline ist ein amerikanisches Unternehmen, das Lieferdrohnen und drohnenbasierte Logistiksysteme entwickelt, herstellt und betreibt. Derzeit hat Zipline Standorte in Nordamerika, Afrika und Asien, von denen aus bisher, Stand 2024, über eine Million Lieferungen zugestellt wurden (Zipline, 2024). Im Kontext dieser Arbeit ist die Plattform 2 (**Tab. 4**) (**Abb. 6**) interessant. Sie ist ein spezifisch für den Einsatz im urbanen Raum konzipierter Quadrocopter-Starrflügel-Hybrid. Die Fracht wird durch eine mit einer Steuereinheit ausgestatteten Winde aus einer Höhe von bis zu 90 Metern über Grund abgesetzt. Die Präzision liegt dabei laut Hersteller bei einem Radius von 60 Zentimetern (Zipline 2024).

Table 4: Technische Daten Plattform 2 (Zipline 2024).

Gewicht [kg]	keine Angabe	Art der Ladungssicherung	innen
Nutzlast [kg]	2,7-3,6	Grenzwert Niederschlag [mm/h]	hoch ²
Geschwindigkeit [km/h]	112	Grenzwert Wind [m/s]	hoch ²
Reichweite [km]	16	Lieferzeit [min]	10

² Basierend auf der Aussage, dass Ziplines Drohnen in Regen, Wind, Gewittern, extremer Kälte und anderen Bedingungen operieren können (Zipline 2024).

Alphabet Wing

Alphabets (ehemals Google) Tochtergesellschaft Wing befasst sich mit der Entwicklung und dem Betrieb von Lieferdrohnen. Die ersten praktischen Versuche fanden 2014 in Queensland, Australien, statt (X 2014). Seitdem wurden laut eigenen Angaben über 350.000 Lieferungen per Drohne getätigt (Wing 2024a). Zu den Anwendungsbereichen, mit denen Wing wirbt, gehören Lieferungen im E-Commerce, Einzelhandel sowie die Lieferung von Medikamenten (Woodworth 2022) (Wing 2024a). Zu den technischen Daten der von Wing genutzten Drohnen ist nicht viel bekannt (nicht einmal die Typenbezeichnungen), außer dass

derzeit mindestens zwei verschiedene Multicopter-Starrflügel-Hybride mit verschiedener Tragkraft eingesetzt bzw. erprobt werden (**Tab. 5 und 6**) (**Abb. 7**). Der Transport der Fracht findet beim kleineren Modell außen unter dem Rumpf statt, beim größeren Modell wird sie im Inneren des Rumpfes aufbewahrt. Zum Absetzen nutzen beide Modelle eine integrierte Winde, mit der die Fracht herabgelassen wird. Diese Methode ist präziser als ein Abwurf und somit auch für den urbanen Bereich geeignet. Die neuere, größere Drohne ist laut Wing gezielt dafür ausgelegt, Pakete bis zu 2,2 kg zu transportieren (Woodworth 2024).

Tabelle 5: Technische Daten Wing-Drohne (klein) (Woodworth 2022; Woodworth 2024; Wing 2024b).

Gewicht [kg]	ca. 4,4 ³	Art der Ladungssicherung	außen
Nutzlast [kg]	1,1	Grenzwert Niederschlag [mm/h]	keine Angabe
Geschwindigkeit [km/h]	keine Angabe	Grenzwert Wind [m/s]	keine Angabe
Reichweite [km]	keine Angabe	Lieferzeit [min]	keine Angabe

Tabelle 6: Technische Daten Wing-Drohne (groß) (Woodworth 2022; Woodworth 2024; Wing 2024b).

Gewicht [kg]	ca. 8,8 ³	Art der Ladungssicherung	innen
Nutzlast [kg]	2,2	Grenzwert Niederschlag [mm/h]	keine Angabe
Geschwindigkeit [km/h]	104	Grenzwert Wind [m/s]	keine Angabe
Reichweite [km]	19	Lieferzeit [min]	keine Angabe

³ Basierend auf der Aussage, dass die Nutzlast bei Wings Prototypen und Produktionsmodellen bei ca. 25% des Basisgewichts liegt (Woodworth 2022).



Abbildung 5: MK30 (Amazon Staff 2023a). **Abbildung 6:** Platform 2 (Zipline 2024). **Abbildung 7:** Wing-UAS (Wing 2024b)

2.4 EU-Drohnenverordnung

Die Nutzung von zivilen Drohnen wird seit 2021 EU-weit durch die EU-Drohnenverordnung geregelt, welche durch die „Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 der Kommission vom 24. Mai 2019 über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge“ definiert wird. Die in 2.3 betrachteten Lieferdrohnen fallen nach Artikel 5 Absatz 1 DVO 2019/947/EU in die UAS-Betriebskategorie „speziell“, da sie die in Artikel 4 DVO 2019/947/EU genannten Bedingungen (**Textbox 1**) nicht erfüllen,

jedoch keine Menschenansammlungen (**Textbox 2**) überfliegen, was zu einer Einstufung in die Kategorie „zulassungspflichtig“ führen würde (Artikel 6 Absatz 1 DVO 2019/947/EU).

- a) Das UAS fällt unter eine der in der Delegierten Verordnung (EU) 2019/945 genannten Klassen, ist privat hergestellt oder erfüllt die in Artikel 20 genannten Bedingungen;
- b) Das unbemannte Luftfahrzeug hat eine höchstzulässige Startmasse von weniger als 25 kg.
- c) Der Fernpilot sorgt dafür, dass das unbemannte Luftfahrzeug in einer sicheren Entfernung von Menschen gehalten und nicht über Menschenansammlungen geflogen wird.
- d) Der Fernpilot hält das unbemannte Luftfahrzeug zu jedem Zeitpunkt in VLOS-Betrieb, es sei denn, es fliegt im Follow-me-Modus oder es wird ein Beobachter nach Teil A des Anhangs hinzugezogen.
- e) Während des Flugs wird das unbemannte Luftfahrzeug entsprechend Teil A des Anhangs in einem Abstand von 120 m vom nächstgelegenen Punkt auf der Erdoberfläche gehalten, sofern es nicht ein Hindernis überfliegt.
- f) Während des Flugs führt das unbemannte Luftfahrzeug keine gefährlichen Güter mit oder wirft Material ab.

Textbox 1: Bedingungen der UAS-Betriebskategorie „offen“

3. Menschenansammlungen“ (assemblies of people): eine Vielzahl von Menschen, die so dicht gedrängt stehen, dass es einer einzelnen Person nahezu unmöglich ist, sich aus dieser Menge zu entfernen;

Textbox 2: Definition Menschenansammlungen (Artikel 2 Absatz 3 DVO 2019/947/EU)

Aufgrund der maximalen Startmasse von über 25 kg fallen die betrachteten Drohnen nicht in die Unterkategorien C5 und C6 und sind somit „UAS im Rahmen einer Betriebsgenehmigung“. Für den Erhalt einer Betriebsgenehmigung müssen die in Artikel 12 Absatz 1 und 2 DVO 2019/947/EU aufgeführten Bedingungen eingehalten werden. Dies umfasst die Risikobewertung und die dazugehörigen Minderungsmaßnahmen seitens des UAS-Betreibers, sowie ausreichende betriebliche Sicherheitsziele und deren Umsetzung zur Gewährleistung eines sicheren Betriebs.

2.4.1 Lufträume und U-Spaces

Der Betrieb von Drohnen der Kategorie „spezifisch“ wird nach und Anhang Teil B DVO 2019/947/EU durch Einhalten der drei in Anhang Teil A DVO 2019/947/EU aufgelisteten Standardszenarien für Drohnen der Unterkategorien C5 und C6 ermöglicht. Diese sollen es ermöglichen, in bestimmten Ausnahmefällen Wohngebiete zu überfliegen und/oder außerhalb der direkten Sichtlinie zu operieren. Da die betrachteten

Drohnen jedoch nicht den Kategorien C5 und C6 angehören, ist eine Anwendung nach Standardszenarios nicht möglich.

Zukünftig sieht die Drohnenverordnung jedoch die Implementierung des U-Space-Systems vor (**Textbox 3**) (Absatz 26 DVO 2019/947/EU).

26) Das „U-Space-System“ einschließlich seiner Infrastruktur, Dienste und Verfahren für den sicheren UAS-Betrieb, das deren Einbeziehung in das Luftfahrtsystem unterstützt, ist zwar noch in Aufbau, doch mit dieser Verordnung sollten bereits jetzt Anforderungen an die Umsetzung der drei Grundpfeiler des U-Space-Systems festgelegt werden — Registrierung, Geo-Sensibilisierung und Fernidentifikation — die es weiter zu vervollständigen gilt.

Textbox 3: *Einbindung von U-Spaces*

Das U-Space-System hat die sichere Integrierung von Drohnen in den Europäischen Luftraum zum Ziel. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf der Integrierung von kommerziellen und hoheitlich genutzten Drohnen, da diese aufgrund ihrer Einsatzprofile nicht im Rahmen der Standardszenarien genutzt werden können. Die Kernaufgaben des U-Space-Systems sind:

- UAS-Flugautorisation
- Geo-Sensibilisierung (**Textbox 4**)
- Elektronische Identifikation der UAS
- Bereitstellen von Verkehrsinformationen
- Bereitstellen von Wetterinformationen
- Überwachung und Sicherstellen des Einhaltens der Luftverkehrsordnung

(Gutiérrez Castro und Ventas García 2021)

„Geo-Sensibilisierung“ (Geo-awareness): eine Funktion, die ausgehend von den durch die Mitgliedstaaten bereitgestellten Daten eine potenzielle Verletzung der Luftraumgrenzen erkennt und die Fernpiloten warnt, sodass diese sofortige und wirksame Maßnahmen zur Vermeidung dieser Verletzung ergreifen können;

Textbox 4: *Definition Geo-Sensibilisierung*

Wie die Umsetzung aussieht, ist noch nicht bekannt, jedoch liegt seit 2022 ein Konzept vor. Dieses sieht vor, dass der Flugverkehr von einem oder mehreren Dienstleistern (U-Space-Service-Provider, USSP) koordiniert wird. Die Steuerung der Drohnen wird in diesem Konzept hauptsächlich bei den Betreibern liegen. Die USSP stellen den Betreibern umfassende Luftraum- und Verkehrsdaten zur Verfügung und vergeben Fluggenehmigungen (Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 2022a) (Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 2022b).

2.5 Nachfrage Drohnenlieferung

Als Grundlage für die Gefährdungsbeurteilung wird zunächst die Anzahl der voraussichtlichen Flugbewegungen ermittelt. Dies dient später unter anderem der Einstufung von Unfallwahrscheinlichkeiten. Basierend auf der SESAR-Studie haben Doole et al. (2020) ein Modell erstellt, mit dem sich die voraussichtliche Verkehrsdichte bzw. die Anzahl der Flugbewegungen von Lieferdrohnen in Großstädten für die Jahre 2035 und 2050 ermitteln lässt. Das Modell ist allgemein anwendbar, wurde aber mit Daten europäischer Länder (Deutschland, Vereinigtes Königreich, Frankreich, Niederlande und Belgien) und spezifisch der Stadt Paris erstellt. Somit ist es gut geeignet, um die zu erwartende Verkehrsdichte von Lieferdrohnen in Hamburg zu ermitteln. Das Modell geht von sieben Annahmen aus:

1. Drohnenlieferung finden nicht über Staatsgrenzen hinweg statt.
2. Drohnenlieferungen finden ausschließlich in urbanen Gegenden statt.
3. 70 % aller in urbanen Gegenden zugestellten Pakete können per Drohne zugestellt werden.
4. Pakete, die 2,2 kg (5 lbs) oder weniger wiegen, werden per Drohne zugestellt.
5. Zustellung per Drohne findet nur im Last-Mile-Segment (Transport vom Verteilerzentrum zu Empfänger*innen) statt.
6. Im Durchschnitt dauert eine Zustellung per Drohne 30 Minuten (Hin- und Rückflug).
7. Die Anzahl der nutzbaren Tage für die Zustellung ist wetter- und drohnenabhängig. 8 m/s Windgeschwindigkeit und jegliche Art von Niederschlag werden als Grenzwert gesetzt. Für Paris führt dies zu etwa 80 % an nutzbaren Tagen.

Da das Modell 2020 erstellt wurde und es in den letzten vier Jahren weitere Entwicklungen auf dem Gebiet der Lieferdrohnen gegeben hat, werden diese Annahmen darauf untersucht, inwiefern sie in dem hier betrachteten Szenario zutreffen. Die Annahmen 1-3 treffen aufgrund der Grenzen des Szenarios weiterhin zu. Annahme 4 wurde durch die von Amazon und Alphabet genutzten und in 2.3 aufgeführten Drohnen bestätigt, welche 2,2 kg als maximale Zuladung aufweisen. Dies gilt auch für Annahme 5 und 6.

Annahme 7 wird darauf untersucht, inwiefern die Grenzwerte zur Nutzung von Drohnen und die Anzahl der nutzbaren Tage angepasst werden müssen. Zum einen ist davon auszugehen, dass Hamburg aufgrund der geografischen Lage eine höhere Anzahl von Regentagen bzw. Tagen mit Windgeschwindigkeiten über dem Grenzwert für die Drohnenutzung aufweist. Zum anderen liegt nahe, dass aufgrund von technischem Fortschritt die Spanne der Wetterbedingungen, unter denen Drohnen operieren können, wächst. Doole et al. (2020) nutzen als Referenz eine Drohne des Typs DJI Matrice, die bis zu einer Windgeschwindigkeit von 8 m/s und nur in niederschlagsfreien Bedingungen eingesetzt werden kann (DJI, 2020). Diese Werte decken sich mit dem von Amazon vorgestellten Prototypen MK27-2, der bei klarem, trockenem Wetter und Winden bis zu 14 Knoten (ca. 7,4 m/s) einsetzbar ist. Aufgrund des Mangels an konkreten Daten in Bezug auf die MK30 wird im Folgenden mit auf der MK27-2 basierenden Grenzwerten gerechnet. Die zur

Ermittlung der nutzbaren Tage genutzten Grenzwerte liegen somit bei 8 m/s und 0 mm/h Niederschlag. Im Zeitraum von 1986 bis 2015 lag die durchschnittliche Anzahl von Regentagen pro Jahr bei 123 (Helmholtz-Zentrum, 2023). Die Erhebung der Winddaten gestaltet sich jedoch schwieriger, da die meisten Datensätze entweder keine ausreichende Auflösung haben oder nur das jährliche Mittel angeben. Es kann jedoch festgestellt werden, dass im selben Zeitraum in Hamburg im Schnitt jährlich 27 Sturmtage mit einer Intensität von 11 m/s auftraten. Diese Anzahl liegt deutlich unter der der Regentage. Es liegt nahe, dass eine beträchtliche Überlappung von Sturm und Regentagen vorliegt. Dementsprechend wird im Folgenden von einer durchschnittlichen Anzahl von 123 nutzbaren Tagen ausgegangen. Es ergibt sich somit ein meteorologischer Faktor von:

$$1 - \frac{\text{Anzahl Regentage}}{365} = 1 - \frac{123 \text{ Regentage}}{365 \text{ Tage}} = 0,66$$

Zur Ermittlung der Anzahl der Flugbewegungen wird, wie in **Abbildung 8** dargestellt, die Menge der jährlichen Paketzustellungen mit Faktoren für Anteil der Lieferungen innerhalb der Staatsgrenzen (National parcel volume), Anteil der urbanen Bevölkerung (Urban parcel volume), Gewichtsbeschränkungen (Weight constraint), ökonomische Einschränkungen (Economical viable limit), Anteil der Stadt an gesamter urbaner Bevölkerung (city parcel volume) und meteorologische Einschränkungen (meteorological limit) multipliziert. Da bestätigt wurde, dass sich die Annahmen für Last-Mile Delivery und Gewichtsbeschränkungen mit aktuellen Plänen von großen Lieferdiensten decken, werden die Faktoren für Weight Constraint und Economical viable limit übernommen. Daraus ergeben sich folgende Formeln:

$$\text{Nachfrage Drohnenl. (National)} = n \cdot u \cdot w \cdot e \quad (1)$$

$$\text{Nachfrage Drohnenl. (Stadt)} = \text{Nachfrage Drohnenl. (National)} \cdot c \cdot m \quad (2)$$

Mit den Variablen:

National parcel Volume: n

Urban parcel Volume (Deutschland): u

Weight constraint: w

Economical viable limit: e

City parcel volume: c

Meteorological limit: m

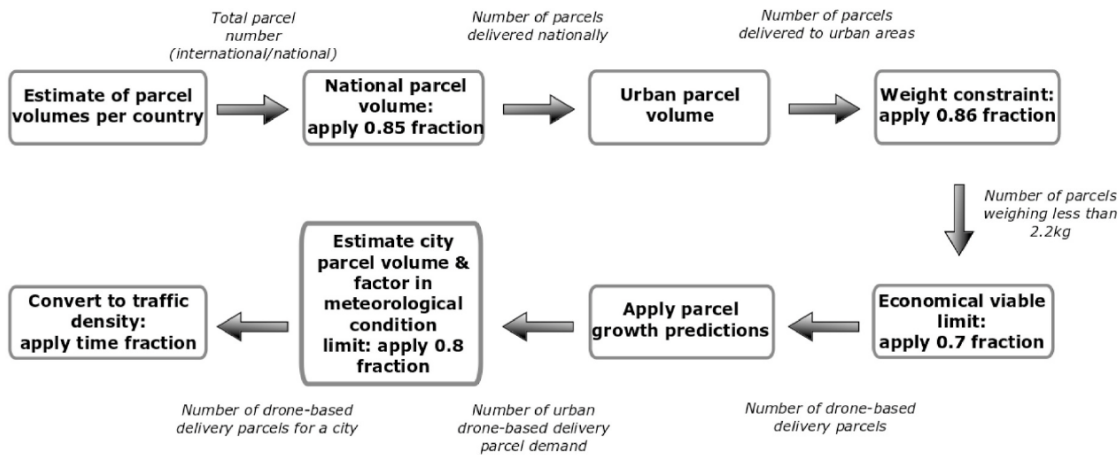


Abbildung 8: Modell zur Berechnung der Nachfrage an und Verkehrsdichte von Lieferdrohnen (Doole et al. 2020).

Da die Einführung von Drohnen graduell erfolgen wird, kann davon ausgegangen werden, dass bis zu einer vollständigen Implementierung dieser im Last-Mile-Segment das Volumen der in Deutschland zugestellten Pakete weiterhin ansteigt. Hierzu werden zunächst die von Doole et al. (2020) erarbeiteten Szenarien für 2035 mit geringem, mittlerem und starkem Wachstum übernommen (**Tabelle 7**) und mit einem auf den Werten von 2023 basierendem Szenario ohne angenommenes Wachstum als Basiswert verglichen, um eine Spanne von möglichen Werten zu erhalten. Wie in der Vorlage, wird ein gleichbleibender Stand der Technik angenommen.

Tabelle 7: Nachfrage Drohnenlieferung (National) für 2035 (Doole et al.2020).

Jahr	Low	Medium	High
2035	1,8 mrd	2,1 mrd	2,8 mrd

Zur Bestimmung der Menge der in 2023 theoretisch zur Drohnenlieferung gültigen Pakete, werden folgende Werte in Formel 1 eingesetzt:

$n = 3,9$ Mrd. (Bundesnetzagentur, 2023)

$u = 0,78$ (Worldbank, 2024)

$w = 0,85$

$e = 0,7$

Woraus sich

$$\text{Nachfrage Drohnenlieferung} = 3,9 \cdot 10^9 \cdot 0,78 \cdot 0,85 \cdot 0,7 \quad (3)$$

$$\text{Nachfrage Drohnenlieferung} = 1,81 \cdot 10^9 \quad (4)$$

ergibt. Es fällt dabei auf, dass 2023 bereits der von Doole et al. (2020) für 2035 projizierte Wert von 1,8 Mrd. erreicht wurde. Dieser wird somit nicht weiter in Betracht gezogen. Um eine Unterschätzung der Gefährdungen zu vermeiden, bietet es sich zudem an, sicherheitshalber den höchsten projizierten Wert zu verwenden. Es wird somit mit einer urbanen Nachfrage von 2,8 Mrd. Paketen jährlich gerechnet.

Der Anteil Hamburgs an der gesamten urbanen Bevölkerung Deutschlands liegt bei 8,17 % (BWFGB Hamburg 2024; DESTATIS 2024), was einen Faktor von 0,08 ergibt. Aus der angepassten Annahme 7 wird der meteorologische Faktor von 0,66 übernommen.

Durch einsetzen von

$$c = 0,08$$

$$m = 0,66$$

in (2) mit einer Nationalen Nachfrage von 2,8 Mrd. ergibt sich für Hamburg

$$\text{Nachfrage Drohnenl. (Hamburg)} = \text{Nachfrage Drohnenl. (Deutschland)} \cdot 0,08 \cdot 0,66 \quad (5)$$

$$\text{Nachfrage Drohnenl. (Hamburg)} = 2,8 \cdot 10^9 \cdot 0,08 \cdot 0,66 \quad (6)$$

$$\text{Nachfrage Drohnenl. (Hamburg)} = 148 \cdot 10^6 \quad (7)$$

Jährlich kann also mit ca. 148 Mio. Flugbewegungen im Großraum Hamburg gerechnet werden. Auf die 260 Werkstage im Jahr bezogen ergibt dies 569.230 Flugbewegungen pro Tag. Werden durchschnittlich 30 Minuten Flugdauer pro Lieferung (Doole et al. 2020) angenommen, bedeutet dies, dass sich täglich 284.615 Flugstunden akkumulieren.

2.6 Betrachtetes Szenario

Unter Einbezug der vorangegangenen Recherche wird folgendes Szenario für die Hansestadt Hamburg betrachtet:

1. 148 Mio. Flugbewegungen von Lieferdrohnen im Jahr 2035. E-Commerce % Delivery macht den Hauptanteil der Flugbewegungen im städtischen Bereich aus.
2. Die Lieferungen finden im Last-Mile- bzw. First-Mile-Bereich statt
3. Es wird, basierend auf dem Basisgewicht-Nutzlast-Verhältnis von 25% (Wing 2022) und dem Trend zu immer leichteren Drohnentypen (Amazon Staff 2023a; Amazon Staff 2023b), davon ausgegangen, dass die im Jahr 2035 genutzten Lieferdrohnen ein Basisgewicht von ca. 10 kg aufweisen. Durch diese Annahme ist die Gefährdungsbeurteilung zukunftsorientiert und deckt sich mit den von Doole et al. (2020) und Blom et al. (2021) genutzten Beispielen in Form von DJI Matrice (9 kg) und md4-3000 (15,7 kg) (DJI 2024; Rosenbalm 2024).
4. Die maximale Nutzlast liegt bei 2,2 kg
5. Abladen der Fracht via Winde von einer schwebenden Drohne aus

6. Nutzung von U-Spaces
7. Betriebsabläufe analog zu Amazons Modell
8. Der gewerbliche Betrieb geht von einem Betriebsgelände aus und umfasst die notwendige Infrastruktur und das Einhalten des Arbeitsschutzes
9. Der kleingewerbliche Betrieb findet größtenteils im öffentlichen Raum statt und steht mitunter stellvertretend für die private Nutzung. Notwendige Infrastruktur und das Einhalten des Arbeitsschutzes sind nicht gegeben

Nicht betrachtet werden:

- Drohnen die von BOS genutzt werden.
- Schwerlastdrohnen, die Frachten von über 2,2 kg transportieren. Diese Art von Drohnen wird höchstwahrscheinlich nicht im urbanen Raum nutzbar sein.
- Flugtaxi. Wie in 2.2 erläutert, unterscheidet sich diese Art von autonomem Fluggerät stark von regulären Lieferdrohnen, da sie dem Personentransport dient.
- Lärmbelästigung durch den Einsatz von Drohnen.
- Gefährdungen durch mutwilligen Eingriff in den Flugverkehr oder Terrorismus, sowie Kriminalität

3. Gefährdungen

3.1 Ermittlung der Gefährdungen

Die Gefährdungen werden nach Vorgaben aus der Arbeitshilfe für Gefährdungsbeurteilungen der BG ETEM ermittelt (BG ETEM 2022) (**Anhang 1**). Die für den Betrieb von Lieferdrohnen relevanten Gefährdungen werden im Folgenden genauer erörtert. Die Auflistung findet nicht strikt nach der von der BG ETEM genutzten Reihenfolge, sondern nach vermutetem Grad der Relevanz nach Schwere und Wahrscheinlichkeit statt. Beginnend mit der relevantesten wurden folgende Gefährdungen ermittelt:

3.1.1 Bewegte Transport- und Arbeitsmittel

Definition gemäß BG ETEM (2022): Anfahren durch, Aufprallen auf, Überfahren durch und Umkippen von bewegten Transport- und Arbeitsmitteln.

Im Kontext dieser Bewertung ist das betrachtete Arbeitsmittel die Drohne. Aufgrund der großen Bandbreite an verschiedenen Drohnenmodellen und Größenordnungen der möglichen Nutzlast muss hierbei weiter differenziert werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sowohl von einer kleinen Drohne für die Last-Mile Delivery als auch einer deutlich größeren Frachtdrohne in Folge eines Zusammenstoßes mindestens schwere Verletzungen und/oder Schäden an Personen und Sachgütern verursacht werden können. Zwar besitzen moderne Drohnen in der Regel Systeme zur Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung, jedoch muss davon ausgegangen werden, dass solche Systeme nicht absolut fehlerfrei operieren. Derzeit genutzt werden Ultraschall-, Infrarot-, Laser- und optische Sensoren. Diese werden entweder einzeln oder

in Kombination miteinander genutzt, wobei eine kombinierte Nutzung vorzuziehen ist, um die Fehleranfälligkeit der einzelnen Sensortypen auszugleichen (Chen et al. 2018). Eine weitere Schwierigkeit in der Hinderniserkennung bilden nichtstatische Umgebungen. In bekannter unveränderlicher Umgebung sind das Navigieren und Vermeiden von Kollisionen mittlerweile sehr einfach, doch mit der steigenden Anzahl von transienten Hindernissen steigen auch die Anforderungen an diese Systeme. Der Einsatz in Innenstädten stellt also für Drohnen einen Extremfall dar. Hier bedeuten dichte Bebauung und hohes Verkehrsaufkommen vergleichsweise wenig Platz zum Manövrieren und Ausweichen in Kombination mit einer großen Anzahl von nichtstatischen Hindernissen in Form von Menschen, Tieren, Fahrzeugen und anderen Drohnen. Dies stellt eine sehr komplexe Situation dar, in der potentielle Fehler in der Hindernisvermeidung schnell zu Kollisionen führen können.

3.1.2 Ungeschützt bewegte Maschinenteile

Definition gemäß BG ETEM (2022): Quetschstellen, Scherstellen, Stoßstellen, Schneidstellen, Stichstellen, Einzugsstellen und Fangstellen ungeschützt bewegter Maschinenteile.

Diese Definition trifft auf die Rotoren von Multicoptern zu. Diese können Drehzahlen von mehreren Tausend Umdrehungen pro Minute erreichen und weisen in den meisten Fällen nur einen begrenzten Rotorschutz auf. Hierdurch sind schwere Schnittverletzungen bei Berührung der laufenden Rotoren möglich. Je nach Betriebsphase steht diese Gefährdung stark mit der Gefährdung durch *Bewegte Transport und Arbeitsmittel* im Zusammenhang, da eine Kollision mit der Drohne sehr wahrscheinlich auch zum Kontakt mit den Rotoren führen kann. Außerhalb der Flugphasen besteht diese Gefährdung hauptsächlich während des Start- und Landevorganges.

3.1.3 Unkontrolliert bewegte Teile

Definition gemäß BG ETEM (2022): Kippende, pendelnde, rollende, gleitende, herabfallende, sich lösende, berstende, wegfliegende Teile und unter Druck austretende Medien.

Relevante Elemente, die somit unter diese Definition fallen, sind: die Drohne selbst, sich lösende Fracht und unzureichend befestigte und wegfliegende Rotoren. Sonstige bewegte Teile sind entweder nicht relevant oder in anderen Szenarien bereits erfasst.

Aufgrund des Gewichtes von als Lieferdrohnen genutzten Multicoptern besteht im Falle eines Absturzes eine sehr hohe Gefahr der (tödlichen) Verletzung von Lebewesen und der Beschädigung von Sachwerten. Gerade beim Einsatz in Innenstädten ist aufgrund der hohen Dichte von Personen und Fahrzeugen die Wahrscheinlichkeit, dass bei einem Absturz eben jene betroffen sind, stark erhöht. Abhängig von der Flughöhe kann diese Gefahr noch weiter steigen. Die Flughöhe kann bei der Nutzung von U-Spaces innerhalb von Städten bis zu 120 Meter betragen (Bundesministerium für Digitales und Verkehr 2022a) (Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 2022b). Das Gewicht der Drohne kann zusätzlich je nach

Beladungsstand weitaus größer als das Eigengewicht ausfallen, was die Gefahr noch weiter steigert. Als mögliche Ursachen für Abstürze sind technische Defekte, Kollisionen und das Erschöpfen des Akkus denkbar. Wie schon bei den ungeschützt bewegten Maschinenteilen besteht also auch bei dieser Gefährdung zumindest teilweise ein direkter Zusammenhang mit der Gefährdung durch bewegte Transport- und Arbeitsmittel.

Da je nach Lieferdrohne der Transport von 2,5 kg bis hin zu 40 kg Nutzlast möglich ist, darf auch die Gefährdung durch herabfallende Lasten nicht vernachlässigt werden. Löst sich ein 2,5 kg schweres Paket in einer Höhe von 120 Metern, kann durchaus mit fatalen Folgen gerechnet werden. Das unbeabsichtigte Lösen von Nutzlast kann, wie auch schon der Absturz der Drohne an sich, durch mehrere Ursachen herbeigeführt werden. Zum einen liegt es nahe, dass durch eine Kollision die Haltevorrichtung beschädigt oder gar gänzlich zerstört und die Fracht dadurch nicht mehr gehalten werden kann. Auch hier ist wieder anzumerken, dass diese Gefährdung damit teilweise mit der Gefährdung durch bewegte Transport- und Arbeitsmittel verknüpft ist. Ursachen, die unabhängig von Kollisionen auftreten können, sind ein technischer Defekt der Haltevorrichtung, ein ungeplantes Lösen der Haltevorrichtung aufgrund eines fehlerhaften Lösebefehls und das unbeabsichtigte manuelle Auslösen eines Lösebefehls.

3.1.4 Physikalisch-chemische Gefährdungen

Definition gemäß BG ETEM (2022): Physikalisch-chemische Gefährdungen (z. B. Brand- und Explosionsgefährdungen, unkontrollierte chem. Reaktionen). Zerbersten von Behältern. Stoffaustritt.

Da es sich bei der meistverbreitet genutzten Energiequelle für kommerzielle Drohnen um Lithium-Ionen-Akkus handelt, trifft diese Gefährdung zu. Lithium-Ionen-Akkus können bei Beschädigung oder falscher Handhabung einen Effekt, der als „Thermal Runaway“ bekannt ist, erleiden; eine endotherme Kettenreaktion, bei der es durch Überladen, starke Erwärmung, oder Beschädigung zu einer immer weiter steigenden Temperatur bis hin zur Selbstentzündung des Elektrolyten kommt. Die Verbrennung des Elektrolyten setzt wiederum Sauerstoff frei, wodurch ein sehr heißer (660-1400 °C) und schwer zu löschender Brand entsteht. Weiterhin können weitere brennbare Bestandteile des Akkus entzündet werden. Ein Löschen ist durch große Mengen Wasser möglich (Wang et al. 2005; DGUV 2024).

Im Falle einer mechanischen Beschädigung wird der Prozess durch interne Kurzschlüsse im Akku ausgelöst. Die Kurzschlüsse führen zu der für den Prozess notwendigen Erwärmung. Hierzu reichen je nach Batterietyp schon Stürze aus geringer Höhe. Durchbohren, starkes Verformen und Zerquetschen des Akkus führen in den meisten Fällen sicher zu einem Thermal Runaway. Wird das Gehäuse des Akkus infolge einer mechanischen Einwirkung nicht beschädigt, ist jedoch nicht ersichtlich, ob es zu einer internen Beschädigung gekommen ist. Teilweise kann es mehrere Tage dauern, bis ein interner Kurzschluss zu einem Thermal Runaway führt. Somit besteht die Gefahr, dass ein Akku durch einen Sturz zwar ausreichend

Schaden genommen hat, aber erst Tage später während der Nutzung (zum Beispiel im Flug) zu brennen beginnt (DGUV 2024).

Bei Überladung sieht es ähnlich aus wie bei einer mechanischen Beschädigung, jedoch sind es dieses Mal keine internen Kurzschlüsse, die zum Thermal Runaway führen, sondern die allgemein erhöhte elektrische Last (DGUV 2024).

Bei einer zu starken Erwärmung des Akkus wird die Temperatur nicht durch einen fehlerhaften elektrischen Prozess im Akku hinzugeführt, sondern durch eine externe Quelle. Dies kann verschiedene Ursachen haben. Am relevantesten für diese Betrachtung sind externe Erhitzung durch Brandeinwirkung und das Laden zu vieler Akkus auf engem Raum (DGUV 2024).

Auch diese Gefährdung ist nicht unabhängig, da eine mechanische Beschädigung des Akkus als Folge einer Kollision und eines Absturzes auftreten kann. Die Überladung und Überhitzung können während des Ladeprozesses auftreten. Der Thermal Runaway durch Überhitzung ist zusätzlich relevant, wenn es um eine Gefährdung durch Brandlasten geht (siehe Gefährdung durch brennbare Stoffe).

Eine Zusammenfassung der Ursachen und Gefährdungen von brennenden Lithium-Ionen-Akkus ist in **Anhang 2** dargestellt.

3.1.5 Einatmen von Gefahrstoffen

Definition gemäß BG ETEM (2022): Einatmen von Gefahrstoffen (Gase, Dämpfe, Nebel, Stäube einschl. Rauche).

Kommt es zu einem Thermal Runaway, kann das Elektrolyt so stark erhitzt werden, dass es in Form eines weißen bzw. grauen Nebels austritt und mit der Luftfeuchtigkeit reagiert. Hierbei entstehen Fluorwasserstoff und Phosphorsäure. Beide Substanzen sind ätzend und können bei Einatmen zu Verätzung der Atemwege und der Lunge führen (DGUV 2024). Laut DGUV (2024) sind die in kleinen Lithium-Ionen Akkus enthaltenen Mengen Elektrolyt ausreichend, um schadhafte Mengen an Fluorwasserstoff und Phosphorsäure zu erzeugen.

Da die Freisetzung dieser Stoffe erst durch einen Thermal Runaway erfolgt, ist diese Gefährdung nicht unabhängig und tritt in Folge eines Akkubrandes auf.

3.1.6 Brennbare Feststoffe

Lithium-Ionen-Akkus enthalten zum einen brennbare Stoffe in Form von Lithium und Lithiumsalze, zum anderen kann eine starke Erhitzung der Akkuzelle den vorher genannten Thermal Runaway auslösen (DGUV 2024). Dies bedeutet, dass es sich bei diesen Akkus um brennbare Feststoffe und somit Brandlasten handelt (DGUV 2024). Setzen Firmen größere Mengen an Lieferdrohnen ein, bedeutet dies, dass auch eine

entsprechende Menge an Ladestationen und Akkus und somit eine hohe Konzentration von brennbaren Stoffen vorhanden sein muss.

3.1.7 Folgegefährdungen durch Absturz

Diese Gefährdung ist nicht in der Vorgabe der BG ETEM aufgeführt, wird hier jedoch als Sammelbegriff für die Vielzahl an Gefahren genutzt, die durch den Absturz einer Drohne innerhalb städtischer Umgebung auftreten können. Ein Absturz über einer stark befahrenen Straße kann beispielsweise zu Folgeunfällen unter den Kraftfahrzeugen führen. Sei es durch den Versuch, der Drohne auszuweichen, oder durch Verletzung der Fahrer*innen bzw. Beschädigung der Fahrzeuge.

Außerdem können Folgegefahren durch den transportierten Inhalt auftreten. Hierzu gehören zum Beispiel (verschreibungspflichtige) Medikamente und Gefahrstoffe, welche durch den Absturz einer Drohne oder das unbeabsichtigte Lösen der Fracht in der Umwelt freigesetzt und allgemein zugänglich gemacht werden. Handelt es sich beim transportierten Inhalt um brennbare Stoffe oder Lithium-Ionen-Akkus, kann dies eine weitere Gefährdung durch Brand verursachen.

3.2 Art der Gefährdungsbeurteilung

Bei der Betrachtung der ermittelten Gefährdungen ist auffällig, dass diese in vielen Fällen nicht unabhängig voneinander auftreten, sondern sich gegenseitig bedingen. So kann die Gefährdung durch Lithium-Ionen-Akkus zwar separat während der Handhabung der Drohne/des Akkus am Boden auftreten, aber auch als Folge eines Absturzes oder einer Kollision. Da die Auslöser und Mechanismen, die zu einem Thermal Runaway führen können, unterschiedlicher Natur sind, ist es schwierig, diese Gefährdung losgelöst zu betrachten. Ähnliches gilt für die Gefährdung durch Kontakt mit den Rotoren. Sie kann alleingestellt auftreten, aber auch infolge einer Kollision oder eines Absturzes. Weiterhin sind viele der Gefährdungen aufgrund des Mangels an Erfahrungswerten und belastbaren Daten sehr schwer bis gar nicht zu quantifizieren.

Aus diesen Gründen bietet sich eine Prozess FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) an. Diese Methode der Analyse wird genutzt, um qualitative Aussagen über die Fehlerwahrscheinlichkeit, Fehlerschwere und Fehlerdetektion in der Entwicklung oder dem Betrieb von Produkten und Prozessen zu treffen. Auch lässt sich eine FMEA gut im Detailgrad skalieren, was die Erfassung von mehrschichtigen und voneinander abhängigen Fehlerbildern ermöglicht (Werdich 2012: S. 3-14). Um dies zu gewährleisten, wird zunächst die Prozessstruktur ermittelt (Werdich 2012: S. 37-54).

4. Prozessstruktur

Als Vorbereitung der PFMEA wird zunächst ein Strukturbaum des Lieferprozesses unter Berücksichtigung der Ziele der einzelnen Prozessschritte erstellt (**Abb. 9**). Es findet eine Aufteilung des Gesamtprozesses in einen aktiven und einen inaktiven Teilprozess statt.

4.1 Inaktiv

Der inaktive Teil umfasst das Herstellen bzw. den Erhalt der Betriebsbereitschaft außerhalb der unmittelbaren Flugbewegungen und somit primär das Aufladen der für die Drohnen genutzten Akkus zum Erreichen des notwendigen Ladestandes.

4.2 Aktiv

Der aktive Teil umfasst den unmittelbaren Liefervorgang mit dem Ziel des sicheren Ausliefern der Fracht. Der Liefervorgang selbst wird in vier Prozessschritte aufgeteilt:

Vorbereitung

Ziel der Vorbereitung ist das Herstellen der Flugbereitschaft für den Liefervorgang. Dies umfasst das Aufstellen der Drohne am Abflugort, einen Vorflugcheck und das sichere Anbringen der Fracht (automatisiert oder per Hand).

Start

Das Abheben der Drohne, nachdem die Fracht verladen bzw. abgesetzt wurde. Ziel des Starts ist das Erreichen der Reiseflughöhe unter Einhaltung der Drohnenverordnung.

Flug

Die Flugbewegung zwischen Start und Landepunkt. Ziel des Fluges ist das Erreichen des jeweiligen Zielpunktes unter Einhaltung der Drohnenverordnung.

Absetzen

Das Verharren der Drohne über dem Zielort (niedriger als Reiseflughöhe) und das Absetzen der Fracht via Winde oder Fallenlassen aus niedriger Höhe. Ziel des Ausliefern ist das Absetzen der Fracht unter Einhaltung der Drohnenverordnung.

Diese Struktur deckt sich grob mit der von Blom et al. (2021) genutzten Einteilung der Flugphasen. Es ist anzumerken, dass die finale Prozessstruktur sich nur auf den Auslieferungsprozess bezieht und nicht auf die Heimkehr nach erfolgreicher Auslieferung. Dies wurde so gewählt, um die Komplexität des Prozesses möglichst gering zu halten. Durch die Annahme, dass jeder Flug mit Fracht erfolgt, wird die Gefährdung im Zweifelsfall zu hoch eingeschätzt, was einer zu niedrigen Einschätzung vorzuziehen ist. Außerdem ist durch diese Entscheidung auch die Möglichkeit abgedeckt, dass eine Drohne mehrere Pakete in einer Tour zustellt, was bei derzeitigen Modellen nicht vorgesehen ist, jedoch eine potentielle zukünftige Entwicklung darstellt.

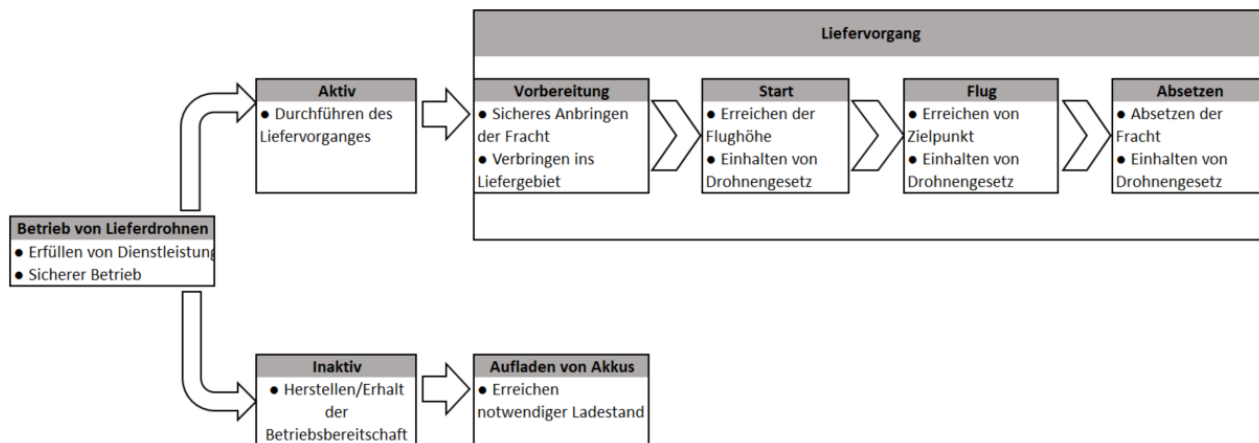


Abbildung 9: Prozessstruktur des Lieferprozesses.

4.3 Gefährdungen in den Prozessschritten

Die in 3 ermittelten Gefährdungen werden den Prozessschritten zugeordnet (**Tabelle 8 und 9**). Die Folgegefährdungen durch einen Absturz werden nicht mit einbezogen, da sie zu viele unbekannte Variablen aufweisen und den Umfang dieser Arbeit überschreiten würden.

4.3.1 Vorbereitung

Während der Vorbereitung des Liefervorganges findet keine eigenständige Bewegung der Drohne statt, somit bestehen keine mechanischen Gefährdungen seitens der Drohne. Als einzige Gefährdung für diesen Prozessschritt wird die physikalisch-chemische Gefährdung durch einen beschädigten Akku festgelegt. Dieser kann aufgrund technischer Fehler oder durch fehlerhafte Bedienung (z. B. Fallenlassen) in Brand geraten und zu daraus resultierenden Verletzungen führen sowie explodieren.

4.3.2 Start

Während des Starts befindet sich die Drohne am Boden bzw. in Bodennähe und bewegt sich nicht mit Reisefluggeschwindigkeit. Im gewerblichen Kontext findet diese Phase auf einem abgesperrten Betriebsgelände statt, welches größtenteils frei von Hindernissen und unbeteiligten Personen ist. Das bedienende Personal und zum Betrieb gehörende Gebäude befinden sich jedoch im Gefahrenbereich. In städtischen Wohngebieten ist in Bodennähe mit einer hohen Dichte an Hindernissen zu rechnen, welche von der Bebauung, über Bepflanzung in Form von Bäumen und anderen Pflanzen bis hin zu in Innenhöfen gespannten Wäscheleinen reichen. In dieser Phase wird somit allgemein eine Gefährdung durch Kollision mit Personen und Gegenständen infolge fehlerhafter Hindernisvermeidung oder starken Windes angenommen. Aufgrund der geringen Höhe geht zudem eine Gefährdung vom Kontakt der Rotoren mit Personen und Gegenständen aus. Dieser Kontakt kann mehrere Ursachen haben. Dazu gehören unsachgemäße Handhabung seitens der bedienenden Person, neugierige Kinder oder Tiere, versuchter Diebstahl der Fracht oder aber Abdriften der Drohne durch starke Windböen. Auch hier ist während der gesamten Phase die Gefährdung durch einen beschädigten Akku vorhanden. Hinzu kommt die Gefährdung der Drohne und Fracht durch Personen in Form von mutwilliger Beschädigung oder Zerstörung der Drohne.

4.3.3 Flug

Während der Flugphase bewegt sich die Drohne mit Reisefluggeschwindigkeit und auf Reishöhe fort. Somit haben die Gefährdungen durch den Absturz der Drohne sowie durch herabfallende Fracht wahrscheinlich die größte Relevanz. Direkte Kollisionen mit Personen sind aufgrund der geringen Personendichte in Reiseflughöhe nicht zu erwarten. Die Gefährdung durch einen defekten Akku ist in diesem Schritt etwas weiter gefasst und schließt nicht nur die Gefährdung durch einen vor dem Flug beschädigten Akku ein, der während des Prozessschrittes aufbrennt/exploidiert, sondern auch die Gefährdung infolge eines Absturzes, in dem der Akku der Drohne beschädigt wurde.

4.3.4 Absetzen

Während der Auslieferungsphase wird die Fracht von der Drohne zu Kund*innen gebracht. Dies erfolgt entweder durch Absetzen per Winde oder durch Abwerfen aus niedriger Höhe (ca. 3 m). In beiden Fällen kann es aufgrund von

Table 8: Gefährdungen in den aktiven Prozessschritten.

Aktiv			
Vorbereitung	Start	Flug	Absetzen
<ul style="list-style-type: none"> ● Physikalisch-chemische Gefährdungen 	<ul style="list-style-type: none"> ● Bewegte Transport- und Arbeitsmittel ● Ungeschützt bewegte Maschinenteile ● Unkontrolliert bewegte Teile ● Physikalisch-chemische Gefährdungen 	<ul style="list-style-type: none"> ● Unkontrolliert bewegte Teile ● Physikalisch-chemische Gefährdungen 	<ul style="list-style-type: none"> ● Unkontrolliert bewegte Teile ● Physikalisch-chemische Gefährdungen

4.3.5 Aufladen von Akkus

Da sich wie bei der Vorbereitung die Drohne selbst während des Aufladens der Akkus nicht bewegt, entfallen auch hier sämtliche mechanischen Gefährdungen. Somit bleibt die physikalisch-chemische Gefährdung durch einen beschädigten Akku. Zusätzlich kann während des Ladens auch durch unbeschädigte Akkus eine Gefährdung auftreten. Eine fehlerhafte Handhabung beim Laden kann durch Tiefenentladen, Überladen und ein Entstehen zu hoher Temperaturen aufgrund der Ladebedingungen (zum Beispiel Hitzestau durch zu viele Ladegeräte auf engem Raum ohne ausreichende Lüftung) auftreten. Außerdem besteht durch die direkte Handhabung der Akkus die Gefahr des Fallenlassens, was zu einer mechanischen Beschädigung führen kann. Die große Anzahl von Akkus auf engem Raum stellt eine zusätzliche Brandlast für das Gebäude dar. Sollten die Akkus aus einem dieser Gründe in Brand geraten, besteht zusätzlich eine Gefährdung durch das Einatmen der beim Verbrennungsprozess freiwerdenden Gefahrstoffe.

Table 9: Gefährdungen im inaktiven Prozessschritt.

Inaktiv
Aufladen von Akkus
<ul style="list-style-type: none">• Brennbare Feststoffe• Einatmen von Gefahrstoffen• Physikalisch-chemische Gefährdungen

4.4 Ursachen für Fehler – Fehlerbäume

In den vorangegangenen Abschnitten wurde deutlich, dass viele der Gefährdungen und die ihnen zugrundeliegenden Fehler voneinander abhängig und teilweise gegenseitig bedingt sind. Um diese komplexen Abhängigkeiten weiter zu strukturieren, wurde sich zu einer Analyse nach Fehlerbaummethode entschieden. Hierzu werden zunächst die den Fehlerbäumen zugrundeliegenden Auswirkungen festgelegt.

Es ergeben sich folgende Unterkategorien:

- Schaden an Personen (mechanische Einwirkung)
- Schaden an Personen (Brand)

Die daraus entstehenden Fehlerbäume (**Anhang 3**) werden mit drei Unterebenen erstellt. Dabei wird an der Bauteilebene gestoppt, da eine Diskussion der Fehlfunktionen einzelner elektronischer Bauteile den Umfang dieser Arbeit überschreiten würde.

4.5 Schaden an Personen (mechanische Einwirkung)

Für den Schaden an Personen durch mechanische Einwirkung wurden vier grundlegende Gefährdungen ermittelt:

- Kollision – Drohne mit Person
- Absturz von Drohne
- Herabfallende Fracht
- Kontakt mit Rotoren

Diese decken sich mit den von der DGUV Information 208-058 („Sicherer Umgang mit Multikoptern (Drohnen)“) angegebenen Gefährdungen (DGUV 2020).

4.5.1 Kollision – Drohne mit Person

Die direkte Kollision einer Drohne im kontrollierten Flug mit einer oder mehreren Personen ist nur bei geringen Flughöhen möglich. Dies wird bei der Ermittlung der Ursachen berücksichtigt. Eine Kollision kann folgende Ursachen haben:

- Ein Ausweichen ist nicht möglich, da zu wenig Platz zum Ausweichen zur Verfügung steht. Dies kann durch eine räumliche Einschränkung in Form von Bebauung auftreten, aber auch in Situationen, in denen ein Ausweichen zur Kollision mit einer anderen Person führen würde bzw. führt. Ferner kann eine für die gewählte Flughöhe zu hohe Geschwindigkeit dazu führen, dass ein Ausweichmanöver keinen Erfolg hat.
- Eine Person in der Flugbahn wird nicht oder nicht rechtzeitig erkannt und somit ein Ausweichmanöver gar nicht erst eingeleitet. Dies kann durch zu schlechte Sichtverhältnisse aufgrund von Witterung (Nebel, Blendung durch Sonne) geschehen, aber auch durch fehlerhafte oder verschmutzte Sensoren.
- Plötzlich auftretende starke Windböen können eine Drohne kurzzeitig vom Kurs abbringen; sowohl in der Horizontalen als auch der Vertikalen. Dies kann durch die Geometrie der Bebauung weiter verstärkt werden. Z. B. durch Turbineneffekte zwischen Gebäuden.

4.5.2 Absturz von Drohne

Ein Absturz kann in jeder Situation vorkommen, in der sich die Drohne in der Luft befindet. Die Ursachen eines Absturzes variieren je nach Flughöhe. Ein Absturz kann folgende Ursachen haben:

- Kollision mit einer anderen Drohne. Dies kann durch die in 4.5.1 erwähnten Ursachen auftreten.
- Kollision mit Gelände/Bebauung. Auch hier gelten die in 4.5.1 aufgeführten Ursachen.
- Zuneigegehen des Akkus. Dies kann verschiedene Gründe haben. Normalerweise besitzen Drohnen eine automatische Heimkehrfunktion, die diesem Szenario entgegenwirken soll. Fällt diese Funktion aus, kann es passieren, dass der Akku während des Fluges zu Neige geht und die Drohne zu Boden fällt. Es ist zudem denkbar, dass auch bei funktionierender automatischer Heimkehr ein rechtzeitiges Erreichen des Abflugortes oder eine kontrollierte Notlandung im öffentlichen Raum nicht möglich sind. Grund dafür kann sein, dass die Verkehrslage im Luftraum und die vorliegende Bebauung oder Personendichte am Boden keins von beidem zulassen, ohne weitere Gefährdungen zu verursachen. Auch denkbar ist ein ungeplantes Ansteigen des Stromverbrauchs aufgrund von Wetterbedingungen wie Gegenwind.
- Ausfall des Akkus. Im Gegensatz zum einfachen Erschöpfen des Akkus liegt hierbei eine Fehlfunktion des Akkus selbst vor. Sei es in Form eines spontanen Versagens oder gar der Entzündung. Dies kann aufgrund vorangegangener Beschädigungen oder fehlerhafter Handhabung geschehen.

4.5.3 Herabfallende Fracht

Beim Herabfallen der Fracht bleibt die Drohne selbst intakt und in einem kontrollierbaren Zustand, jedoch löst sich aufgrund folgender Ursachen das transportierte Paket und fällt zu Boden:

- Fehlerhafte Halterung. Der Mechanismus, mit dem das Paket gehalten wird, schließt nicht ausreichend, löst sich aufgrund eines technischen Defektes während des Fluges oder ist selbst nicht zureichend befestigt.
- Fehlerhaftes Befestigen. Die Frachthalterung ist intakt und funktioniert wie vorgesehen, jedoch wurde beim Vorgang des Anbringens der Fracht an der Drohne ein Fehler gemacht und die Fracht nicht ausreichend gesichert. Auch ist eine Beschädigung des Frachtbehälters (z. B. Karton des Paketes) denkbar, welche zum Herausfallen des transportierten Inhaltes führt.
- Kollision mit Drohne. Die Kollision mit einer anderen Drohne kann eine der oder beide Drohnen so weit beschädigen, dass sich die Fracht löst und herabfällt; auch wenn beide Drohnen noch flugbereit sind.
- Unbeabsichtigtes Lösen. Die Halterung der Fracht wird per Befehl seitens der Drohnensteuerung gelöst, weil fälschlicherweise angenommen wurde, dass der Absetzpunkt erreicht wurde.

4.5.4 Kontakt mit Rotoren

- Kommt eine Drohne mit einer Person in direkten Kontakt, können die schnell drehenden Rotoren zu teilweise schweren Schnittverletzungen führen. Ein direkter Kontakt kann erfolgen durch:
 - Kollision – Drohne mit Person. Hierbei handelt es sich somit um eine direkte Folge von 4.5.1.
 - Start/Landung zu nahe an Personen. Findet der Start- bzw. Landeprozess zu nahe an Personen statt, können selbst kleine Fehler in der Steuerung oder Einflüsse von außen (z. B. Windböen) dazu führen, dass eine Drohne in direkten Kontakt mit Personen kommt.

4.6 Schaden an Personen (Brand)

Der Brand eines Akkus stellt eine unmittelbare Gefährdung durch Verbrennungen, Einatmen von Verbrennungsprodukten und auch die Einwirkung von Splintern infolge einer Explosion dar.

4.6.1 Brand oder Explosion des Akkus durch technische Ursache

Kommt es zu einer Fehlfunktion des Akkus, kann sich im Inneren durch die Thermal-Runaway-Reaktion so viel Druck aufbauen, dass die Hülle des Akkus explosionsartig birst.

4.6.2 Brand oder Explosion des Akkus durch Fehlbedienung

Wie schon in 3.1.4 erwähnt, können sowohl die fehlerhafte Handhabung als auch direkte physikalische Beschädigungen des Akkus zu einer Fehlfunktion und somit zum Brand führen.

4.7 Gefährdungsszenarien

Aus den in 4.4 erstellten Fehlerbäumen werden die in der PFMEA genutzten Szenarien abgeleitet. Hierzu werden in jeder der vier Kategorien die Ursachen des ersten Unterschlusses als Grundlagen bzw. Hauptgefährdungen der jeweiligen Szenarien festgelegt. Diese werden den in 4.1 festgelegten Prozessschritten respektive der in 4.3 gemachten Zuteilung der Gefährdungen zugeordnet. Da in 2.6 festgelegt wurde, dass sowohl die Nutzung durch kleingewerbliche als auch großgewerbliche Betreiber

betrachtet wird und diesen zum Teil stark unterschiedliche Infrastruktur zur Verfügung steht, wird in den Prozessschritten „Laden“, „Flugvorbereitung“ und „Start“ jeweils nach der Art des Betreibers differenziert (**Tabelle 10 und 11**). Im Einklang mit 2.6 wird zudem der Prozessschritt „Auslieferung“ nach Art des Zielgebietes in „urban“ und „suburban“ unterteilt, da sich diese Gebiete durch Bevölkerungsdichte und mögliche Absatzmethoden unterscheiden (**Tabelle 12**). Die so erstellten Tabellen dienen als Formblätter zur Durchführung der PFMEA.

Tabelle 10: Formblatt PFMEA Gewerbe

	Prozessschritt	Mögliche Gefährdung	Mögliche Folgen	Mögliche Ursache	B	A	E	RPZ
Inaktiv	Laden (Gewerbe)	Physikalisch-chemische Gefährdung	Personenschaden durch Brand und/oder Explosion und Einatmen von Verbrennungsprodukten	Beschädigter Akku, Überspringen von Brand auf andere ladende/gelagerte Akkus				
		Einatmen von Gefahrstoffen Brennbare Feststoffe		Akku überladen, Fallenlassen des Akkus				
Aktiv	Flugvorbereitung (Gewerbe)	Physikalisch-chemische Gefährdung	Personenschaden durch Brand und/oder Explosion	Beschädigter Akku, Akku überladen				
	Start (Gewerbe)	Bewegte Transport- und Arbeitsmittel	Personenschaden durch Kollision Drohne mit Person	keine Ausweichmöglichkeit, fehlerhafte Sensoren, starke Windböen				
		Ungeschützt bewegte Maschinenteile	Personenschaden durch Berührung mit Rotoren	fehlender Sicherheitsabstand, (un-)bewusstes Berühren durch Personen, starke				
		Unkontrolliert bewegte Teile	Personenschaden durch abstürzende Drohne	Ausfall des Akkus, Kollision mit anderen Drohnen oder Gebäuden, Zuneigegehen des Akkus				
		Unkontrolliert bewegte Teile	Personenschaden durch herabfallende Fracht	Fehlerhafte Frachthalterung, fehlerhaft befestigte Fracht, unbeabsichtigtes Lösen der Halterung				
		Physikalisch-chemische Gefährdung	Personenschaden durch Brand und/oder Explosion	Beschädigung des Akkus durch Absturz und/oder Kollision mit Drohnen oder Gelände. Brand nach Absturz				

Tabelle 11: Formblatt PFMEA Kleingewerbe

	Prozessschritt	Mögliche Gefährdung	Mögliche Folgen	Mögliche Ursache	B	A	E	RPZ
Inaktiv	Laden (Kleingewerbe)	Physikalisch-chemische Gefährdung	Personenschaden durch Brand und/oder Explosion und Einatmen von Verbrennungsprodukten	Beschädigter Akku, Überspringen von Brand auf andere ladende/gelagerte Akkus				
		Einatmen von Gefahrstoffen Brennbare Feststoffe		Akku überladen, Fallenlassen des Akkus				
Aktiv	Flugvorbereitung (Kleingewerbe)	Physikalisch-chemische Gefährdung	Personenschaden durch Brand und/oder Explosion	Beschädigter Akku, Akku überladen				
	Start (Kleingewerbe)	Bewegte Transport- und Arbeitsmittel	Personenschaden durch Kollision Drohne mit Person	keine Ausweichmöglichkeit, fehlerhafte Sensoren, starke Windböen				
		Ungeschützt bewegte Maschinenteile	Personenschaden durch Berührung mit Rotoren	fehlender Sicherheitsabstand, (un-)bewusstes Berühren durch Personen, starke				
		Unkontrolliert bewegte Teile	Personenschaden durch abstürzende Drohne	Ausfall des Akkus, Kollision mit anderen Drohnen oder Gebäuden, Zuneigegehen des Akkus				
		Unkontrolliert bewegte Teile	Personenschaden durch herabfallende Fracht	Fehlerhafte Frachthalterung, fehlerhaft befestigte Fracht, unbeabsichtigtes Lösen der Halterung				
	Physikalisch-chemische Gefährdung	Personenschaden durch Brand und/oder Explosion	Beschädigung des Akkus durch Absturz und/oder Kollision mit Drohnen oder Gelände. Brand nach Absturz					

Tabelle 12: Formblatt allgemeiner Bereich

	Prozessschritt	Mögliche Gefährdung	Mögliche Folgen	Mögliche Ursache	B	A	E	RPZ
Aktiv	Flug	Unkontrolliert bewegte Teile	Personenschaden durch abstürzende Drohne	Ausfall des Akkus, Kollision mit anderen Drohnen oder Gebäuden, Zuneigegehen des Akkus				
		Unkontrolliert bewegte Teile	Personenschaden durch herabfallende Fracht	Fehlerhafte Frachthalterung, fehlerhaft befestigte Fracht, unbeabsichtigtes Lösen der Halterung				
		Physikalisch-chemische Gefährdung	Personenschaden durch Brand und/oder Explosion	Beschädigung des Akkus durch Absturz und/oder Kollision mit Drohnen oder Gelände. Brand nach Absturz				
	Absetzen (urban)	Unkontrolliert bewegte Teile	Personenschaden durch abstürzende Drohne	Ausfall des Akkus, Kollision mit anderen Drohnen oder Gebäuden, Zuneigegehen des Akkus				
		Unkontrolliert bewegte Teile	Personenschaden durch herabfallende Fracht	Fehlerhafte Frachthalterung, fehlerhaft befestigte Fracht, unbeabsichtigtes Lösen der Halterung				
		Physikalisch-chemische Gefährdung	Personenschaden durch Brand und/oder Explosion	Beschädigung des Akkus durch Absturz und/oder Kollision mit Drohnen oder Gelände. Brand nach Absturz				
	Absetzen (suburban)	Unkontrolliert bewegte Teile	Personenschaden durch abstürzende Drohne	Ausfall des Akkus, Kollision mit anderen Drohnen oder Gebäuden, Zuneigegehen des Akkus				
		Unkontrolliert bewegte Teile	Personenschaden durch herabfallende Fracht	Fehlerhafte Frachthalterung, fehlerhaft befestigte Fracht, unbeabsichtigtes Lösen der Halterung				
		Physikalisch-chemische Gefährdung	Personenschaden durch Brand und/oder Explosion	Beschädigung des Akkus durch Absturz und/oder Kollision mit Drohnen oder Gelände. Brand nach Absturz				

4.8 Bewertungszahlen

Die Bewertung des Restrisikos erfolgt anhand des Bestimmens der Risikoprioritätszahl (RPZ) nach Werdich (2012) welche durch die Formel

$$RPZ = B \cdot A \cdot E \quad (8)$$

definiert wird. Die RPZ wird daraufhin nach den in **Tabelle 13** gegebenen Definitionen ausgewertet.

Tabelle 13: Ergebnisdefinitionen RPZ (Werdich 2012: S. 207).

1-100	akzeptables Restrisiko, keine zusätzliche Maßnahme
100-125	geringes Restrisiko, zusätzlicher Warnhinweis notwendig
125-250	erhöhtes Restrisiko, zusätzliche Schutzmaßnahme erforderlich
250-1.000	inakzeptables Restrisiko, konstruktive Maßnahme erforderlich

Die Bedeutung B der Folgen wird über folgende Formel errechnet:

$$B = (v \cdot d) + b \quad (9)$$

Dabei kommen folgende Faktoren zum Einsatz:

v = Verletzungsgrad

d = Schadensdauer

b = Rettungschancen und Schadensbegrenzung

errechnet. Die Faktoren sind in **Tabelle 14** aufgelistet.

Tabelle 14: Faktoren der Bedeutung der Folgen (Werdich 2012: S. 208).

v	Verletzungsgrad
1	Leichte Verletzungen (erste Hilfe Versorgung)
2	Mittelschwere Verletzungen (ambulante Behandlung notwendig)
3	Sehr schwere Verletzungen (stationäre Behandlung notwendig)
d	Schadensdauer
1	Keine Langzeitschäden oder Verletzungsfolgen
2	Noch tragbare Langzeitschäden
3	Schwere Langzeitschäden (Berufsunfähigkeit, Invalidität)
b	Rettungschancen und Schadensbegrenzung
0	Gute Rettungschancen, erfolgversprechende Schadensbegrenzung
1	Schlechte Voraussetzung für Rettung und Schadensbegrenzung

Die Auftretenswahrscheinlichkeit wird über folgende Formel errechnet:

$$A = (w \cdot g) + f \quad (10)$$

Dabei kommen folgende Faktoren zum Einsatz:

w = Fehlerwahrscheinlichkeit

d = Gefährdungsd disposition

f = Anfälligkeit für Gefährdung

Die Faktoren sind in **Tabelle 15** aufgelisteten.

Tabelle 15: Faktoren der Auftretenswahrscheinlichkeit (Werdich 2012: S. 208).

w	Fehlerwahrscheinlichkeit
1	Fehlfunktion oder Fehlverhalten wird sehr selten erwartet
2	... wird mit mäßiger Häufigkeit erwartet
3	... wird sehr häufig erwartet
g	Gefährdungsd disposition
1	Aufenthalt im Gefahrenbereich sehr selten
2	Nur zeitweiser Aufenthalt im Gefahrenbereich
3	Sehr langer oder ständiger Aufenthalt im Gefahrenbereich
f	Anfälligkeit für Gefährdung
0	Nicht anfällig (gute PSA)
1	sehr anfällig (keine PSA)

Die Entdeckungsmöglichkeit wird über folgende Formel errechnet:

$$E = (q \cdot k) + r \quad (11)$$

Dabei kommen folgende Faktoren zum Einsatz:

q = Qualifikation der gefährdeten Person

k = Komplexität der Gefährdungsd situation

r = Reaktionsmöglichkeiten

Die Faktoren geben sind in **Tabelle 16** aufgelistet.

Tabelle 16: Faktoren der Entdeckungsmöglichkeit (Werdich 2012: S. 208).

q	Qualifikation der gefährdeten Person
1	Fachmann
2	Unterwiesene Person
3	Laie, nicht unterwiesen
k	Komplexität der Gefährdungsd situation
1	Komplexität gering, Situation gut durchschaubar
2	Mittlere Komplexität, Situation noch durchschaubar
3	Hohe Komplexität, Situation kaum durchschaubar
r	Reaktions-, Eingreif- und Ausweichmöglichkeiten
0	Gute Reaktionsmöglichkeiten
1	Schlechte Reaktionsmöglichkeiten

5 Risikobewertung

Basierend auf den in 2.6 getroffenen Annahmen werden für die Bewertung folgende Bedingungen gesetzt:

Gewerbe

Die Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) und Brandschutzordnung der Stadt Hamburg werden eingehalten. Dazu gehören die Unterweisung von Beschäftigten (§ 12 BetrSichV), das regelmäßige Prüfen von Arbeitsmitteln, sowie das Einhalten von Prüffristen (§§ 14-17 BetrSichV) und das Tragen von notwendiger PSA (§6 BetrSichV) (DGUV 2020a). Zudem wird davon ausgegangen, dass sich an die für die Nutzung von U-Spaces notwendigen Richtlinien gehalten wird. Dies umfasst die Ausstattung der Lieferdrohnen mit einem Fernidentifikationssystem nach Artikel 8 der DVO (EU) 2021/664 (Bundesministerium für Digitales und Verkehr 2022a und 2022b) und das Vorliegen sämtlicher erforderlicher Genehmigungen für den U-Space-Betrieb (Bundesministerium für Digitales und Verkehr 2022a).

Der Betrieb der Lieferdrohnen findet von einem abgeschlossenen Betriebsgelände aus statt. Unbeteiligte Personen können nicht ohne weiteres den Startbereich betreten und nur das nötigste Personal ist beim Beladen und Start zugegen. Das Laden der Akkus findet unter Einhaltung der Brandschutzordnung und Berücksichtigung der Hinweise und Informationen der DGUV statt (DGUV 2020) (DGUV 2024). Es wird angenommen, dass die Steuerung der Drohnen aufgrund der großen Menge von Flugbewegungen vollständig autonom erfolgt.

Für die Bewertung des Risikos im gewerblichen Umfang gelten somit folgende Bewertungszahlen:

f = 0 (gute PSA)

q = 2 (unterwiesene Person)

Kleingewerbe

Das Hauptaugenmerk liegt hierbei im Gastronomiegewerbe, da der Einsatz von Drohnen im Einzugsgebiet von kleinen Betrieben eine attraktive Alternative zum Einsatz von Fahrradkurier*innen und der Nutzung von Autos bietet (Doole et al. 2020). Das Einhalten der Betriebssicherheitsverordnung, sowie der Brandschutzordnung ist im Vergleich zur gewerblichen Nutzung schwieriger sicherzustellen. Dementsprechend wird für die Bewertung des Risikos im Kleingewerbe angenommen, dass diese nicht eingehalten werden. Es wird angenommen, dass die für die U-Spaces notwendigen Genehmigungen vorliegen, da eine Nutzung im U-Space Bereich ansonsten nicht möglich ist. Allerdings ist aufgrund der starken Fluktuation in der Belegschaft und Fachkräftemangel davon auszugehen, dass der Betrieb durch

nicht ausgebildetes oder nicht ausreichend ausgebildetes Personal erfolgt (Monsef 2023). Es ist zum Beispiel vorstellbar, dass der Besitzer eines Betriebes die notwendigen Unterweisungen und Zertifikate erhält, den Betrieb der Drohne(n) dann jedoch an eine nicht unterwiesene Person delegiert. Es ist zudem denkbar, dass aufgrund des Automatisierungsgrades vom Betreiber angenommen wird, dass der Betrieb der Drohne „mal eben nebenbei“ möglich sei. Im städtischen Bereich ist es üblich, dass privat geführte Restaurants in die Bebauung integriert sind. Dabei kann es sich um Wohngebäude handeln, von denen Teile der Räumlichkeiten an den Restaurantbesitzer vermietet werden, oder aber um Gebäude, die auch von anderen (Klein-)Gewerben genutzt werden wie zum Beispiel Einkaufszentren oder Einkaufsstraßen. Der Betrieb findet somit nicht auf einem abgeschlossenen Betriebsgelände statt.

Für die Bewertung des Risikos im kleingewerblichen Umfang gelten somit folgende Bewertungszahlen:

f = 1 (keine PSA)

q = 3 (nicht unterwiesen)

Urban

Für das Ausliefern im urbanen Bereich sehen Wing und Zipline das Absetzen der Fracht per Winde vor. Dies hat den Vorteil, dass die Drohne oberhalb der Bebauung im Schwebeflug verharren kann, was die Gefahr einer Berührung mit Personen oder Objekten verhindert und zudem ein präzises Absetzen am Zielpunkt ermöglicht.

Suburban

Das von Amazon vorgeschlagene Konzept des Abwurfs von Paketen im (Vor-) Garten von Kund*innen ist nur im suburbanen Raum möglich, da hierzu eine Flughöhe von ca. 3 m eingehalten werden muss, was aufgrund der Bebauungsdichte im urbanen Raum nicht möglich ist. Außerdem liegt durch den Abwurf auf einem Privatgelände eine räumliche Trennung vom öffentlichen Raum vor.

5.1 Laden (Gewerbe)

Die Risikobewertung von 5.1 ist in **Tabelle 17** zusammengefasst.

5.1.1 Brand und/oder Explosion (technische Ursache)

Da der Ladeprozess in einem geschlossenen Raum stattfindet, ist es sehr gut möglich, wenn nicht sogar wahrscheinlich, dass sich der Brand eines einzelnen Akkus auf andere Akkus bzw. die Umgebung ausbreitet. Hierbei handelt es sich dann um die Gefährdungen infolge eines Gebäudebrandes. Die dadurch auftretenden Verletzungen durch Verbrennungen und Rauchgasvergiftung können sehr schwer bis tödlich ausfallen und zu schweren Langzeitfolgen in Form von Invalidität führen (DGUV 2020b). Die Chancen der

Rettung einer betroffenen Person und Schadensbegrenzung werden unter Annahme des Vorhandenseins von baulichen und organisatorischen Brandschutzmaßnahmen als gut eingeschätzt ($v = 3, d = 3, b = 0$).

Mit zunehmender Anzahl an genutzten Drohnen nimmt die Anzahl der benötigten Akkus im betrachteten Gebiet zu und somit auch die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Akkubrandes. Dem gegenüber stehen die Auflagen für die Sicherheit der in der EU verkauften Akkus, sowie die entsprechenden Vorgaben bezüglich der Wartung und Wartungsintervalle. Werden diese eingehalten, ist von einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit eines technisch bedingten Brandes auszugehen. In Anbetracht der in 2.5 ermittelten Nachfrage ist mit dem häufigen Wechsel und damit verbundenem Laden von Akkus zu rechnen. Dies bedeutet, dass sich regelmäßig Mitarbeiter*innen im und um den Laderaum aufhalten ($w = 1, g = 2, f = 0$).

Liegt ein technischer Defekt vor, der zu einem Brand führt, kann es Vorzeichen geben, die von unterwiesenem Personal rechtzeitig entdeckt werden können. Abhängig von der Anzahl der zu überwachenden Akkus und der im Laderaum verbrachten Zeit ist es denkbar, dass die Vorzeichen trotzdem übersehen werden. Die Situation ist grundlegend wenig komplex (Brand vs. kein Brand), wird jedoch mit steigender Anzahl von zu überwachenden Akkus zunehmend unübersichtlicher. Der Einsatz von Rauchmeldern, feuerfesten Ladeschränken, Brandmeldeanlagen, sowie geeigneten Löschmitteln ermöglicht ein frühzeitiges Erkennen und Verhindern eine schnelle Ausbreitung. Aufgrund dessen können geeignete Maßnahmen, wie die Evakuierung des betroffenen Bereiches und/oder die Bekämpfung eines Entstehungsbrandes, eingeleitet werden ($q = 2, k = 2, r = 0$)

Es ergibt sich eine **RPZ von 72**. Es sind keine weiteren Maßnahmen erforderlich.

5.1.2 Brand und/oder Explosion (operative Ursache)

Die Situation im Falle eines Brandes ist identisch mit der in 5.1.1 und wird somit gleich eingeschätzt ($v = 3, d = 3, b = 0$).

Im Vergleich zu 5.1.1 liegt hier jedoch eine fehlerhafte Bedienung der Akkus zu Grunde, wodurch sich die Faktoren der Auftretenswahrscheinlichkeit und Entdeckungsmöglichkeit verändern. Ausgehend von der großen Anzahl genutzter Akkus, steigt die Wahrscheinlichkeit eines operativen Fehlers. Dies umfasst das versehentliche Fallenlassen sowie Fehler im Ladeprozess (überladen, tiefenentladen), welche wiederum durch Beschädigung zu einem Aufbrennen des Akkus führen können. Hierbei ist zu beachten, dass ein operativer Fehler nicht zwingend zu einem Brand führt, sollten die Beschädigungen am Akku nicht ausreichen, einen Thermal Runaway auszulösen. Die Häufigkeit, dass ein operativer Fehler auftritt, der ausreicht einen, um Brand zu starten, wird dementsprechend als moderat eingeschätzt. Die Gefährdungsdiskposition wird wie in 5.1.1 eingeschätzt ($w = 2, g = 2, f = 0$).

Da diese Art von Fehler durch die direkte Interaktion von Mitarbeiter*innen mit den Akkus entsteht, ist ein rechtzeitiges Erkennen und Reagieren wahrscheinlich. Zum Beispiel können Akkus nach Herunterfallen

direkt aus dem Verkehr gezogen werden. Das Überladen wird in der Regel durch in Ladegeräten integrierte Ladeschutzsysteme verhindert. Die Situation wird als gut durchschaubar und wenig komplex eingestuft („Akku heruntergefallen oder nicht?“) und weist gute Reaktionsmöglichkeiten in Form von direktem Eingreifen mit und ohne technischen Hilfsmitteln auf ($q = 2, k = 1, r = 0$).

Es ergibt sich eine **RPZ von 72**. Es sind keine weiteren Maßnahmen erforderlich.

5.2 Flugvorbereitung (Gewerbe)

Die Risikobewertung von 5.2 ist in **Tabelle 17** zusammengefasst.

5.2.1 Brand und/oder Explosion

Ausgehend von dem für den gewerblichen Bereich erstellten Szenario findet die Vorbereitung der Drohne entweder auf dem Startplatz des Firmengeländes statt. Es liegen deshalb weniger Brandlasten in unmittelbarer Nähe des Prozesses vor. Daraus wird auf eine im Vergleich zu 5.1.1 reduzierte Schwere der Folgen mit guten Rettungsmöglichkeiten geschlossen. Kommt es zum Brand, kann sich die Person selbst sehr schnell und effektiv aus dem Gefahrenbereich bewegen oder von anderen gerettet werden, ohne dass diese sich einer beträchtlichen Gefahr aussetzen müssen ($v = 2, d = 2, b = 0$).

Die Wahrscheinlichkeit, dass die für einen Brand notwendige Fehlerkette während der kurzen Phase der Flugvorbereitung eintritt, ist sehr gering. Die genannte Lage abseits von Gebäuden, geringe Anzahl beteiligter Personen und kurze Dauer des Prozesses bedeuten einen sehr kurzen bzw. seltenen Aufenthalt im Gefahrenbereich ($w = 1, g = 1, f = 0$).

Die Situation ist gut durchschaubar, da sie wenige Arbeitsschritte erfordert und eine potentielle Fehlfunktion sichtbare Anzeichen in Form von Rauchentwicklung und Hitze aufweist. Zudem wird während dieser Phase direkt an der Drohne gearbeitet, wodurch es sehr unwahrscheinlich ist, dass ein bevorstehender bzw. ein entstehender Brand unbemerkt bleibt. Kommt es zu einem Thermal Runaway, kann sehr gut und schnell reagiert werden. Da keine Brandlasten vorhanden sind und der Prozess größtenteils im Freien stattfindet, ist es sehr einfach, den Gefahrenbereich zu verlassen oder andere Maßnahmen zu ergreifen. Eine Ausbreitung der Situation ist unwahrscheinlich ($q = 2, k = 1, r = 0$).

Es ergibt sich eine **RPZ von 8**. Es sind keine weiteren Maßnahmen erforderlich.

5.3 Start (Gewerbe)

Die Risikobewertung von 5.3 ist in **Tabelle 17** zusammengefasst.

5.3.1 Kollision Drohne mit Person

Aus Gründen der Praktikabilität kann angenommen werden, dass der Flug einer Lieferdrohne mit einem senkrechten Aufsteigen auf 50 m beginnt, bevor in einen Steigflug mit horizontaler und vertikaler Geschwindigkeit auf Reiseflughöhe gestiegen wird (Blom et al. 2021). Eine direkte Kollision ohne

Fremdeinwirkungen kann dementsprechend nur beim vertikalen Aufstieg eintreten, falls sich Körperteile über der Drohne befinden. Die Geschwindigkeit ist zu diesem Zeitpunkt gering [Wert einfügen], was zu leichten Verletzungen ohne Langezeitschäden führen kann. Zu den möglichen Fremdeinwirkungen zählen starker Wind und Windböen. Durch diese kann die Drohne im Kurs beeinträchtigt werden und es zu einer Kollision mit einer Person kommen. Eine solche Kollision findet maximal mit der vorliegenden Windgeschwindigkeit statt. Als Obergrenze wird die maximal zulässige Windgeschwindigkeit für die Nutzung von Lieferdrohnen angenommen ($v = 1, d = 1, b = 0$)

Die Wahrscheinlichkeit, dass es zu einer Kollision kommt wird als sehr gering eingeschätzt. Die Voraussetzungen für eine Kollision ohne Fremdeinwirkungen sind sehr spezifisch und setzen voraus, dass sich eine Person praktisch direkt über der Drohne befindet. Eine Kollision in der Horizontalen durch starken Wind ist zwar möglich, jedoch aufgrund von Kollisionsvermeidungssystemen unwahrscheinlich. Auch ist anzunehmen, dass die Verhaltensregeln für das Personal vorsehen, dass beim Start ein Sicherheitsabstand eingehalten werden muss, welcher den Aufenthalt im Gefahrenbereich pro Start auf ein Minimum verringert. Aufgrund der hohen Anzahl von Starts wird ein zeitweiser Aufenthalt im Gefahrenbereich angenommen ($w = 1, g = 2, f = 0$).

Die Situation ist wenig komplex und gut durchschaubar. Zur Erkennung muss nur das Abweichen der Drohne vom vorgesehenen Kurs festgestellt werden. Kommt es jedoch zur Kursabweichung durch eine plötzliche und starke Windbö, kann die Situation so schnell eintreten, dass eine Reaktion durch Ausweichen nur schlecht möglich ist ($q = 2, k = 1, r = 1$).

Es ergibt sich eine **RPZ von 6**. Es sind keine weiteren Maßnahmen erforderlich.

5.3.2 Berührung mit Rotoren

Kommt es zu einer Berührung der Rotoren mit einer Person, können teils schwere Schnittverletzungen auftreten. Abhängig von dem betroffenen Körperteil (Augen, Sehnen in Extremitäten, usw.) können diese mitunter Langzeitfolgen nach sich ziehen. Da sich der Start auf einem dedizierten Startplatz im Freien vollzieht, sind die Voraussetzungen für eine Rettung sehr gut ($v = 2, d = 2, b = 0$).

Der Personenschaden durch Berührung mit Rotoren ist eine direkte Folge der in 5.3.1 betrachteten Kollision und wird dementsprechend mit derselben Fehlerwahrscheinlichkeit und Gefährdungsdiskposition versehen ($w = 1, g = 1, f = 0$). Aufgrund dessen sind auch die Bewertungszahlen für die Komplexität und Reaktionsmöglichkeiten gleich ($q = 2, k = 1, r = 1$).

Es ergibt sich eine **RPZ von 12**. Es sind keine weiteren Maßnahmen erforderlich.

5.3.3 Absturz von Drohne

Ausgehend vom Gewicht der in 2.6 definierten Drohnen (10 kg) ist ein Auftreffen auf eine Person infolge eines Absturzes aus mehr als 3,05 m im AIS Level 6 „unsurvivable“ einzuordnen (Melnik 2014) (Koh et al. 2018) (s. **Anhang 4**). Die Bedeutung der Folgen ist somit schwer und eine Rettung nicht mehr möglich ($v = 3$, $d = 3$, $b = 1$).

Oh und Yoon (2022) schlagen, basierend auf den Sicherheitsbestimmungen der FAA, für die Nutzung von Drohnen im urbanen Bereich einen Sicherheitsgrad von 10^{-7} tödlichen Unfällen pro Flugstunde vor. Die EASA setzt diesen Wert im Vorschlag von JARUS (2017) bei 10^{-6} tödlichen Unfällen pro Flugstunde an. Im Bereich um einen Betrieb, der Drohnen für Lieferungen im Last-Mile-Segment einsetzt, ist aufgrund der in 2.5 errechneten Nachfrage mit einer sehr hohen Dichte von Drohnen zu rechnen. Blom et al. (2021) erstellten eine Simulation für die niederländische Stadt Delft, in der basierend auf den von Melnik et al. (2014) ermittelten Wahrscheinlichkeiten für Systemausfälle, das Risiko eines tödlichen Drohnenabsturzes in Abhängigkeit von der Entfernung zum Lieferzentrum ermittelt wurde. Diese lieferte für den Bereich unmittelbar auf und um das Betriebsgelände ein Risikograd von 10^{-4} gefolgt von einem Gebiet mit einem individuellen Risikograd von 10^{-5} tödlichen Unfällen pro Jahr. Dies zeigt einen sehr starken Anstieg des Risikogrades mit abnehmendem Abstand zum Lieferzentrum. Es muss angemerkt werden, dass die Stadt Delft eine doppelt so hohe Bevölkerungsdichte wie Hamburg aufweist, jedoch die nach Doole et al. (2021) errechnete Nachfrage um den Faktor 100 kleiner ist als in Hamburg (Citypopulation 2024a) (Citypopulation 2024b) (Blom et al. 2021). Außerdem betrachtet die Simulation nur die Wahrscheinlichkeit aufgrund eines technischen Defektes, andere Ursachen, wie menschliches Versagen, Kollisionen mit anderen Drohnen, Gebäuden oder Vögeln, sind nicht einbezogen (Blom et al. 2021). Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass der allgemeine Trend der Zunahme des Risikos um mehrere Größenordnungen mit abnehmender Entfernung zum Lieferzentrum auch auf die Stadt Hamburg angewendet werden kann. Ausgehen von einer grundlegenden Systemfehlerrate von $9,4 \times 10^{-6}$ pro Flugstunde (Melnik 2014) ist ein Überschreiten der von Oh und Yoon (2022) und der EASA vorgeschlagene Grenzwerte sehr wahrscheinlich. Die Fehlerwahrscheinlichkeit liegt somit bei sehr häufig ($w = 3$). Aufgrund der hohen Dichte an Flugbewegungen und der Bevölkerungsdichte kann angenommen werden, dass sich tagsüber ständig Personen im überflogenen Bereich aufhalten. Dem steht jedoch der vergleichsweise kurze Aufenthalt von Personen im Freien (ca. 10 % des Tages) gegenüber, da eine 10 kg schwere Drohne nicht in der Lage ist, Gebäude im freien Fall zu durchschlagen (Blom et al. 2021). Die Gefährdungsdiskussion ist infolge dessen als mittel eingestuft ($g = 2$). PSA wird seitens der Bevölkerung nicht getragen ($f = 1$). Dies führt zu einer Bewertungszahl von $A = 7$. Zur Kontrolle wird eine Bewertung nach VDA durchgeführt. Drohnenlieferungen greifen auf bekannte und erprobte Technologien zurück und nutzen diese, um ein neues Verfahren zur Last-Mile Delivery umzusetzen. Dies entspricht der Definition „neuer Prozess mit bekannten, jedoch

problematischen Verfahren, welche eine Bewertungszahl von $A = 7 - 8$ entspricht (Werdich 2012 S. 246). Aufgrund der Übereinstimmung wird $A = 7$ genutzt.

Ein rechtzeitiges Entdecken ist im Falle eines Absturzes praktisch unmöglich. Da der Absturz in der Regel ohne Vorwarnung für betroffene Personen am Boden erfolgt und die auslösenden Ereignisse (Zusammenstoß, Vogelschlag etc.) in der Regel außerhalb des Sichtfeldes eben dieser stattfinden ($k = 3$), sind die Reaktionsmöglichkeiten sehr schlecht ($r = 1$). Da auch unbeteiligte Personen betroffen sein können, wird von nicht unterwiesenen Personen ausgegangen ($q = 3$). Die Entdeckungsmöglichkeit ist sehr schlecht ($E = 10$).

Es ergibt sich eine **RPZ von 700**. Ein inakzeptables Restrisiko, das konstruktive Maßnahmen erfordert.

5.3.4 Herabfallende Fracht

Da es derzeit keine Untersuchungen zur Verletzungsschwere herabfallender Pakete gibt, werden für die Bewertung der Verletzungsschwere die von Koh et al. (2018) ermittelten Ergebnisse für Verletzungen durch herabfallende Drohnen genutzt (s. **Anhang 4**). Da die Ergebnisse auf Simulationen und Experimenten zum Absturz von Drohnen basieren, dienen sie hierbei nur der Annäherung, denn Pakete und UAVs weisen durch unterschiedlichen Aufbau, Gewichtsverteilung und Dichte unterschiedliche Luftwiderstände und Fallgeschwindigkeiten auf. Diese Unterschiede werden jedoch, für eine vorläufige Abschätzung der Folgen, als vernachlässigbar angenommen. Zudem ist unbekannt, welcher Prozentsatz an Lieferungen die 2,2 kg Marke erreicht. Es wird im Folgenden vom Worst-Case ausgegangen: Das vertikale Auftreffen eines 2,2 kg schweren Paketes auf den Kopf. Die AIS-Zahl für ein 2,2 kg schweres Paket bei einer Fallhöhe von 3,05 m läge bei 3,56 (s. **Anhang 4**) (Koh et al. 2018). Dies entspricht nach AIS einer ernsthaften Verletzung wie zum Beispiel einem signifikanten Schädelbruch mit einer Todesrate von 8-10% (Koh et al. 2018; Schmitt et al. 2015). Die Langzeitschäden werden als schwer eingeordnet. Die angegebene Flughöhe von 3,05 m wird während des Starts schnell erreicht bzw. überschritten, weswegen die geminderte Verletzungsschwere vor Erreichen dieser Höhe nicht in die Bewertung einfließt. Durch diese Entscheidung wird zudem auch hier vom Worst-Case ausgegangen. Aufgrund der ermittelten Werte wird die Verletzungsschwere als sehr schwere Verletzungen mit schweren Langzeitschäden eingeordnet. Da diese Verletzung nicht zwangsläufig tödlich endet und der Prozess auf einem übersichtlichen Gelände stattfindet, ist die Rettungschance gut ($v = 3, d = 3, b = 0$).

Wie in 5.3.3 erwähnt, ist um das Betriebsgelände mit einem erhöhten Aufkommen von Drohnen zu rechnen. Da die Fracht in einem inneren Frachtraum gesichert ist, ist ein unbeabsichtigtes Lösen infolge von leichten Kollisionen oder starken Winden weniger wahrscheinlich als der Absturz der Drohne. Eine Kollision, die den Frachtraum soweit beschädigt, dass die Fracht hinausfallen kann, führt vermutlich direkt zu einem Absturz der gesamten Drohne (s. 5.3.3). Ein versehentliches Abwerfen der Fracht aufgrund eines

menschlichen Fehlers ist im vollautomatisierten Betrieb unwahrscheinlich, da aufgrund der Menge der betriebenen Drohnen wenige bis keine direkte Steuerung durch Menschen erfolgt. Die Fehlerwahrscheinlichkeit ist gering. Die Gefährdungsdiskposition und PSA werden wie in 5.3.3 eingestuft ($w = 1, g = 3, f = 1$).

Für die Entdeckungsmöglichkeiten siehe 5.3.3 ($E = 10$).

Es ergibt sich eine **RPZ von 360**. Ein inakzeptables Restrisiko, das konstruktive Maßnahmen erfordert.

5.3.5 Brand und/oder Explosion nach Absturz auf Gebäude

Gebäudeüberbauungsgrad 22,3%, Gebäudedichte 1,086 1/km² (Meinel 2013)

Durch den Absturz auf einem Gebäude kann es zu einem Brand kommen, der sich über den Dachstuhl auf das Gebäude ausbreitet. Damit verbunden sind sämtliche Risiken eines Gebäude- bzw. Wohnungsbrandes ($v = 3, d = 3, b = 1$).

Ausgehend von einer Systemfehlerrate von $9,4 \times 10^{-6}$ pro Flugstunde (Melnyk 2014), dem erwarteten Aufkommen von 77×10^6 Flugstunden pro Jahr und einem Gebäudeüberbauungsgrad von 22,3% ergeben sich pro Jahr 161 Abstürze auf bebauter Fläche. Dass es nach einem Absturz auch noch zu einem Thermal Runaway und einer daraus folgenden Explosion sowie Verletzungen durch Splitter kommt, wird aufgrund der notwendigen Verkettung von Ereignissen als sehr selten eingestuft. Die Gefährdungsdiskposition wird aufgrund der hohen Dichte von Drohnenbewegungen um das Betriebsgelände als hoch eingestuft. PSA wird seitens der Bevölkerung nicht getragen ($w = 1, g = 3, f = 1$).

Die gefährdeten Personen sind in der Regel nicht unterwiesen. Da im betrachteten Szenario jedoch von einer Luftraumüberwachung durch U-Space-Dienstleister und der autonomen Steuerung der Drohnen seitens des Betreibers ausgegangen wird, wird die Bewertungszahl der Qualifikation als „Fachmann“ eingestuft. Eine Erkennung des Absturzes ist möglich durch ein Abbrechen der Verbindung zur Drohne (im Falle einer sehr starken Beschädigung oder eines Akkubrandes), durch Absturzmeldung seitens der Drohne (im Falle einer moderaten Beschädigung), durch Ausfall des elektronischen Identifikationssystems infolge eines Absturzes, sowie Meldung durch Dritte. Die Position der abgestürzten Drohne ist aufgrund der Luftraumüberwachung und der Navigationsdaten im System des Betreibers bekannt. Aufgrund dessen ist die Situation gut durchschaubar und es liegen gute Reaktionsmöglichkeiten vor ($q = 1, k = 1, r = 0$).

Es ergibt sich eine **RPZ von 40**. Es sind keine weiteren Maßnahmen erforderlich.

Table 17: Ausgefülltes Formblatt PFMEA im gewerblichen Bereich.

	Prozessschritt	Mögliche Gefährdung	Mögliche Folgen	Mögliche Ursache	B	A	E	RPZ
Inaktiv	Laden (Gewerbe)	Physikalisch-chemische Gefährdung	Personenschaden durch Brand und/oder Explosion und Einatmen von Verbrennungsprodukten	Beschädigter Akku, Überspringen von Brand auf andere ladende/gelagerte Akkus	9	3	4	72
		Einatmen von Gefahrstoffen Brennbare Feststoffe		Akku überladen, Fallenlassen des Akkus	9	4	2	72
Aktiv	Flugvorbereitung (Gewerbe)	Physikalisch-chemische Gefährdung	Personenschaden durch Brand und/oder Explosion	Beschädigter Akku, Akku überladen	4	1	2	8
	Start (Gewerbe)	Bewegte Transport- und Arbeitsmittel	Personenschaden durch Kollision Drohne mit Person	keine Ausweichmöglichkeit, fehlerhafte Sensoren, starke Windböen	1	2	3	6
		Ungeschützt bewegte Maschinenteile	Personenschaden durch Berührung mit Rotoren	fehlender Sicherheitsabstand, (un-)bewusstes Berühren durch Personen, starke	4	1	3	12
		Unkontrolliert bewegte Teile	Personenschaden durch abstürzende Drohne	Ausfall des Akkus, Kollision mit anderen Drohnen oder Gebäuden, Zuneigegehen des Akkus	10	7	10	700
		Unkontrolliert bewegte Teile	Personenschaden durch herabfallende Fracht	Fehlerhafte Frachthalterung, fehlerhaft befestigte Fracht, unbeabsichtigtes Lösen der Halterung	9	4	10	360
		Physikalisch-chemische Gefährdung	Personenschaden durch Brand und/oder Explosion	Beschädigung des Akkus durch Absturz und/oder Kollision mit Drohnen oder Gelände, Brand nach Absturz	10	4	1	40

5.4 Laden (Kleingewerbe)

Die Risikobewertung von 5.4 ist in **Table 18** zusammengefasst.

5.4.1 Brand und/oder Explosion (technische Ursache)

Die grundlegende Bewertung der Folgen eines Brandes ist identisch mit 5.1.1 und umfasst schwere Verletzungen bis hin zum Tod und mögliche Langzeitschäden. Aufgrund der Nähe zu (oder direkter Integration in) Bebauung, zu der auch Wohngebäude gehören können, ist mit einer Ausbreitung der Situation zu rechnen. Diese Ausbreitung kann unter anderem in Form von Wohnungsbränden auftreten, wodurch zum einen eine größere Anzahl von (unbeteiligten) Personen gefährdet wird und auch die Voraussetzung zur Rettung und Schadensbegrenzung stark verschlechtert werden ($v = 3, d = 3, b = 1$).

Auch hier wird mit einer großen Anzahl von genutzten Akkus gerechnet. Hinzu kommt, dass im Kleingewerbe aufgrund von finanziellen Beweggründen in Betracht gezogen werden muss, dass bei der Beschaffung von Lieferdrohnen und Akkus auf den Gebrauchtmärkte zurückgegriffen wird. Dies führt wiederum zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit eines technischen Defektes, da so bereits beschädigte Produkte in den Einsatz kommen können. Außerdem ist eine einheitliche Durchsetzung technischer, baulicher und auch organisatorischer Brandschutzmaßnahmen sowie der Nutzung von PSA schwer zu erreichen und zu kontrollieren. Sollten diese Maßnahmen nicht eingehalten oder gar bewusst umgangen werden, bedeutet dies wiederum eine Erhöhung der Unfallwahrscheinlichkeit und -schwere. Dem gegenüber steht wie in 5.1.1 aufgeführt, die Tatsache, dass die für eine Fehlfunktion mit Brandfolge notwendige Verkettung von Ereignissen nicht bei jedem technischen Fehler auftreten wird.

Fehlerwahrscheinlichkeit wird dementsprechend höher als in 5.1.1, jedoch trotzdem niedriger als mäßige Häufigkeit eingeschätzt. Da es sich bei dem betrachteten Szenario um Lokalitäten in Wohngebäuden handelt, wird von einem sehr langen oder ständigen Aufenthalt im Gefahrenbereich ausgegangen, da in Folge einer Ausbreitung der Situation nicht nur das Personal betroffen ist, sondern auch die Anwohnerschaft. Dies bedeutet auch, dass davon auszugehen ist, dass keine PSA getragen wird ($w = 1, g = 3, f = 1$).

Aufgrund großer Fluktuation der Belegschaft in der Gastronomie wird davon ausgegangen, dass das Personal in den meisten Fällen wenig bis gar nicht im Umgang mit Akkus und Ladegeräten unterwiesen ist. Zudem ist es unwahrscheinlich, dass Mitarbeiter*innen nur zur Abwicklung der Drohnenlieferungen eingestellt werden, sondern dies zusätzlich zu ihren sonstigen Tätigkeiten verrichten. Es ist zu erwarten, dass aufgrund räumlicher Einschränkungen keine dedizierten Räume für Ladegeräte und auch keine Ladeschränke vorhanden sind. Ladegeräte werden somit wahrscheinlich in Räumen mit primär anderer Nutzung wie zum Beispiel Abstellkammern, Hinterzimmern oder dergleichen aufgestellt werden. Durch die gemischte Nutzung, die fehlende Unterweisung und Zeitdruck entsteht somit eine Situation, in der eine Fehlfunktion und der dadurch entstehende Brand nicht bzw. nicht rechtzeitig erkannt werden könnten, um den Thermal Runaway zu verhindern. Tagsüber ist die Situation durch die direkte Anwesenheit von Personen in der Nähe der Ladestationen noch durchschaubar. Werden die Akkus jedoch über Nacht geladen, oder in den Stationen vergessen, kann ein technischer Defekt nicht rechtzeitig erkannt werden. Es wird hierbei vom schwerwiegenderen Fall ausgegangen und die Situation als allgemein kaum durchschaubar eingeschätzt. Ausgehend von diesem Fall sind auch die Reaktionsmöglichkeiten schlecht. Tagsüber kann auf Entstehungsbrände reagiert und Rettungskräfte alarmiert werden. Da sich Akkubrände selbst unter optimalen Bedingungen nur sehr schwer löschen lassen, wird sich die Reaktion auf eine Verhinderung der Ausbreitung beschränken. Tritt die Fehlfunktion nachts ein, wird sie vermutlich erst bemerkt, wenn sich die Situation schon über einen Entstehungsbrand hinaus ausgebreitet hat. Insgesamt sind die Reaktionsmöglichkeiten somit schlecht ($q = 3, k = 3, r = 1$).

Es ergibt sich eine **RPZ von 400**. Ein inakzeptables Restrisiko, das konstruktive Maßnahmen erfordert.

5.4.2 Brand und/oder Explosion (operative Ursache)

Die Ausgangssituation ist die gleiche wie in 5.4.1. Aufgrund dessen werden die gleichen Werte für Verletzungsgrad, Schadensdauer, Rettungschancen, Gefährdungsdiskussion, Anfälligkeit für Gefährdung und die Qualifikation der gefährdeten Personen genutzt. Abweichend von 5.4.1 wird eine höhere Fehlerwahrscheinlichkeit angenommen, da dieses Fehlerbild von menschlichem Fehlverhalten ausgelöst wird. Dieses wird unter anderem durch fehlende Unterweisung und Hektik infolge von Zeitdruck verstärkt ($v = 3, d = 3, b = 1$) ($w = 2, g = 3, f = 1$).

Da direkt mit den Akkus und Ladegeräten interagiert wird ist, wie in 5.1.2 erläutert, ein direktes Bemerkens des Fehlers und darauffolgendes Eingreifen (Akku aus dem Verkehr ziehen, Ladestation abschalten (DGUV 2024)) sehr gut möglich. Die Situation ist gut durchschaubar und es bestehen gute Reaktionsmöglichkeiten ($q = 3, k = 1, r = 0$).

Es ergibt sich eine **RPZ von 210**. Das Risiko ist erhöht, es sind zusätzliche Schutzmaßnahmen erforderlich.

5.5 Flugvorbereitung (Kleingewerbe)

Die Risikobewertung von 5.5 ist in **Tabelle 18** zusammengefasst.

5.5.1 Brand und/oder Explosion

Die Vorbereitung findet im Inneren der jeweiligen Lokalitäten oder im öffentlichen Raum statt. In beiden Fällen geraten Dritte in den Gefahrenbereich. Eine Vorbereitung im Inneren der Lokalität führt wiederum zu einer Schwere der Folgen wie in 5.2.2. Ein Vorbereiten im Freien führt zwar im Falle eines Brandes zu einer geringeren Schwere, jedoch liegen dort in der Regel ebenfalls Brandlasten in Form von Fassaden, Begrünung (besonders kritisch während anhaltender Trockenperioden) und Fahrzeugen vor. Ausgehend vom schwereren Fall ergeben sich schwere Verletzungen mit schweren Langzeitschäden. Die Rettungschancen und Möglichkeiten der Schadensbegrenzung werden entsprechend 5.2.2 als schlecht eingeschätzt ($v = 3, d = 3, b = 0$).

Die Auftretenswahrscheinlichkeit wird als allgemein gering eingeschätzt, da auch hier eine konkrete Fehlerkette während der kurzen Periode der Flugvorbereitung eintreten muss. Der Aufenthalt im Gefahrenbereich ist aufgrund dessen ebenfalls nur sehr kurz bzw. selten. Das Fehlen von PSA an Belegschaft, Anwohnern und Passanten erhöht die Wahrscheinlichkeit von Verletzungen jedoch ($w = 1, g = 1, f = 1$).

Die Situation ist durch den direkten Umgang mit dem Gerät übersichtlich und gut durchschaubar. Findet die Vorbereitung im öffentlichen Raum statt, kann es jedoch geschehen, dass sich Dritte bewusst oder unbewusst in den Gefahrenbereich begeben. Dies kann im Falle von Fahrradfahrer*innen mitunter sehr schnell vonstattengehen. Handelt es sich bei dem zum Vorbereiten benutzten Bereich um einen stark frequentierten Fußweg oder liegt er nahe einer stark befahrenen Straße, steigt die Komplexität der Situation, jedoch nicht soweit, dass sie gänzlich unübersichtlich ist, da angenommen wird, dass Passanten in der Regel vermeiden, in den Gefahrenbereich zu gelangen ($q = 2, k = 2, r = 0$).

Es ergibt sich eine **RPZ von 72**. Es sind keine weiteren Maßnahmen erforderlich.

5.6 Start (Kleingewerbe)

Die Risikobewertung von 5.6 ist in **Tabelle 18** zusammengefasst.

5.6.1 Kollision Drohne mit Person

Im Vergleich zu 5.3.1 werden aufgrund der Möglichkeit einer Fehlbedienung und einer zu hohen horizontalen Geschwindigkeit Verletzungsgrad und Schadensdauer höher eingeschätzt. Die Voraussetzungen für eine Rettung sind gut ($v = 2, d = 2, b = 0$).

Die Fehlerwahrscheinlichkeit wird aufgrund von Zeitdruck und fehlender Unterweisung als mäßig eingeschätzt. Die Gefährdungsdiskposition mangels Abgrenzung des Startplatzes zum öffentlichen Raum ist zeitweise. PSA wird weder von bedienenden Personen noch von Passant*innen getragen ($w = 2, g = 2, f = 1$).

Alle am Prozess beteiligten Personen sind nicht unterwiesen. Die Situation selbst ist in ihrer Komplexität noch durchschaubar, es kann jedoch passieren, dass Passant*innen übersehen werden, oder unbemerkt in den Gefahrenbereich gelangen. Die Reaktionsmöglichkeiten sind jedoch gering, da der Prozess sehr schnell vonstattengehen kann ($q = 3, k = 2, r = 1$).

Es ergibt sich eine **RPZ von 140**. Geringes Restrisiko, zusätzlicher Warnhinweis notwendig.

5.6.2 Berührung mit Rotoren

Für die Bedeutung der Folgen siehe 5.3.2 ($v = 2, d = 2, b = 0$).

Für die Auftretenswahrscheinlichkeit: siehe 5.6.1 ($w = 2, g = 2, f = 1$).

Für die Entdeckungsmöglichkeit: siehe 5.6.1 ($q = 3, k = 2, r = 1$).

Es ergibt sich eine **RPZ von 140**. Geringes Restrisiko, zusätzlicher Warnhinweis notwendig.

5.6.3 Absturz von Drohne

Für die Bedeutung der Folgen siehe 5.3.3 ($v = 3, d = 3, b = 1$).

Im Gegensatz zu 5.3.3 ist beim Start von Drohnen im Kleingewerbe eine geringere Dichte an Flugbewegungen zu erwarten, da eine vergleichsweise kleine Anzahl von Drohnen über eine Vielzahl einzelner Standorte verteilt betrieben wird. Abweichend von 5.3.3 wird die Gefährdungsdiskposition eine Stufe niedriger eingeordnet. Aufgrund der geringeren Dichte von Flugbewegungen ist die Gefährdung durch Kollisionen um den Startpunkt herum niedriger als im gewerblichen Bereich. Da die allgemeine Verkehrsdichte im Luftraum mit zunehmender Höhe abnimmt (Oh und Yoon 2024) kann davon ausgegangen werden, dass beim Start mit zunehmendem Risiko von Kollisionen zu rechnen ist. Außerdem besteht die Gefahr eines Absturzes aufgrund von Kontakt mit Bebauung oder Bäumen. Die Fehlerwahrscheinlichkeit wird dementsprechend als mäßige Häufigkeit eingestuft. Die Aufgrund der Bevölkerungsdichte wird ein zeitweiser Aufenthalt im Gefahrenbereich erwartet ($w = 2, g = 2, f = 1$).

Für die Entdeckungsmöglichkeiten siehe 5.3.3 ($E = 10$).

Es ergibt sich eine **RPZ von 500**. Ein inakzeptables Restrisiko, das konstruktive Maßnahmen erfordert.

5.6.4 Herabfallende Fracht

Für die Bedeutung der Folgen siehe 5.3.4 ($v = 3, d = 3, b = 0$).

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Stück Fracht herabfällt, ist größer als in 5.3.4, da hier nicht von der Nutzung geschlossener Frachträume ausgegangen wird. Eine Kollision, die zum Herabfallen der Fracht führt, muss nicht stark genug sein, die Drohne signifikant zu beschädigen. Auch haben Wetterbedingungen hierbei einen größeren Einfluss. Starke Winde oder Böen können die Fracht von der Halterung lösen. Läuft der Lieferprozess manuell ab, ist zudem denkbar, dass die Fracht versehentlich abgeworfen bzw. herabgelassen wird. Da die Anzahl der Flugbewegungen zum Beispiel von einzelnen Restaurants im Vergleich zum gewerblichen Betrieb gering ist, ist die Gefährdungsdiskposition hierbei gering ($w = 2, g = 1, f = 1$).

Für die Entdeckungsmöglichkeit: siehe 5.3.3 ($q = 3, k = 3, r = 1$).

Es ergibt sich eine **RPZ von 270**. Ein inakzeptables Restrisiko, das konstruktive Maßnahmen erfordert.

5.6.5 Brand und/oder Explosion nach Absturz auf Gebäude

Für die Bedeutung der Folgen siehe 5.3.5 ($v = 3, d = 3, b = 1$).

Für die Auftretenswahrscheinlichkeit siehe 5.3.5 ($w = 1, g = 2, f = 1$).

Im Gegensatz zu 5.3.5 ist in dieser Situation keine automatisierte Steuerung oder Überwachung seitens des Betreibers vorausgesetzt. Ein Absturz wird entweder durch den U-Space-Dienstleister oder durch die*den Pilot*in erkannt. Es ist jedoch denkbar, dass ein Absturz nicht korrekt gemeldet wird, oder versucht wird, diesen zu vertuschen, um mögliche Bußgelder oder anderweitige Kosten zu vermeiden. Aus denselben Gründen ist es möglich, dass ein Absturz zwar erkannt wird, eine Beseitigung der Drohne allerdings nicht rechtzeitig erfolgt. Da es folglich vorkommen kann, dass eine abgestürzte Drohne unbemerkt auf einem Hausdach verbleibt und es noch nach Tagen zur Entzündung von Lithium-Ionen-Akkus kommen kann, wird die Situation als kaum durchschaubar mit schlechten Reaktionsmöglichkeiten eingeordnet ($q = 2, k = 3, r = 1$).

Es ergibt sich eine **RPZ von 210**. Das Risiko ist erhöht, es sind zusätzliche Schutzmaßnahmen erforderlich.

Tabelle 18: Ausgefülltes Formblatt PFMEA im kleingewerblichen Bereich.

	Prozessschritt	Mögliche Gefährdung	Mögliche Folgen	Mögliche Ursache	B	A	E	RPZ
Inaktiv	Laden (Kleingewerbe)	Physikalisch-chemische Gefährdung	Personenschaden durch Brand und/oder Explosion und Einatmen von Verbrennungsprodukten	Beschädigter Akku, Überspringen von Brand auf andere ladende/gelagerte Akkus	10	4	10	400
		Einatmen von Gefahrstoffen Brennbare Feststoffe		Akku überladen, Fallenlassen des Akkus	10	7	3	210
Aktiv	Flugvorbereitung (Kleingewerbe)	Physikalisch-chemische Gefährdung	Personenschaden durch Brand und/oder Explosion	Beschädigter Akku, Akku überladen	9	2	4	72
	Start (Kleingewerbe)	Bewegte Transport- und Arbeitsmittel	Personenschaden durch Kollision Drohne mit Person	keine Ausweichmöglichkeit, fehlerhafte Sensoren, starke Windböen	4	5	7	140
		Ungeschützt bewegte Maschinenteile	Personenschaden durch Berührung mit Rotoren	fehlender Sicherheitsabstand, (un-)bewusstes Berühren durch Personen, starke	4	5	7	140
		Unkontrolliert bewegte Teile	Personenschaden durch abstürzende Drohne	Ausfall des Akkus, Kollision mit anderen Drohnen oder Gebäuden, Zuneigegehen des Akkus	10	5	10	500
		Unkontrolliert bewegte Teile	Personenschaden durch herabfallende Fracht	Fehlerhafte Frachthalterung, fehlerhaft befestigte Fracht, unbeabsichtigtes Lösen der Halterung	9	3	10	270
		Physikalisch-chemische Gefährdung	Personenschaden durch Brand und/oder Explosion	Beschädigung des Akkus durch Absturz und/oder Kollision mit Drohnen oder Gelände. Brand nach Absturz	10	3	7	210

5.7 Flug

Die Risikobewertung von 5.7 ist in **Tabelle 19** zusammengefasst.

5.7.1 Absturz von Drohne

Für die Bedeutung der Folgen siehe 5.3.3 ($v = 3, d = 3, b = 1$).

Ausgehend von 5.3.3 wird für die allgemeine Flugphase eine geringere Dichte an Drohnen erwartet als am Lieferzentrum. Es kann davon ausgegangen werden, dass in dieser Phase aufgrund der Verteilung der Drohnen über dem Stadtgebiet die in 5.3.3 genannten Grenzwerte eingehalten, wenn nicht sogar weit unterschritten werden (Blom et al. 2021). Die Fehlerwahrscheinlichkeit liegt somit bei sehr selten. Aufgrund der geringen Dichte an Flugbewegungen mit zunehmenden Abstand zum Lieferzentrum und der geringen Zeit, die Menschen durchschnittlich im Freien verbringen (genannt Shelter Factor - der Anteil des Tages, den eine Person durchschnittlich in geschützten Bereichen wie Häusern und Fahrzeugen verbringt), ist der Aufenthalt im Gefahrenbereich selten. PSA wird von der Bevölkerung nicht getragen ($w = 1, g = 1, f = 1$)

Für die Entdeckungsmöglichkeiten siehe 5.3.3 ($E = 10$).

Es ergibt sich eine **RPZ von 200**. Das Risiko ist erhöht, es sind zusätzliche Schutzmaßnahmen erforderlich.

5.7.2 Herabfallende Fracht

Für die Bedeutung der Folgen siehe 5.3.4 ($v=3, d=3, b=0$).

Für die Auftretenswahrscheinlichkeit siehe 5.7.1 ($w = 1, g = 1, f = 1$). Eine Unterscheidung nach Art der Ladungssicherung (innen/außen) wird aufgrund des Erreichens der kleinstmöglichen Bewertungszahlen nicht gemacht.

Für die Entdeckungsmöglichkeiten siehe 5.3.3 ($E = 10$).

Es ergibt sich eine **RPZ von 180**. Das Risiko ist erhöht, es sind zusätzliche Schutzmaßnahmen erforderlich.

5.7.3 Brand und/oder Explosion nach Absturz auf Gebäude]

Für die Bedeutung der Folgen siehe 5.3.5 ($B = 10$).

Für die Fehlerwahrscheinlichkeit siehe 5.3.5 ($A = 3$).

Aufgrund der parallelen Nutzung der U-Spaces durch verschiedene Lieferdienste und Dienstleister wird für die Entdeckungsmöglichkeiten der im Vergleich zu 5.3.5 höhere Wert von 5.6.3 übernommen ($E = 7$).

Es ergibt sich eine **RPZ von 210**. Das Risiko ist erhöht, es sind zusätzliche Schutzmaßnahmen erforderlich.

5.8 Absetzen (urban)

Die Risikobewertung von 5.8 ist in **Tabelle 19** zusammengefasst.

5.8.1 Absturz von Drohne

Für die Bedeutung der Folgen siehe 5.3.3 ($B = 10$).

Für die Auftretenswahrscheinlichkeit siehe 5.7.1 ($A = 2$).

Die Entdeckungsmöglichkeit wird größtenteils wie in 5.3.4 eingeschätzt. Da die Drohne während des Absetzprozesses jedoch längere Zeit in geringer Höhe über dem Absetzpunkt verharret, ist es gut vorstellbar, dass Passant*innen aufgrund von Betriebsgeräuschen auf diese aufmerksam werden. Ein Herabfallen der Fracht kann somit besser bemerkt werden. Eine Reaktion ist unter diesen Bedingungen in Form von Ausweichen oder dem Schützen des Kopfes möglich, erfordert aber schnelle Reflexe ($q = 3, k = 2, r = 1$).

Es ergibt sich eine **RPZ von 140**. Das Risiko ist erhöht, es sind zusätzliche Schutzmaßnahmen erforderlich.

5.8.2 Herabfallende Fracht

Für die Bedeutung der Folgen siehe 5.3.4 ($v=3, d=3, b=0$).

Die Auftretenswahrscheinlichkeit wird größtenteils wie in 5.7.2 eingeschätzt. Da die Drohne zwecks Absetzens der Fracht über öffentlich zugänglichem Raum möglichst nahe an der Lieferadresse schwebt (z. B. über Gehwegen oder Straßen), wird die Gefährdungsdisposition jedoch als mäßig eingeordnet. Aufgrund des Shelter Factors entfällt eine Einordnung als häufig ($w = 1, g = 2, f = 1$).

Für die Entdeckungsmöglichkeiten siehe 5.8.1 ($E = 7$).

Es ergibt sich eine **RPZ von 189**. Das Risiko ist erhöht und es sind zusätzliche Schutzmaßnahmen erforderlich.

5.8.3 Brand und/oder Explosion nach Absturz auf Gebäude

Für die Bedeutung der Folgen siehe 5.3.5 (B = 10).

Im Vergleich zu 5.3.5 ist die Gefährungsdiskposition in dieser Phase gering, da die Drohne zum Absetzen der Fracht nicht direkt über dem Gebäude verbleibt (A = 2).

Für die Entdeckungsmöglichkeiten siehe 5.6.3 (E = 7).

Es ergibt sich eine **RPZ von 140**. Das Risiko ist erhöht, es sind zusätzliche Schutzmaßnahmen erforderlich.

5.9 Absetzen (suburban)

Die Risikobewertung von 5.9 ist in **Tabelle 19** zusammengefasst.

5.9.1 Absturz von Drohne

Der Absturz einer 10 kg schweren Drohne aus 1,49 m Höhe kann nach $E_{pot} = m \cdot g \cdot h$ mit einer maximalen Energie von 146,17 J erfolgen. Dies entspricht AIS Level 4 (138 J) „Severe“ mit der Wahrscheinlichkeit einer tödlichen Verletzung von bis zu 50% (s. **Anhang 4**) (Koh et al. 2018; Schmitt et al. 2015). Die Schwere der Folgen wird als sehr schwere Verletzungen mit schweren Langzeitschäden und guten Rettungschancen eingestuft (v = 3, d = 3, b = 0)

Für die Auftretenswahrscheinlichkeit siehe 5.7.1 (A = 2).

Aufgrund der geringen Flughöhe ist nicht davon auszugehen, dass eine Drohne in diesem Prozessabschnitt übersehen wird. Die Situation selbst ist somit gut durchschaubar und wenig komplex. Aufgrund der geringen Fallhöhe sind Reaktionsmöglichkeiten schlecht (q = 3, k = 1, r = 1).

Es ergibt sich eine **RPZ von 72**. Es sind keine weiteren Maßnahmen erforderlich.

5.9.2 Herabfallende Fracht

Aufgrund der niedrigen Flughöhe von ca. 3 Metern während des Absetzens ergibt sich für das Auftreffen auf den Kopf bei Betrachtung des 5. Perzentils nach DIN 33402 (1,51 m) eine Fallhöhe von 1,49 m. Für ein 2,2 kg schweres Paket ergibt sich nach $E_{pot} = m \cdot g \cdot h$ eine potentielle Energie von 32,16 J. Dies stellt auch die maximal mögliche Energie für einen Aufschlag auf eine Person dar. 32,16 J liegt unter AIS Level 2 (57 J) und fällt somit in AIS Level 1 „Minor“ (s. **Anhang 4**) (Koh et al. 2018; Schmitt et al. 2015). Die Bedeutung der Folgen ist somit gering ohne Langzeitschäden und mit guten Rettungschancen (v = 1, d = 1, b = 0)

Da das Absetzen ein gezieltes Abwerfen der Fracht vorsieht, wird die Fehlerwahrscheinlichkeit als mäßig eingeordnet. Durch die geringe Bevölkerungsdichte in den Randbezirken und die räumliche Trennung des

Absetzortes (Garten bzw. Vorgarten) von der Öffentlichkeit ist der Aufenthalt im Gefahrenbereich selten. PSA wird seitens der Bevölkerung nicht getragen ($w = 2, g = 1, f = 1$).

Für die Entdeckungsmöglichkeiten siehe 5.9.1 ($E = 4$).

Es ergibt sich eine **RPZ von 12**. Es sind keine weiteren Maßnahmen erforderlich.

5.9.3 Brand und/oder Explosion nach Absturz auf Gebäude

Für die Bedeutung der Folgen siehe 5.3.5 ($B = 10$).

Im Vergleich zu 5.3.5 ist die Gefährdungsdisposition in dieser Phase gering, da die Drohne zum Absetzen der Fracht nicht direkt über dem Gebäude verbleibt. Zudem ist die Bebauungsdichte vergleichsweise gering. ($A = 2$).

Für die Entdeckungsmöglichkeiten siehe 5.6.5 ($E = 7$).

Es ergibt sich eine **RPZ von 140**. Das Risiko ist erhöht, es sind zusätzliche Schutzmaßnahmen erforderlich.

Tabelle 19: Ausgefülltes Formblatt PFMEA im allgemeinen Bereich.

Prozessschritt		Mögliche Gefährdung	Mögliche Folgen	Mögliche Ursache	B	A	E	RPZ
Aktiv	Flug	Unkontrolliert bewegte Teile	Personenschaden durch abstürzende Drohne	Ausfall des Akkus, Kollision mit anderen Drohnen oder Gebäuden, Zuneigegehen des Akkus	10	2	10	200
		Unkontrolliert bewegte Teile	Personenschaden durch herabfallende Fracht	Fehlerhafte Frachthalterung, fehlerhaft befestigte Fracht, unbeabsichtigtes Lösen der Halterung	9	2	10	180
		Physikalisch-chemische Gefährdung	Personenschaden durch Brand und/oder Explosion	Beschädigung des Akkus durch Absturz und/oder Kollision mit Drohnen oder Gelände, Brand nach Absturz	10	3	7	210
	Absetzen (urban)	Unkontrolliert bewegte Teile	Personenschaden durch abstürzende Drohne	Ausfall des Akkus, Kollision mit anderen Drohnen oder Gebäuden, Zuneigegehen des Akkus	10	2	7	140
		Unkontrolliert bewegte Teile	Personenschaden durch herabfallende Fracht	Fehlerhafte Frachthalterung, fehlerhaft befestigte Fracht, unbeabsichtigtes Lösen der Halterung	9	3	7	189
		Physikalisch-chemische Gefährdung	Personenschaden durch Brand und/oder Explosion	Beschädigung des Akkus durch Absturz und/oder Kollision mit Drohnen oder Gelände, Brand nach Absturz	10	2	7	140
	Absetzen (suburban)	Unkontrolliert bewegte Teile	Personenschaden durch abstürzende Drohne	Ausfall des Akkus, Kollision mit anderen Drohnen oder Gebäuden, Zuneigegehen des Akkus	9	2	4	72
		Unkontrolliert bewegte Teile	Personenschaden durch herabfallende Fracht	Fehlerhafte Frachthalterung, fehlerhaft befestigte Fracht, unbeabsichtigtes Lösen der Halterung	1	3	4	12
		Physikalisch-chemische Gefährdung	Personenschaden durch Brand und/oder Explosion	Beschädigung des Akkus durch Absturz und/oder Kollision mit Drohnen oder Gelände, Brand nach Absturz	10	2	7	140

6. Ergebnisse und Maßnahmen

Die in 5 bewerteten Gefährdungen werden nach RPZ sortiert (s. **Anhang 5**). Aufgrund von Überschneidungen/Doppelungen werden Maßnahmen ausgehend von den Gefährdungen mit der höchsten RPZ ausgewählt. Bei der Kollision Drohne mit Person und Berührung mit den Rotoren liegt das Risiko nur beim Einsatz im kleingewerblichen Bereich über dem akzeptablen Wert und ist vergleichsweise niedrig eingestuft. Im Bereich des inakzeptablen Restrisikos finden sich „Absturz von Drohne“ und „Herabfallende Fracht“ sowohl beim gewerblichen als auch beim kleingewerblichen Einsatz sowie die Gefährdung durch einen Akkubrand aufgrund von technischen Ursachen. Ausschlaggebend für die hohe Einstufung sind bei allen fünf Einträgen die extrem hohen Werte für die Bedeutung der Folgen und die Erkennungsmöglichkeit. Die Auftrittswahrscheinlichkeit führt bei „Absturz von Drohne“ in beiden Bereichen dazu, dass diese Gefährdung die höchste RPZ aufweisen. Es ist dementsprechend anzunehmen, dass eine Senkung der Werte für die Bedeutung der Folgen und die Entdeckungsmöglichkeit die größte Wirkung auf das Restrisiko haben. Da die Schadensmechanismen der Gefährdungen „Absturz von Drohne“ und „Herabfallende Fracht“ unabhängig von den organisatorischen Unterschieden im gewerblichen und privaten Bereich sind (Verletzungen durch Energie beim Aufprall), ist es jeweils möglich, Maßnahmen festzulegen, die bereichsübergreifend wirken. Selbiges gilt für Maßnahmen, die die Bewertung der Reaktionsmöglichkeit verbessern. Unter dieser Voraussetzung werden die Maßnahmen für den Absturz und herabfallende Fracht anhand der Einträge mit der höchsten RPZ festgelegt. Dasselbe Verfahren wird für die Gefährdung „Brand und/oder Explosion nach Absturz auf Dach“ durchgeführt. Die zu untersuchenden Gefährdungen sind in **Tabelle 20** aufgeführt.

Tabelle 20: Liste der zu untersuchenden Gefährdungen

Prozessschritt	Mögliche Folgen	B	A	E	RPZ
Start (Gewerbe)	Absturz von Drohne	10	7	10	700
Laden (Kleingewerbe)	Brand und/oder Explosion (technische Ursache)	10	4	10	400
Start (Gewerbe)	Herabfallende Fracht	9	4	10	360
Laden (Kleingewerbe)	Brand und/oder Explosion (Fehlbedienung)	10	7	3	210
Start (Kleingewerbe)	Brand und/oder Explosion nach Absturz auf Dach	10	3	7	210
Start (Kleingewerbe)	Kollision Drohne mit Person	4	5	7	140
Start (Kleingewerbe)	Berührung mit Rotoren	4	5	7	140

Zum Festlegen weiterer Maßnahmen wird sich des ebenfalls aus der Arbeitssicherheit entliehenen STOP-Prinzips bedient:

Substitution

Technische Schutzmaßnahmen

Organisatorische Maßnahmen

Persönliche Schutzausrüstung

Dieser Reihenfolge nach werden geeignete Maßnahmen ausgewählt. Hierzu wird zuerst angestrebt, die Gefahrenquelle selbst durch Substitution zu beseitigen. Ist dies nicht möglich, werden technische und organisatorische Schutzmaßnahmen in Betracht gezogen. Ist die Implementierung dieser nicht möglich oder wird das Risiko durch sie nicht ausreichend gesenkt, ist der Einsatz von PSA notwendig (BG BAU 2022). Da die Gefahr hauptsächlich die Bevölkerung betreffen, sind Maßnahmen in Form von PSA nicht praktikabel und werden im Folgenden auch nicht betrachtet.

6.1 Absturz von Drohne

6.1.1 Substitution

Eine Reduktion der Aufprallenergie kann durch eine Reduktion des Basisgewichts der genutzten Drohnen erreicht werden. Ob dies praktikabel ist, ist fraglich, da selbst ein Basisgewicht-Nutzlast-Verhältnis von 1 unter Berücksichtigung einer Nutzlast von 2,2 kg zu einem Basisgewicht führt, das ab einer Fallhöhe von 3,05 m einen AIS-Level von 3 überschreitet (Koh et al 2018).

Eine weitere Substitutionsmöglichkeit ist die Nutzung rein bodengebundener autonomer Lieferdrohnen. Da dies jedoch den Umfang dieser Arbeit überschreitet, wird diese Option nicht weiter betrachtet.

6.1.2 Technische Schutzmaßnahmen

Als technische Maßnahmen zur Reduktion der Aufprallenergie kommen Fallschirme und Airbags in Frage (Clothier et al. 2018; Koh et al. 2018). Beide Systeme reduzieren die an eine betroffene Person übertragene Energie durch Abbremsen des Falls oder Verlängerung des Bremsweges. Die Nutzung von Fallschirmen erhöht zudem die Reaktionsmöglichkeiten von Personen am Boden (Clothier et al. 2018). Der Nachteil beim Einsatz von Fallschirmen ist die zur Entfaltung notwendige Mindesthöhe. Der von AL-Madani et al. (2018) erprobte Prototyp eines Drohnenfallschirms kann ab einer Flughöhe von 20 m eingesetzt werden. Da die Drohnen beim Start schnell auf 50 m Höhe steigt und ein Absetzen aus 20 m oder mehr unter Einsatz einer Winde möglich ist, kann die Zeit, in der der Fallschirm nicht rechtzeitig auslösen kann, auf ein Minimum reduziert werden. Ein redundanter Einsatz beider Maßnahmen hätte zudem den Vorteil, dass beim Versagen einer Maßnahme immer noch eine partielle Reduktion der Aufprallenergie stattfindet. Reicht diese Reduktion aus, die Verletzungen auf AIS-Level 2 zu senken und eine gute Reaktion der betroffenen Personen am Boden zu ermöglichen, ergeben sich folgende Bewertungszahlen: B = 4, E = 9.

Die RPZ beträgt 252. Die Maßnahmen sind nicht ausreichend (**Tab. 21**).

Reduzieren die Maßnahmen die Verletzungen jedoch auf AIS-Level 1 ergeben sich folgende Bewertungszahlen: B = 1, E = 9 (**Tab. 22**).

Tabelle 21: Restrisiko bei Erreichen von AIS-Level 2

Prozessschritt	Mögliche Folgen	B	A	E	RPZ
Start (Gewerbe)	Absturz von Drohne	4	7	9	252
Start (Kleingewerbe)	Absturz von Drohne	4	5	9	180
Flug	Absturz von Drohne	4	2	9	72
Absetzen (urban)	Absturz von Drohne	4	2	6	48

Tabelle 22: Restrisiko bei Erreichen von AIS-Level 1

Prozessschritt	Mögliche Folgen	B	A	E	RPZ
Start (Gewerbe)	Absturz von Drohne	1	7	9	63
Start (Kleingewerbe)	Absturz von Drohne	1	5	9	45
Flug	Absturz von Drohne	1	2	9	18
Absetzen (urban)	Absturz von Drohne	1	2	6	12

Wird AIS-Level 2 erreicht, ist ein niedriges Risiko in der Flug- und Absetzphase erreicht. Ob ein AIS-Level von 1 erreicht werden kann, ist unklar und bedarf genauerer Untersuchungen. Organisatorische Maßnahmen für die Startphase sind notwendig.

6.1.3 Organisatorische Maßnahmen

Die hohe Dichte an Flugbewegungen trägt in der Startphase entscheidend zum Restrisiko bei. Eine Maßnahme zur weiteren Reduktion des Risikos ist, die Anzahl der Personen, die sich in den gefährdeten Bereichen um das Verteilerzentrum befinden, zu minimieren. Eine Zwangsräumung des betroffenen Gebietes, wie es von Blom et al. (2018) vorgeschlagen wird, erscheint nicht praktikabel, da es voraussichtlich auf starke Ablehnung seitens der Bevölkerung stoßen wird. Durch die wachsende Reichweite von Drohnen ist es praktikabel, die Errichtung von Verteilerzentren auf Industriegebiete oder andere Orten mit geringer Bevölkerungsdichte zu beschränken.

Eine weitere Möglichkeit ist, ein Limit für tägliche Flugbewegungen pro Verteilerzentrum zu setzen. Die Abdeckung des Lieferbereiches erfolgt in diesem Fall über mehrere Verteilerzentren, die über das Stadtgebiet verteilt sind, was die extreme Ballung von Flugbewegungen an einem Ort reduziert.

6.2 Brand und/oder Explosion (technische Ursache)

6.2.1 Substitution

Die größte Auswirkung auf das Risiko kann durch eine Substitution der genutzten Energiequelle erreicht werden. Da die Gefährdung durch die Brennbarkeit und mechanische Anfälligkeit von Lithium-Ionen-Akkus entsteht, ist ein Ersetzen dieser durch weniger bis, im besten Falle, nicht brennbarer Akkuarten anzustreben. Möglich wäre hier der Einsatz von Polymer-Polymer-Feststoffakkus (Cui et al. 2020). Die Implementierung eines schwer brennbaren oder selbstlöschenden Energieträgers hat das Potential, das Risiko dieser Gefährdung stark zu senken, indem die Ausbreitung eines Brandes verhindert wird. Dies kann das Ausmaß der Verletzungen auf leichte Verbrennungen und das Einatmen von Brandgasen reduzieren (s.

Tab. 23). Wann und ob diese Technologie Marktreife erlangt, ist noch nicht abzusehen (Backhaus 2020). Deshalb werden zusätzlich technische Maßnahmen betrachtet.

6.2.2 Technische Schutzmaßnahmen

Die Ausbreitung eines Akkubrandes kann durch die Nutzung von zugelassenen Ladeschränken verhindert werden. Wird das Szenario eines Gebäudebrandes verhindert, reduziert sich auch die Schwere der Folgen, und die Voraussetzung für eine Schadensbegrenzung ist gut. Werden Ladeschränke eingesetzt, sinkt die Schwere der Folgen auf $B = 2$ ($v = 2, d = 1, b = 0$).

Auch denkbar sind in den Drohnen implementierte Diagnosesysteme, die einen Betrieb mit beschädigtem oder nicht regelmäßig geprüfem Akku ausschließen. Somit kann indirekt das Einhalten von Arbeitsschutzrichtlinien sichergestellt werden. Die Einführung dieser Maßnahme reduziert die Fehlerwahrscheinlichkeit und damit die Auftretenswahrscheinlichkeit auf $A = 3$. Ist die Nutzung von Ladeschränken jedoch nicht sichergestellt, reicht die Senkung der Auftretenswahrscheinlichkeit nicht aus, um das Risiko auf einen akzeptablen Wert zu senken. Es sind organisatorische Maßnahmen notwendig.

6.2.3 Organisatorische Maßnahmen

Um die Umsetzung der technischen Maßnahmen sicherzustellen, kann sich des U-Space-Systems bedient werden. Da die Nutzung der U-Spaces an die Registrierung von Drohnen und Betreibern gebunden ist, ist es möglich, gezielt Betriebe mit angemeldeten Lieferdrohnen auf die Umsetzung der technischen Maßnahmen, Unterweisung der Mitarbeitenden, sowie grundlegender Arbeits- und Brandschutzvorschriften zu kontrollieren. **Tabelle 24** zeigt mögliche Bewertungszahlen bei Nutzung von Ladeschränken und weiteren Brandschutzmaßnahmen.

Tabelle 23: Restrisiko bei Erreichen von AIS-Level 2

Mögliche Folgen	B	A	E	RPZ
Brand und/oder Explosion (technische Ursache)	2	4	10	80

Tabelle 24: Risikobewertung bei Einhaltung von Maßnahmen.

Mögliche Folgen	B	A	E	RPZ
Brand und/oder Explosion (technische Ursache)	2	3	6	36

6.3 Herabfallende Fracht

6.3.1 Substitution

Eine praktikable Substitutionsmöglichkeit wurde nicht gefunden. Ein Reduzieren des Gewichtes der Nutzlast ist mit großer Wahrscheinlichkeit nicht praktikabel, da es die Wirtschaftlichkeit des Prozesses reduziert. Es ist auch fraglich, inwiefern eine Reduktion des Gewichtes ein sicheres AIS-Level erreichen kann, wenn der Transport über 50 m Höhe stattfindet. Stattdessen wird nach technischen Maßnahmen gesucht.

6.3.2 Technische Schutzmaßnahmen

Die Nutzung von Fallschirmen und Airbags kann wie in 6.1.2 die Aufprallenergie reduzieren und somit ein sicheres AIS-Level erreichen, jedoch ist auch hier fraglich, inwiefern es wirtschaftlich ist, jedes Stück Nutzlast mit diesen Maßnahmen auszustatten.

Eine Möglichkeit wäre, das Volumen des transportierten Paketes in Abhängigkeit zur Masse so weit zu vergrößern, dass der so erhöhte Luftwiderstand eine ausreichende Reduktion der Fallgeschwindigkeit erreicht. Zusätzlich kann der so frei gewordene Raum durch schockabsorbierende Materialien aufgefüllt werden. Wird der AIS-Level durch diese Maßnahme auf 2 verringert ($B = 4$), so sinkt das Risiko für das Absetzen im urbanen Bereich und den Flug auf ein akzeptables Niveau. Für den Start im Kleingewerbe bleibt nur ein kleines Restrisiko. Das Risiko des Starts im Gewerbe bleibt weiterhin im inakzeptablen Bereich (**Tab. 25**); für diese Phase sind organisatorische Maßnahmen notwendig.

Tabelle 25: Restrisiko bei Erreichen von AIS-Level 2

Prozessschritt	Mögliche Folgen	B	A	E	RPZ
Start (Gewerbe)	Herabfallende Fracht	4	4	10	160
Start (Kleingewerbe)	Herabfallende Fracht	4	3	10	120
Absetzen (urban)	Herabfallende Fracht	4	3	7	84
Flug	Herabfallende Fracht	4	2	10	80

6.3.3 Organisatorische Maßnahmen

Um das Restrisiko beim Start im gewerblichen Bereich weiter zu reduzieren, können dieselben organisatorischen Maßnahmen wie in 6.1.3 angewandt werden. Wird die Gefährdungsdiskposition auf einen zeitweisen Aufenthalt im Gefahrenbereich reduziert ($g = 2$), ergibt sich eine RPZ von 120 - geringes Restrisiko. Wird die Disposition auf einen sehr seltenen Aufenthalt reduziert ($g = 1$), ergibt sich eine RPZ von 80 – akzeptables Restrisiko.

6.4 Brand und/oder Explosion (Fehlbedienung)

6.4.1 Substitution

Für Möglichkeiten der Substitution siehe 6.2.1. Durch den Einsatz von schwer brennbaren Akkus kann die RPZ auf einen Wert von 42 gesenkt werden – akzeptables Restrisiko.

6.4.2 Technische Schutzmaßnahmen

Die in 6.2.2 erwähnten Diagnosesysteme können dabei helfen, einen beschädigten Akku rechtzeitig zu erkennen und eine weitere Nutzung zu verhindern. Zur Minderung der Folgen und Verhinderung der

Ausbreitung durch einen laufenden Thermal Runaway können für Lithium-Ionen-Akkus geeignete Explosions- und Feuerschutztaschen verwendet werden.

Die Nutzung von Ladeschränken kann zudem das Risiko durch eine verzögerte Entzündung, auch nachts, reduzieren.

6.4.3 Organisatorische Maßnahmen

Für organisatorische Maßnahmen siehe 6.2.3.

6.5 Brand und/oder Explosion nach Absturz auf Dach

6.5.1 Substitution

Durch die Implementierung von Feststoffakkus lässt sich die RPZ auf 42 senken – akzeptables Restrisiko.

6.5.2 Technische Schutzmaßnahmen

Durch die in 6.1.2 aufgeführten Systeme (Fallschirm, Airbag) kann die Aufprallenergie einer abstürzenden Drohne so weit reduziert werden, dass eine Beschädigung des Akkus und ein darauffolgender Thermal Runaway extrem unwahrscheinlich werden. Wird eine Auftretenswahrscheinlichkeit von $A = 2$ erreicht, sinkt die RPZ auf 140. Weitere Schutzmaßnahmen sind erforderlich.

Um die Entdeckungswahrscheinlichkeit zu verbessern, ist der Einsatz von durch Trägheitssensoren ausgelösten Totmannmeldern möglich. Im Falle eines Absturzes können diese durch einen Warnton auf die havarierte Drohne aufmerksam machen, was zu einer Verbesserung der Reaktionsmöglichkeiten und Erhöhung der Übersichtlichkeit der Situation führt ($k = 1, r = 0$) (**Tab. 26**). Organisatorische Maßnahmen sind nicht notwendig.

Tab. 26: Restrisiko bei Nutzung von Fallschirm, Airbag und Totmannmelder.

Mögliche Folgen	B	A	E	RPZ
Brand und/oder Explosion nach Absturz auf Dach	10	2	3	60

6.6 Kollision Drohne mit Person

6.6.1 Substitution

Eine geeignete Substitution kann nicht gefunden werden. Technische Schutzmaßnahmen sind erforderlich.

6.6.2 Technische Schutzmaßnahmen

Geeignete technische Schutzmaßnahmen können nicht gefunden werden. Organisatorische Schutzmaßnahmen sind erforderlich.

6.6.3 Organisatorische Maßnahmen

Zur Reduktion des Restrisikos wird eine Reduktion der Auftretenswahrscheinlichkeit und eine Verbesserung der Entdeckungsmöglichkeit angestrebt. Beides kann durch die Deklaration von dedizierten Drohnen-Start- und Landeplätzen erreicht werden. Diese können auf Parkplätzen oder in Parks gelegen sein und über räumliche Abgrenzungen in Form von Zäunen oder Ähnlichem verfügen. Durch die Nutzung von dedizierten und abgegrenzten Bereichen wird das Risiko für Dritte verringert, da diese nicht mehr versehentlich/unbewusst in den Gefahrenbereich geraten können. Die räumliche Abgrenzung kann in der Höhe so ausgelegt sein, dass ein horizontales Ausbrechen der Drohne in Kopfhöhe nicht möglich ist. Die Nutzung dieser Bereiche kann durch die Einbindung in das U-Space-System sichergestellt werden, indem nur Starts von diesen Bereichen aus freigegeben werden. Die Schadensdisposition wird so auf seltenen Aufenthalt im Gefahrenbereich verringert und die Situation gut durchschaubar ($g = 1, k = 1$). Es ergibt sich somit eine RPZ von 48 – akzeptables Restrisiko.

6.7.1 Substitution

Zur Substitution können propellerlose Drohnen genutzt werden (Xu et al. 2023). Inwiefern diese Technologie allerdings bis zur Einführung der ersten Lieferdrohnen Marktreife erlangt, ist nicht absehbar. Ferner gibt es Überlegungen zum Einsatz ballongestützter Drohnen-Systeme. Auch hier ist fraglich, inwiefern diese für die kommerzielle Nutzung praktikabel sind. Tests zur Anfälligkeit durch Wind sind zudem noch nicht durchgeführt worden (Gustilo et al. 2023). Es wird dementsprechend nach technischen Maßnahmen gesucht.

6.7.2 Technische Schutzmaßnahmen

Als technische Maßnahme kommt der Einsatz eines Propellerschutzes (auch: Propellerkäfig) in Frage (**Abb. 8**). Durch diesen wird die Wahrscheinlichkeit des Kontaktes von Personen mit den Propellern stark reduziert. Sinkt die Auftretenswahrscheinlichkeit auf $A = 3$ ($w = 1, g = 2, f = 1$), so ergibt sich eine RPZ von 84 – akzeptables Restrisiko.

Zusätzlich stellt der Einsatz von verformbaren Propellern eine Möglichkeit dar, die Schwere der Auswirkungen zu reduzieren (Nguyen et al. 2020). Diese befinden sich jedoch noch in der Erprobung.

Tabelle 27: DJI Mavic mit Propellerschutz (Drohnen 2024).



6.7.3 Organisatorische Maßnahmen

Organisatorische Maßnahmen sind nach 6.7.2 nicht notwendig, jedoch haben die in 6.3.3 aufgeführten Maßnahmen auch eine positive Auswirkung auf das Risiko dieser Gefährdung. Die Auswirkungen auf die RPZ durch Implementierung eines Rotorschutzes und dedizierter Startplätze sind in **Tabelle 28** und **29** abzulesen.

Tabelle 28: Restrisiko durch Nutzung von dedizierten Startplätzen.

Mögliche Folgen	B	A	E	RPZ
Kollision Drohne mit Person	4	3	4	48

Tabelle 29: Restrisiko durch Nutzung von dedizierten Startplätzen und Propellerschutz.

Mögliche Folgen	B	A	E	RPZ
Berührung mit Rotoren	4	2	4	32

7. Diskussion

In dieser Arbeit wurde anhand der PFMEA-Methode ermittelt, welche Gefährdungen in einer groß angelegten Nutzung von kommerziellen und privaten Drohnen im urbanen Bereich auftreten.

Kapitel 2 hat aufgezeigt, dass eine Nutzung von kommerziellen Drohnen im europäischen Luftraum sehr wahrscheinlich ist, und es wurde anhand des Beispiels von Lieferdrohnen eine voraussichtliche Mindestanzahl an Flugbewegungen ermittelt. 2,8 Mrd. Flugbewegungen pro Jahr allein für Lieferdrohnen zeigen sehr gut, dass das Thema „kommerzielle Drohnen“ sicherheitstechnischer Untersuchungen bedarf. Dies wird dadurch bestätigt, dass seitens der Europäischen Union bereits Konzepte für den Einsatz von kommerziellen Drohnen in europäischen Großstädten erstellt wurden.

In Kapitel 3 wurde eine Auflistung von möglichen Gefährdungen beim Einsatz von kommerziellen Drohnen in Großstädten erstellt. Diese decken sich im mechanischen Bereich mit den in der DGUV „Sicherer Umgang mit Multikoptern (Drohnen)“ aufgeführten Gefährdungen. Durch die Betrachtung nicht nur des Einsatzes im urbanen öffentlichen Raum, sondern auch des Ladeprozesses und der Vorbereitung wurde festgestellt, dass die Brandgefahr durch die momentan weit verbreiteten Lithium-Ionen-Akkus ebenfalls beachtet werden muss. Hierzu waren zum Zeitpunkt des Schreibens keine Studien verfügbar.

Die in Kapitel 4 erarbeitete Prozessstruktur deckt sich mit dem von Amazon während des Schreibens dieser Arbeit veröffentlichten Artikel über die Struktur des Lieferprozesses von Prime Air (Amazon Staff 2024a) und kann somit als akkurat angenommen werden.

In Kapitel 5 wurde festgestellt, dass auch unter Berücksichtigung bestehender und geplanter Sicherheitsmaßnahmen, wie dem Einsatz von U-Spaces, noch inakzeptable Risiken bestehen. Dies deckt sich mit der Einschätzung seitens Gutiérrez Castro und Ventas García (2021), laut denen die schiere Menge an genutzten Drohnen die Schadensbegrenzungsmöglichkeiten des aktuellen U-Space-Konzeptes in Zukunft weit übersteigen wird. Aufgrund der erwarteten Mengen von Drohnen muss mit Ausfällen, Kollisionen und Fehlbedienung gerechnet werden. Die Bewertung der Auftrittswahrscheinlichkeiten von Abstürzen und Brandgefährdungen hat auch gezeigt, dass die Datenlage hinsichtlich der Zuverlässigkeit der derzeit genutzten Drohnen und Akkus noch sehr lückenhaft ist und es, wie Gutiérrez Castro und Ventas García (2021) anmerken, weiterer Untersuchungen und groß angelegter Simulationen bedarf. Aus der Risikobewertung kann zudem gefolgert werden, dass Verbesserungen von Sensoren, Steuerung und Systemfehlerrate allein nicht ausreichen, um einen sicheren Betrieb von kommerziellen und privaten Drohnen zukunftsorientiert zu gewährleisten. Besonders Abstürze von Drohnen haben aufgrund der freigesetzten Energie beim Aufprall extreme Folgen für betroffene Personen. Zudem zeigte sich, dass die Risiken durch die Nutzung von Lithium-Ionen-Akkus nicht vernachlässigt werden dürfen.

Die in Kapitel 6 festgelegten Maßnahmen zeigen, dass das Risiko durch Absturz durch den Einsatz von Fallschirmen und Airbags sehr gut auf ein akzeptables Maß reduziert werden kann. Zur genaueren Bewertung des Einsatzes zusätzlicher Polsterung in beförderter Fracht müssen weitere Untersuchungen getätigt werden, da die Zusammenhänge zwischen Masse, Geometrie, Fallgeschwindigkeit und der daraus resultierenden Aufprallenergie je nach transportierter Fracht variieren. Es ist durchaus möglich, dass diese mit vergleichsweise geringem Aufwand auf ein akzeptables Maß reduziert werden kann. Diese Lösung deckt sich zu einem gewissen Maße mit den von Amazon eingesetzten „Trampolinen“, mit denen der Inhalt der transportierten Pakete beim Abwurf der Fracht am Zielort geschützt werden soll (Amazon Staff 2024a). Im Hinblick auf die Gefährdungen durch Lithium-Ionen-Akkus hängen die Maßnahmen stark von der zukünftigen Entwicklung der genutzten Technologie ab. Sollten Feststoffakkus innerhalb der nächsten zehn Jahre marktreif werden, sinkt das Risiko durch Akkubrände jeglicher Art auf einen akzeptablen Wert. Glaubt man der Autoindustrie, ist eine Marktreife der Technologie in den nächsten Jahren sehr wahrscheinlich. Für den Fall, dass brauchbare Feststoffakkus nicht rechtzeitig im notwendigen Maße verfügbar sind, hat sich gezeigt, dass die Kombination aus Luftraumüberwachung seitens der U-Space-Dienstleister und an den Drohnen angebrachten Totmannmeldern ausreichen sollte, um das Risiko auf ein akzeptables Maß zu senken. Da diese Maßnahme jedoch auch die Erkennungsmöglichkeiten und Reaktionsmöglichkeiten in anderen Unfallszenarien wie dem Absturz einer Drohne verbessert, wird vorgeschlagen, sie unabhängig von der Verfügbarkeit von Feststoffakkus festzulegen. Beispielsweise das Risiko durch Brände am Boden im Rahmen der für den Betrieb der Drohnen notwendigen Logistik kann durch den Einsatz von Feststoffakkus reduziert werden. Da die Bewertung des Risikos jedoch hauptsächlich aufgrund der Annahme eines Nichteinhaltens von Brand- und Arbeitsschutzmaßnahmen zustande kommt, wird hier angeraten, dass auch bei Vorhandensein von Feststoffakkus organisatorische Maßnahmen zur Sicherstellung der Umsetzung der vorgeschriebenen Maßnahmen getroffen werden. Ferner wurde aufgezeigt, dass es notwendig ist, dedizierte Drohnenstart- und Landeplätze für die kleingewerblich sowie private Nutzung zur Verfügung zu stellen, um eine Gefährdung Dritter durch die Drohnen auszuschließen. Folgende Themen bedürfen zudem weiterer Untersuchungen:

- Gefährdungen und Risiken für Sachwerte. Hierfür wurden in den **Anhängen 7** und **8** bereits ein Fehlerbaum und ein PFMEA Formblatt erstellt.
- Die Auswirkungen eines Absturzes auf einer befahrenen Straße in Form von direkter Gefährdung aber auch Folgegefährdungen durch den Eingriff in den Straßenverkehr.
- Auswirkungen von Kollisionen, Vogelschlag und Wettereinflüssen auf das Bodenrisiko durch Abstürze.

Abschließend werden je zwei Upgrade-Pakete zur Minimierung der Risiken im gewerblichen und privaten (kleingewerblichen) Bereich vorgeschlagen, **Tabelle 30** und **32** zeigen die Substitutionsmaßnahmen und

Technischen Maßnahmen unter der Annahme, dass Feststoffakkus innerhalb der nächsten zehn Jahre Marktreife erlangen. **Tabelle 31** und **33** zeigen die Substitutionsmaßnahmen ohne einer Marktreife von Feststoffakkus.

Tabelle 30: Upgrade-Paket für gewerbliche Drohnen unter Annahme der Marktreife von Feststoffakkus.

Gewerblich	
Substitution	Feststoffakku
Technische Maßnahmen	Fallschirm
	Airbag
	Totmannmelder

Tabelle 31: Upgrade-Paket für gewerbliche Drohnen ohne Marktreife von Feststoffakkus.

Gewerblich	
Technische Maßnahmen	Fallschirm
	Airbag
	Totmannmelder

Tabelle 32: Upgrade-Paket für private Drohnen unter Annahme der Marktreife von Feststoffakkus.

Privat	
Substitution	Feststoffakku
Technische Maßnahmen	Fallschirm
	Totmannmelder

Tabelle 323: Upgrade-Paket für private Drohnen ohne Marktreife von Feststoffakkus.

Privat	
Technische Maßnahmen	Fallschirm
	Totmannmelder

Zusammenfassung

Drohnen erfüllen viele Anwendungszwecke in kommerziellen sowie privaten Bereichen. Da viele dieser Anwendungsbereiche ihr Einsatzgebiet im städtischen Raum haben, ist in Zukunft mit einer stark anwachsenden Zahl von Drohnen im Luftraum europäischer Großstädte zu rechnen. Mit einer wachsenden Anzahl von Luftfahrzeugen steigt jedoch auch das Risiko für die Bevölkerung am Boden. Das Ziel dieser Arbeit ist, das Ausmaß dieses Risikos durch kommerzielle und private Drohnenutzung am Beispiel der Stadt Hamburg für das Jahr 2035 zu ermitteln. Um dies zu erreichen, wurde zunächst der zukünftige Bedarf an kommerziell und privat genutzten Drohnen bestimmt und ausgehend davon durch eine Prozess-FMEA eine Bewertung der auftretenden Risiken durchgeführt. Die Durchführung der Prozess-FMEA fokussierte sich dabei auf die Gefährdungen und Risiken durch kommerziell genutzte Lieferdrohnen, da sich herausstellte, dass diese voraussichtlich den Großteil der im städtischen Bereich genutzten Drohnen ausmachen werden. Es wurden zwei Szenarien betrachtet. Der koordinierte Einsatz von mehreren Tausend Drohnen durch eine kleine Anzahl von großen Lieferunternehmen wie Amazon und der Einsatz vergleichsweise weniger Drohnen durch mehrere kleine Betriebe.

Die Durchführung der Prozess-FMEA erwies sich als teilweise schwierig, da die Datenlage zum Bodenrisiko durch Lieferdrohnen im städtischen Bereich sehr lückenhaft ist und sich nur auf das Risiko von Abstürzen durch Systemausfälle beschränkt. Es mussten somit Annahmen für die Auftretenswahrscheinlichkeiten dieser Ereignisse getroffen werden.

Die Prozess-FMEA ergab, dass, auch unter Annahme der Umsetzung zurzeit geplanter Maßnahmen zur Flugsicherung im städtischen Luftraum, signifikante Risiken für die Bevölkerung durch abstürzende Drohnen, herabfallende Fracht und leicht entflammable Akkus bestehen. Die Arbeit schließt damit ab, dass mögliche Maßnahmen zur Risikominderung ermittelt und bewertet werden. Zusätzlich wurden aus diesen Maßnahmen Konzepte für mögliche Upgrade-Pakete für private und kommerziell genutzte Drohnen vorgeschlagen.

Zukünftige Arbeiten sollten darauf ausgelegt werden, eine belastbare Datenlage anhand von Simulationen und groß angelegten Pilotprojekten zu schaffen.

Literaturverzeichnis

1. AL-Madani, B.; Svirskis, M.; Narvydas, G.; Maskeliūnas, R. und Damaševilius, R., 2018. Design of Fully Automatic Drone Parachute System with Temperature Compensation Mechanism for Civilian and Military Applications. *Journal of Advanced Transportation*, Volume 2018.
2. Amazon Autor, 2018. *Prime Air* [online]. Amazon. Online verfügbar unter <https://www.aboutamazon.de/news/innovationen/prime-air>. [Zugriff am 14.05.2024].
3. Amazon Staff, 2022a. *Amazon Prime Air prepares for drone deliveries* [online]. Amazon. Online verfügbar unter <https://www.aboutamazon.com/news/transportation/amazon-prime-air-prepares-for-drone-deliveries>. [Zugriff am 14.05.2024].
4. Amazon Staff, 2022b. *Amazon reveals the new design for Prime Air's delivery drone—here's your first look* [online]. Amazon. Online verfügbar unter <https://www.aboutamazon.com/news/transportation/amazon-prime-air-delivery-drone-reveal-photos>. [Zugriff am 14.05.2024].
5. Amazon Staff, 2023a. *11 photos of Amazon's new Prime Air drone that can fly in light rain and deliver packages up to 5 pounds in under an hour* [online]. Amazon. Online verfügbar unter <https://www.aboutamazon.com/news/transportation/amazon-prime-air-drone-delivery-mk30-photos>. [Zugriff am 14.05.2024].
6. Amazon Staff, 2023b. *Amazon is launching ultra-fast drone deliveries in Italy, the UK, and a third location in the U.S.* [online]. Amazon. Online verfügbar unter <https://www.aboutamazon.com/news/operations/amazon-prime-air-drone-delivery-updates>. [Zugriff 14.05.2024].
7. Amazon Staff, 2023c. *Get medications faster with drone delivery from Amazon Pharmacy* [online]. Amazon. Online verfügbar unter <https://www.aboutamazon.com/news/retail/amazon-pharmacy-amazon-air-prescription-drone-delivery>. [Zugriff am 14.05.2024].

8. Amazon Staff, 2024a. *Watch a drone delivery take flight in 18 photos from Amazon's drone facility in Texas* [online]. Amazon. Online verfügbar unter <https://www.aboutamazon.com/news/transportation/amazon-drone-delivery-photos>. [Zugriff am 14.05.2024].

9. Amazon Staff, 2024b. *Amazon drone delivery is coming to Arizona* [online]. Amazon. Online verfügbar unter <https://www.aboutamazon.com/news/transportation/amazon-drone-delivery-arizona>. [Zugriff am 14.05.2024].

10. Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse (BG ETEM), 2022. Arbeitshilfe – Gefährdungsbeurteilung.

11. Blom, H. A. P.; Jiang, C.; Grimme, W. B. A.; Mitici, M. und Cheung Y. S., 202. Third party risk modelling of Unmanned Aircraft System operations, with application to parcel delivery service. *Reliability Engineering and System Safety*, 214. Pp. 107788

12. Boon, M. A.; Drijfhout, A. P. und Tesfamichael, S., 2017. COMPARISON OF A FIXED-WING AND MULTI-ROTOR UAV FOR ENVIRONMENTAL MAPPING APPLICATIONS: A CASE STUDY. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W6. 47-54.

13. Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 2022a. *Bereit zum Abheben: Konzept für Drohnenverkehr vorgelegt* [online]. Bundesministerium für Digitales und Verkehr. Online verfügbar unter <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2022/099-wissing-konzept-drohnenverkehr.html>. [Zugriff am 15.12.2022].

14. Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 2022b. *Konzept Einrichtung von U-Spaces in Deutschland*. [pdf]. Bundesministerium für Digitales und Verkehr. Online verfügbar unter <https://www.dipul.de/homepage/de/aktuelle-meldungen/u-spacekonzept-deutschland/konzept-einrichtung-von-u-spaces-in-deutschland.pdf?cid=18w>. [Zugriff am 14.04.2024].

15. Bundesnetzagentur, 2023. *Paket Sendungsmengen* [online]. Bundesnetzagentur. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Datenportal/3_Post/_svg_Post/Post_Paket/P_Paketmarkt_Mengen/P_Paketmarkt_Mengen.html?nn=695916. [Zugriff 14.05.2024].

16. Chen, J.; Zhou, Y.; Lv, Q.; Deveerasetty, K. K. und Dike, H. U., 2018. A Review of Autonomous Obstacle Avoidance Technology for Multi-rotor UAVs. *Proceeding of the IEEE International Conference on Information and Automation*. Wuyi Mountain: IEEE. pp 244-248.

17. Citypopulation, 2024a. *Hamburg. Die Einwohnerentwicklung von Hamburg* [online]. Thomas Brinkhoff. Online verfügbar unter https://citypopulation.de/de/germany/hamburg/02000__hamburg/. [Zugriff am 14.05.2024].

18. Citypopulation, 2024b. *Delft. Die Einwohnerentwicklung von Delft sowie verwandte Informationen und Dienste* [online]. Thomas Brinkhoff. Online verfügbar unter https://citypopulation.de/de/netherlands/admin/zuid_holland/0503__delft/. [Zugriff am 14.05.2024].

19. Clothier, R.A.; Williams, B.P. und Hayhurst, K.J., 2018. Modelling the risks remotely piloted aircraft pose to people on the ground. *Safety Science*, 101. pp. 33-47.

20. Cohn, P.; Green, A.; Langstaff, M. und Roller, M., 2017. *Commercial drones are here. The future of unmanned aerial systems*. [pdf]. McKinsey & Company. Online verfügbar unter <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Capital%20Projects%20and%20Infrastructure/Our%20Insights/Commercial%20drones%20are%20here%20The%20future%20of%20unmanned%20aerial%20systems/Commercial-drones-are-here-The-future-of-unmanned-aerial-systems.pdf>. [Zugriff am 14.05.2024].

21. Cui, Y.; Wan, J.; Ye, Y.; Liu, K.; Chou, L.-Y., 2020. A Fireproof, Lightweight, Polymer-Polymer Solid-State Electrolyte for Safe Lithium Batteries. *Nano letters*, 20 (3), pp. 1686–1692.

22. Dalamagkidis, Konstantinos; Valavanis, K. P.; Piegl, L. A., 2008. *Evaluating the risk of unmanned aircraft ground impacts*. In: 2008 16th Mediterranean Conference on Control and Automation. Automation (MED 2008). Ajaccio: IEEE. pp. 709–716.

23. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), 2020a. DGUV Information 208-058 „Sicherer Umgang mit Multikoptern (Drohnen)“.

24. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), 2020b. DGUV Information 205-001 „Betrieblicher Brandschutz in der Praxis“.

25. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) 2024. DGUV Information 205-041 „Brandschutz beim Umgang mit Lithium-Ionen-Batterien“.
26. DESTATIS, 2024. *Bevölkerungsstand* [online]. Statistisches Bundesamt. Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsstand/_inhalt.html#:~:text=Bev%C3%B6lkerung%20im%203.&text=September%202023%20lebten%2084%20607,\(%2B%20336%20000%20Personen\)%20gewachsen](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsstand/_inhalt.html#:~:text=Bev%C3%B6lkerung%20im%203.&text=September%202023%20lebten%2084%20607,(%2B%20336%20000%20Personen)%20gewachsen) [Zugriff am 14.05.2024].
27. DJI 2024. *Matrice 350 RTK Worry-Free Basic Combo* [online]. DJI. Online verfügbar unter <https://store.dji.com/de/product/m350-rtk-and-dji-care-enterprise-basic?vid=141411>. [Zugriff am 14.05.2024].
28. Doole, M.; Ellerbroek, J. und Hoekstra, J., 2020. Estimation of traffic density from drone-based delivery in very low level urban airspace. *Journal of Air Transport Management*, 88, pp. 101862.
29. Drohnen.de, 2024. *DJI Mavic Pro Zubehör: Propellerschutz / Prop Guard* [online]. Online verfügbar unter <https://www.drohnen.de/14746/dji-mavic-pro-zubehoer-propellerschutz-prop-guard/>. [Zugriff am 14.05.2024].
30. DURCHFÜHRUNGSVERORDNUNG (EU) 2019/ 947 DER KOMMISSION - vom 24. Mai 2019 - über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge.
31. Eskandaripour, H. und Boldsai Khan, E. 2023. Last-Mile Drone Delivery: Past, Present, and Future. *Drones*, 7, 77.
32. *Federal Aviation Administration (FAA), 2022. Airworthiness Criteria: Special Class Airworthiness Criteria for the Amazon Logistics, Inc. MK27-2 Unmanned Aircraft.*
33. Gustilo, R. C.; Coronel, P. R. S.; Duenas, R. A. S.; Hartigan-Go, K. A. B. und Gabriel E. M. B., 2023. E-BALLOON: A PROPELLERLESS FLIGHT CONTROL SYSTEM. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 58 (1).

34. Gutierrez Castro, D. und Enrique Ventas, G. 2021. *Safety Challenges for Integrating U-Space in Urban Environments*. In: 2021 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Athens: IEEE. pp. 1258–1267.
35. BWFG Hamburg, 2023. *Demografiebericht 2023 - Die Stadt im Wandel*. [pdf]. Behörde für Wissenschaft, Forschung, Gleichstellung und Bezirke. Online verfügbar unter <https://www.hamburg.de/contentblob/18487780/5ee61926a50cb5b4eaf825d558e45562/data/demografischer-bericht-hamburg-2023.pdf>. [Zugriff am 14.05.2024].
36. Hänseberger, S., 2017. Wenn Drohnen vom Himmel fallen – luftrechtliche Haftungsfragen. Personen- und Sachschäden Dritter durch selbständig fliegende zivile Kleindrohnen. *AJP Aktuelle Juristische Praxis* (2), p. 163–170.
37. Helmholtz-Zentrum, 2023. *Norddeutschland: Regentage (1986-2015)* [online]. Helmholtz-Zentrum. Online verfügbar unter <https://www.norddeutscher-klimamonitor.de/klima/1986-2015/jahr/regentage/norddeutschland/dwd-regnie.html>. [Zugriff am 14.05.2024].
38. JARUS, 2017. *Guidelines on specific operation risk assessment (SORA)*. Joint Authorities Regulation Unmanned Systems.
39. Koh, C. H.; Low, K. H.; Li, L.; Zhao, Y.; Deng, C.; Tan, S. K., 2018. Weight threshold estimation of falling UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) based on impact energy. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 93. S. 228–255.
40. Landmesser, D., 2021. *Paketdrohnen bleiben ein ferner Traum. DHL stellt Entwicklung ein* [online]. Tagesschau. Online verfügbar unter <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/unternehmen/post-dhl-paketkopter-einstellung-101.html>, zuletzt aktualisiert am 09.08.2021. [Zugriff am 14.05.2024].
41. Meinel, G., 2013. Flächennutzung und bauliche Dichte – Messergebnisse des IÖR-Monitors. *16th Leibniz Conference Stadtökologie - Klimawandel und Urbanisierung*. Berlin: Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung.
42. Melnyk, R; Schrage, D.; Volovoi, V. und Jimenez, H., 2014. A third-party casualty risk model for unmanned aircraft system operations. *Reliability Engineering and System Safety*, 124. pp. 105-116.

43. Monsef, R., 2023. *IW-Kurzbericht, 69/2023 Arbeitskräftefluktuation – Corona-Tief überwunden, neue Rezessionssorgen spürbar*. [pdf]. Institut der deutschen Wirtschaft Online verfügbar unter https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Kurzberichte/PDF/2023/IW-Kurzbericht_2023-Fluktuation.pdf. [Zugriff am 14.05.2024].
44. Nguyen, D. Q.; Loianno, G. und Ho V. A., 2020. Towards Design of a Deformable Propeller for Drone Safety. 2020 3rd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft). New Haven: IEEE. p. 464–469.
45. Oh, S. und Yoon, Y. 2024. Urban drone operations: A data-centric and comprehensive assessment of urban airspace with a Pareto-based approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 182. pp. 104034.
46. Rosenbalm, M., 2024. *UMFANGREICHE DATENERFASSUNGSPROJEKTE? UNSER DROHNEN-LIDAR-VERMESSUNGSEQUIPMENT MACHT SIE ALLE ZU LEICHTER ARBEIT: mdLiDAR3000DL* [online]. microdrones. Online verfügbar unter <https://www.microdrones.com/de/integrated-systems/microdrones-experten-drohnen-serie/mdlidar3000dl/>. [Zugriff am 14.05.2024].
47. Schmitt, K.-U.; Niederer, P. F.; Cronin, D. S.; Morrison III, B.; Muser, M. H. und Walz, F., 2019. *Trauma Biomechanics*. Fünfte Auflage. Cham: Springer International Publishing. pp. 21-26, pp. 89-93.
48. SESAR, 2017. *European Drones Outlook Study - Unlocking the value for Europe*. Belgium: Publications Office of the European Union.
49. Tkáč, M. und Mésároš, P., 2019. Utilizing drone technology in the civil engineering. *SSP – JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING*, 14, (1). pp. 27-37
50. UAVOS, 2024. *FIXED-WING UAV SITARIA COMPLETED FLIGHT TESTS* [online]. UAVOS INC. Online verfügbar unter <https://www.uavos.com/wp-content/uploads/2021/06/sit-run-1-1024x478.jpg>. [Zugriff am 14.05.2024].

51. Unmanned Systems Technology (UST), 2024a. *Innovative UAV Platforms for Commercial & Industrial Applications | Advanced EFI Drone Propulsion Solutions* [online]. Unmanned Systems Technology. Online verfügbar unter <https://www.unmannedsystemstechnology.com/wp-content/uploads/2024/01/innoflight-galaxy-helicopter-drone-1024x629.jpeg>. [Zugriff am 14.05.2024].
52. Unmanned Systems Technology (UST), 2024b. *Skiron-X Small Unmanned Aerial System* [online]. Online verfügbar unter <https://www.unmannedsystemstechnology.com/wp-content/uploads/2012/06/Group-2-UAS-768x512.jpg>. [Zugriff am 14.05.2024].
53. Vergouw, B.; Nagel, H.; Bondt, G. und Custers, B. Custers, 2016. Drone Technology: Types, Payloads, Applications, Frequency Spectrum Issues and Future Developments. In: B. Custers, Hrsg. *The Future of Drone Use*. The Hague: T.M.C. Asser Press. pp. 21-45.
54. Wang, Q.; Ping, P.; Zhao, X.; Chu, G.; Sun, J. und Chen, C., 2012. Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery. *Journal of Power Sources*, 208. pp. 210-224.
55. Werdich, M., Hrsg., 2012. FMEA – Einführung und Moderation. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
56. Wing, 2024a. *Your good delivered in minutes* [online]. Wing Aviation LLC. Online verfügbar unter <https://wing.com/partner/>. [Zugriff am 14.05.2024].
57. Wing, 2024b. Better delivery [online]. Wing Aviation LLC. Online verfügbar unter <https://wing.com/>. [Zugriff am 14.05.2024].
58. Woodworth, A., 2022. *Wing's Aircraft Library* [online]. Wing Aviation LLC. Online verfügbar unter <https://blog.wing.com/2022/07/wings-aircraft-library.html/>. [Zugriff am 14.05.2024].
59. Woodworth, A., 2024. *Customer demand and Wing's Aircraft Library design approach shape new aircraft* [online]. Wing Aviation LLC. Online verfügbar unter <https://blog.wing.com/2024/01/customer-demand-and-wings-aircraft.html>, zuletzt aktualisiert am 17.01.2024. [Zugriff am 14.05.2024].

60. Worldbank, 2024. *Urban population (% of total population) – Germany* [online]. World Bank Group. Online verfügbar unter <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS?amp%3Blocations=DE-GB-FR-NL-BE&%3Bstart=1960&%3Bview=chart&end=2022&locations=DE&start=2014&view=chart>. [Zugriff am 07.04.2024].
61. X, 2014. *Wing. Transforming the way goods are transported* [online]. X. Online verfügbar unter <https://x.company/projects/wing/>. [Zugriff am 14.05.2024].
62. Xu, H.; Jiang, L.; Cao, Z. und Bao, X., 2023. Design study of a rotorless Unmanned Aerial Vehicle. *4th International Seminar on Artificial Intelligence, Networking and Information Technology (AINIT)*. Nanjing: IEEE. pp. 58–62.
63. Yinka-Banjo, C. und Ajayi, O., 2020. Sky-Farmers: Applications of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) in Agriculture. In: George Dekoulis, Hrsg. 2020. *Autonomous Vehicles*. IntechOpen.
64. Zipline, 2024. *Zipline Fact Sheet* [online]. Zipline. Online verfügbar unter <https://www.flyzipline.com/about/zipline-fact-sheet>. [Zugriff am 14.05.2024].

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind in allen Fällen unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Ort, Datum: _____

Unterschrift: _____

Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Multicopter-UAS (DJI 2024).....	8
Abbildung 2: Helikopter-UAS (UST 2024a).....	8
Abbildung 3: Hybrid-US (UST 2024b).....	8
Abbildung 4: Starrflügel-UAS (UAVOS 2024).....	8
Abbildung 5: MK30 (Amazon Staff 2023a).....	12
Abbildung 6: Platform 2 (Zipline 2024).....	12
Abbildung 7: Wing-UAS (Wing 2024b).....	12
Abbildung 8: Modell zur Berechnung der Nachfrage an und Verkehrsdichte von Lieferdrohnen (Doole et al. 2020).....	17
Abbildung 9: Prozessstruktur des Lieferprozesses.....	25

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Voraussichtliche Anzahl genutzter UAS in der EU in den Jahren 2035 und 2050 (SESAR 2017)....	9
Tabelle 2: Technische Daten MK27-2 (Amazon Autor 2018; Amazon Staff 2022a; Amazon Staff 2022b, FAA 2022).....	11
Tabelle 3: Technische Daten MK30 (Amazon Staff 2022b; Amazon Staff 2023a; Amazon Staff 2023b; Amazon Staff 2024a; Amazon Staff 2024b).....	11
Tabelle 4: Technische Daten Platform 2 (Zipline 2024).....	11
Tabelle 5: Technische Daten Wing-Drohne (klein) (Woodworth 2022; Woodworth 2024; Wing 2024b).12	
Tabelle 6: Technische Daten Wing-Drohne (groß) (Woodworth 2022; Woodworth 2024; Wing 2024b).12	
Tabelle 7: Nachfrage Drohnenlieferung (National) für 2035 (Doole et al.2020).....	17
Tabelle 8: Gefährdungen in den aktiven Prozessschritten.....	26
Tabelle 9: Gefährdungen im inaktiven Prozessschritt.....	27
Tabelle 10: Formblatt PFMEA Gewerbe.....	30
Tabelle 11: Formblatt PFMEA Kleingewerbe.....	31
Tabelle 12: Formblatt allgemeiner Bereich.....	31
Tabelle 13: Ergebnisdefinitionen RPZ (Werdich 2012).....	32
Tabelle 14: Faktoren der Bedeutung der Folgen (Werdich 2012).....	32
Tabelle 15: Faktoren der Auftretenswahrscheinlichkeit (Werdich 2012).....	33
Tabelle 16: Faktoren der Entdeckungsmöglichkeit (Werdich 2012).....	33

Tabelle 17: Ausgefülltes Formblatt PFMEA im gewerblichen Bereich.....	42
Tabelle 18: Ausgefülltes Formblatt PFMEA im kleingewerblichen Bereich.	47
Tabelle 19: Ausgefülltes Formblatt PFMEA im allgemeinen Bereich.....	50
Tabelle 20: Liste der zu untersuchenden Gefährdungen.....	51
Tabelle 21: Restrisiko bei Erreichen von AIS-Level 2.....	53
Tabelle 22: Restrisiko bei Erreichen von AIS-Level 1.....	53
Tabelle 23: Restrisiko bei Erreichen von AIS-Level 2.....	54
Tabelle 24: Risikobewertung bei Einhaltung von Maßnahmen.	54
Tabelle 25: Restrisiko bei Erreichen von AIS-Level 2.....	55
Tabelle 26: Restrisiko bei Nutzung von Fallschirm, Airbag und Totmannmelder.	56
Tabelle 27: DJI Mavic mit Propellerschutz (Drohnen 2024).....	58
Tabelle 28: Restrisiko durch Nutzung von dedizierten Startplätzen.....	58
Tabelle 29: Restrisiko durch Nutzung von dedizierten Startplätzen und Propellerschutz.....	58
Tabelle 30: Upgrade-Paket für gewerbliche Drohnen unter Annahme der Marktreife von Feststoffakkus.	61
Tabelle 31: Upgrade-Paket für gewerbliche Drohnen ohne Marktreife von Feststoffakkus.....	61
Tabelle 32: Upgrade-Paket für private Drohnen unter Annahme der Marktreife von Feststoffakkus.....	61
Tabelle 33: Upgrade-Paket für private Drohnen ohne Marktreife von Feststoffakkus.	61

Anhänge

Anhang 1 – Formblatt zur Ermittlung der Gefährdungen

Tabelle 1: Formblatt zur Ermittlung von bei der Drohnennutzung auftretenden Gefährdungen. Erstellt nach BG ETEM (2022).

1. Mechanische Gefährdungen		5. Brand- und Explosionsgefährdungen		8.3 Ersticken (z.B. durch sauerstoffreduzierte Atmosphäre), Ertrinken	
1.1 Ungeschützt bewegte Maschinenteile	X	5.1 Brennbare Feststoffe, Flüssigkeiten, Gase	X	8.4 Unzureichende Flucht- und Verkehrswege, unzureichende Sicherheits- und	
1.2 Teile mit gefährlichen Oberflächen		5.2 Explosionsfähige Atmosphäre		8.5 Unzureichende Bewegungsfläche am Arbeitsplatz, ungünstige Anordnung des Arbeitsplatzes, unzureichende	
1.3 Bewegte Transport- und Arbeitsmittel	X	5.3 Explosivstoffe		9. Physische Belastung/Arbeitsschwere	
1.4 Unkontrolliert bewegte Teile	X	6. Thermische Gefährdungen		9.1 Schwere dynamische Arbeit	
1.5 Stolpern, Rutschen, Stürzen		6.1 Heiße Medien/Oberflächen		9.2 Einseitig dynamische Arbeit, Körperbewegung	
1.6 Absturz	X	6.2 Kalte Medien/Oberflächen		9.3 Haltungsarbeit (Zwangshaltung), Haltearbeit	
2. Elektrische Gefährdungen		7. Spezielle physikalische Gefährdungen		9.4 Kombination aus statischer und dynamischer Arbeit	
2.1 Körperdurchströmung		7.1 Lärm		10. Psychische Belastung	
2.2 Störlichtbogen		7.2 Ultraschall, Infraschall		10.1 Ungenügend gestaltete Arbeitsaufgabe	
2.3 Elektrostatische Aufladungen		7.3 Ganzkörpervibrationen		10.2 Ungenügend gestaltete Arbeitsorganisation	
3. Gefährdungen durch Gefahrstoffe		7.4 Hand-Arm-Vibrationen		10.3 Ungenügend gestaltete soziale Bedingungen	
3.1 Hautkontakt mit Gefahrstoffen (Feststoffe, Flüssigkeiten, Feuchtarbeit)		7.5 Optische Strahlung		10.4 Ungenügend gestaltete Arbeitsplatz und Arbeitsumgebungsbedingungen	
3.2 Einatmen von Gefahrstoffen (Gase, Dämpfe, Nebel, Stäube, einschl. Rauche)		7.6 Ionisierende Strahlung		11. Sonstige Gefährdungen	
3.3 Verschlucken von Gefahrstoffen		7.7 Elektromagnetische Felder		11.1 Durch Menschen (z. B. Überfall)	
3.4 physikalisch-chemische Gefährdungen (z.B. Brand- und Explosionsgefährdungen)	X	7.8 Unter- oder Überdruck		11.2 Durch Tiere (z. B. Bisse)	
4. Gefährdungen durch Biostoffe		8. Gefährdungen durch Arbeitsumgebungsbedingungen		11.3 Durch Pflanzen und pflanzliche Produkte	
4.1 Infektionsgefährdung durch pathogene Mikroorganismen		8.1 Klima (z.B. Hitze, Kälte, unzureichende Lüftung]		11.4 Durch Mängel in der Organisation	
4.2 Sensibilisierende und toxische Wirkungen von Mikroorganismen		8.2 Beleuchtung, Licht			

Anhang 2 – Brand von Lithium-Ionen-Akkus

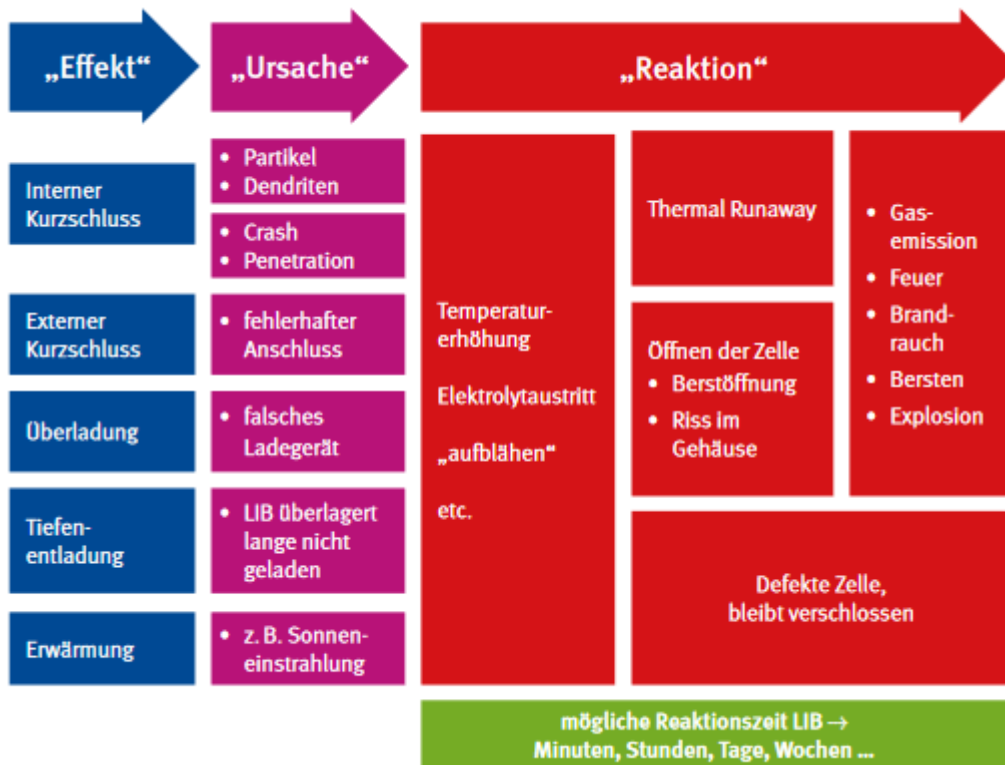


Abbildung 1: Fehlerursachen und Reaktionen im Umgang mit Lithium-Ionen-Akkus.

Anhang 3 - Fehlerbäume Personenschaden

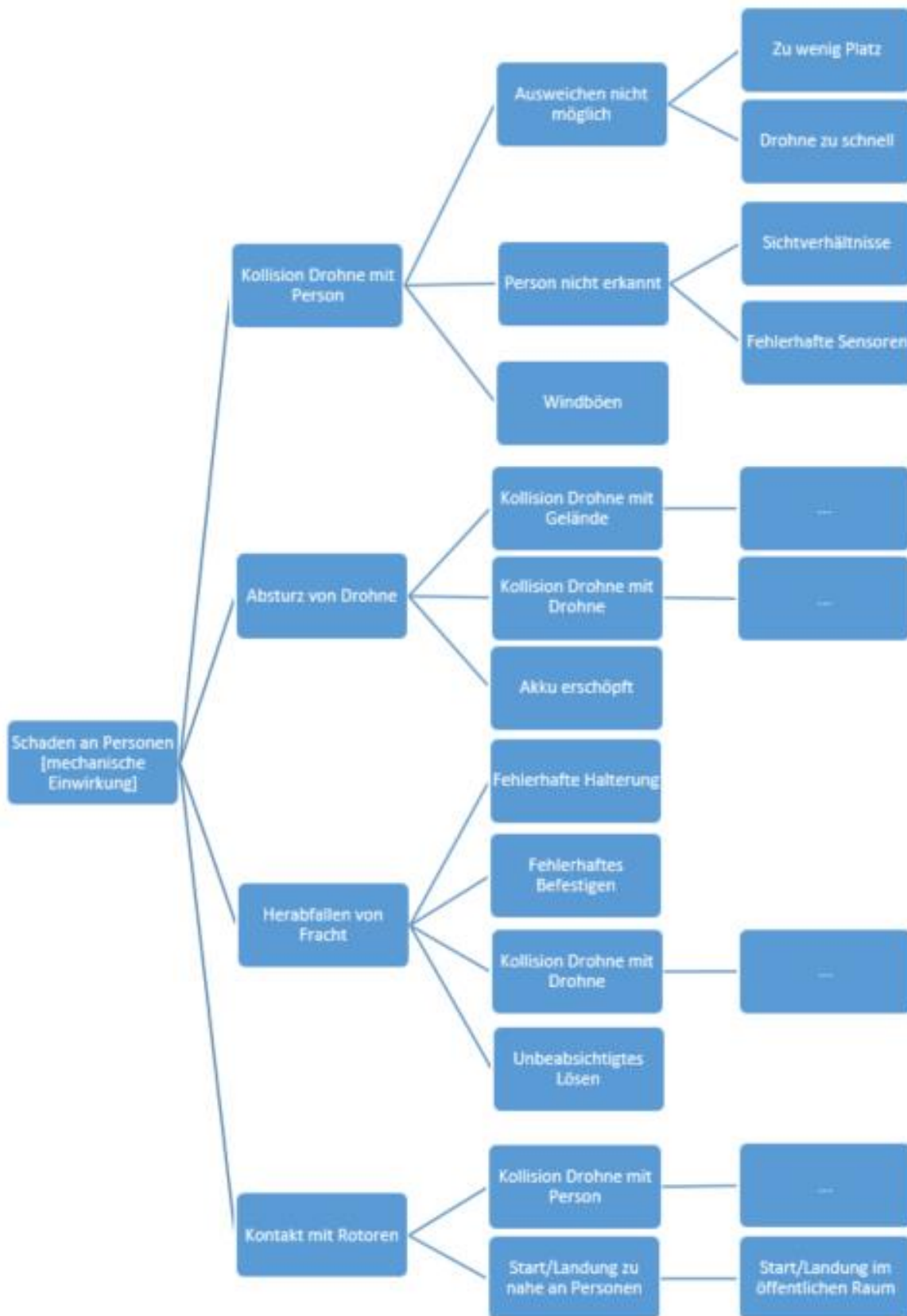


Abbildung 2: Fehlerbaum zur Ermittlung der Fehlerursachen, die zu einem Personenschaden durch mechanische Einwirkung führen.

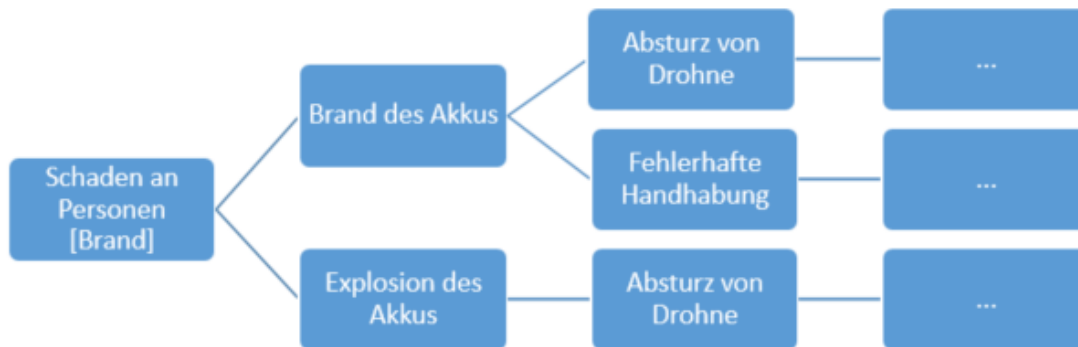


Abbildung 3: Fehlerbaum zur Ermittlung der Fehlerursachen, die zu einem Personenschaden durch ein Brandereignis führen.

Anhang 4 – AIS-Level für Drohnenabstürze

Tabelle 2: AIS-Level mit zugehörigen Verletzungsgraden und Beispielen (Koh et al. 2018)

AIS-Code	Injury	Example	Probability of Death
1	Minor	Superficial Laceration (Skin cut)	0%
2	Moderate	Minor Skull Fracture	1–2%
3	Serious	Major Skull Fracture	8–10%
4	Sever	Severe Life-Endangering Fracture	5–50%
5	Critical	Ruptured Liver with Tissue Loss	5–50%
6	Unsurvivable	Death	100%

Tabelle 3: AIS-Level infolge von Drohnenabstürzen verschiedener Gewichtsklassen aus verschiedenen Höhen.

	3.05 m (10ft)	6.1 m (20ft)	9.14 m (30ft)	15.24 m (50ft)	21.34 m (70ft)	30.48 m (100ft)	45.72 m (150ft)	60.96 m (200ft)
0.305 kg	0	0.1	0.3	0.6	1.0	1.3	3.3	5.8
0.405 kg	0.1	0.4	0.6	0.8	1.4	2.4	5.7	> 6
0.565 kg	0.6	1.0	1.5	2.6	4.4	> 6	> 6	> 6
0.700 kg	1.0	1.9	3.1	6.0	> 6	> 6	> 6	> 6
0.820 kg	1.2	2.4	3.7	> 6	> 6	> 6	> 6	> 6
1.0 kg	0.52	0.69	0.89	1.36	1.92	2.86	4.77	> 6
1.1 kg	0.57	0.81	1.09	1.75	2.53	3.85	> 6	> 6
1.2 kg	0.68	1.14	1.69	2.92	4.37	> 6	> 6	
1.4 kg	1.02	2.06	3.33	> 6	> 6			
1.6 kg	1.51	3.41	5.77	> 6				
1.8 kg	2.11	5.06	> 6	> 6				
2 kg	2.82	> 6	> 6					
2.2 kg	3.56	> 6	> 6					
2.4 kg	4.29	> 6	> 6					
3 kg	> 6	> 6						
5 kg	> 6							

Anhang 5 – Auswertung PFMEA

Tabelle 4: Gefährdungen sortiert nach RPZ.

Prozessschritt	Mögliche Folgen	B	A	E	RPZ
Start (Gewerbe)	Absturz von Drohne	10	7	10	700
Start (Kleingewerbe)	Absturz von Drohne	10	5	10	500
Laden (Kleingewerbe)	Brand und/oder Explosion (technische Ursache)	10	4	10	400
Start (Gewerbe)	Herabfallende Fracht	9	4	10	360
Start (Kleingewerbe)	Herabfallende Fracht	9	3	10	270
Laden (Kleingewerbe)	Brand und/oder Explosion (Fehlbedienung)	10	7	3	210
Start (Kleingewerbe)	Brand und/oder Explosion nach Absturz auf Dach	10	3	7	210
Flug	Brand und/oder Explosion nach Absturz auf Dach	10	3	7	210
Flug	Absturz von Drohne	10	2	10	200
Absetzen (urban)	Herabfallende Fracht	9	3	7	189
Flug	Herabfallende Fracht	9	2	10	180
Absetzen (urban)	Brand und/oder Explosion nach Absturz auf Dach	10	2	7	140
Absetzen (suburban)	Brand und/oder Explosion nach Absturz auf Dach	10	2	7	140
Absetzen (urban)	Absturz von Drohne	10	2	7	140
Start (Kleingewerbe)	Kollision Drohne mit Person	4	5	7	140
Start (Kleingewerbe)	Berührung mit Rotoren	4	5	7	140

Anhang 6 - Fehlerbaum Mechanische Gefährdung für Sachwerte

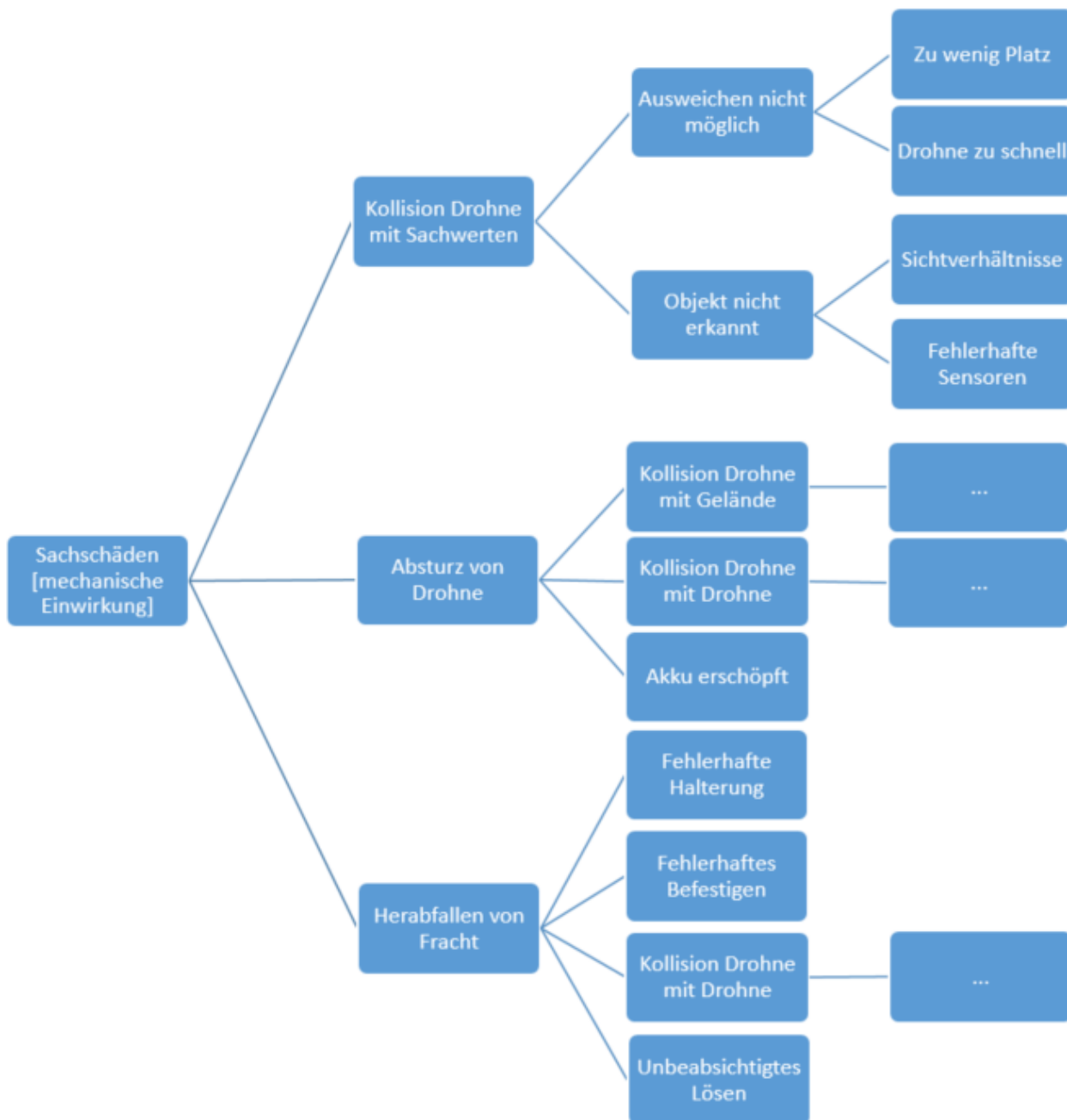


Abbildung 4: Fehlerbaum zur Ermittlung der Fehlerursachen, die zu einem Sachschaden durch mechanische Einwirkungen führen.

Anhang 7 – PFMEA Formblatt zur Bewertung der Risiken für Sachwerte

Tabelle 4: PFMEA Formblatt zur Bewertung der Risiken für Sachwerte durch kommerzielle und private Drohnennutzung.

	Prozessschritt	Mögliche Gefährdung	Mögliche Auswirkungen	Mögliche Ursache	Schwere der Auswirkung	Wahrscheinlichkeit	Entdeckungswahrscheinlichkeit	Bestehende Maßnahmen	RPZ	
Inaktiv	Laden	Physikalisch-chemische Gefährdung Brennbare Feststoffe	Sachschaden durch Brand	Beschädigter Akku, Akku überladen, Überspringen von Brand auf andere ladende/gelagerte Akkus						
		Physikalisch-chemische Gefährdung	Sachschaden durch Brand	Beschädigter Akku, Akku überladen						
	Start	Bewegte Transport- und Arbeitsmittel	Sachschaden durch Kollision Drohne mit Gebäude/Fahrzeug	keine Ausweichmöglichkeit, fehlerhafte Sensoren, starke Windböen						
		Physikalisch-chemische Gefährdung	Sachschaden durch Brand und/oder Explosion	Beschädigung des Akkus durch Absturz und/oder Kollision mit Drohnen oder Gelände						
Aktiv	Flug	Unkontrolliert bewegte Teile	Sachschaden durch herabfallende Fracht	Fehlerhafte Frachthalterung, fehlerhaft befestigte Fracht, unbeabsichtigtes Lösen der Halterung						
		Bewegte Transport- und Arbeitsmittel	Sachschaden durch Kollision Drohne mit Gebäude/Fahrzeug	keine Ausweichmöglichkeit, fehlerhafte Sensoren						
		Physikalisch-chemische Gefährdung	Sachschaden durch Brand und/oder Explosion	Beschädigung des Akkus durch Absturz und/oder Kollision mit Drohnen oder Gelände						
		Unkontrolliert bewegte Teile	Sachschaden durch herabfallende Fracht	Fehlerhafte Frachthalterung, fehlerhaft befestigte Fracht, unbeabsichtigtes Lösen der Halterung						
	Landung	Bewegte Transport- und Arbeitsmittel	Physikalisch-chemische Gefährdung	Sachschaden durch Kollision Drohne mit Gebäude/Fahrzeug	keine Ausweichmöglichkeit, fehlerhafte Sensoren, starke Windböen					
			Physikalisch-chemische Gefährdung	Sachschaden durch Brand und/oder Explosion	Beschädigung des Akkus durch Absturz und/oder Kollision mit Drohnen oder Gelände					
		Unkontrolliert bewegte Teile	Sachschaden durch herabfallende Fracht	Fehlerhafte Frachthalterung, fehlerhaft befestigte Fracht, unbeabsichtigtes Lösen der Halterung						
			Sachschaden durch herabfallende Fracht	Fehlerhafte Frachthalterung, fehlerhaft befestigte Fracht, unbeabsichtigtes Lösen der Halterung						