

TEXTE
09/2026

Endbericht

Chancen und Risiken der unbemannten Luftfahrt für Mensch und Umwelt

von

M. Sc. Joonas Lieb, Dr. rer. nat. Niklas Peinecke,
Dipl.-Math. Gunnar Schwöch, M. Sc. Maria Stolz

DLR – Institut für Flugföhrung, Braunschweig

Dipl.-Ing. Ingmar Seitz, M. Sc. Marcus Klatte, M. Sc. Michael Schrömbges

RWTH – Institut für Städtebauwesen und Stadtverkehr, Aachen

M. Sc. Ibraheem Adeniran, Abdulrahmon Ghazal, Dr.-Ing. Carina Kehrt

DLR – Institut für Verkehrsforschung, Berlin

Herausgeber:
Umweltbundesamt

TEXTE 09/2026

REFOPLAN des Bundesministeriums für Umwelt,
Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3721 58 101 0
FB001647

Endbericht

Chancen und Risiken der unbemannten Luftfahrt für Mensch und Umwelt

von

M. Sc. Joonas Lieb, Dr. rer. nat. Niklas Peinecke,
Dipl.-Math. Gunnar Schwoch, M. Sc. Maria Stolz
DLR – Institut für Flugführung, Braunschweig

Dipl.-Ing. Ingmar Seitz, M. Sc. Marcus Klatte, M. Sc. Michael Schrömbges
RWTH – Institut für Städtebauwesen und Stadtverkehr, Aachen

M. Sc. Ibraheem Adeniran, Abdulrahmon Ghazal, Dr.-Ing. Carina Kehrt
DLR – Institut für Verkehrsforschung, Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

DLR – Institut für Flugföhrung
Lilienthalplatz 7
38108 Braunschweig

DLR – Institut für Verkehrsforschung
Rutherfordstraße 2
12489 Berlin

RWTH Aachen University – Institut für Städtebauwesen und Stadtverkehr
Mies-van-der-Rohe-Straße 1
52074 Aachen

Abschlussdatum:

Februar 2025

Redaktion:

Fachgebiet Lärmminderung bei Anlagen und Produkten, Lärmwirkungen
Julia Treichel

DOI:
<https://doi.org/10.60810/openumwelt-7579>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Januar 2026

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren

Kurzbeschreibung: Chancen und Risiken der unbemannten Luftfahrt für Mensch und Umwelt

Zukünftige Verkehrsentwicklungen zur Verbesserung logistischer Herausforderungen werden die Welt des Güter- und Materialtransports beeinflussen. Dabei werden Drones möglicherweise eine Rolle spielen. Um die möglichen Effekte dieser neuartigen luftseitigen Logistik auf die Verkehrsentwicklung sowie Mensch und Umwelt abschätzen zu können, wurde die zu erwartende Verkehrsentwicklung für zwei zukünftige, repräsentative Szenarien (d. h. Szenario B – Paketstation, Szenario C - Direktbelieferung) und ein Referenzszenario (d. h. Szenario A – Status quo) modelliert. Anschließend wurden die Wirkungen der boden- und luftseitigen Modellierung (z. B. Lärmauswirkung, visuelle Beeinträchtigung, Energieverbrauch u.v.m.) auf Mensch und Umwelt analysiert.

Die Ergebnisse zeigen am Beispiel der Städteregion Aachen, dass der Droneneinsatz in Deutschland unter den derzeitigen Rahmenbedingungen lediglich in speziellen Einzelfällen sinnvoll erscheint. Mögliche Vorteile könnten in einer Zeitersparnis, geringeren Betriebskosten sowie energetischen Einsparungen liegen. Demgegenüber stehen jedoch zahlreiche Unsicherheiten. Aus gesundheitlicher Perspektive bestehen die Bedenken, dass die Lärmbelastung sowie die visuelle Beeinträchtigung im Umfeld von Start- und Landeplätzen sich negativ auf das Wohlbefinden der Bevölkerung auswirken könnten. Wirtschaftlich betrachtet gibt es Herausforderungen. Einerseits ist für den Transport schwerer Güter weiterhin ein ergänzendes Bodenkonzept erforderlich. Andererseits schränken witterungsabhängige Faktoren die Zuverlässigkeit des luftseitigen Logistikbetriebs stark ein. Zudem sind aktuell die Genehmigungsprozesse für Drones im urbanen Gebiet aufwendig.

Abstract: Opportunities and risks of unmanned aviation for people and the environment

Future transport developments to improve logistical challenges will influence the world of goods and material transport. Drones may play a role in this. In order to assess the possible effects of this new type of air-side logistics on traffic development as well as people and the environment, the expected traffic development was modelled for two representative future scenarios (i.e., Scenario B - parcel station, Scenario C - direct delivery) and a reference scenario (i.e., Scenario A - status quo). The effects of the ground- and air-side modelling (e.g., noise impact, visual impairment, energy consumption, etc.) on people and the environment were then analysed.

Using the example of the Aachen city region, the results show that the use of drones in Germany only appears to make sense in special individual cases under the current framework conditions. Possible advantages could include time savings, lower operating costs and energy savings. On the other hand, however, there are numerous uncertainties. From a health perspective, there are concerns that noise pollution and visual impairment in the vicinity of take-off and landing sites could have a negative impact on the well-being of the population. From an economic perspective, there are challenges. On the one hand, a supplementary ground concept is still required for the transport of heavy goods. On the other hand, weather-related factors severely limit the reliability of airside logistics operations. In addition, the authorisation processes for drones in urban areas are currently complex.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	8
Tabellenverzeichnis	9
Formelverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis.....	10
Symbolverzeichnis.....	12
Zusammenfassung.....	13
Summary	21
1 Einleitung.....	28
2 Analyse allgemeiner Rahmenbedingungen für die unbemannte Luftfahrt	29
2.1 Akzeptanz von Drohnen	29
2.1.1 Allgemeine gesellschaftliche Akzeptanz von Drohnen	31
2.1.2 Ergebnisse zur visuellen Beeinträchtigung	32
2.1.3 Ergebnisse zur akustischen Beeinträchtigung	33
2.1.4 Ergebnisse zu weiteren Akzeptanzfaktoren.....	35
2.2 Städtebaulichen Aspekte zu Start- und Landeplätzen	37
2.2.1 Städtebauliche Einbindung von Vertihubs.....	37
2.2.2 Möglichkeiten zur Standortwahl und baulichen Gestaltung von Vertihubs.....	42
2.2.3 Wirtschaftliche Gesichtspunkte	44
2.2.4 Verteilung der Vertihubs in einem Gebiet.....	45
2.2.5 Verkehrliche Erschließung	45
2.2.6 Herausforderungen, Hindernisse und Akzeptanzfaktoren bei der Anlage von Vertihubs.....	46
2.3 Rechtliche Rahmenbedingungen	47
2.3.1 Rechtlichen Rahmenbedingungen für die Bodeninfrastruktur.....	47
2.3.2 Rechtlichen Rahmenbedingungen für den Luftraum	49
2.4 Untersuchungen zu logistischen Belieferungskonzepten mit Drohnen.....	50
2.5 Potenzialanalyse von Gütersegmenten für Drohnen.....	52
3 Modellierung und Simulation.....	55
3.1 Szenariendefinition und -entwicklung	55
3.1.1 Szenario A – Status quo	56
3.1.2 Szenario B – Paketstationen	58
3.1.3 Szenario C – Direktbelieferung	60
3.2 Modellierung und Parameterisierung.....	61

3.2.1	Modellierung des bodengebundenen Verkehrs	63
3.2.2	Modellierung des Drohnenverkehrs	65
3.3	Modellierungs- und Simulationsergebnisse	70
3.3.1	Flächeninanspruchnahme	70
3.3.2	Verkehrliche Auswirkungen	71
3.3.3	Ökonomische Auswirkungen	74
3.3.4	Energetische Auswirkungen	78
3.3.5	Soziale Akzeptanz und gesundheitliche Auswirkungen	81
3.3.6	Robustheit des Drohnenverkehrs	86
4	Fazit zu Chancen und Risiken der unbemannten Luftfahrt	91
5	Literatur	97
A	Anhang	108
A.1	Detailangaben zu verwendeten Suchsträngen bei der Literaturanalyse zur Akzeptanz von Drohnen	108
A.2	Detailangaben zu den Kostenarten bei Szenario B und C	109
A.3	Detailangaben zu den energetischen Auswirkungen	112

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematische Darstellung von Vertihubs im urbanen Kontext im Beispiel Paketzustellung (eigene Darstellung)	38
Abbildung 2:	Realisierung eines Vertihub-Vorhabens – mögliche Akteurskonstellation	39
Abbildung 3:	Prozessschritte für die Realisierung von Vertihubs.....	42
Abbildung 4:	Darstellung eines Distributionszentrums	44
Abbildung 5:	Überblick des Untersuchungsgebiets Städteregion Aachen	56
Abbildung 6:	Szenario A – Status quo	57
Abbildung 7:	Standorte der einzelnen Distributionszentren.....	58
Abbildung 8:	Szenario B – Paketstationen.....	58
Abbildung 9:	Gewählte Standorte im Szenario B – Paketstationen	59
Abbildung 10:	Szenario C – Direktbelieferung	60
Abbildung 11:	Gewählte Standorte im Szenario C – Direktbelieferung	61
Abbildung 12:	Verwendete Modelle im Forschungsvorhaben und deren Datenschnittstellen	62
Abbildung 13:	Bestimmung der statistischen Maßzahlen	66
Abbildung 14:	Flugbeschränkungsgebiete für Flugbetrieb mit Drohnen	68
Abbildung 15:	Vergleich der Szenarien zu Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge	72
Abbildung 16:	Vergleich der Szenarien zu Laufleistung (ohne Flugbeschränkungsgebiete).....	73
Abbildung 17:	Tägliche Gesamttransportkosten für den Boden- und Drohnenverkehr	77
Abbildung 18:	Vergleich der Belieferungskonzepte zum Energieverbrauch ...	81
Abbildung 19:	Geräuschbelastung durch Drohnenbetrieb im Szenario „Paketstationen“ – ohne (links) und mit (rechts) Flugbeschränkungsgebieten.....	83
Abbildung 20:	Geräuschbelastung durch Drohnenbetrieb im Szenario „Direktbelieferung“ – ohne (links) und mit (rechts) Flugbeschränkungsgebieten.....	83
Abbildung 21:	Präsenzwahrscheinlichkeit (links) und Gleichzeitigkeit (rechts) im Szenario „Paketstationen“.....	85
Abbildung 22:	Präsenzwahrscheinlichkeit (links) und Gleichzeitigkeit (rechts) im Szenario „Direktbelieferung“.....	85
Abbildung 23:	Niederschlag an einzelnen Tagen des Messzeitraums	87
Abbildung 24:	Häufigkeitsverteilung der Sonnenscheindauer im Messzeitraum	88
Abbildung 25:	Bestimmung der sicheren Nutzzeit	88
Abbildung 26:	Bestimmung der sicheren und wirtschaftlichen Nutzzeit	89

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Drohnenbegriffe	30
Tabelle 2:	Akzeptanzbegriffe.....	30
Tabelle 3:	Fahrzeugcharakteristika des e-Lkw 3,5 t zGM der KEP- Dienstleister.....	75
Tabelle 4:	Abschätzung der täglichen Kosten für den bodengebunden Güterverkehr mittels KEP-Fahrzeugen für die modellierten Szenarien	75
Tabelle 5:	Abschätzung der täglichen Kosten für den Drohnenbetrieb bei optimistischer und pessimistischer Auslegung für die Szenarien B – Paketstationen und C – Direktbelieferung	76
Tabelle 6:	Abgeschätzte Kosten pro Flugkilometer	77
Tabelle 7:	Laufleistung und Energieverbrauch der eingesetzten e-Lkw ...	79
Tabelle 8:	Gesamtenergieverbrauchswerte der Drohne für Szenario B und C.....	80
Tabelle 9:	Maximale Geräuschbelastung durch Drohnenbetrieb für beide Szenarien	84
Tabelle 10:	Präsenzwahrscheinlichkeit und Gleichzeitigkeit der Drohnen.	85
Tabelle 11:	Klassifizierung einzelner Tage im Messzeitraum.....	90
Tabelle 12:	Übersicht zu den Chancen und Risiken der unbemannten Luftfahrt nach Themengebiet.....	94
Tabelle 13:	Fixkosten Szenario B - Paketstationen	109
Tabelle 14:	Variable Kosten Szenario B - Paketstationen	109
Tabelle 15:	Personalkosten Szenario B - Paketstationen	110
Tabelle 16:	Fixkosten Szenario C - Direktbelieferung	110
Tabelle 17:	Variable Kosten Szenario C - Direktbelieferung	111
Tabelle 18:	Personalkosten Szenario C - Direktbelieferung.....	111
Tabelle 19:	Experimentelle Flugversuche der „kleinen Paketdrohne“ zum Energieverbrauch	112
Tabelle 20:	Experimentell bestimmter Energieverbrauch der „Schwerlastdrohne“	113

Formelverzeichnis

Formel 1:	A-bewerteter Schalldruckexpositionspegel.....	69
Formel 2:	Frequenzunabhängige geometrische Dämpfung	69
Formel 3:	Frequenzunabhängige atmosphärische Dämpfung	69
Formel 4:	A-bewerteter äquivalente Dauerschallpegel.....	70
Formel 5:	Energieverbrauch einer Drohne	112

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
Akku	Akkumulator
ASFK	Average Simultaneous Flights per Square Kilometer
B2B	Business-to-Business
B2C	Business-to-Consumer
BauGB	Baugesetzbuch
BauNVO	Baunutzungsverordnung
BDL	Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft
BDLI	Bundesverband der deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie
BEV	Battery Electric Vehicle
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur
CFMS	Copter Flight Management System
CIB	Cross-Impact-Bilanzanalyse
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DLR-FL	Institut für Flugführung des DLR e.V.
DLR-VF	Institut für Verkehrsforschung des DLR e.V.
DWD	Deutscher Wetterdienst
EASA	European Union Aviation Safety Agency
ED-R	Flugbeschränkungsgebiete
FAA	Federal Aviation Administration
FATO	Final Approach and Take-Off Area
ft	Fuß (feet)
GPS	Global Positioning System
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs
IVECO	Industrial Vehicles Corporation
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
KEP	Kurier-Express-Paketdienstleistung
LiPo	Lithium-Polymer

LuftVG	Luftverkehrsgesetz
LuftVO	Luftverkehrs-Ordnung
Lkw	Lastkraftwagen
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MUAS	Movable Unmanned Aerial System
NRW	Nordrhein-Westfalen
ÖV	Öffentlicher Verkehr
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PAV	Pilotless Aircraft Vehicle
PE	Paketeinheit
Pkw	Personenkraftwagen
PlanZV	Planzeichenverordnung
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses
RAS	Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen
ROG	Raumordnungsgesetz
RPA	Remotely Piloted Aircraft
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
RWTH-ISB	Institut für Städtebauwesen und Stadtverkehr der RWTH Aachen University
StGB	Strafgesetzbuch
STOL	Short Take-Off and Landing
TVÖD	Tarifvertrag für den öffentlichen Dienst
UAM	Urban Air Mobility
UAS	Unmanned Aerial System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle (Drohne)
UBA	Umweltbundesamt
UTM	Unmanned Aircraft System Traffic Management
VTOL	Vertical Take-Off and Landing
VUL	Verband unbemannter Luftfahrt
zGM	Zulässige Gesamtmasse

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Erläuterung
D_s	Dezibel [dB]	Frequenzabhängige geometrische Dämpfung
$D_{L,n}$	Dezibel [dB]	Frequenzabhängige Atmosphärische Dämpfung
E_D	Watt [$1\text{kg} * \text{m}^2 * \text{s}^{-3} = \text{W}$]	Gesamtenergieverbrauch einer Drohne
E_F	Watt [$1\text{kg} * \text{m}^2 * \text{s}^{-3} = \text{W}$]	Energieverbrauch einer Drohne im Flug
E_G	Watt [$1\text{kg} * \text{m}^2 * \text{s}^{-3} = \text{W}$]	Grundenergieverbrauch einer Drohne
$L_{pAE,i}$	Dezibel [dB (A)]	A-bewerteter Schalldruckexpositionspegel
n_f	-	Nutzlastfaktor
$p_{A,i}$	Pascal [Pa]	A-bewertete Schalldruckverlauf
p_o	Pascal [Pa]	Bezugsschalldruck
Q	Coulomb [$\text{C} = \text{A} * \text{s}$]	Elektrische Ladung
s	Meter [m]	Entfernung
s_0	Meter [m]	Bezugsentfernung
t	Sekunde [s]	Betrachtungszeitraum
V_{max}	Volt [V]	Maximale Spannung
V_{min}	Volt [V]	Minimale Spannung
V_{Nenn}	Volt [V]	Nennspannung

Zusammenfassung

Aktuelle Entwicklungen im Logistikbereich, wie beispielsweise der stetige Anstieg an Gütertransporten sowie die Erprobung innovativer Belieferungskonzepte zur Verbesserung dieser, werden die Welt des Güter- und Materialtransports zukünftig beeinflussen. Eine Möglichkeit, diesen Herausforderungen zu begegnen, könnte – vorausgesetzt, dies ist politisch und gesellschaftlich gewollt - die unbemannte Luftfahrt (z. B. Drohnen) als eines dieser neuartigen Konzepte sein. Ziel des Projekts „Chancen und Risiken der unbemannten Luftfahrt“ ist es, zu untersuchen, ob und wie die Potenziale des unbemannten Luftverkehrs ausgeschöpft werden können, ohne dass Umweltbelastungen oder Risiken für Menschen und Umwelt zunehmen. Zu diesem Zweck wurde in der vorliegenden Untersuchung ausgehend vom derzeitigen Belieferungskonzept (d. h. Szenario A - Status quo) die zu erwartende Verkehrsentwicklung für zwei zukünftige, repräsentative Szenarien (d. h. Szenario B – Paketstation, Szenario C - Direktbelieferung) modelliert. Auf diese Weise konnten die möglichen Auswirkungen (z. B. Lärmauswirkung, visuelle Beeinträchtigung, Energieverbrauch, u.v.m.) auf Mensch und Umwelt analysiert werden. Im Nachfolgenden werden zunächst die modellierten Szenarien vorgestellt, um anschließend die verwendeten Simulationsmodelle zu erörtern.

Szenarienvorstellung

Um geeignete Szenarien zu identifizieren, wurde eine Literaturanalyse durchgeführt. In Bezug auf einen Droneneinsatz im Logistikbereich konnte festgestellt werden, dass Drohnen dort auch für Kurier-, Express- und Paketdienste (KEP) geeignet sein könnten. In diesem Segment handelt es sich um die Belieferungen mit kleineren und eher leichteren Paketen zwischen 2 – 31,5 kg (Thaller, 2018). Zudem werden in diesem Segment vornehmlich private Kundinnen und Kunden beliefert, die tendenziell leichtere Bestellungen unterhalb der maximalen zulässigen Nutzlast einer Drohne erwarten. Als ein vielversprechender Ansatz in diesem Gütersegment ergab sich das sogenannte „Shared-Truck-Drone“ Belieferungskonzept (Carlsson & Song, 2018). Hierbei werden KEP-Fahrzeuge und Drohnen im selben Auslieferungsgebiet gleichzeitig eingesetzt. In Abhängigkeit festgelegter Rahmenbedingungen (z. B. maximale Nutzlast der Drohnen) werden dann bodengebundene Fahrzeuge oder Drohnen für die Auslieferung einzelner Pakete ausgewählt. In den beiden modellierten Szenarien mit Drohnen wurde das „Shared-Truck-Drone“ Belieferungskonzept verfolgt.

Auf der Grundlage verschiedener Literaturanalysen wurden mittels einer Szenariotechnik (Weimer-Jehle, 2006; Weimer-Jehle, 2018) drei Szenarien zu diesem Belieferungskonzept entwickelt und am Beispiel der Städteregion Aachen untersucht. Das erste Szenario (Szenario A - Status quo) repräsentiert die aktuelle Form des Pakettransports, bei dem der Versand ausschließlich durch klassische, bodengebundene Transportfahrzeuge erfolgt. In diesem Szenario kommen als KEP-Fahrzeuge elektrische Kleintransporter (e-Lkw) zum Einsatz, die eine zulässige Gesamtmasse von maximal 3,5 t aufweisen. Diese Fahrzeuge sind jeweils an einem der acht bestehenden Distributionszentren in der Modellregion stationiert und beliefern die Kundinnen und Kunden in der Region mit den entsprechenden Sendungen. Die Analyse dieses Szenarios dient als Basis für den Vergleich mit den nachfolgenden Szenarien, die auf gewissen Abschnitten der Lieferkette eine Paketlieferung mittels Drohnen vorsehen. Im Szenario „Paketstationen“ (Szenario B - Paketstationen) kommen Schwerlastdrohnen mit einer maximalen Zuladung von 10 kg zum Einsatz, die einen Teil des Pakettransports von der Straße in die Luft verlagern. Die Drohnen operieren in diesem Szenario von zwei zentral gelegenen Vertihubs aus, an denen die Pakete von elektrischen KEP-Fahrzeugen angeliefert werden. Von den Vertihubs aus beliefern die Schwerlastdrohnen die in der Städteregion Aachen verteilten 317 Paketstationen. Die Kundinnen und Kunden holen ihre Pakete dann von diesen Paketstationen ab. Im Szenario „Direktbelieferung“

(Szenario C - Direktbelieferung) findet die Belieferung der Pakete an die Endempfängerinnen und Endempfänger mittels kleiner, leichter Paketdrohnen mit einer maximalen Zuladung von 5 kg statt. Dieses Szenario sieht sechs auf die Modellregion verteilte Vertihubs vor. Von dort können die Drohnen auch in dicht besiedelten Bereichen direkt auf bzw. in unmittelbarer Nähe von Grundstücken landen. In beiden Szenarien mit Drohneneinsatz werden Pakete gewerblicher Kundinnen und Kunden und Pakete schwerer als die maximale Zuladung von 5 kg bzw. 10 kg, durch bodengebundene, elektrisch betriebene KEP-Fahrzeuge transportiert.

Simulationsmodelle

Für die umfassende Modellierung des Verkehrs in der Städteregion Aachen wird eine Vielzahl von Simulationsmodellen verwendet, um sowohl den bodenseitigen Personen- und Güterverkehr als auch den unbemannten Luftverkehr präzise abzubilden. Die Zielsetzung des Projekts erforderte es, sowohl Verhaltensmuster der Verkehrsteilnehmerinnen und Verkehrsteilnehmer zu simulieren als auch deren Wechselwirkungen im Verkehrsnetz zu untersuchen. Für die gemeinsame Modellierung des Personen- und Güterverkehrs wurden die mikroskopische, agentenbasierte Verkehrssimulation MATSim (Axhausen et al., 2016) und die Logistiksimulation Jsprit (Schröder et al., 2012) verwendet. Diese beiden Modelle bilden das Verkehrsgeschehen auf mikroskopischer Ebene ab, indem sie die Mobilität einzelner Personen bzw. des Güterverkehrs simulieren. Die Grundlage der Simulation stellt eine synthetische Bevölkerung (Rödding, 2020) dar, die die demografischen Verhältnisse und Mobilitätsmuster der Städteregion Aachen widerspiegelt. Durch die detaillierte Modellierung der individuellen Bewegungen und Entscheidungen der Verkehrsteilnehmerinnen und Verkehrsteilnehmer war es möglich, die Verkehrsbelastung des Straßennetzes realistisch darzustellen und folglich die Veränderungen auf den Verkehr durch die Szenarien zu untersuchen. Die Modellierung des Drohnenverkehrs erfolgte auf auf der Grundlage aus der Personen- und Güterverkehrsmodellierung entstandenen Bedarfs an Gütertransport. Um eine realistische Simulation des Drohnenverkehrs zu ermöglichen, wurden präzise Angaben zu Start- und Zielpunkten sowie zu den Startzeiten aus der Bedarfsmodellierung abgeleitet. Zusätzlich müssen für die Drohnen die relevanten Leistungsdaten vorhanden sein. Dazu gehören Informationen zu Geschwindigkeiten, Steig- und Sinkraten sowie weitere flugspezifische Eigenschaften, die für die Berechnung der Luftverkehrsströme und der Interaktionen mit dem bodenseitigen Verkehr unerlässlich sind. Zur Modellierung des Luftverkehrs wurden Gridcity (Peinecke, 2017) und CFMS (Naser et al., 2021) verwendet. Durch die Kombination dieser verschiedenen Simulationsmodelle wird ein umfassendes Bild des Verkehrsgeschehens in der Städteregion Aachen geschaffen, um die Auswirkungen des Drohnenverkehrs auf Mensch und Umwelt zu analysieren. Im Folgenden werden nun die Ergebnisse zu den analysierten Themengebieten vorgestellt und deren Chancen und Risiken für Mensch und Umwelt dargestellt. Zu diesen Themengebieten gehören:

- ▶ Rechtliche Operationalisierung
- ▶ Beteiligung und städtebauliche Einbindung
- ▶ Verkehrliche Auswirkungen inkl. Straßenverkehrssicherheit und Sicherheit des Drohnenbetriebs
- ▶ Ökonomische Auswirkungen
- ▶ Energetische Auswirkungen
- ▶ Soziale Akzeptanz inkl. Geräuschbelastung und visueller Beeinträchtigung
- ▶ Robustheit des Drohnenbetriebs

Rechtliche Operationalisierung

Die rechtliche Operationalisierung des Drohnenbetriebs erfordert eine sorgfältige Berücksichtigung sowohl der flugrechtlichen als auch der verkehrlichen und städtebaulichen Rahmenbedingungen. Im Bereich der flugrechtlichen Vorschriften sind insbesondere die Luftverkehrsordnung (LuftVO) sowie Regelungen zum Immissionsschutz von zentraler Bedeutung. Parallel dazu müssen im Rahmen der städtebaulichen Analyse Bauplanungsrecht, Bauordnungsrecht, Verkehrsrecht und Landesrecht in Kombination mit Immissionsschutzrichtlinien berücksichtigt werden. Diese Vielzahl an rechtlichen Vorgaben erfordert eine umfassende Verträglichkeitsprüfung der unterschiedlichen Teilbereiche, was die Planung komplex gestaltet und die Erstellung von Rechtsgutachten notwendig macht. Die vorgenommenen Analysen zeigen, dass eine prinzipielle Umsetzbarkeit eines Drohnenbetriebs gegeben ist, die jedoch stark von den Ergebnissen rechtlicher Prüfungen abhängt. Auch die Implementierung temporärer Einrichtungen oder Pop-up-Lösungen zur Errichtung von Start- und Landeplätzen für die Drohnen birgt Hindernisse und Risiken, die unter anderem der Akzeptanz in der Bevölkerung, städtebaulichen Aspekten und einer rechtlichen Prüfung standhalten müssen. Zukünftige europäische Luftraumkonzepte, wie das U-space Konzept, bieten Chancen zur Vereinfachung eines flächendeckenden Drohnenbetriebs.

Beteiligung und städtebauliche Einbindung

Die Entwicklung eines Logistikkonzepts für Drohnen erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen öffentlichen Behörden und privaten Akteuren. Hierbei kann zwischen drei Akteuren unterschieden werden, den Schlüssel-, Primär- und Sekundärakteuren. Schlüsselakteure sind zentral für die Umsetzung zuständig und haben einen direkten Einfluss auf die Entscheidungsprozesse (z. B. Stadtrat und Flugsicherung). Primäre Akteure haben eine direkte Mitwirkung an der Planung und den Planungsprozessen (z. B. Wirtschaftsförderungen sowie Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben), wohingegen sekundäre Akteure eine indirekte, unterstützende Mitwirkung aufweisen (z. B. Bauleitplanung und Umweltschutzorganisationen). Dabei ist die Zuordnung einzelner Organisationen nicht immer eindeutig und mitunter während des gesamten Prozesses fließend.

Das Logistikkonzept umfasst Start- und Landeplätze für Drohnen, sogenannte Vertihubs. Diese dienen als Umschlagspunkte zwischen Boden- und Luftverkehr und müssen unter Berücksichtigung vorhandener Infrastrukturen und städtebaulicher Anforderungen geplant werden. Daher ist eine städtebauliche Einbindung der Vertihubs wichtig. Die Planung umfasst im Wesentlichen die Schritte Projektinitiierung, Akteursanalyse und Evaluationsplanung, Konzeptplanung, Entwurfsplanung, Standortsuche, Umsetzungsplanung sowie Evaluation und Anpassungen. Im Verlauf dieser Planungsschritte ist ein iterativer Planungsprozess empfehlenswert, um lokale Gegebenheiten und die Interessen aller Beteiligten zu berücksichtigen. Ein besonderes Augenmerk gilt es im Rahmen der Planung auf die Standortsuche und die damit verbundene Flächeninanspruchnahme zu legen. Hierbei sollte zwischen verschiedenen Nutzungsmöglichkeiten abgewogen werden und eine geeignete Nutzung priorisiert werden. Die ausgewertete Literatur zeigt insbesondere ein wiederkehrendes Konzept, das Vertihubs auf Gebäudedächern, deren Fläche heute ungenutzt ist, zu installieren, vorschlägt (Daskilewicz, 2018; Fadhil, 2018; Lineberger, 2019; Kim et al., 2020; NUAR, 2021). Dieses Konzept würde keine zusätzlichen Boden- oder Freiflächen in bebauten urbanen Gebieten beanspruchen.

Verkehrliche Auswirkungen

Im Rahmen der verkehrlichen Auswirkungen wurden insbesondere Fahrzeugaufkommen, Fahrtenaufkommen, Laufleistung und Verlustzeiten der drei modellierten Szenarien untersucht. Die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge (d. h. Fahrzeugaufkommen) wurde wie folgt berechnet: Die Fahrzeuganzahl an klassischen Lieferfahrzeugen ergibt sich aus der Anzahl der zu

transportierenden Pakete laut abgeschätzter Nachfrage, der Anzahl der durchschnittlich ausgelieferten Pakete pro Lieferfahrzeug (ca. 120 Pakete) und dem Lieferzeitraum pro Tag (ca. 8 Arbeitsstunden). Die Anzahl an benötigten Drohnen wurde über die Simulation mittels Gridcity berechnet. Im Szenario Status quo ergibt sich ein täglicher Bedarf an 726 e-Lkw. Im Szenario „Paketstationen“ ist mit einer Reduktion der insgesamt eingesetzten Fahrzeuge von 18 % zu rechnen. Insgesamt werden damit 599 Fahrzeuge eingesetzt, unterteilt in 331 Drohnen und 268 e-Lkw. Im Szenario „Direktbelieferung“ werden insgesamt 785 Fahrzeuge benötigt, unterteilt in 508 Drohnen und 277 e-Lkw. Damit benötigt das Szenario „Direktbelieferung“ die meisten Fahrzeuge, was durch die kleine Nutzlast der eingesetzten kleinen Transportdrohne von 5 kg und damit verbunden dem weiterhin hohen Bedarf an bodengebundenen e-Lkw erklärt werden kann.

In Bezug auf die Anzahl der Fahrten (d. h. Fahrtenaufkommen) der jeweils modellierten Szenarien kann festgestellt werden, dass Szenario Status quo am wenigsten Fahrten benötigt, da in diesem Fall alle Pakete jeweils mit Hilfe einer der e-Lkw transportiert werden kann. Folglich entspricht die Anzahl der Fahrten im Szenario Status quo genau der Anzahl der Fahrzeuge (d. h. 726). Im Szenario „Paketstationen“ werden insgesamt 9 793 Fahrten unternommen, wobei 94,5 % dieser Fahrten mit Schwerlastdrohnen durchgeführt werden. Lediglich 535 Fahrten werden mit 268 e-LKW erledigt. Dies entspricht einer Reduktion der Fahrten der e-Lkw im Vergleich zum Szenario Status quo um 26 %. Im Szenario „Direktbelieferung“ werden insgesamt 31 244 Fahrten durchgeführt, um die Kundinnen und Kunden nahezu einzeln beliefern zu können. Hierbei werden 98,2 % der Fahrten mit kleineren Paketdrohnen absolviert und die Anzahl von Fahrten mit e-Lkw um 24 % reduziert. In Bezug auf die zurückgelegte Strecke der Fahrzeuge (d. h. Laufleistung) erzielt das Szenario „Direktbelieferung“ die längste akkumulierte Fahrzeugstrecke mit 190 380 km. Dies begründet sich aus der Tatsache, dass jede Kundin und jeder Kunde mit Hilfe der kleinen Paketdrohnen einzeln belieft werden. In diesem Szenario werden circa 70 % der Gesamtaufleistung durch Paketdrohnen zurückgelegt. Im Szenario „Paketstationen“ wird eine akkumulierte Fahrzeugstrecke von 127 301 km zurückgelegt. Insgesamt 67 % der Gesamtaufleistung werden durch die Schwerlastdrohnen absolviert. Im Vergleich dazu liegen im Szenario Status quo die eingesetzten e-Lkw insgesamt 137 700 km zurück.

Ein weiterer Faktor ist die Anzahl der Haltevorgänge der KEP-Fahrzeuge und die daraus resultierenden Verlustzeiten im Straßennetz. Im Szenario Status quo werden insgesamt 31 198 Haltevorgänge verzeichnet, wobei die angenommene minimale Haltedauer bei 3 min liegt. Durch den Einsatz von Drohnen im Szenario „Paketstationen“ kann die Anzahl der Haltevorgänge der KEP-Fahrzeuge auf insgesamt 4 614 reduziert werden. Dadurch verringern sich die Verlustzeiten im Gesamtsystem um ungefähr 86 % im Vergleich zum Szenario Status quo. Im Szenario „Direktbelieferung“ kann im Vergleich zum Szenario Status quo eine um 82 % geringere Verlustzeit festgestellt werden. Auch wenn die Auswirkungen und lokalen Verlustzeiten eines einzelnen Haltevorgangs gering scheinen, sind durch die Vielzahl der wegfallenden Haltevorgänge durch die Belieferung per Drohne Veränderungen des Verkehrsflusses sichtbar. Insgesamt sind die verkehrlichen Auswirkungen auf den KEP-Verkehr beachtlich, jedoch ist mit eher geringeren Auswirkungen auf den gesamten bodengebundenen (Straßen-)Verkehr zu rechnen.

Straßenverkehrssicherheit

In Bezug auf die Straßenverkehrssicherheit ereigneten sich im Jahr 2019 in Deutschland insgesamt 8 060 Unfälle mit Personenschaden, an denen mindestens ein leichtes Nutzfahrzeug beteiligt war (Destatis, 2020). Das entsprach etwa 4 % aller Unfälle mit Personenschaden. Die Einführung von Drohnenlieferungen könnte Auswirkungen auf diese Unfallstatistiken haben. Je nach Szenario geht die Fahrleistung von KEP-Fahrzeugen um 68 % bzw. 58 % zurück, was potenziell zu einer Reduktion von Verkehrsunfällen führen könnte. Auf der anderen Seite könnte der Rückgang der Verkehrsmenge auch dazu führen, dass sich die Geschwindigkeit auf den Straßen

erhöht. Entsprechend könnten Unfälle sowohl häufiger als auch schwerer werden (Schüller, 2009). Zum aktuellen Zeitpunkt lässt sich daher keine valide Aussage tätigen. Allgemein bleibt die Verkehrssicherheitsforschung in diesem Bereich herausfordernd, da empirische Daten zur Interaktion zwischen Drohnen und Bodenverkehr derzeit fehlen. Diese Lücke erschwert fundierte Aussagen über die Verkehrssicherheit in einem sich wandelnden Lieferumfeld.

Sicherheit eines Drohnenbetriebs

In den letzten Jahren hat sich gezeigt, dass ein zukünftiger flächendeckender Drohnenbetrieb Auswirkungen auf die Sicherheit der Bevölkerung haben könnte. Als Beispiel seien hier zunächst die Auswirkungen auf den zivilen Luftverkehr durch den gesetzeswidrigen Einsatz von Drohnen genannt. So gab es im Zeitraum von 2017 bis 2019 alleine am Flughafen Frankfurt/Main fünf dokumentierte Zwischenfälle, die durch den Einsatz von Drohnen verursacht wurden (Naas, 2024). Diese Vorfälle führten zu einem Ausfall von insgesamt 220 Flügen. Ein weiterer kritischer Aspekt der Drohensicherheit ist die potenzielle Störung der Privatsphäre der Bevölkerung. Einzelne Fälle, in denen Grundstückseigentümer sich durch den Einsatz von Drohnen gestört fühlten, sind bekannt. Jedoch ist dies bislang kein flächendeckendes Massenphänomen. Technische Störungen bzw. einzelne Systemausfälle der Drohne gefährden die Sicherheit der Drohne zusätzlich. Die Ausfallwahrscheinlichkeit nicht luftfahrtzertifizierter Komponenten einer Drohne wird auf etwa 10^{-3} geschätzt, im Vergleich zur zertifizierten Luftfahrt mit 10^{-9} . Hier ist jedoch zu beachten, dass regelmäßige Wartungsintervalle diese Ausfallwahrscheinlichkeit reduzieren können. In Bezug auf Kollisionen zwischen Drohnen und anderen Luftfahrzeugen gibt es bislang wenig bis keine dokumentierten Vorfälle in Deutschland. Im Bereich des Einsatzes von Drohnen durch Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) sind häufig Abstimmungsschwierigkeiten zwischen bemannten Rettungshubschraubern und Drohnenbetreibern zu beobachten. Zudem ist das Thema Spoofing und Jamming, dass die Manipulation von GPS-Daten nach sich zieht, von zentraler Bedeutung für die Sicherheit von Drohnen. Obwohl es in Deutschland bislang keine spezifischen Vorfälle in Bezug auf Drohnen bekannt sind, bleibt das Risiko bestehen, dass solche Bedrohungen in der Zukunft relevant werden könnten. Insgesamt sind bezüglich der Sicherheit des Drohnenbetriebs verschiedene Herausforderungen zu adressieren, die einem kommerziellen Drohnenlieferbetrieb hinderlich sein könnten.

Ökonomische Auswirkungen

Bei der Untersuchung der ökonomischen Auswirkungen des Drohnenbetriebs auf den gesamten Lieferverkehr in der Städteregion Aachen wurden die drei Kostenarten Fixkosten, variable Kosten und Personalkosten berücksichtigt. Die Fixkosten umfassen Anschaffungskosten und Infrastrukturkosten, während variable Kosten unter anderem Reparaturkosten, die Nutzung des Luftraums und die Nutzung von speziellen Diensten beinhalten. Personalkosten beziehen sich auf das Personal, das für den Betrieb der KEP-Fahrzeuge bzw. für den Betrieb der Drohnen benötigt wird. Die bodengebundenen klassischen KEP-Fahrzeuge wurden mit einem Kostenfaktor basierend auf den Daten aus IVECO Daily Electric (2016) angenommen. Für den Betrieb und Unterhalt der Drohnen wurden einmal optimistische und einmal pessimistische Annahmen für die beiden Szenarien „Paketstationen“ und „Direktbelieferung“ getroffen. Hierbei stellen optimistische Annahmen geringere Fixkosten bei der Anschaffung der Drohnen, geringere Reparaturkosten und geringere Personalkosten beim Betrieb der Drohnen im Vergleich zu den pessimistischen Annahmen voraus. Die Ergebnisse der Analysen zeigen, dass der Einsatz von Drohnen in beiden modellierten Szenarien jeweils unter Berücksichtigung von optimistischen und pessimistischen Annahmen eine Kostenreduktion im Vergleich zum herkömmlichen Transport mit KEP-Fahrzeugen ermöglicht. Besonders hervorzuheben ist das Szenario „Paketstationen“, das sich als das kostengünstigste Szenario erweist und eine Reduktion von 42 % im Vergleich zum Status

quo erzielt. Allgemein würde der Einsatz von Drohnen und die damit verbundene Automatisierung eines Teils der Lieferkette voraussichtlich zu Kosteneinsparungen führen.

Energetische Auswirkungen

Zur Beurteilung der energetischen Auswirkungen des Droneneinsatzes auf den Gesamtlieferverkehr wurden verschiedene Energieverbrauchsanalysen durchgeführt. Der Energieverbrauch eines e-Lkw kann basierend auf den Daten des IVECO Daily Electric (2016) mit 0,4218 kWh/km festgelegt werden. Der Energieverbrauch der in den Szenarien „Paketstationen“ und „Direktbelieferung“ eingesetzten Drohnen wurde durch experimentelle Flugversuche und Laboranalysen näherungsweise abgeschätzt (Gasche, 2023). In dieser Analyse konnten die Wettereinflüsse wie Wind und Temperatur jedoch nur unter idealen Bedingungen berücksichtigt werden, während die Effekte der zusätzlichen Nutzlast nur durch eine grobe Annäherung in die Berechnungen eingeflossen sind. Die Ergebnisse zeigen, dass der Status quo den höchsten Energieverbrauch aufweist, während im Szenario „Paketstationen“ eine Senkung des Energieverbrauchs um 63 % erreicht werden konnte. Im Szenario „Direktbelieferung“ wurde eine Reduktion von 57 % im Vergleich zum Status quo festgestellt. Interessanterweise ergab sich im Szenario „Direktbelieferung“ ein höherer Energieverbrauch im Vergleich zum Szenario „Paketstationen“. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die geringere Nutzlast der kleineren Paketdrohnen im Szenario „Direktbelieferung“ zu einem höheren Anteil an Paketen im Bodenverkehr führt, was wiederum die Laufleistung der e-Lkw und damit verbunden den Energieverbrauch erhöht. Jedoch muss angemerkt werden, dass die Validität der Erkenntnisse weiter zu prüfen ist, da die Energieverbräuche nur annäherungsweise abgeschätzt werden konnten.

Soziale Akzeptanz

Die gesellschaftliche und soziale Akzeptanz von Drohnen wurde bereits in zahlreichen wissenschaftlichen Studien untersucht. In diesem Projekt wurde mit Hilfe einer Literaturanalyse basierend auf dem PRISMA-Verfahren Analysen unter anderem zu „Akzeptanz von Drohnen“ vorgenommen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Einsatzzweck der Drohnen einen starken Einfluss auf dessen Akzeptanz hat (Eißfeldt et al., 2020). Höhere Akzeptanz genießen Einsätze zur Suche und Bergung vermisster Personen im Gegensatz zu kommerziellen oder freizeitbezogenen Anwendungen (Tan et al., 2021). Zudem haben mehrere Studien gezeigt, dass die Bevölkerung die Verletzung der Privatsphäre durch den Einsatz von Drohnen befürchtet (Eißfeldt et al., 2020; Nelson et al., 2019; Grossi et al., 2020; Tan et al., 2021; Klauser & Pedrozo, 2017). Außerdem konnte in mehreren wissenschaftlichen Studien gezeigt werden, dass die Geräuschentwicklung von Drohnen negativen Effekt auf Akzeptanz hat (Ferreira & Kalakao, 2021; Walther et al., 2019; Lydinia, Philipsen & Ziefle, 2016; Chang & Chetty, 2017; Wang et al., 2016; Eißfeldt et al., 2020; Yedavalli & Mooberry, 2019). Zu guter Letzt konnten zwei Studien einen negativen Einfluss durch visuelle Verschmutzung auf Akzeptanz nachweisen (Ferreira & Kalakou, 2021; Boucher, 2016), wohingegen die Bedenken in zwei anderen Studien diesbezüglich gering ausfielen (Haddad et al., 2020; Grossi et al., 2020). Insgesamt lässt sich festhalten, dass die soziale Akzeptanz von Drohnen von mehreren unterschiedlichen Faktoren abhängig ist und diese auch individuell sehr unterschiedliche ausgeprägt sein können. Dennoch ist die Akzeptanz von Drohnen in kommerziellen Anwendungen in der Bevölkerung aktuell eher gering ausgeprägt.

Geräuschbelastung

Zur Modellierung der Geräuschbelastung des Dronenbetriebs in der vorliegenden Modellregion wird zunächst auf ermittelte Geräuschpegel aus realen Flugversuchen der hier in Betracht gezogenen Dronenmodelle zurückgegriffen. Dabei wurde für das Szenario „Paketstationen“ ein garantierter Schallleistungspegel von 101 dB(A) für die Schwerlastdrohne angenommen. Für das Szenario „Direktbelieferung“ wurde von einem garantierten Schallleistungspegel von 99 dB(A)

für die kleinere Paketdrohne ausgegangen. Anschließend wurde der Dauerschallpegel unter Berücksichtigung der geometrischen und atmosphärischen Dämpfung berechnet und daraus der Beurteilungspegel abgeleitet. Da keine Reflexionen und Beugungen der Schallausbreitung durch Gebäudegeometrien betrachtet wurden, stellt der abgeleitete Beurteilungspegel lediglich eine Näherung dar. In der Realität kann dieser durch Gebäudedämpfung und -reflexion sowohl höher als auch niedriger ausfallen. Es wurde der gesamte Drohnenbetrieb jeweils für beide Szenarien simuliert, wobei ein gleichzeitiger Betrieb mehrerer Drohnen in unterschiedlichen Höhen betrachtet wird. Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass insbesondere an wenigen, besonders stark frequentierten, Start- und Landeplätzen der Drohnen, Geräuschbelastungen bis zu 67,0 dB(A) beim Szenario „Direktbelieferung“ auftreten. Dies weist darauf hin, dass die zu erwartende Geräuschbelastung durch eine Verlagerung der Transportwege vom Boden in die Luft voraussichtlich den Immissionsrichtwert für einen Tagbetrieb etwa in Wohn-, Misch- und Gewerbegebieten der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm (BMUV, 2017) lokal an den Start- und Landepunkten der Drohnen in Einzelfällen überschreiten könnte. Derart stark frequentierte Punkte wären dann nur in Industriegebieten denkbar. Da die Lärmbelastung hier vorwiegend am Boden während Start und Landung anfällt, könnten jedoch zusätzliche Lärmschutzmaßnahmen angewandt werden.

Visuelle Beeinträchtigung

Die visuelle Beeinträchtigung durch den Drohnenverkehr wird maßgeblich von zwei Faktoren beeinflusst. Zum einen, der Präsenzwahrscheinlichkeit, also der Wahrscheinlichkeit, dass zu einem beliebigen Zeitpunkt eine Drohne am Himmel sichtbar ist, und zum anderen der maximalen Anzahl gleichzeitig fliegender Drohnen, die folgend als Konkurrenz oder Gleichzeitigkeit bezeichnet wird. In dieser Analyse wird die Modellregion mit Hilfe eines Rasters in einzelne Zellen unterteilt, um dann die Präsenzwahrscheinlichkeit und die Konkurrenz der Drohnen pro Zelle bestimmen zu können. Eine Zelle ist definiert als ein Rechteck mit den Abmessungen von $0,005^\circ \times 0,005^\circ$ Längen- und Breitengrad, was einer Fläche von etwa $0,2 \text{ km}^2$ entspricht (ca. 555 m nördlich und 354 m östlich). Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass die Präsenzwahrscheinlichkeit an den Vertihubs mit bis zu 43 % am höchsten ist. Dies bedeutet, dass in etwa 5 von 12 Stunden mindestens eine Drohne sichtbar wäre. Hierbei sind die 12 Stunden die maximale theoretische mögliche Betriebsdauer der Drohnen. Im übrigen Raum hingegen, liegen die Präsenzwahrscheinlichkeiten deutlich unter 5 %. Die größte Konkurrenz von Drohnen ist im Umfeld der Vertihubs zu beobachten. In der Nähe dieser Vertihubs sind maximal 8 Drohnen gleichzeitig in einer Zelle und in der Fläche größtenteils 0 bis 2 Drohnen gleichzeitig pro Zelle. Zusätzlich kann von einer Betriebsflughöhe im Streckenflug von mehr als 100 m ausgegangen werden, wodurch, in Abhängigkeit von der Größe der Drohnen, diese schwer sichtbar sein werden. Angesichts der ermittelten maximalen Präsenzwahrscheinlichkeit von 43 % wird von einer wahrgenommenen Beeinträchtigung ausgegangen.

Robustheit des Drohnenbetriebs

Ein grundlegendes Problem für den Betrieb von Drohnen in der ausgewählten Modellregion, sind die vorhandenen Wetterbedingungen, die einen ganzjährigen Betrieb von Drohnen unrealistisch erscheinen lassen. Mit Hilfe der kostenlos zugänglichen Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) konnte eine erste Abschätzung zum Betrieb von Drohnen in der Region getroffen werden. Hierbei wurde ein sicherer und wirtschaftlicher Betrieb der Drohnen als maßgeblich angenommen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass aufgrund der vorliegenden Daten eine – vorsichtig pessimistische – Abschätzung zur Nutzung des Luftraums über Aachen für Drohnen geleistet werden kann. Danach kann an mindestens 89 % der Tage und zu 53,7 % der verfügbaren Tageslichtzeit ein Drohnenbetrieb sicher und wirtschaftlich durchgeführt werden. Tage- oder wochenlange Perioden, in denen ein Drohnenbetrieb nicht möglich ist, konnten nicht

identifiziert werden. Dennoch zeigt die vorgenommene Analyse, dass von einem robusten, ganzjährigen Logistikbetrieb mittels Drohnen derzeit nicht ausgegangen werden kann. Zudem gilt es zu bedenken, dass bei regionalen, nationalen oder sogar internationalen Katastrophenfällen, in denen insbesondere die kritische Infrastruktur beschädigt oder zerstört wurde, mit einer hohen Wahrscheinlichkeit davon auszugehen ist, dass der kommerzielle, logistische Drohnenliefer-transport eingestellt würde.

Zusätzlich könnte zukünftiger Drohnenverkehr auch durch mutwillige und teilweise strafrechtlich relevante Handlungen, wie beispielsweise Vandalismus oder Sabotageakte, beeinflusst oder gestört werden. Vandalismus gegenüber Drohnen geht oftmals mit einer (mindestens) empfundenen Grenzüberschreitung der Privatsphäre einzelner einher. Hierbei ist zu bedenken, dass das Eindringen in die Privatsphäre und ein „nicht genehmigtes Aufzeichnen“ durch optische Sensorik (z. B. Kameras) nach § 201a StGB einen Straftatbestand darstellt. Wie im Abschnitt „Sicherheit des Drohnenbetriebs“ angemerkt, sind Einzelfälle, in denen die lokale Bevölkerung mutwillig und gewaltsam gegen Drohnen vorgegangen ist, in Deutschland auch schon bekannt (Busch, 2022). Im Bezug auf mögliche Sabotageakte kann festgehalten werden, dass ohne spezielle Sicherheitsmaßnahmen oder gesonderte Verschlüsselungstechnologie beim Einsatz von Drohnen im Grunde jeder Teil der Infrastruktur, d. h. die Start- und Landeplätze, das Kommunikationsnetzwerk, das Navigationssystem, die Bodeninfrastruktur, U-space-Services sowie sämtliche involvierte Personen, mögliche Angriffspunkte bieten (Abro et al., 2022; Torens et al., 2021).

Abschließende Empfehlung

Die gewonnenen Modellierungs- und Simulationsergebnisse zeigen einerseits, dass der Einsatz von Drohnen im Logistiksektor Vorteile, insbesondere in Bezug auf die Senkung der Transportkosten und das Potenzial zur Energieeinsparung, hat. Auf der anderen Seite ist jedoch der Aufbau einer doppelten Infrastruktur notwendig, um die begrenzte Robustheit des Drohnenbetriebs zu kompensieren. Darüber hinaus führt der Betrieb von Drohnen an Vertihubs zu einer zusätzlichen Geräuschbelastung. Des Weiteren ist von einer visuellen Beeinträchtigung der Bevölkerung auszugehen. Zusätzlich stellt die geringe Akzeptanz des gewerblichen Drohnenbetriebs bei der Bevölkerung eine weitere Herausforderung dar. In Anbetracht dieser Faktoren ist es wahrscheinlich, dass der Drohnenbetrieb in Deutschland vorerst eine Nischenanwendung bleibt. Für sehr (zeit-)kritische Waren (z. B. Medizintransport) oder für entlegene Regionen (z. B. Inseln) ist ein Logistiktransport mittels Drohnen vorstellbar.

Summary

Current developments in the logistics sector, such as the steady increase in goods transport and the testing of innovative delivery concepts to improve these concepts, will influence the world of goods and materials transport in the future. One way to encounter these challenges – assuming this is politically and socially desirable – could be unmanned aircraft systems (UAS), also called "drones", as one of these new concepts. The aim of this project, "Opportunities and risks of unmanned aviation", is to investigate whether and how the potential of unmanned air transport can be utilised without increasing environmental pollution or risks for people and the environment. To this end, the present study modelled the expected traffic development for two representative future scenarios (i.e., scenario B - parcel stations, scenario C - direct delivery) based on the current delivery concept (i.e., scenario A - status quo). In this way, the possible effects (e.g., noise impact, visual impairment, energy consumption, etc.) on people and the environment could be analysed. In the following, the modelled scenarios are first presented, and then the simulation models used are discussed, and their results presented.

Introduction of scenarios

A literature analysis was carried out to identify suitable scenarios. With regard to the use of drones in the logistics sector, it was found that drones could also be suitable for courier, express and parcel services (CEP). This segment involves deliveries of smaller and lighter parcels weighing between 2 and 31.5 kg (Thaller, 2018). In addition, this segment primarily delivers to private customers who tend to expect lighter orders below the maximum permissible payload of a drone. One promising approach in this goods segment is the so-called "shared truck-drone" delivery concept (Carlsson & Song, 2018). Here, CEP vehicles and drones are used simultaneously in the same delivery area. Depending on defined framework conditions (e.g., maximum payload of the drones), ground-based vehicles or drones are then selected for the delivery of individual parcels. In the two modelled scenarios involving drones, the "shared truck-drone" concept was followed.

Based on various literature analyses, three scenarios for this delivery concept were developed using a scenario technique (Weimer-Jehle, 2006; Weimer-Jehle, 2018) and examined using the example of the Aachen city region. The first scenario (scenario A - status quo) represents the current form of parcel transport, in which deliveries are made exclusively by traditional, ground-based transport vehicles. In this scenario, electric vans (e-trucks) with a maximum permissible total mass of 3.5 tonnes are used as CEP vehicles. These vehicles are stationed at one of the eight existing distribution centres in the model region and deliver the corresponding consignments to customers in the region. The analysis of this scenario serves as a basis for comparison with two other scenarios, which provide for parcel delivery by drone on certain sections of the supply chain. In the "parcel stations" scenario (scenario B - parcel stations), heavy-lift drones with a maximum payload of 10 kg are used to transfer part of the parcel transport from the road to the air. In this scenario, the drones operate from two centrally located Vertihubs, to which the parcels are delivered by electric CEP vehicles. From the Vertihubs, the heavy-lift drones deliver to the 317 parcel stations distributed throughout the Aachen city region. Customers then collect their parcels from these parcel stations. In the "direct delivery" scenario (scenario C - direct delivery), parcels are delivered to the final recipients using small, lightweight parcel drones with a maximum payload of 5 kg. This scenario envisages six distribution hubs spread across the model region. From there, the drones can also land directly on or in the immediate vicinity of the recipients in densely populated areas. In both scenarios involving the use of drones, parcels from commercial customers and parcels heavier than the maximum payload of 5 kg or 10 kg are transported by ground-based, electrically powered CEP vehicles.

Simulation models

A large number of simulation models are used for the comprehensive modelling of traffic in the Aachen city region in order to precisely depict both ground-based passenger and freight traffic as well as unmanned air traffic. The objective of the project required both the simulation of behavioural patterns of road users and the investigation of their interactions in the transport network. The microscopic, agent-based traffic simulation MATSim (Axhausen et al., 2016) and the logistics simulation Jsprit (Schröder et al., 2012) were used for the joint modelling of the ground-based passenger and freight traffic. These two models depict the traffic situation on a microscopic level by simulating the mobility of individual people or freight transport. The simulation is based on a synthetic population (Rödding, 2020) that reflects the demographic conditions and mobility patterns of the Aachen city region. By modelling the individual movements and decisions of road users in detail, it was possible to realistically depict the traffic load on the road network and consequently investigate the changes to traffic caused by the scenarios which involve drones. The modelling of drone traffic was based on the demand for freight transport resulting from the modelling of passenger and freight traffic. In order to enable a realistic simulation of drone traffic, precise information on take-off and destination points as well as take-off times was derived from the demand modelling. In addition, relevant performance data must be available for the drones. This includes information on flight speeds, climb and descent rates and other flight-specific characteristics that are essential for calculating air traffic flows and interactions with ground-based traffic. Gridcity (Peinecke, 2017) and CFMS (Naser et al., 2021) were used to model the air traffic. By combining these different simulation models, a comprehensive picture of the traffic situation in the Aachen city region was created in order to analyse the effects of drone traffic on people and the environment. In the following, the results of the analysed subject areas are presented, and their opportunities and risks for people and the environment are outlined. These subject areas include:

- ▶ Legal operationalisation
- ▶ Stakeholder involvement and urban integration
- ▶ Traffic effects incl. road traffic safety and safety of drone traffic
- ▶ Economic effects
- ▶ Energy consumption effects
- ▶ Social acceptance incl. noise pollution and visual impairment
- ▶ Robustness of the drone operation

Legal operationalisation

The legal operationalisation of drone operations requires careful consideration of both the aviation law and the traffic and urban planning framework conditions. In the area of aviation regulations, the German air traffic regulations (LuftVO) and regulations on immission control are of central importance. At the same time, building planning law, building regulations law, traffic law and state law in combination with immission control guidelines must be considered as part of the urban development analysis. This multitude of legal requirements necessitates a comprehensive compatibility assessment of the various sub-areas, which makes planning complex and necessitates the preparation of legal opinions. The analyses carried out showed that drone operations are feasible in principle but are heavily dependent on the results of legal reviews. A possible interim solution through the implementation of temporary facilities or pop-up solutions for setting up take-off and landing sites for drones also harbours challenges and risks that must

stand up, e.g., to public acceptance, urban planning aspects and legal scrutiny. Future European airspace concepts, such as the U-space concept, also offer opportunities to simplify drone operations in Europe.

Stakeholder involvement and urban integration

The development of a logistics concept for drones requires close cooperation between public authorities and private stakeholders. A distinction can be made between three main actors: the key, primary and secondary actors. Key actors are central to the implementation and have a direct influence on the decision-making processes (e.g., city council and air traffic control). Primary actors are directly involved in the planning processes (e.g., economic development agencies, authorities and organisations with security tasks), while secondary actors are indirectly involved in a supporting role (e.g., urban land-use organisations and environmental protection organisations). The allocation of individual organisations is not always clear and is sometimes fluid throughout the entire process.

The logistics concept includes take-off and landing sites for drones, known as vertihubs. These serve as transfer points between ground and air transport and must be planned considering existing infrastructure and urban planning requirements. It is therefore important to integrate the vertihubs into the urban planning. Planning essentially comprises the steps of project initiation, stakeholder analysis and evaluation planning, concept planning, design planning, site search, implementation planning, evaluation and adjustments. During these planning steps, an iterative planning process is recommended to take local circumstances and the interests of all stakeholders into account. During the planning process, attention should be paid to the search for a location and the associated land utilisation. Here, the various possible use cases should be weighed up and suitable use cases prioritised. The literature analysed showed a recurring concept that proposes installing vertihubs on the roofs of buildings whose space is currently unused (Daskiewicz, 2018; Fadhil, 2018; Lineberger, 2019; Kim et al., 2020; NUAR, 2021). This concept would not require any additional land or open spaces in urban areas.

Traffic effects

As part of the traffic effects, the number of vehicles, the number of vehicle trips, the accumulated mileage and the lost time stemming from the number of stops were calculated for the three modelled scenarios. The number of vehicles used was calculated as follows: The number of classic delivery vehicles results from the number of parcels to be transported according to the estimated demand, the average number of parcels delivered per CEP vehicle (approx. 120 parcels) and the delivery period per day (approx. 8 working hours). The number of drones required was calculated via the simulation using Gridcity. The "status quo" scenario results in a daily requirement of 726 e-trucks. In the "parcel stations" scenario, a reduction of 18 % in the total number of vehicles is to be expected. A total of 599 vehicles are therefore used, divided into 331 drones and 268 e-trucks. In the "direct delivery" scenario, a total of 785 vehicles are required, divided into 508 drones and 277 e-trucks. This means that the "direct delivery" scenario requires the most vehicles, which can be explained by the small payload of 5 kg of the small transport drone used and the associated continued high demand for ground-based e-trucks.

In terms of the number of vehicle trips (i.e., number of journeys) of the scenarios modelled, it can be seen that the "status quo" scenario requires the fewest journeys, as in this case all parcels can be transported with the help of one e-truck per journey. Consequently, the number of journeys in the "status quo" scenario corresponds exactly to the number of vehicles (i.e., 726). In the "parcel stations" scenario, a total of 9,793 journeys are made, 94.5 % of which are carried out with heavy-lift drones. Only 535 journeys are made with 268 e-trucks. This corresponds to a 26 % reduction in the number of journeys made by e-trucks compared to the "status quo"

scenario. In the "direct delivery" scenario, a total number of 31,244 journeys are made in order to be able to deliver the parcels to each customer almost individually. Here, 98.2 % of journeys are completed with smaller parcel drones, and the number of journeys with e-trucks is reduced by 24 %. In terms of the distance travelled by the vehicles (i.e., mileage), the "direct delivery" scenario achieves the longest accumulated vehicle distance at 190,380 km. This is due to the fact that each customer is delivered individually with the help of the small parcel drones. In this scenario, around 70% of the total mileage is covered by parcel drones. In the "parcel stations" scenario, an accumulated vehicle distance of 127,301 km is covered. A total of 67 % of the total mileage is covered by heavy-lift drones. In comparison, the e-trucks used in the "status quo" scenario cover a total of 137,700 km.

Another factor is the number of stops made by CEP vehicles and the resulting lost time on the road network. In the "status quo" scenario, a total of 31,198 stops are recorded, with the assumed minimum stop duration being 3 minutes. By using drones in the "parcel stations" scenario, the number of stops by CEP vehicles can be reduced to a total of 4,614. This reduces the loss times in the overall system by around 86 % compared to the "status quo" scenario. In the "direct delivery" scenario, an 82 % reduction in lost time can be observed compared to the "status quo" scenario. Even if the effects and local lost times of a single stop appear to be low, changes to the traffic flow are visible due to the large number of stops that are cancelled as a result of delivery by drone. Overall, the traffic impact on CEP traffic is considerable, but the impact on all ground-based (road) traffic is expected to be lower.

Road traffic safety

In terms of road safety, a total of 8,060 accidents with personal injury involving at least one CEP vehicle occurred in Germany in 2019 (Destatis, 2020). This corresponded to around 4 % of all accidents with personal injury. The introduction of drone deliveries could have an impact on these accident statistics. Depending on the scenario, the mileage of CEP vehicles decreases by 68 % or 58 %, which could potentially lead to a reduction in road accidents. On the other hand, the decrease in traffic volume could also lead to an increase in the traffic speed on the roads. As a result, accidents could become both more frequent and more serious (Schüller, 2009). No valid statement can be made at the present time. In general, road safety research in this area remains challenging, as there is currently a lack of empirical data on the interaction between drones and ground traffic. This gap makes it difficult to make well-founded statements about road safety in a changing delivery environment.

Safety of drone operations

In recent years, it has become apparent that future widespread drone operations could have an impact on public safety. One example of this is the impact on civil aviation caused by the unlawful use of drones. In the period from 2017 to 2019, there were five documented incidents caused by the use of drones at Frankfurt/Main airport (Naas, 2024). These incidents led to a total of 220 flights being cancelled. Another critical aspect of drone safety is the potential disturbance of people's privacy. Individual cases are known in which property owners have felt disturbed by the use of drones. However, this is not yet a widespread mass phenomenon. Technical faults or individual drone system failures also jeopardise the safety of drone applications. The probability of failure of non-certified components of a drone is estimated at around 10^{-3} compared to certified components at 10^{-9} in the aviation domain. However, it should be noted that regular maintenance intervals can reduce this probability of failure. With regard to collisions between drones and other aircraft, there have been few to no documented incidents in Germany to date. When it comes to the use of drones by authorities and organisations with security tasks, coordination difficulties between manned rescue helicopters and drone operators can often be observed. In

addition, the issue of spoofing and jamming, which involves the manipulation of GPS data, is of central importance for the safety of drones. Although no specific incidents relating to drones have been reported in Germany to date, there is still a risk that such threats could become relevant in the future. Overall, there are various challenges to be addressed with regard to the security of drone operations that could hinder commercial drone delivery operations.

Economic effects

When analysing the economic impact of drone operation on delivery traffic in the Aachen city region, the three cost types of fixed costs, variable costs and personnel costs were taken into account. The fixed costs include acquisition costs and infrastructure costs, while variable costs include repair costs, the use of airspace and the use of special services for drone operations. Personnel costs relate to the staff required to operate the CEP vehicles or drones. Classic ground-based CEP vehicles were assumed with a cost factor based on the data derived from IVECO Daily Electric (2016). Optimistic and pessimistic assumptions were made for the operation and maintenance of the drones for the two scenarios "parcel stations" and "direct delivery". The optimistic assumptions assume lower fixed costs for the purchase of the drones, lower repair costs and lower personnel costs for the operation of the drones compared to the pessimistic assumptions. The results of the analyses show that the use of drones in both modelled scenarios, considering optimistic and pessimistic assumptions, enables a cost reduction compared to transport with CEP vehicles. Noteworthy is the "parcel stations" scenario, which proves to be the most cost-effective scenario and achieves a reduction of 42 % compared to the "status quo". In general, the use of drones and the associated automation of part of the supply chain would likely lead to cost savings.

Effects on energy consumption

Various energy consumption analyses were carried out to assess the energy consumption impact on overall delivery traffic when using drones. The energy consumption of an e-truck can be determined at 0.4218 kWh/km based on the data of the IVECO Daily Electric (2016). The energy consumption of the drones used in the "parcel stations" and "direct delivery" scenarios was approximated by experimental flight tests and laboratory analyses (Gasche, 2023). In this analysis, however, weather influences such as wind and temperature could only be considered under ideal conditions, while the effects of the additional payload were only included in the calculations by means of a rough approximation. The results show that the "status quo" scenario has the highest energy consumption, while a 63 % reduction in energy consumption was achieved in the "parcel stations" scenario. In the "direct delivery" scenario, a reduction of 57 % was recorded compared to the "status quo" scenario. Notably, the "direct delivery" scenario resulted in higher energy consumption compared to the "parcel stations" scenario. This is due to the fact that the lower payload of the smaller parcel drones in the "direct delivery" scenario leads to a higher proportion of parcels in ground transport, which in turn increases the mileage of the e-trucks and the associated energy consumption. However, it should be noted that the validity of the findings should be further investigated, as the energy consumption was only approximately estimated.

Social acceptance

The societal and social acceptance of drones has already been analysed in numerous scientific studies. In this project, a literature analysis based on the PRISMA method was used to analyse, among other things, the "acceptance of drones". The results show that the intended use of drones has a strong influence on their acceptance (Eißfeldt et al., 2020). Search and rescue missions enjoy greater acceptance than commercial or recreational drone applications (Tan et al., 2021). In addition, several studies have shown that the population fears the violation of privacy

through the use of drones (Eißfeldt et al., 2020; Nelson et al., 2019; Grossi et al., 2020; Tan et al., 2021; Klauser & Pedrozo, 2017). In addition, several scientific studies have shown that the noise generated by drones has a negative effect on their acceptance (Ferreira & Kalakao, 2021; Walther et al., 2019; Lydinia, Philipsen & Zieffle, 2016; Chang & Chetty, 2017; Wang et al., 2016; Eißfeldt et al., 2020; Yedavalli & Mooberry, 2019). Finally, two studies were able to demonstrate a negative influence of visual pollution on acceptance (Ferreira & Kalakou, 2021; Boucher, 2016), whereas the concerns in two other studies were minor in this regard (Haddad et al., 2020; Grossi et al., 2020). Overall, it can be stated that the social acceptance of drones depends on several different factors and that these can also vary greatly from person to person. Nevertheless, the acceptance of drones in commercial applications is currently rather low among society.

Noise pollution

To model the noise impact of drone operations in this model region, the first step is to draw conclusions from noise levels determined from real flight tests of the drone models considered here. For the "parcel stations" scenario, a guaranteed sound power level of 101.0 dB(A) was assumed for the modelled heavy-lift drone. For the "direct delivery" scenario, a guaranteed sound power level of 99.0 dB(A) was assumed for the modelled small parcel drone. The continuous sound level was then calculated, considering the geometric and atmospheric attenuation, and the rating level was derived from this. No reflections and diffractions of the emitted sound through building geometries were considered; thus, the derived rating level is an approximation. Finally, the entire drone operation was simulated for both scenarios, with simultaneous operation of several drones at different heights. The results show that the noise exposure varies between 28.0 and 48.0 dB(A) over the majority of the area. In some places, especially at a few particularly busy drone take-off and landing sites, significantly higher noise levels occur, with peak values of up to 67.0 dB(A) in the "direct delivery" scenario. This indicates that the expected noise pollution due to a shift of transport routes from the ground to the air would probably exceed the immission guide value for daytime operations in residential, mixed and commercial areas, as specified in the Technical Instructions on Noise Abatement (BMUV, 2017) locally at the take-off and landing points. Such heavily frequented points would then only be conceivable in industrial areas. However, as the noise pollution here is mainly generated on the ground during take-off and landing, additional noise protection measures could be applied.

Visual impairment

The visual impairment caused by drone traffic is significantly influenced by two factors. Firstly, the probability of presence, meaning the probability that a drone will be visible in the sky at any given moment. Secondly, the maximum number of drones flying simultaneously in a given area, which is referred to as competition or simultaneity. In this analysis, the model region is divided into individual cells via a grid in order to determine the probability of presence and the competition of drones per cell. A cell is defined as a rectangle with dimensions of 0.005° longitude and 0.005° latitude, which corresponds to an area of approximately 0.2 km² (approx. 555 m north and 354 m east). The results of the study show that the probability of presence is highest at the vertihubs, with up to 43 % in one cell. This means that at least one drone would be visible in around 5 out of 12 hours. The 12 hours are the maximum theoretical operating time of the drones. In other areas, however, the probability of presence is well below 5 %. The greatest competition from drones can be observed in the vicinity of the vertihubs. In the vicinity of these vertihubs, a maximum of 8 drones are in one cell at the same time. However, mostly only 0 to 2 drones are present per cell at the same time. In addition, an operational flight altitude of more than 100 metres can be assumed during en-route flight, which, depending on the size of the

drones, will make them difficult to see. In view of the determined maximum probability of presence of 43 %, it is assumed that there is a perceived impairment.

Robustness of drone operation

A fundamental problem for the operation of drones in the selected model region is the existing weather conditions, which make the year-round operation of drones seem unrealistic. With the help of weather data from the German weather service (DWD), it was possible to make an initial assessment of the robustness of drone operations in the region. Safe and economically feasible drone operation was assumed to be essential. To summarise, it can be said that a cautiously pessimistic estimate of the use of the airspace over Aachen for drones can be made on the basis of the assessed data. According to this, drone operations can be carried out safely and economically on at least 89.0 % of the days and during 53.7 % of the available daylight hours. Periods lasting days or weeks in which drone operations are not possible have not been identified. Nevertheless, the analysis carried out shows that robust, year-round logistics operations using drones cannot be assumed for the assessed region. It should also be kept in mind that in the event of regional, national or even international disasters in which critical infrastructure is damaged or destroyed, commercial drone delivery transport would most likely be cancelled.

In addition, future drone traffic could also be influenced or disrupted by wilful and sometimes criminal acts, such as vandalism or acts of sabotage. Vandalism against drones often goes hand in hand with (at least) a perceived violation of the privacy of individuals. It should be borne in mind that invasion of privacy and "unauthorised recording" by optical sensors (e.g., cameras) is a criminal offence under section 201a of the German Criminal Code (StGB). As noted in the section "Safety of drone operations", individual cases in which the local citizens have taken wilful and violent action against drones are already known in Germany (Busch, 2022). With regard to possible acts of sabotage, it can be stated that without special security measures or special encryption technology, basically every part of the infrastructure, i.e., the take-off and landing sites, the communication network, the navigation system, the ground infrastructure, the U-space services and all persons involved, offers possible points of attack (Abro et al., 2022; Torens et al., 2021).

Final recommendation

The modelling and simulation results obtained show, on the one hand, that the use of drones in the logistics sector has advantages, particularly in terms of reducing transport costs and the potential for energy savings. On the other hand, however, the development of dual infrastructures, both for ground and air, is necessary to compensate for the limited robustness of drone operations. Furthermore, the operation of drones at vertihubs leads to additional noise pollution. A visual impact on the population is also likely. In addition, the low acceptance of commercial drone operations by the society poses a further challenge. In view of these factors, it is likely that drone operations will remain a niche application in Germany for the time being. Logistics transport using drones is conceivable for very (time-)critical goods (e.g., medical transport) or for remote regions (e.g., islands).

1 Einleitung

Das rapide Wachstum des E-Commerce hat zu einem Anstieg der Nachfrage nach städtischem Güterverkehr geführt, wodurch die Zahl der Lieferwagen und -transporter auf städtischen Straßen erheblich zugenommen hat (Allen et al., 2018). Dies führt zu vermehrten Verkehrsstaus, Luftverschmutzung und Lärmbelästigung in städtischen Gebieten. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, besteht ein wachsendes Interesse am Einsatz unbemannter Luftfahrzeuge (UAS) für den städtischen Güterverkehr. Im vorliegenden Dokument werden UAS auch als Drohnen bezeichnet, die Begriffe sind synonym zu verstehen.

In diesem Bericht werden die Ergebnisse einer Simulationsstudie über den Einsatz von UAS für den städtischen Güterverkehr in der Städteregion Aachen, Deutschland, vorgestellt. Ziel der Studie ist es, die Auswirkungen der Verlagerung eines Teils des städtischen Güterverkehrsaufkommens von Kraftfahrzeugen auf Drohnen zu untersuchen und das Potenzial und die Hemmnisse des Einsatzes von Drohnen für den städtischen Güterverkehr zu bewerten.

Die systematische Untersuchung umfasst zunächst eine Durchsicht von akademischer Literatur, Industrieberichten und politischen Dokumenten und dient als Grundlage für die Entwicklung des in dieser Studie verwendeten Simulationsmodells. Die Untersuchung liefert Einblicke in den aktuellen Stand der Forschung zum Einsatz von UAS im städtischen Güterverkehr, einschließlich der technologischen und regulatorischen Herausforderungen, die mit ihrem Einsatz verbunden sind. Aus der systematischen Literaturanalyse fließen die Ergebnisse in die Annahmen und Daten der anschließend verwendeten Simulationsmodelle ein und tragen dazu bei, dass die Simulationsstudie zum Einsatz von UAS im städtischen Güterverkehr realistisch ist. Die Simulation wird mit einem Modell durchgeführt, das ein bodengestütztes und ein luftgestütztes Verkehrsnachfragemodell kombiniert. Das bodengestützte Modell berücksichtigt sowohl den Personen- als auch den Güterverkehr, während sich das luftgestützte Modell speziell auf die Nachfrage nach UAS für den städtischen Güterverkehr konzentriert.

Die Ergebnisse der Modellierung und Simulation geben Hinweise darauf, welche Chancen und Risiken ein zukünftiger Droneneinsatz zur Paketlieferung haben könnte. Hierbei werden verschiedene Themenfelder detaillierter untersucht, um Erkenntnisse zu u. a. den verkehrlichen, ökonomischen, energetischen und sozialen Auswirkungen einer möglichen Verlagerung des städtischen Güterverkehrs vom Boden in die Luft zu analysieren. Zudem werden Untersuchungen zu den rechtlichen Rahmenbedingungen eines kommerziellen, städtischen Dronenbetriebs unternommen und dessen Möglichkeit zur städtebaulichen Einbindung analysiert. Aus den gewonnenen Ergebnissen können anschließend initiale Handlungsempfehlungen abgeleitet werden, die bei einer möglichen, zukünftigen Realisierung eines kommerziellen Dronenbetriebs zur Paketlieferung im städtischen Gebiet berücksichtigt werden könnten. Dabei richtet sich der vorliegende Bericht vornehmlich an Vertreterinnen und Vertreter der (Verkehrs-)Politik, der Stadtentwicklung, der Bauämter und Stadtplanerinnen und Stadtplaner sowie an Vertreterinnen und Vertreter des Logistiksektors und der Dronenherstellung. Zudem sollen durch diesen Bericht auch Umweltverbände, Gesetzgeberinnen und Gesetzgeber und die breite Bevölkerung angesprochen werden.

Der Bericht beginnt zunächst mit der Untersuchung der aktuellen Rahmenbedingungen zur unbemannten Luftfahrt, insbesondere zu den Themen Akzeptanz von Dronen, Start- und Landeplätzen, rechtliche Rahmenbedingungen sowie mögliche Belieferungskonzepte und Gütersegmente (Kapitel 2). Darauf folgen die eigentliche Modellentwicklung und Simulation des Personen- und Güterverkehrs am Boden und in der Luft, wodurch die unterschiedlichen Auswirkungen analysiert werden konnten (Kapitel 3). Abschließend werden die Ergebnisse zu den Chancen und Risiken der unbemannten Luftfahrt zusammengefasst (Kapitel 4).

2 Analyse allgemeiner Rahmenbedingungen für die unbemannte Luftfahrt

Bei der systematischen Literaturanalyse zur Akzeptanz von Drohnen (Kapitel 2.1) sowie bei der Literaturanalyse zur städtebaulichen Einbindung von Start- und Landeplätzen (Kapitel 2.2) wurde das *Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) Verfahren verwendet. Hierbei handelt es sich um eine evidenzbasierte Anwendung zur Anfertigung von systematischen Übersichten, die als Publikationsstandard angesehen werden kann (Moher et al, 2011). Des Weiteren werden die boden- und luftseitigen rechtlichen Rahmenbedingungen für den Betrieb von Drohnen erörtert (Kapitel 2.3) und verschiedene potenzielle Belieferungskonzepte, die den Einsatz von Drohnen vorsehen, diskutiert (Kapitel 2.4). Zu guter Letzt wird in diesem Kapitel 2 eine Potenzialanalyse von Gütersegmenten, die für den Einsatz von Drohnen sinnvoll wären, durchgeführt (Kapitel 2.5).

Bei dem zunächst angewandten PRISMA-Verfahren werden typischerweise folgende Prozessschritte durchgeführt:

1. Forschungsfrage erarbeiten
2. Suchstrategie erarbeiten
3. Ein- und Ausschlusskriterien definieren
4. Suchstring erarbeiten
5. Suchzeitraum definieren
6. Elektronische Datenbanksuche
7. Title- und Abstract-Screening
8. Volltextbeschaffung
9. Volltext-Screening
10. Händische Suche & Inkludierung
11. Daten- / Informations-Extraktion der inkludierten Publikationen/Studien inklusive Qualitätsbewertung
12. Ergebnisse und Diskussion

2.1 Akzeptanz von Drohnen

Zunächst wurde die **Forschungsfrage** definiert. Grundsätzlich hängt die Akzeptanz von Drohnen in der Bevölkerung von vielen verschiedenen Faktoren ab. Um die Literaturanalyse einzuschränken, wurde in der Literaturanalyse zur Akzeptanz von Drohnen das Hauptaugenmerk auf zwei explizite Akzeptanzfaktoren gelegt. Diese beiden Akzeptanzfaktoren sind:

- Visuelle Beeinträchtigung
- Akustische Beeinträchtigung

Folglich wird im Nachfolgenden die Forschungsfrage auch wie folgt formuliert:

„Inwiefern beeinflussen visuelle und akustische Beeinträchtigungen, hervorgerufen durch Drohnen, deren gesellschaftliche Akzeptanz in der Bevölkerung?“

Anschließend wurde die **Suchstrategie** ausgearbeitet. Eine systematische Literaturanalyse beruht auf der sinnvollen Auswahl geeigneter Suchbegriffe, die die entwickelte Forschungsfrage allumfassend berücksichtigen. Im vorliegenden Fall wurden sowohl die gewählten Drohnenbegriffe als auch die Akzeptanzbegriffe in einem iterativen Prozess gefunden. Dies bedeutet, dass einige der letztendlich ausgewählten Drohnen- und Akzeptanzbegriffe bereits vor der finalen Literaturrecherche probeweise in verschiedenen Datenbanken verifiziert wurden. Die

untersuchten Drohnenbegriffe sind in Tabelle 1, die untersuchten Akzeptanzbegriffe sind in Tabelle 2 aufgelistet. Hierbei verdeutlicht das Sternchen (*), dass alle Wörter mit den vorherigen Anfangsbuchstaben in der Suche berücksichtigt wurden.

Tabelle 1: Drohnenbegriffe

Drohnenbegriffe				
Drohne	Drone	Unmanned air*	Unmanned aer*	Air taxi
Personal Air Vehicle*	PAV	UAV	UAM	UAS
UTM	RPA	Quadcopter	Multicopter	multirotor
Unbemannte Luft*	Unbemannte Flug*	Lufttaxi	Urban Air Mobility	Urban Air Taxi

Tabelle 2: Akzeptanzbegriffe

Akzeptanzbegriffe				
Annoy*	Affectiv*	Stress*	Health*	Accident*
Injur*	Incident*	Ärger*	Affektiv*	Gesundheit*
Accept*	Akzept*	Percept*	Wahrgenommen*	Perceiv*
Wahrnehmung*	Concern*	Sorg*	Opinion*	Meinung*
Intention*	Absicht*	Verletzt*		

Danach wurden **Ein- wie auch Ausschlusskriterien** definiert, um den Umfang der Literatursuche in einem sinnvollen Rahmen zu halten. Als Einschlusskriterien wurden folgende Faktoren definiert:

- ▶ (ausschließlich) deutsch- und englischsprachige Publikationen
- ▶ Drohnenbegriffe im Titel (vgl. Tabelle 1)
- ▶ Akzeptanzbegriffe im Titel, Abstract und in Keywords (vgl. Tabelle 2)

Daraufhin wurden folgende Faktoren als Ausschlusskriterium definiert:

- ▶ Keine Publikationen mit einem Erscheinungsjahr älter als das Jahr 2009
- ▶ (ausschließlich) Suche nach Drohnen- und Akzeptanzbegriffen, wie in Tabelle 1 und Tabelle 2 aufgeführt

Anschließend wurden folgende **elektronische Datenbanken** bei dieser systematischen Literaturanalyse verwendet:

- ▶ SCOPUS (<https://www.scopus.com>)
- ▶ Web of Science (<https://www.webofscience.com>)
- ▶ PubMed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov>)

Für jede der drei elektronischen Datenbanken musste ein eigener **Suchstrang** entwickelt werden. Dabei wurden die Drohnen- sowie Akzeptanzbegriffe, wie sie in Tabelle 1 und Tabelle 2

dargelegt sind, verwendet. Konkret wurde nach Akzeptanzbegriffen im Zusammenhang mit Drohnenbegriffen gesucht (d. h. Drohnenbegriffe AND Akzeptanzbegriffe). Somit unterscheiden sich die drei entwickelten Suchstränge rein in ihrem formalen Aufbau, angepasst auf die jeweilige Datenbank, jedoch nicht in ihren Suchbegriffen.

Das **Titel-, Abstract- und Volltext-Screening** wurde mit Hilfe des Literaturverwaltungsprogramms Citavi 6 durchgeführt. Alle gefundenen Publikationen wurden in das Literaturverwaltungsprogramm geladen und dort gescreent. Insgesamt wurden am Stichtag 14.02.2022 8.888 Publikationen mit den im Anhang A.1 hinterlegten Suchsträngen gefunden. Davon wurden 3.219 Duplikate identifiziert und von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Somit wurden insgesamt 5.669 Publikationen einem gründlichen Titel- und Abstract-Screening unterzogen. Nach erfolgtem Screening blieben noch 41 Publikationen übrig, die im Sinne der Fragestellung ein erhöhtes Interesse hervorgerufen haben. Bei diesen 41 Publikationen wurde ein Volltext-Screening durchgeführt. Ziel des Volltext-Screenings war es, die für die Fragestellung der Literaturanalyse relevanten Publikationen final zu identifizieren und gegebenenfalls fragliche Publikationen auszuschließen. Nach erfolgtem Volltext-Screening wurden insgesamt noch 8 Publikationen entfernt. Die Gründe für den Ausschluss sind mannigfaltig:

- ▶ Erscheinungsjahr (n =1)
- ▶ Distanzmessung zur optimalen Interaktion zwischen Drohne und Mensch ohne Akzeptanzbezug (n =1)
- ▶ Modellierung der Geräuschenwicklung ohne Akzeptanzbezug (n =2)
- ▶ Duplikat, obwohl Abstract-Formulierung unterschiedlich war (n = 1)
- ▶ Drohnen im Gesundheitswesen ohne Akzeptanzbezug (n = 1)
- ▶ Studienmethoden zweifelhaft (n =2)

Händisch wurden keine weiteren Publikationen der Literaturanalyse hinzugefügt.

Folgend werden die Ergebnisse der ausgearbeiteten Literaturanalyse zur Akzeptanz von Drohnen beschrieben. Dabei wird zunächst die allgemeine gesellschaftliche Akzeptanz von Drohnen beleuchtet. Anschließend wird ein spezifischer Blick auf visuelle und akustische Beeinträchtigungen, hervorgerufen durch Drohnen, gelegt und die Auswirkung dieser Faktoren auf die gesellschaftliche Akzeptanz erörtert. Zu guter Letzt werden weitere Akzeptanzfaktoren wie beispielsweise Aspekte der Privatsphäre oder Sicherheitsbedenken analysiert.

2.1.1 Allgemeine gesellschaftliche Akzeptanz von Drohnen

Die allgemeine gesellschaftliche Akzeptanz von Drohnen ist Forschungsgegenstand zahlreicher Publikationen. In einer bevölkerungsrepräsentativen Befragung von Eißfeldt et al. (2020) mit 832 Teilnehmerinnen und Teilnehmern in Deutschland teilt sich die Gesellschaft in 42 %, die eher positiv gegenüber Drohnen eingestellt sind, und ebenfalls 42 % mit einer eher negativen Einstellung. In der Befragung stellte sich das Geschlecht von Personen als ein Akzeptanzfaktor heraus. Demnach wurde bei Männern durchschnittlich eine höhere Akzeptanz als bei Frauen verzeichnet. Frauen haben bezüglich des Einsatzes von Drohnen noch größere Bedenken. Eine Untersuchung von Reddy & DeLaurentis (2016a) findet insbesondere bei Männern unter 36 Jahren eine stärkere Zustimmung. Studien von Ferreira und Kalakou (2021) sowie dem Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft (BDL, 2016) bestätigen die identifizierten Geschlechterunterschiede der zuvor erwähnten Publikationen. Einen möglichen Grund für diese Beobachtungen liefert eine Untersuchung von Klauser und Pedrozo (2017). In dieser gaben

16 % der männlichen Teilnehmer an, dass sie bereits Erfahrungen mit Drohnen gemacht haben, wohingegen lediglich 1,8 % der weiblichen Teilnehmerinnen bereits entsprechende Erfahrungen besitzen. Eißfeldt et al. (2020) identifizierten in ihrer Befragung, dass Männer ein höheres Interesse an Technik besitzen und sich auch besser über Drohnen informiert fühlen. Die Studie von Eißfeldt et al. (2020) identifizierte außerdem einen hohen Bildungsgrad sowie ein höheres Einkommen der Befragten als weitere Faktoren, die zu einer hohen Akzeptanz beitragen. Gemäß einer Umfrage von Lydinia, Philipsen & Zieflle (2016) zeigte sich generell, dass Probandinnen und Probanden ohne Erfahrungen mit Drohnen eher viele Bedenken bezüglich der Nutzung sowie eine generelle Ablehnung gegenüber autonom fliegenden Drohnen haben.

Eine Studie von Grossi et al. (2020), welche mit insgesamt 45 Probandinnen und Probanden in den USA durchgeführt wurde, kam zu dem Ergebnis, dass die Teilnehmerinnen und Teilnehmer bereits über ein gutes Wissen über Drohnen verfügen. Eine andere Studie von Clothier et al. (2015) hingegen aus Australien stellte fest, dass die australische Bevölkerung noch nicht besonders gut über Drohnen informiert ist und eine eher neutrale Einstellung aufweist. Die Probandinnen und Probanden der Studie zeigten sich jedoch sehr interessiert an der Thematik. Eine Forschungsarbeit von Yedavalli & Mooberry (2019) ergab, dass es einen Unterschied macht, wo Drohnen fliegen. So würden Personen Drohnen wohl eher befürworten, wenn sie über dünn besiedelten Gebieten fliegen. Zudem verzeichnete die Studie positivere Meinungen gegenüber Drohnen bei der Stadtbevölkerung im Vergleich zur Landbevölkerung und bei jüngeren und wohlhabenderen Personen. Oltvoort et al. (2019) bemerkten, dass die wahrgenommene Transparenz der Stadt über die Dronennutzung einen positiven Effekt auf die Akzeptanz hat. Vertrauen in die Stadt und die eigene Kontrollwahrnehmung haben sich hierbei als mediierende Faktoren ergeben. Zudem fand eine neuere Studie heraus, dass die Akzeptanz von zivil genutzten Drohnen in Deutschland steigt und immer mehr Personen im Vergleich zum Jahre 2019 eine eigene Drohne besitzen, was die Akzeptanz weiter begünstigen könnte (VUL, 2022). Weitere Akzeptanzfaktoren in Bezug auf Drohnen konnten in einer Studie von Reddy & DeLaurentis (2016b) ausfindig gemacht werden. Hier zeigten sich insbesondere wahrgenommene Risiken (z. B. Kollision, Privatsphäre), Vorteile (z. B. Sicherheit, Effizienz, Kosten), Nutzungsgrund, Nutzungsgebiet, Dronencharakteristika sowie Kosten in der Herstellung und Nutzung als maßgebliche Einflussparameter. Nelson et al. (2019) untersuchten, wie Personen die Berichterstattung über Drohnen in den Medien wahrnehmen. Ein Drittel der Probandinnen und Probanden gaben an, dass über Drohnen weder positiv noch negativ in den Medien berichtet wurde, und 45 % der Befragten nahmen die Berichterstattungen eher positiv wahr.

2.1.2 Ergebnisse zur visuellen Beeinträchtigung

Eine Umfrage von Ferreira und Kalakou (2021) in Lissabon hat ergeben, dass visuelle Verschmutzung im Sinne von neuen Objekten am Himmel einen negativen Effekt auf die Akzeptanz von Drohnen hat. In einer Fokusgruppenstudie von Boucher (2016) in England und Italien tätigten Probandinnen und Probanden die Aussage, dass sie nicht ständig daran erinnert werden möchten, überwacht zu werden. Bei den Teilnehmerinnen und Teilnehmern herrschte das allgemeine Gefühl, dass sie ihre Privatsphäre schon vor längerer Zeit verloren haben. Aus diesem Grund sollten Drohnen ihrer Ansicht nach wenigstens nicht immer präsent sein. Andererseits merkten die Probandinnen und Probanden auch an, dass Drohnen aufgrund ihrer potenziell abschreckenden Wirkung zur Sicherheit beitragen könnten.

In zwei Umfragen aus Deutschland und den USA hingegen hatten nur sehr wenige der Befragten Bedenken bezüglich der visuellen Beeinträchtigung durch Drohnen geäußert (Haddad et al., 2020; Grossi et al., 2020). Die Befragung von Grossi (2020) fand im Rahmen von Flugtests statt. Folglich unterscheidet sich diese Studie von den anderen darin, dass die Probandinnen und

Probanden reale Drohnenflüge im Rahmen der Untersuchung gesehen haben. Hieraus ergibt sich die Frage, ob sich Bedenken hinsichtlich der visuellen Beeinträchtigung ändern, wenn Personen Drohneneinsätze tatsächlich erleben.

Zwei weitere Studien beschäftigten sich mit der allgemeinen Erkennbarkeit von Drohnen. In einer Untersuchung von Aydin (2019) in Singapur mit 1.050 Befragten hatten mehr als die Hälfte der Probandinnen und Probanden in einem Bildertest Schwierigkeiten zu erkennen, ob es sich um eine Drohne oder ein unbemanntes Flugobjekt handelt. Auch in einer Interviewstudie von Wang et al. (2016) in den USA gaben die 16 Teilnehmerinnen und Teilnehmer an, dass sie es schwer fänden Drohnen, zu erkennen. In dieser Studie wurde eine DJI-Kameradrohne als Schauobjekt verwendet.

Eine bevölkerungsrepräsentative Befragung in Deutschland (Eißfeldt et al., 2020) mit 832 Teilnehmerinnen und Teilnehmern ergab, dass die Akzeptanz gegenüber Drohnen unter anderem von deren Design abhängen könnte. Gemäß einer Fragebogenstudie von Lydinia, Philipsen & Ziefler (2016) mit 200 Befragten, welche ebenfalls in Deutschland durchgeführt wurde, wird von Probandinnen und Probanden gefordert, dass kommerzielle und zu Sicherheitszwecken genutzte Drohnen eindeutig erkennbar gestaltet sein sollen. Für Hobbydrohnen hingegen ist laut Aussagen der Befragten keine Erkennung erforderlich.

2.1.3 Ergebnisse zur akustischen Beeinträchtigung

Grundsätzlich berichten mehrere Publikationen, dass die Geräuschentwicklung von Drohnen einen negativen Effekt auf deren Akzeptanz in der Bevölkerung hat. Als Beispiel sind hier die Publikationen von Ferreira & Kalakou (2021), Walther et al. (2019), Lydinia et al. (2016), Chang et al. (2017) sowie Wang et al. (2016) zu nennen. Konkret berichten auch Eißfeldt et al. (2020), dass 53 % der Probandinnen und Probanden in ihrer Studie Bedenken wegen der Geräuschentwicklung von Drohnen haben. Zu sehr ähnlichen Ergebnissen kommt auch die Studie von Yedavalli und Mooberry (2019), in der 49 % der Befragten große Bedenken bzgl. der Geräuschart und 48 % der Befragten bzgl. der Lautstärke von Drohnen äußerten. Nur Grossi et al. (2020) widersprechen als einzige der in diesem Literaturreview eingeschlossenen Publikationen den zuvor genannten Erkenntnissen. Torija, Li & Self (2020) finden in ihrer Untersuchung heraus, dass die Probandinnen und Probanden eine geringere Belästigung durch Drohnen empfinden, wenn zusätzlich zu den akustischen auch visuelle Stimuli präsentiert werden. Zudem werden Drohnen als weniger störend empfunden in Szenarien, in denen grundsätzlich mehr Reizquellen vorhanden sind, wie zum Beispiel an einer stark befahrenen Kreuzung. Andere Geräuschquellen scheinen die Dronengeräusche teilweise zu maskieren. Ein weiteres Experiment von Torija (2021), in dem die Probandinnen und Probanden Dronengeräuschen verschiedener Manöver (z. B. Starten, Steigen, Überflug) aus unterschiedlicher Entfernung ausgesetzt sind, identifiziert die Lautstärke sowie Schärfe und Fluktuation des Geräusches als starke Prädiktoren für empfundene Belästigung. Darüber hinaus werden Drohnen als weniger störend wahrgenommen, je weiter weg sie sich befinden.

Die Ergebnisse einer Studie von Aalmoes & Sieben (2021), bei denen Hovern und Überflug-Manöver evaluiert werden, zeigen im Gegensatz zu der Untersuchung von Torija, Li & Self (2020) keine signifikanten Unterschiede in der empfundenen Belästigung durch Drohnen. Gefunden werden Unterschiede zwischen ausschließlich akustischen und visuell-akustischen Stimuli. Auch werden keine Unterschiede zwischen lauteren (z. B. Straßen oder Kreuzungen mit fließendem und hohem Verkehrsaufkommen) und leiseren Straßen (z. B. Straßen mit wenig Verkehr) gefunden. Dies steht ebenfalls im Gegensatz zu den Ergebnissen aus Torijas Studie. Weiterhin werden verschiedenen Flugmanöver miteinander verglichen und es stellte sich heraus, dass Hovern als störender empfunden wird als ein Überflug. Hierbei untersucht Torija, Li & Self (2020) nur

Hovern in sieben verschiedenen Umgebungen und mit unterschiedlichen Lautstärken. Drohengeräusche werden zudem mit anderen Geräuschen verglichen, wobei Helikopter als am wenigsten belästigend empfunden werden, gefolgt von Drohnen. Rasenmähergeräusche werden als am störendsten wahrgenommen. Die Studie fand eine Interaktion zwischen visueller Wahrnehmung und Vehikeltyp. Demnach verändert sich die empfundene Belästigung mit einer Veränderung der visuellen Wahrnehmung. Dieses Ergebnis trifft jedoch nur auf den Rasenmäher zu. Vorhandene Einstellungen gegenüber Drohnen haben sich in der Studie als signifikanter Prädiktor für allgemeine Belästigung durch Drohnen erwiesen. Des Weiteren untersuchen Torija et al. (2021) Flugmanöver wie Starten, Steigen, Überflug und Landen, wobei die erlebten Tonhöhen, Generativität und Lautstärke mit zunehmender Distanz der Drohnen verringerte. Zudem konnte gezeigt werden, dass Lautstärke, Schäfte und Fluktuation keine starken Prädiktoren für Generativität sind.

Wang et al. (2016) schlussfolgert aus ihrer Untersuchung, dass sich ihre Probandinnen und Probanden besonders durch Nachtflüge gestört fühlen und damit eine deutliche Begrenzung der Drohnenaktivitäten während der Nachtstunden für die Akzeptanz von Drohnen förderlich wäre. In einer ähnlichen Weise berichten Haddad et al. (2020) in ihrer Studie, dass eine konkrete Begrenzung der Geräuschentwicklung verursacht durch Drohnen gefordert wird. In einer Studie von Gwak, Han und Lee (2021) scheint die wahrgenommene Belästigung mit der Größe der Drohnen zuzunehmen. Kleine Drohnen werden demnach als weniger störend empfunden als größere. Dieser Befund wird mit der schwächeren Tonalität kleinerer Drohnen erklärt. Verglichen mit herkömmlichen Flugzeuggeräuschen, verursachen Drohnen in dieser Studie eine größere Belästigung.

Forschungsergebnisse von Hui et al. (2021) weisen darauf hin, dass die Beziehung zwischen empfundener Belästigung und Dronentyp, Flughöhe sowie Flugmodus komplex ist. Generell stellte sich in der Studie heraus, dass Drohnen in geringen Flughöhen als störender empfunden werden verglichen mit höheren. Es wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen Drohnen mit und ohne Payload gefunden. Bezuglich des Flugmodus zeigen die Ergebnisse eine starke Korrelation in der Belästigung zwischen Hovern und Vorbeifliegen. Hieraus wurde abgeleitet, dass es in zukünftigen Studien womöglich ausreichend wäre nur einen der beiden Flugmodi zu untersuchen. Am unangenehmsten wurden die Geräusche einer Drohne vom Typ Tello beim niedrigen Vorbeifliegen empfunden, verglichen mit den Typen Mavic, Phantom und Matrice. Ähnlich wie in der Studie von Callanan (2020) wurde zudem untersucht, wie sehr Dronengeräusche kognitiv ablenken. Die Ergebnisse hierzu sind jedoch uneindeutig, da die Ergebnisse eines hearing in noise tests sowie eines alphanumerischen Zifferntests bei allen Probandinnen und Probanden sehr gut ausfielen und der Effekt von Dronengeräuschen daher schwierig zu identifizieren ist. Zukünftige Studien sollten andere kognitive Tests verwenden.

Ein Experiment von Stolz et al. (2023) ergab, dass sich Personen durch Drohnen am ehesten in einem Park oder Wohngebiet gestört fühlen, verglichen mit einem Gewerbegebiet und einer Hauptstraße. Dies wurde darauf zurückgeführt, dass insbesondere in diesen simulierten Szenarien kleine Dronentypen sehr präsent waren und niedrig geflogen sind. Die Probandinnen und Probanden äußerten in Interviews nach Betrachten der vier Szenarien, dass kleine Drohnen durch ihren geringen Abstand stärker hörbar waren und eine umringende Wirkung hatten. Insbesondere Renn- und Filmdrohnen wurden als sehr störend empfunden, da sie das Gefühl von Beobachtung vermittelten. Als weiterer Grund, warum Drohnen im Park und Wohngebiet als störender empfunden werden, wurde angegeben, dass man sie insbesondere im Park nicht erwarten würde, weil dies Erholungsgebiete sind. Dagegen würde man Drohnen in Gewerbegebieten eher erwarten und diese dort auch als nützlicher empfinden. Weiterhin herrscht dort gewöhnlicherweise eine höhere allgemeine Geräuschkulisse, sodass Drohnen weniger stören

würden. Diese Aussage ist im Einklang mit den Ergebnissen aus Torijas Studie (2020), wo Drohnen in lauteren Umgebungen als weniger störend wahrgenommen wurden.

Eine Studie von Callanan et al. (2020) untersuchte, ob der Einsatz von Drohnen in Arbeitsumfeldern beeinträchtigend wirken könnte. Hierzu erhielten die Probandinnen und Probanden die Aufgabe, verschiedene Sätze unter dem Einfluss von nahegelegenen Dronengeräuschen zu verstehen. Die Ergebnisse zeigen, dass vor allem kurze Phrasen sowohl bei hohen als auch tiefen von Drohnen verursachten Umgebungsgeräuschen richtig wiedergegeben werden konnten. Grundsätzlich hängt es laut der Untersuchung stark vom Schalldruckpegel ab, ob Personen genau wiedergeben können was sie gehört haben. Die Distanz der Drohnen zur hörenden Person spielt eher weniger eine Rolle.

2.1.4 Ergebnisse zu weiteren Akzeptanzfaktoren

Privatsphäre

Mehrere Studien zeigen, dass die Bevölkerung in Hinblick auf Drohnen mitunter am stärksten eine Verletzung der Privatsphäre fürchtet (Eißfeldt et al., 2020; Nelson et al., 2019; BDL, 2022; Grossi et al., 2020; Tan et al., 2021; Klauser & Pedrozo, 2017). Die Untersuchung von Tan et al. (2021) fand heraus, dass Bedenken bezüglich der Privatsphäre von der Aktivität und dem Kontext abhängen. So finden die Probandinnen und Probanden, dass Drohnen im öffentlichen Raum die Privatsphäre weniger beeinträchtigen als in anderen Situationen.

Gemäß einer Befragung mit 2 108 Teilnehmerinnen und Teilnehmern von Nelson et al. (2019) in den USA werden Hobbydrohnen und Drohnen, welche von der Regierung eingesetzt werden, als größte Bedrohung für die Privatsphäre wahrgenommen. Insbesondere wird erwähnt, dass die Regierung Drohnen nicht verantwortungsbewusst einsetzen könnte. Anzumerken ist jedoch, dass in dieser Untersuchung auch Drohnen, die für militärische Zwecke genutzt werden sollen, berücksichtigt wurden. Die meisten Probandinnen und Probanden sind zudem nicht der Ansicht, dass es bereits genügend Regularien zum Schutz der Privatsphäre in Bezug auf Drohnen gibt. Die Studie fand weiterhin heraus, dass die Probandinnen und Probanden, welche schon Berührungs-punkte und Erfahrungen mit Drohnen haben, weniger Bedenken dahingehend haben, dass ihre Privatsphäre durch Drohnen beeinträchtigt werden könnte.

Es existiert jedoch eine Workshop-Studie mit 66 Teilnehmerinnen und Teilnehmern von Cetin et al. (2022) aus Spanien, in der hingegen nur 9 % der Befragten eher weniger Bedenken bezogen auf die Privatsphäre äußerten.

Sicherheit

Eine weitere Sorge, die im Zusammenhang mit Drohnen häufig geäußert wird, bezieht sich auf die Sicherheit (Ferreira & Kalakou, 2021; Eißfeldt et al., 2020; Nelson et al., 2019; Yedavalli & Mooberry, 2019; BDL, 2022; Grossi et al., 2020; Cetin et al., 2022; Tan et al., 2021; Chang & Chetty, 2017; Walther et al., 2019; Burukina & Khavanova, 2019; Haddad et al., 2020). So wird beispielsweise befürchtet, dass Drohnen für kriminelle Zwecke missbraucht (Eißfeldt et al., 2020; Tan et al., 2021; PytlkZillig, 2018), abstürzen und jemanden verletzen könnten (Chang & Chetty, 2017) sowie, dass Cyber Security einen kritischen Aspekt darstellt (Cetin et al., 2022). Gemäß der Studie von Ferreira und Kalakou (2021) haben Frauen größere Sicherheitsbedenken als Männer. Zudem wurde allgemein ein höheres Sicherheitsgefühl beim Autofahren im Vergleich zu Urban Air Mobility (UAM) berichtet. Die Studie fand weiterhin heraus, dass sich die Bedenken verringern, je mehr Erfahrungen Personen mit Urban Air Mobility haben. In einer Befragung von Nelson et al. (2019) kam heraus, dass die größten Bedenken in Hinblick auf Sicherheit bei Flügen über Häusern herrschen. Eine Umfrage des Bundesverbandes der Deutschen Luftverkehrswirtschaft (BDL, 2022) identifizierte weiterhin Sicherheitsbedenken bezogen auf Drohnen für den

konventionellen Luftverkehr. Die Befragten der Studie sind der Ansicht, dass der Staat verstärkt Maßnahmen ergreifen sollte, um zivile Flugzeuge vor Drohnen zu schützen.

Im Gegensatz zu den beschriebenen Studien konnte eine Mixed-Method-Studie von Clothier et al. (2014) mit insgesamt 710 Befragten in Australien keine besonderen Bedenken bezüglich möglicher Sicherheitsrisiken durch Drohnen feststellen. In der Studie wurden Risiken durch Drohnen nicht höher eingeschätzt als zum Beispiel durch Flugzeuge oder andere Technologien (z. B. autonome Fahrzeuge), welche dieselben Aufgaben wie Drohnen übernehmen können.

Nutzungsaspekte („Use-case“) und Nutzungsbereitschaft

Laut einer Untersuchung von Tan et al. (2021) unterscheidet sich die allgemeine Akzeptanz von Drohnen hinsichtlich verschiedener Einsatzzwecke. In der Studie befürworteten die Befragten den Einsatz für industrielle Zwecke sowie Dronennutzung durch den Staat, beispielsweise für Suche und Bergung, stärker als für kommerzielle und freizeitbezogene Anwendungen.

Studien des BDL (2022) und von Eißfeldt et al. (2020) ergaben, dass die gesellschaftliche Akzeptanz von Drohnen für Aufgaben, welche als nützlich für die Bevölkerung empfunden werden, am höchsten ist. Hierzu zählen beispielweise Hilfseinsätze und Rettungsmissionen, Überwachung von Industrieanlagen und wissenschaftliche Anwendungsbereiche. Die geringste Akzeptanz hingegen wurde für Einsatzzwecke wie Paketzustellung, Foto- und Videoaufnahmen, Hobbynutzung und Lufttaxis beobachtet. Im Gegensatz dazu kommt die Interviewstudie von Wang et al. (2016) zu dem Fazit, dass Personen in Hinblick auf kommerzielle Anwendungen von Drohnen im Bereich Transport und Lieferung die wenigsten Bedenken haben. Dies erklärt sich dadurch, dass ProbandInnen der Studie hierin einen Nutzen für sich selbst sehen. Hierbei ist zu erwähnen, dass die Studie von Wang et al. (2016) im Gegensatz zu den anderen beschriebenen Studien einen qualitativen Forschungsansatz verwendet, eine kleine Stichprobe aufweist und in den USA durchgeführt wurde. Die anderen Forschungsarbeiten stammen aus Deutschland (Eißfeldt et al., 2020) und Singapur (Tan et al., 2021).

Yedavalli & Mooberry (2019) verglichen die allgemeine Nutzungsbereitschaft von Urban Air Mobility in vier verschiedenen Ländern. Die Ergebnisse zeigen die höchste Nutzungsbereitschaft von 33 % in Mexiko (Mexiko-City) gefolgt von Amerika (Los Angeles) mit 23 %. Die geringste Bereitschaft, Urban Air Mobility zu nutzen, wurde in der Schweiz (15 %) und Neuseeland (12 %) verzeichnet. Die Ergebnisse ergaben auch, dass die wahrgenommene Bequemlichkeit von Urban Air Mobility-Services ein wesentlicher Faktor für die Nutzungsbereitschaft ist. Cetin et al. (2022) und Keller et al. (2021) legten in ihren Studien einen besonderen Fokus auf die Nutzungsbereitschaft von Lufttaxis. Cetins Untersuchung ergab eine Nutzungsbereitschaft von 63 %. Damit liegt sie mit einer deutlichen Mehrheit recht hoch, fällt im Vergleich zur Nutzungsbereitschaft von Lieferdrohnen (89 %) allerdings wesentlich geringer aus. In Kellers Studie würde die Hälfte der Probandinnen und Probanden Lufttaxis als Transportmittel nicht als erste Wahl in Betracht ziehen. Zumindest könnte sich die Hälfte jedoch vorstellen, mindestens einmal ein Lufttaxi zu nutzen. Für die andere Hälfte der Befragten käme sogar eine häufigere Nutzung infrage.

Gemäß der Fokusgruppenstudie von Boucher (2016) wird der militärische Einsatz von Drohnen stärker akzeptiert als der Einsatz für öffentliche und private Zwecke. Auch in einer Untersuchung von Reddy & DeLaurentis (2016) war die Befürwortung für den militärischen Einsatz mit 28 % am höchsten im Vergleich zu anderen Anwendungsbereichen, wie zum Beispiel öffentlicher Dienst, Landwirtschaft oder Paketlieferung mit einer Zustimmung von jeweils 11 %. Eine weitere Studie von Reddy und DeLaurentis (2016) ergab, dass die Bereitschaft, Dronenservices zu nutzen, bei Frauen geringer ist als bei Männern und geringer bei Personen über 55 Jahren. Weiterhin war die Nutzungsbereitschaft höher bei Personen, die in einem städtischen Gebiet aufgewachsen sind. Eine Umfrage von Herdel et al. (2021) mit 49 Befragten in Israel untersuchte die

Befürwortung von Drohnen speziell für den Einsatz bei der Polizei. Die Ergebnisse zeigen, dass die Akzeptanz mit der Ernsthaftigkeit der Situation, in welcher der Einsatz erfolgt, steigt. So werden die Einsätze von Drohnen bei der Bekämpfung von Terroranschlägen und Erdbeben stärker befürwortet als Drohneneinsätze bei der Aufklärung von Raubzügen oder bei der Bekämpfung des Drogenhandels auf der Straße oder bei der Suche von vermissten Personen. Am geringsten wird der Drohneneinsatz bei der Bekämpfung von Müll im Park befürwortet.

2.2 Städtebaulichen Aspekte zu Start- und Landeplätzen

Vertihubs¹ sind Start- und Landeplätze für UAS und bilden eine Schnittstelle zwischen Boden und Luft. Die Errichtung von Vertihubs in einem dicht besiedelten städtischen Umfeld bringt verschiedene Herausforderungen im Hinblick auf städtebauliche Aspekte mit sich. Dazu zählen unter anderem die begrenzte Verfügbarkeit freier Flächen, die optimale Standortwahl, regulatorische Rahmenbedingungen sowie die Frage nach der Akzeptanz in der Bevölkerung. In diesem Sinne lautet die Forschungsfrage:

Wie können Vertihubs in ein bestehendes urbanes Umfeld integriert werden und welche Rahmenbedingungen sind dabei zu beachten?

Die Suchkriterien schließen Studien und sonstige Quellen ein, die Drohnen bzw. VTOLs (Vertical Take-Off and Landing) in einem urbanen oder suburbanen Umfeld behandeln. Sowohl Publikationen, die Urban Air Mobility zum Zweck der Personenbeförderung betrachten, als auch Publikationen zum Drohnengüterverkehr sind in die Suche eingeschlossen.

Zur Recherche relevanter wissenschaftlicher Quellen erfolgte eine Suche in der SCOPUS-Datenbank gemäß PRISMA-Verfahren, ergänzt durch eine händische Literatursuche. Aus der SCOPUS-Literaturdatenbank ergaben sich 1 422 Treffer, von denen sich 20 als zur Beantwortung der Forschungsfrage relevant herausstellten. Zusätzlich zu den Quellen aus der Datenbanksuche wurden 16 weitere Quellen über eine händische Suche identifiziert. Diese umfasst z. B. Quellen, die in den gefundenen Dokumenten als Zitat vorkommen oder aus früheren Projekten bekannt sind. Es handelt sich um Dokumente, die in wissenschaftlichen Literaturdatenbanken nicht enthalten sind, wie z. B. technische Spezifikationen, Patente, Webseiten, studentische Abschlussarbeiten oder von Unternehmen herausgegebene Projektberichte. Die städtebauliche Einbindung von Start- und Landeplätzen ist ein vielschichtiges Thema, in dessen Rahmen verschiedene Beteiligte eine wichtige Rolle spielen. Für eine vollständige Betrachtung des Themas sind die Zusatzquellen außerhalb von Literaturdatenbanken daher unverzichtbar. Die untersuchten Quellen kommen schwerpunktmäßig aus den USA, die Recherche umfasst aber auch Publikationen aus Deutschland, Südkorea sowie Indien und China.

Ergänzend zu den wissenschaftlichen Quellen erfolgte eine händische Literatursuche zu Planungsprozessen und den daran Beteiligten. Diese lieferte von Bundesministerien erstellte Leitfäden sowie auf kommunaler Ebene erstellte Handlungsempfehlungen.

2.2.1 Städtebauliche Einbindung von Vertihubs

Es zeigt sich, dass sich die Studienlage zu VTOL-Verkehrssystemen in urbanen Gebieten vor allem auf den Einsatzzweck On-Demand-Mobility im Sinne von Personenbeförderung konzentriert. Allgemein finden bisherige Betrachtungen nur auf theoretischer Ebene statt, da es weltweit noch keine vollwertigen, im Betrieb befindlichen Vertihubs für Urban Air Mobility gibt (Preis, 2021). Grundsätzlich lassen sich aus Personenverkehrsstudien gezogene Erkenntnisse zur städtebaulichen Einbindung von Vertihubs auch auf VTOL-Systeme für den Güterverkehr

¹ Start- und Landeplatz für (e)VTOLs; auch: Vertistop/-hub/-drone

anwenden. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich diese Studien stets auf vergleichsweise große VTOLs zur Personenbeförderung beziehen. Dies hat Einfluss auf die Größe und die bauliche Gestaltung der Vertihubs. Aspekte wie regulatorische Rahmenbedingungen und Nutzungsbeschränkungen des Luftraums unterscheiden sich jedoch nicht wesentlich zwischen Personen- und Güterverkehr. Auch die Kriterien zur optimierten Standortwahl von Vertihubs in einem Untersuchungsgebiet sind vergleichbar.

In dem vorliegenden Bericht wird der Transport von Gütern mittels Drohnen untersucht. Dafür werden spezielle Plätze zum Starten, Landen und Parken benötigt, die in diesem Bericht Vertihubs genannt werden. Diese Infrastruktur dient gleichzeitig als Umschlagspunkt der Güter zwischen Boden- und Luftverkehr, so dass entsprechende Umschlagsplätze vorgehalten werden müssen. Abbildung 1: zeigt eine schematische Darstellung von mehreren potenziellen Vertihubs im urbanen Kontext.

Abbildung 1: Schematische Darstellung von Vertihubs im urbanen Kontext im Beispiel Paketzustellung (eigene Darstellung)



Quelle: Eigene Darstellung, RWTH-ISB

Die für einen Vertihub benötigten Flächen sollten in bestehenden baulichen Strukturen liegen, weswegen es diverse Aspekte bei der Planung und beim Bau der Start- und Landeinfrastruktur zu berücksichtigen gilt. Dieser Prozess wird oft als „Brownfield-Planung“ bezeichnet und zielt darauf ab, sinnvolle Kompromisslösungen für alle Beteiligten zu finden (Planacademy, 2018). Im Folgenden wird im Detail auf die beteiligten Akteure, den Planungsprozess und die verkehrliche Erschließung der Vertihubs eingegangen.

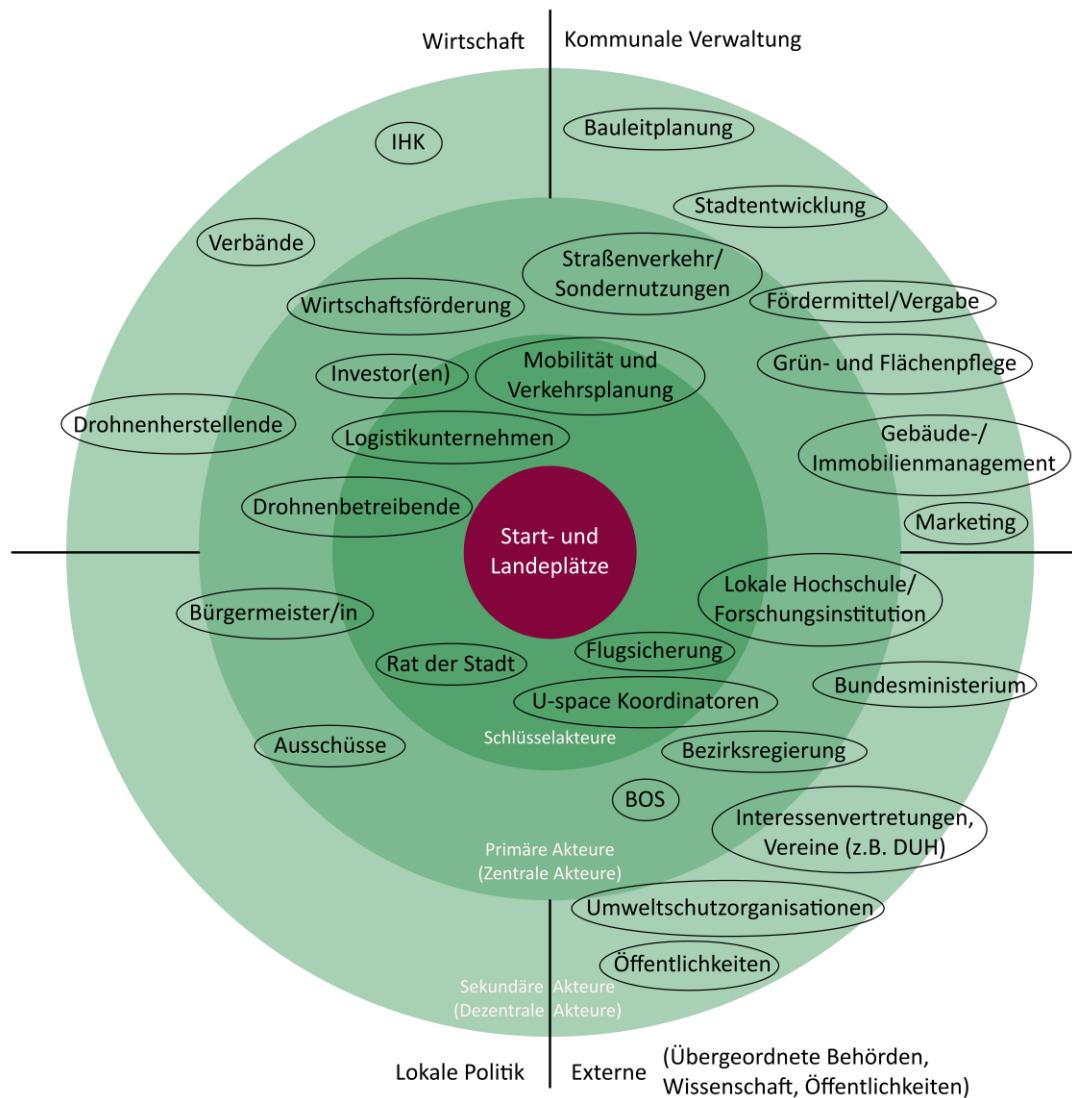
Darstellung relevanter Akteure im Planungsprozess

Die Akteure für die Umsetzung von Belieferungskonzepten mit Drohnen setzen sich im Fall von Vertihubs aus verschiedenen Bereichen der öffentlichen Hand, der Wirtschaft und Externen zusammen. Jede Interessengruppe kann dabei unterschiedliche und ggf. konkurrierende Interessen verfolgen. Beispielsweise liegt in der Aufgabe der öffentlichen Hand die Verbesserung der Verkehrs-, Siedlungs- und Umweltqualität sowie die Vertretung der Bürgerinnen und Bürger. Wirtschaftsunternehmen hingegen berücksichtigen primär die Profitabilität und Dienstleistungsqualität (Städtekonferenz Mobilität, 2019).

Um die Gegensätzlichkeit unterschiedlicher Interessen zu überwinden, sollten die Akteure in den Planungsprozess einbezogen und ihre Interessen verstanden werden. Die Zielsetzung von Netzwerken und Kooperationen ist es, Akteure der luft- und bodenseitigen Planungsgremien zusammenzubringen, um gemeinsame Ziele zu definieren, Synergien zu nutzen und Entscheidungen effizient zu treffen. Für die Zusammenarbeit empfiehlt sich ein integriertes Planungskonsortium mit Personen aus beiden (Fach-)Bereichen von Luft und Boden. Es ist entscheidend, diesen Planungsprozess iterativ zu gestalten, um kontinuierlich Optimierungen und Anpassungen vorzunehmen (BMVI, 2019).

Abbildung 2 zeigt eine mögliche Akteurskonstellation und deren Zugehörigkeit zu übergeordneten Akteursgruppen und Einflussbereichen bei der Identifikation und Realisierung geeigneter Vertihubs. Die Akteure werden im Rahmen der Analyse in die Kategorien Wirtschaft, kommunale Verwaltung, lokale Politik und externe Organisationen gegliedert. Zudem erfolgt eine Einteilung nach Relevanz in sogenannte Schlüsselakteure (zentral für die Umsetzung mit direktem Einfluss auf die Entscheidungsprozesse), primäre Akteure (direkte Mitwirkung) und sekundäre Akteure (indirekte, unterstützende Mitwirkung). Dabei ist die Zuordnung einzelner Organisationen nicht immer eindeutig und mitunter während des gesamten Prozesses fließend.

Abbildung 2: Realisierung eines Vertihub-Vorhabens – mögliche Akteurskonstellation



Quelle: Eigene Darstellung nach Hoenen (2022)

Bei der Errichtung von Start- und Landeplätzen für Drohnen sind klassische Schlüsselakteure wie lokale Mobilitäts- und Verkehrsplanungsämter sowie der Rat der Stadt und das involvierte Logistikunternehmen entscheidend. Ein besonderes Merkmal der Planungsprozesse für Drohneninfrastrukturen ist die Notwendigkeit, Schlüsselakteure aus dem Luftfahrtbereich einzubeziehen, die in traditionellen städtebaulichen Verfahren oft keine oder nur eine untergeordnete Rolle spielen. Dazu zählen beispielsweise die Drohnenbetreibenden, die Behörden für Luftfahrt und Luftfahrtssicherheit sowie die U-space-Koordinatorinnen und -Koordinatoren und die Flugsicherung. Ergänzende primäre Akteure sind lokale bzw. untere und übergeordnete Behörden sowie Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS). Zu den sekundär Beteiligten können in diesem Zusammenhang unter anderem Umweltschutzorganisationen, Vogelschutzverbände, Grünflächenämter und die Drohnenherstellenden zählen.

Handlungsempfehlung Nr. 1

Es ist zu empfehlen, eine klare, regelmäßige und transparente Kommunikationsstruktur aufzubauen, um so die erfolgreiche Einführung und langfristige Etablierung der Drohneninfrastruktur sicherzustellen.

Diese Kommunikationsstruktur umfasst den kontinuierlichen Dialog zwischen allen Beteiligten und die Partizipation neuer Akteure in diesem Planungsprozess (z. B. Drohnenbetreibende, Flugsicherung und U-space Koordinatorinnen und -Koordinatoren) sowie die frühzeitige Einbeziehung der Öffentlichkeit und die Berücksichtigung ihrer Rückmeldungen in dem Planungsprozess. Durch offene Kommunikationskanäle können Missverständnisse vermieden, gemeinsame Lösungen gefunden und die Akzeptanz des Projekts in der Öffentlichkeit gefördert werden.

Planungsschritte zur bodenseitigen städtebaulichen Einbindung

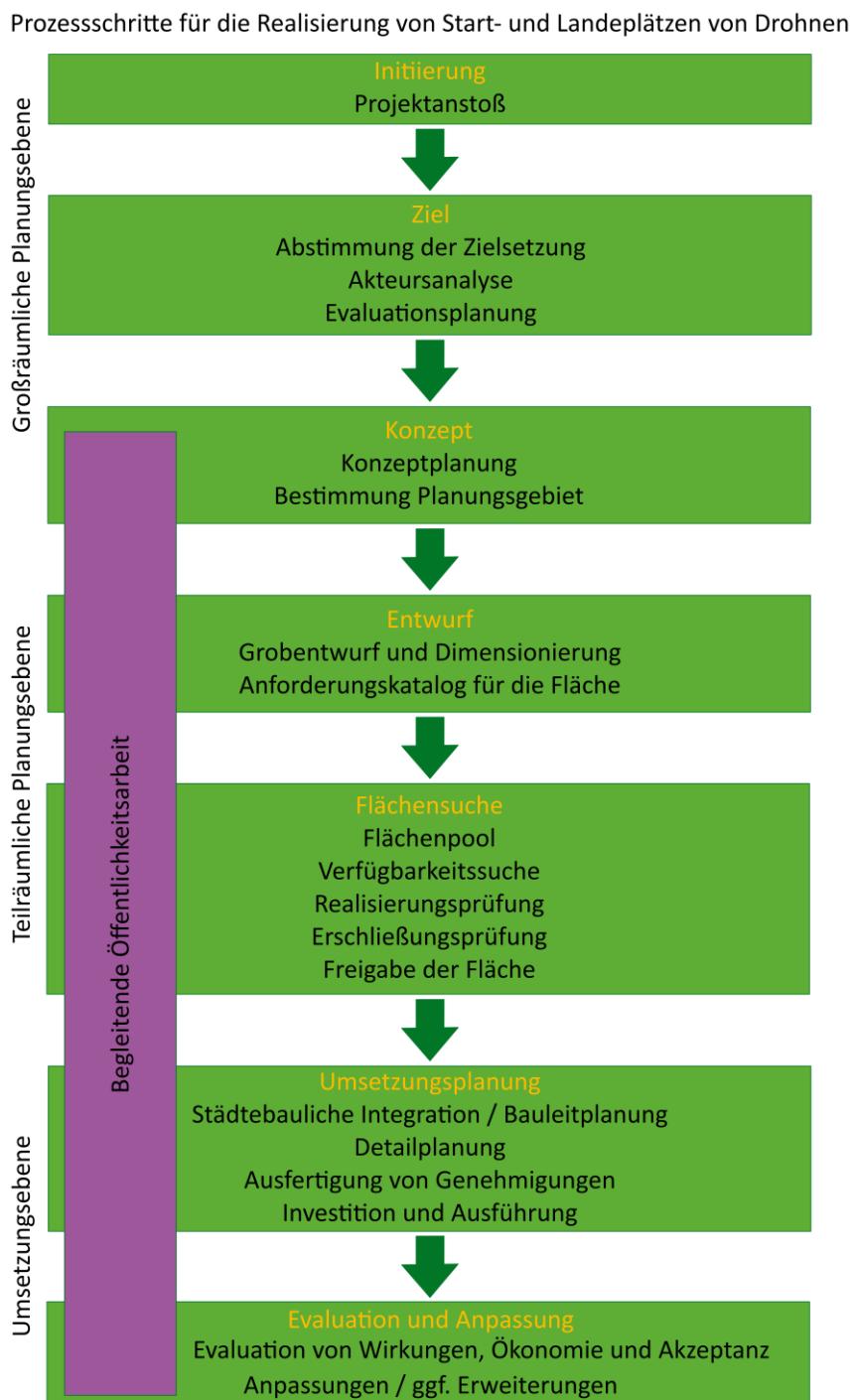
Gemeinsam mit den identifizierten Akteuren gilt es dann, den Prozess der städtebaulichen Einbindung der Vertihubs durchzuführen. Dieser lässt sich in sieben Schritte untergliedern (siehe Abbildung 3).

- ▶ **Initiierung:** Der erste Schritt legt das Fundament für das gesamte Projekt. Ein Kernteam sollte gebildet werden, welches die spezifischen Schlüsselakteure einbezieht. Dazu gehören die politische Ebene, die Fachplanung auf kommunaler Ebene und das betroffene Logistikunternehmen. Es wird empfohlen, kommunale Fachpersonen und externe Gutachtende für Drohnenverkehr hinzuzuziehen. Dieses Team definiert den Projektanstoß und legt die organisatorischen Strukturen fest.
- ▶ **Zielsetzung und Akteursanalyse:** In dieser Phase geht es darum, ein tiefgehendes Verständnis aller relevanten Interessen zu entwickeln. Neben klassischen Akteuren sollten insbesondere Stakeholder des Luftverkehrs wie Polizei, Rettungskräfte und Flugsicherungsbehörden berücksichtigt werden. Aufgrund der Neuartigkeit des Drohnenverkehrs und der Voraussetzungen vor Ort ist jede Analyse zurzeit ein Einzelfall. Durch Workshops oder Interviews können die Anforderungen und Wünsche dieser Partner identifiziert werden. Auf dieser Basis werden die Projektziele definiert, die SMART (spezifisch, messbar, erreichbar, relevant, terminiert) sein sollten, um die Erfolgsmessung zu ermöglichen. Alle Akteure sollten personelle Ressourcen bereitstellen, um den Planungsprozess begleiten und mitgestalten zu können.
- ▶ **Konzeptplanung und Entwurf:** In dieser Phase werden Visionen in konkrete Pläne überetzt. Architekten, Stadtplaner und Ingenieure arbeiten eng zusammen, um ein erstes Konzept zu entwickeln, das die räumlichen Dimensionen, die architektonische Gestaltung und

die technischen Spezifikationen der Vertihubs umfasst. Die Pläne werden iterativ verfeinert, um Aspekte wie Verkehrsfluss, Sicherheitsanforderungen und Nutzungsfreundlichkeit zu optimieren.

- ▶ **Flächensuche:** Die Flächensuche konzentriert sich auf die Identifikation geeigneter Standorte, die eine optimale Erreichbarkeit gewährleisten und den städtebaulichen Vorgaben entsprechen. Die Bodenbeschaffenheit, die vorhandene Infrastruktur und Nutzungsrechte werden geprüft. Eine sorgfältige Analyse der potenziellen Umwelteinflüsse stellt sicher, dass die Standorte keine negativen Auswirkungen auf ihre Umgebung und die Bevölkerung haben. Ein iterativer Prozess zur Standortidentifikation ist empfehlenswert: Zunächst werden potenzielle Standorte bzw. Standorttypen bestimmt, dann hinsichtlich ihrer Erreichbarkeit und Konkurrenz zueinander bewertet. Die bevorzugten Standorte werden daraufhin im Detail betrachtet, wobei Aspekte wie Erschließung, städtebauliches Umfeld und Eigentumsverhältnisse bewertet werden.
- ▶ **Umsetzungsplanung:** Diese Phase berücksichtigt die Ergebnisse und Erkenntnisse der vorherigen Planungsschritte und mündet in der Erstellung eines detaillierten Ausführungsplans. Dieser umfasst Zeitpläne, Kostenkalkulationen und Beschreibungen aller notwendigen Baumaßnahmen. Er dient als Grundlage für die Beantragung von Baugenehmigungen und die Vergabe von Bauaufträgen. Hierbei ist entscheidend, dass alle rechtlichen Anforderungen (siehe Kapitel 2.3), wie das Baurecht und das Bundes-Immissionsschutzgesetz, eingehalten werden.
- ▶ **Evaluations- und Anpassungsphase:** Der Betrieb der Vertihubs wird kontinuierlich überwacht. Dies umfasst die Überprüfung der Einhaltung von Lärm- und Luftgrenzwerten (z. B. Grenzwerte für Treibhausgase), die Analyse der Verkehrsmuster und die Bewertung der Nutzungsfreundlichkeit. Auf Grundlage dieser Daten können Anpassungen vorgenommen werden, um die Anlagen stetig zu verbessern und an sich ändernde Bedürfnisse anzupassen.

Während des gesamten Projekts ist eine transparente Kommunikation mit der Öffentlichkeit wichtig. Dies schafft Vertrauen und fördert die Akzeptanz des Projekts bei den lokalen Anwohnenden und der Öffentlichkeit.

Abbildung 3: Prozessschritte für die Realisierung von Vertihubs

Quelle: Eigene Darstellung nach Hoenen (2022)

2.2.2 Möglichkeiten zur Standortwahl und baulichen Gestaltung von Vertihubs

Urbane Gebiete weisen in der Regel eine stark verdichtete Bebauung auf. Naheliegend ist daher die Platzierung auf Dächern von Gebäuden (Daskilewicz, 2018; Fadhil, 2018; Lineberger, 2019; Kim et al., 2020; NUAIR, 2021). Rimjha & Trani (2021) kommen für das Central Business District von San Francisco zu dem Ergebnis, dass sich Vertihubs mit jeweils maximal drei Landeplätzen auf den dort vorhandenen Dachflächen unterbringen lassen. Gabani et al. (2021) diskutieren ein System, bei dem mobile Lastwagen als Stützpunkt für Güterdrohnen eingesetzt werden. Vascik &

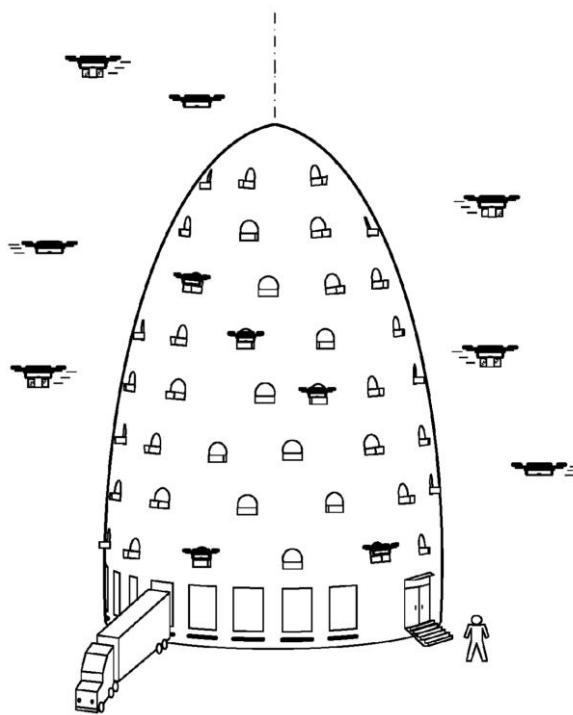
Hansman (2017) schlagen verschiedene Konzepte zur städtebaulichen Einbindung von Start- und Landeeinrichtungen vor. Eine Möglichkeit ist der Bau von Einrichtungen in Kombination mit bereits vorhandenen Tankstellen. Bei der Platzierung in Kombination mit Tankstellen ergibt sich eine günstige, relativ gleichmäßige Verteilung über das Stadtgebiet. Zudem existieren an wichtigen Knotenpunkten im Straßennetz oftmals mehrere Tankstellen. An diesen Stellen bietet es sich an, auch für den Luftverkehr Knotenpunkte mit erhöhter Kapazität anzulegen. Ein weiterer Ansatz ist, Start- und Landeflächen auf noch unbebauten Flächen zu errichten. Als Mindestgröße wird hierbei ein Quadrat mit einer Kantenlänge von 50 ft (15,24 m) angenommen. Im Untersuchungsgebiet Los Angeles County ergeben sich auf diese Weise ca. 500 mögliche Stellen.

Dadurch ergibt sich für jeden Punkt eine Laufweite von unter 400 m bis zum Erreichen eines Vertihubs. Eine Möglichkeit, die von mehreren Autoren angeführt wird (Uber, 2016; Vascik & Hansman, 2017; NASA, 2021; Lim & Hwang, 2019), ist die Platzierung in Kleeblättern von Autobahnkreuzen. Lim und Hwang nehmen für Vertihubs einen Durchmesser von 16 m an und kommen somit zu dem Ergebnis, dass innerhalb der Kleeblätter ausreichend Platz vorhanden ist. Keine der Veröffentlichungen ging jedoch darauf ein, wie diese Vertihubs sicher an das Straßennetz angebunden werden können.

Beim Betrieb von VTOLs kann ein Effekt auftreten, der bei beengten Verhältnissen, insbesondere bei der Landung, möglicherweise zu Problemen führt. So können Helikopter in den sogenannten Vortex-Ring-Zustand geraten (Vascik & Hansman, 2017; Yilmaz et al., 2019). Dabei wird der Rotor durch seinen eigenen Abwind beeinflusst, was zu einem ungewollten Sinken des Luftfahrzeugs führt. Um dies zu vermeiden, sind standardmäßig schräg verlaufende Start- und Landetrajektorien vorgesehen. Für die Gestaltung von Start- und Landeflächen für VTOLs ergibt sich daraus die Frage nach Hindernissen in der Umgebung. Das Risiko des Vortex-Ring-Zustands hängt auch von der Beschaffenheit des Luftfahrzeugs ab. Laut Vascik und Hansman (2017) ist unklar, ob für vollelektrische Luftfahrzeuge mit mehreren Rotoren ebenfalls schräge Start- und Landetrajektorien notwendig sind oder ob sie auch unter beengten Platzverhältnissen sicher betrieben werden können. Lim und Hwang (2019) sowie Zelinski (2020) merken an, dass je nach Typ des Luftfahrzeugs in der Umgebung von Vertihubs ausreichende Approach and Take-Off Areas (FATOs) freizuhalten sind. Die US-amerikanische Federal Aviation Administration (FAA) gibt für Heliports vor, dass zwei An- und Abflugrichtungen vorzusehen sind, welche in einem Mindestwinkel von 135° zueinander liegen (FAA, 2012). Die European Union Aviation Safety Agency (EASA) stellt ein aktuelles Handbuch bereit, in dem auf die technischen Spezifikationen von Vertihubs für bemannte VTOLs im Sichtflugbetrieb eingegangen wird (EASA, 2022).

Zelinski (2020) untersuchte verschiedene Anordnungen von Vertihubs auf ihre betriebliche Effizienz und Flächensparsamkeit. Allen Ansätzen ist gemein, dass neben den eigentlichen Landeflächen auch Parkpositionen für Luftfahrzeuge und entsprechende Taxiways eingeplant sind. So können Turnaround-Prozesse wie Be- und Entladen oder Betanken fernab der Landefläche stattfinden, sodass diese nicht blockiert wird. Bei der Suche nach Flächen für Vertihubs sind daher neben den Landeflächen auch diese weiteren Flächen zu berücksichtigen. Je größer die eingesetzten Luftfahrzeuge sind, desto höher ist der Platzbedarf.

Ein konkretes Beispiel für die Ausgestaltung von Vertihubs liefern Curlander et al. (2017) in ihrem Patent für ein Distributionszentrum zur Verteilung von Paketen mittels UAS (siehe Abbildung 4). Es unterscheidet sich von konventionellen großflächigen Distributionszentren dadurch, dass es mehrere Stockwerke besitzt. Durch die vergleichsweise kleine Grundfläche soll es für den Einsatz in urbanen Gebieten mit hoher Bevölkerungsdichte geeignet sein. Das Gebäude erinnert an einen Bienenstock, aus dem die UAS durch Luken mit daran angebrachten Start- und Landeplattformen ausströmen. Im Erdgeschoss befinden sich Laderampen für Lkw.

Abbildung 4: Darstellung eines Distributionszentrums

Quelle: Curlander et al. (2017)

2.2.3 Wirtschaftliche Gesichtspunkte

Neben den initialen Kosten fallen für Start- und Landeplätze auch Betriebskosten für Wartung, ggf. Personal, Sicherheit, Steuern, Pacht und Versicherung an. Von privaten Unternehmen werden so lange neue Einrichtungen gebaut, bis die marginalen Kosten und die Gewinne durch bessere Angebotsqualität im Gleichgewicht sind. Es ist anzunehmen, dass Start- und Landeeinrichtungen initial mit geringer Kapazität und geringen Kosten in Betrieb genommen werden. Erst wenn sich eine entsprechende Nachfrage entwickelt, besteht für die Unternehmen der Impuls, die Einrichtungen auszubauen, um eine höhere Kapazität zu schaffen (Vascik & Hansman 2017). Peisen et al. (1996) stellten fest, dass für öffentliche Vertihubs die Auswahl an möglichen Standorten eingeschränkt ist, da sie einen höheren Platzbedarf als privat betriebene Vertihubs aufweisen. Einen sehr geringen Flächenbedarf haben Landestationen für einzelne Paketdrohnen, die freistehend im Straßenraum platziert werden können (Ridden, 2020; Valqari, 2022). Sie sind kaum größer als eine Telefonzelle und eignen sich für die Lieferung von Medikamenten oder kleinen Paketen.

Die Betrachtung von Johnston et al. (2020) führt zu der Erkenntnis, dass eine Ausweitung des Urban Air Mobility-Marktes über den heutigen Helikopterverkehr hinaus eine große Anzahl an zusätzlichen Vertihubs erfordert. Für sehr große, dicht besiedelte Städte wie New York, London oder Shanghai wird eine Anzahl von 85 bis 100 Vertihubs angenommen. Für kleinere Städte wie Dallas oder Düsseldorf ist von 38 bis 65 Anlagen auszugehen. Die Autoren geben darüber hinaus jeweils die geschätzten Kosten für drei Größenklassen von Vertihubs an. Auffällig ist dabei, dass ungeachtet der Größe der Anlage die jährlichen Betriebskosten mindestens um den Faktor zwei höher sind als die Baukosten.

2.2.4 Verteilung der Vertihubs in einem Gebiet

Lim & Hwang (2019) untersuchten unterschiedliche Platzierungen von Vertihubs im Stadtgebiet von Seoul und die damit verbundenen Reisezeiteffekte. Mit zunehmender Anzahl an Vertihubs sinkt die Reisezeit, da die Zubringerfahrten zu und von den Vertihubs im Durchschnitt kürzer ausfallen. Dieser Effekt bewirkt jedoch ab einer gewissen Anzahl an Vertihubs kaum noch eine Verbesserung. Ab einer Anzahl von 12 Vertihubs im Untersuchungsgebiet erreicht der kombinierte Individual- und Luftverkehr kürzere Reisezeiten auf den getesteten Relationen als der motorisierte Individualverkehr (MIV) am Boden. Die Kombination aus öffentlichem Personen-nahverkehr (ÖPNV) und Luftverkehr bietet nahezu keine Reisezeitvorteile gegenüber dem reinen Individualverkehr am Boden.

Eine Fallstudie beschäftigte sich mit elektrisch betriebenen VTOLs, die in der kalifornischen Bay Area kleine Pakete transportieren (German et al. 2018). Das Konzept sieht vor, dass die Auslieferung der Pakete in zwei Teilabschnitten erfolgt. Im ersten Abschnitt werden die Güter von einem Stützpunkt außerhalb des Agglomerationsraums zu Vertihubs in der Nähe der Kunden geflogen. Die Vertihubs weisen Ähnlichkeiten zu Heliports auf und können sowohl freistehend als auch auf Dächern von Parkhäusern und anderen Gebäuden errichtet werden. Es würden Luftfahrzeuge zum Einsatz kommen, die eigentlich zur Personenbeförderung konzipiert sind und eine Nutzlast in der Größenordnung von 400 kg aufweisen. Es handelt sich um elektrisch betriebene VTOLs, die sowohl mit Rotoren als auch mit Tragflächen ausgestattet sind (Lift+Cruise- oder Tiltrotor-Prinzip). Für den zweiten Abschnitt des Transports sind verschiedene Szenarien denkbar. Die Möglichkeit der Weiterbeförderung mittels kleiner unbemannter Luftfahrzeuge wurde in der Studie genannt, jedoch nicht näher ausgeführt. Weitere Möglichkeiten sind die Abholung durch die Kunden oder die Auslieferung mit konventionellen Lieferfahrzeugen. Der praktische Hintergrund dieses Konzepts ist die Verbesserung der Lieferlogistik des Onlinehändlers Amazon. Für die Liefervarianten Prime Now und Same Day Delivery soll der Transport via VTOL kürzere Lieferzeiten oder eine größere Entfernung zwischen Kunden und Außenlager ermöglichen.

Fadhil (2018) stellte anhand von Fallstudien in Los Angeles und München eine Methodik zur Platzierung von Vertihubs für den Personenverkehr vor. Seinen Ergebnissen zufolge sollten beim Aufbau eines VTOL-Verkehrssystems als Erstes die Flughäfen, das Zentrum sowie zentrumnahe Bahnhöfe mit Vertihubs ausgestattet werden. Die Start- und Landeplätze sind in drei Größenklassen eingeteilt (aufsteigend von klein nach groß): Vertistops, Vertiports und Vertihubs. Durch eine umgekehrte Betrachtung des Gesetzes vom abnehmenden Grenznutzen lässt sich argumentieren, dass zusätzlicher Lärm an Stellen mit ohnehin hohen Geräuschpegeln weniger Schaden verursacht. Fadhil (2018) schlägt in diesem Sinne vor, Vertihubs an lärmintensiven Stellen zu platzieren.

2.2.5 Verkehrliche Erschließung

Die Errichtung von Vertihubs im Kontext der verkehrlichen Einbindung und Erschließung erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen der öffentlichen Hand und der Wirtschaft. Auch die Schnittstelle zwischen Boden- und Luftverkehr gilt es zu untersuchen.

Die öffentliche Hand spielt eine entscheidende Rolle bei der Verbesserung der Leistungsfähigkeit des Verkehrs und der Erhöhung der Verkehrssicherheit im Zusammenhang mit Vertihubs. Kommunale Behörden, insbesondere die Abteilungen für Verkehrsplanung, Mobilität, Straßenverkehr, Sondernutzungen und das Bauamt, sollten eng in den Planungsprozess eingebunden werden. Diese Stellen sind verantwortlich für die Flächenauswahl, die Berücksichtigung der Eigentumsverhältnisse von potenziellen Gebäuden und Flächen und die Abwägung möglicher Nutzungen. Es ist wichtig, mögliche Konflikte zwischen verschiedenen Nutzungsansprüchen zu

identifizieren und im Genehmigungsprozess zu berücksichtigen. Die Stadt sollte sich bei der Suche nach geeigneten Flächen an den Anforderungen der Betreibenden bzw. Nutzenden orientieren, aber auch aktiv die Gestaltung dieser Flächen beeinflussen.

Die Wirtschaft, insbesondere Logistikunternehmen, kann bei der Konzeption der Vertihubs eine entscheidende Rolle spielen. Dies umfasst die Festlegung des Umschlagknotentyps, die Definition von Nutzungen, die Kostenstruktur und die logistischen Anforderungen. Die Wahl des Standorts sollte darauf abzielen, die Vertihubs direkt im oder in der Nähe des Einzugsgebiets zu platzieren, um lange Anfahrtswege zu vermeiden. Die Zugänge und Zufahrten sollten speziell auf die verwendeten Fahrzeugtypen ausgerichtet sein, beispielsweise durch Anschluss an öffentliche Straßen. Zudem ist eine gründliche brandschutztechnische Untersuchung erforderlich, um die Sicherheit auf dem Gelände zu gewährleisten.

Wichtig ist zudem die Berücksichtigung von Bereichen, in denen mit einem erhöhten Fußverkehrsaufkommen zu rechnen ist (z. B. in Innenstädten, Bereiche zur Paketabholung). Die Anforderungen an alle Zugänge, Zufahrten und Aufstellflächen sollten im Einklang mit der Muster-Richtlinie über Flächen der Feuerwehr stehen, um die Sicherheit der Einrichtung und ihrer Nutzenden zu gewährleisten.

Abschließend zeigt sich in der Untersuchung hinsichtlich der städtebaulichen Einbindung die Komplexität bei der Umsetzung von Drohnenbelieferung. Es gilt, unter Berücksichtigung der regulativen Rahmenbedingungen zwischen den Interessen diverser Akteure zu vermitteln und abzuwagen. Anfänglich stehen aufwändige Genehmigungsprozesse an, die mit zunehmender Etablierung von Drohnenverkehr vermutlich effizienter ablaufen werden. Insgesamt ist der Prozess hochgradig von den Gegebenheiten vor Ort beeinflusst und bedarf entsprechend individueller lokaler Untersuchungen. Ein iterativer und integrierter Planungsprozess unter Einbeziehung aller relevanten Akteure und der Öffentlichkeit ist dabei von Vorteil. Mit der Errichtung von Vertihubs für Drohnen erhält die ausführende Gebietskörperschaft einen Innovationscharakter und zeigt die Bereitschaft, den Herausforderungen bei der Implementierung neuer Technologien zu begegnen.

Handlungsempfehlung Nr. 2

Es ist zu empfehlen, einen iterativen und integrierten Planungsprozess zur Errichtung von Vertihubs für Drohnen unter Einbeziehung aller relevanten Akteure und der Öffentlichkeit vorzunehmen.

2.2.6 Herausforderungen, Hindernisse und Akzeptanzfaktoren bei der Anlage von Vertihubs

Schon in früheren Zeiten war die Einrichtung von VTOL-Landeeinrichtungen im urbanen Umfeld nicht uneingeschränkt möglich. Connors (1968) beschreibt eine Petition mit 8 000 Unterschriften gegen die Einrichtung eines Heliports in Century City, einem Stadtteil von Los Angeles. Cheyno (1967) stellt heraus, dass bei der Einrichtung von Vertihubs auch die Anforderungen der anderen Verkehrsmodi berücksichtigt werden müssen, sodass die Urban Air Mobility bestehende Verkehrssysteme nicht behindert, sondern entlastet und ergänzt. Vascik & Hansman (2017) zeigen, bezogen auf die rechtlichen Rahmenbedingungen in Los Angeles, mögliche Hürden bei der Einrichtung neuer Start- und Landeplätze auf. Für die Einrichtung eines VTOL-Verkehrssystems identifizierten sie drei wesentliche Einschränkungen bzw. Hinderungsgründe: Akzeptanzprobleme in der Bevölkerung aufgrund von Geräuschemissionen, begrenzte Verfügbarkeit von Start- und Landeplätzen sowie die begrenzte Skalierbarkeit des Luftverkehrs im Hinblick auf die Luftraumüberwachung. Als besondere Herausforderung stellten sie heraus, dass

der Stadtrat jede einzelne neue Start- und Landeeinrichtung genehmigen muss. Betroffene Personen können aufgrund der zu erwartenden Geräuschbelastung, Privatsphärenbedenken und weiterer Beweggründe die Errichtung eines Vertihubs missbilligen. Solche Kritik aus der Bevölkerung beeinflusst die Entscheidungen der Politik. In Bezug auf Fluglärm in der Nähe von Flughäfen hat es in der Vergangenheit wiederholt Debatten gegeben. Es hat sich zudem gezeigt, dass Lärmreduktion durch verbesserte Technik einen Gewöhnungseffekt zur Folge hat. Nach einer Phase mit geringerer Geräuschbelastung sind Betroffene nicht bereit, zu den vormals tolerierten Lärmwerten zurückzukehren. Daraus lässt sich ableiten, dass es kaum möglich ist, einen absoluten Geräuschgrenzwert festzulegen, unterhalb dessen die Immissionen automatisch toleriert werden. Weiterhin ist für jede neue Einrichtung im Rahmen der Genehmigung eine Umweltverträglichkeitsstudie durchzuführen. Hinsichtlich der begrenzten Verfügbarkeit von Start- und Landeplätzen argumentieren Wei et al. (2020), dass VTOL-basierte Mobilitätslösungen einen geringeren Flächenverbrauch hervorrufen als beispielsweise Schienenwege, wodurch die Genehmigungsprozesse bezogen auf diesen Aspekt einfacher zu bewältigen sein könnten.

Sowohl German et al. (2018) als auch Fadhl (2018) setzen für Ladestationen an Vertihubs eine Leistung von 400 kW an. Bei der Planung von Vertihubs auf den Dächern bestehender Gebäude ist daher zu prüfen, ob ein Stromanschluss mit dieser Leistung realisiert werden kann. Der Wert bezieht sich allerdings auf VTOLs, die eine Nutzlast von mehreren 100 kg aufweisen. Bei kleineren UAS sind geringere Ladeleistungen zu erwarten.

2.3 Rechtliche Rahmenbedingungen

Um Luftverkehr mit Drohnen abwickeln zu können, müssen die bestehenden rechtlichen Rahmenbedingungen eingehalten werden. Es folgt ein Überblick der möglichen Gesetzeslage mit Bezugspunkten zum Drohnenverkehr. Neben bereits bestehenden geltenden Regelungen wird insbesondere auf möglichen Anpassungsbedarf eingegangen.

2.3.1 Rechtlichen Rahmenbedingungen für die Bodeninfrastruktur

Die maßgeblichen rechtlichen Rahmenbedingungen für die Vertihubs sind in diesem Zusammenhang das Bauplanungsrecht, das Bauordnungsrecht, die Straßenverkehrsordnung, der Immissionsschutz und das jeweilige Landesrecht. Es sei darauf hingewiesen, dass die Errichtung von Vertihubs für Drohnen in städtischen Gebieten die Gesetzgebung und Stadtplanung vor neue Herausforderungen stellt, da es sich um eine neue Nutzungs- und Gebäudeart handelt, die z. B. in der derzeitigen Baunutzungsverordnung NRW nicht ausdrücklich vorgesehen ist. Das bedeutet, dass die bestehenden Rechtsvorschriften, die in erster Linie herkömmliche Bauprojekte und die traditionelle gewerbliche Nutzung betreffen, nur bedingt auf die neuen Anforderungen und Merkmale der Drohneninfrastruktur anwendbar sind. Um Rechtssicherheit zu schaffen und eine Integration der neuen Technologie in das städtische Umfeld zu ermöglichen, sind Anpassungen der Gesetzgebung erforderlich, die die physischen und operativen Merkmale des Drohnenbetriebs sowie der dazugehörigen Vertihubs berücksichtigen.

Ebenso sind die Vorgaben des Bauordnungsrechts zu gesundheitlichen Auswirkungen bei der Planung, Ausführung und Nutzung von Gebäuden zu berücksichtigen. Diese betreffen Aspekte wie den Schallschutz, die Luftqualität, den Lichtbedarf und die Barrierefreiheit. In Bezug auf Vertihubs für Drohnen gilt es, diese Vorgaben zu entwickeln und in die Gesetzgebung zu integrieren.

► **Bauplanungsrecht:**

Das Bauplanungsrecht betrachtet einzelne Bauvorhaben im städtebaulichen Kontext und hat als Rechtsgrundlage das **Raumordnungsgesetz** (ROG) (BMJ, 2023e), das **Baugesetzbuch**

(BauGB) (BMJ, 2023a), die **Baunutzungsverordnung** (BauNVO) (BMJ, 2023b) und die **Planzeichenverordnung** (PlanZV) (BMJ, 2021). Es ist sicherzustellen, dass das Vorhaben im Einklang mit der städtebaulichen Entwicklung steht und eine sozialgerechte Bodennutzung sowie die Wohnbedürfnisse der Bevölkerung berücksichtigt (§ 1 Abs. 5 BauGB) (BMJ, 2023a). Die relevanten Darstellungen des Flächennutzungsplans und die Festsetzungen der Bebauungspläne sollten ebenfalls beachtet werden (§ 31Abs. 2 BauGB). Eine sorgfältige Prüfung der Zulässigkeit von Bauflächen (§ 1 Abs. 1, 2 BauNVO) und Baugebieten (§§ 2-11 BauNVO) ist erforderlich, um sicherzustellen, dass die Vertihubs den geltenden Vorschriften entsprechen.

► **Bauordnungsrecht:**

Die Errichtung von Vertihubs erfordert die Berücksichtigung des Bauordnungsrechts, einschließlich verschiedener Satzungen und Bestimmungen, um sicherzustellen, dass das Vorhaben den gesetzlichen Anforderungen entspricht. Wesentliche Satzungen sind im Folgenden aufgeführt.

- Die örtlichen **Gestaltungssatzungen**, die spezifische Anforderungen an die äußere Erscheinung von Gebäuden und Strukturen festlegen, sind zu prüfen. Die Gestaltung des Vertihubs sollte im Einklang mit diesen Vorschriften stehen, um das städtebauliche Erscheinungsbild zu wahren. Insbesondere die luftseitige Erschließung mit fliegenden Drohnen muss dabei berücksichtigt werden.
- Die **Grünordnungssatzungen**, die Anforderungen an die Begrünung und Landschaftsgestaltung von Flächen vorschreiben, sind ebenso zu beachten. Integrations- und Umweltaspekte sind hier von großer Bedeutung, um die Umgebung zu schützen.
- **Stellplatzsatzungen** sind zu überprüfen, um sicherzustellen, dass ausreichend Parkplätze vorhanden sind, die den Erfordernissen des Vertihubs gerecht werden. Dies betrifft sowohl die Parkmöglichkeiten für Nutzende als auch in Zukunft die Fläche für startende und landende Drohnen. D. h. es wäre denkbar, dass für den Fall von Direktbelieferungen entsprechende Start- bzw. Landeinfrastruktur bei dem Neubau von Gebäuden berücksichtigt werden muss.
- Wenn der Standort historische oder denkmalgeschützte Gebäude oder Strukturen umfasst, sind besondere Vorgaben der **Denkmalschutzsatzungen** zu beachten. Die Einhaltung von Denkmalschutzsatzungen ist unerlässlich, um das kulturelle Erbe zu schützen. Entsprechend sind zunächst erforderliche Genehmigungen einzuholen.
- Eventuelle **Sondernutzungssatzungen**, die spezielle Anforderungen an die Nutzung öffentlicher Flächen festlegen, sind zu prüfen. Dies ist relevant, wenn der Vertihub öffentliche Verkehrswege oder Flächen in Anspruch nimmt, die für andere Zwecke vorgesehen sind.

► **Straßenverkehrsgesetz (StVG):**

Auch wenn der Drohnenverkehr zunächst in der Luft stattfindet, besteht eine enge Verknüpfung zum Bodenverkehr. Insbesondere beim Start- und Landevorgang könnte somit eine Überschneidung zwischen dem geltenden Straßenverkehrsgesetz (BMJ, 2024) und den in den Straßenraum eindringenden Drohnen entstehen.

► **Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG):**

Das **Bundes-Immissionsschutzgesetz** (BMJ, 2023c) ist relevant, da Vertihubs potenziell schädliche Umwelteinwirkungen erzeugen können. Genehmigungen sind erforderlich, wenn

die Anlagen die Allgemeinheit oder Nachbarschaft gefährden oder erheblich belästigen könnten (§ 4 BImSchG). Es ist wichtig, Vorsorgemaßnahmen gegen Beeinträchtigungen zu treffen (§ 4Abs. 4, 5 BImSchG) und Emissionsgrenzwerte und -begrenzungen gemäß § 7 BImSchG und der Richtlinie 2010/75/EU einzuhalten.

► **Landesrecht:**

Je nach Standort gelten unterschiedliche Landesbauordnungen, wie beispielsweise die **Landesbauordnung NRW** (LBO NRW) (NRW, 2024). Hierbei muss gewährleistet werden, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung nicht gefährdet (§ 3 Abs. 1, 3LBO NRW), das Straßen-, Orts- oder Landschaftsbild nicht verunstaltet oder die beabsichtigte Gestaltung gestört wird (§ 9 Abs. 2 LBO NRW). Eine gründliche Prüfung des Vorhabens im Einzelfall unter Berücksichtigung weiterer Paragraphen (§ 4, 5, 6, 8, 12, 13, 14, 15, 30, 32 etc. LBO NRW) ist unerlässlich.

Die aufgeführten Gesetze, Verordnungen und Satzungen sollten beachtet werden, wobei die Liste nicht als abschließend zu verstehen ist. Dabei ist es auch ratsam, Fachleute für Bauordnungsrecht und Juristen in den Planungsprozess einzubeziehen.

Handlungsempfehlung Nr. 3

Zusammenfassend ist es empfehlenswert, diese rechtlichen Bestimmungen für die rechtliche Operationalisierung der Bodeninfrastruktur sorgfältig zu prüfen und einzuhalten. Die frühzeitige Einbindung von Fachleuten und Juristen kann dabei helfen, potenzielle rechtliche Herausforderungen zu bewältigen und die rechtmäßige Errichtung und den Betrieb der Einrichtungen zu gewährleisten.

2.3.2 Rechtlichen Rahmenbedingungen für den Luftraum

Im Hinblick auf die luftrechtlichen Aspekte und die regulativen Herausforderungen, die sich im Kontext von Droneneinsätzen ergeben, resultieren die folgenden zentralen Überlegungen.

► **Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO):**

Die LuftVO (BMJ, 2023d) ist relevant, da sie u. a. Flugbeschränkungsgebiete ausweist. Insbesondere Paragraph § 21 h der LuftVO weist hier Flugbeschränkungsgebiete für jeglichen Drohnenbetrieb auf. Es ist jedoch festzustellen, dass die derzeit geltenden Regelungen, insbesondere in Bezug auf den Abstand zu Energieerzeugungsanlagen und den Mindestabstand zu Flugplätzen, in urbanen Gebieten häufig nicht realistisch sind, um den Betrieb von Drohnen, insbesondere Lieferdrohnen, zu ermöglichen. Dies stellt eine Herausforderung für die Umsetzung von Droneneinsätzen zur Paketlieferung in städtischen Gebieten dar und schränkt diese aktuell stark ein.

► **Luftverkehrsgesetz (LuftVG):**

Das LuftVG ist relevant, da es den maßgeblichen Rechtsrahmen des Luftrechts in Deutschland darstellt. Bei einem kommerziellen Drohnenbetrieb für die Paketlieferung ist davon auszugehen, dass Teile dieser Gesetzgebung auf die Betreiber dieser Dienstleistung mittels Drohne angewandt werden.

Perspektivisch bietet das Konzept U-space die Möglichkeit, den hochautomatisierten, effizienten und sicheren Betrieb einer großen Anzahl von Drohnen zu gewährleisten. Damit werden klassische Prozeduren des Luftverkehrsmanagements (z. B. mittels Luftverkehrskontrolle) ersetzbar. U-space repräsentiert ein digitales Ökosystem, das mithilfe digitaler U-space-Dienste den unteren Luftraum verwalten und koordinieren kann. Maßgeblich für dessen Einrichtung und Betrieb

sind die gesetzlichen Rahmenbedingungen der europäischen Durchführungsverordnungen (DVO) (EU) 2021/664 (EC, 2021a), DVO (EU) 2021/665 (EC, 2021b) und DVO (EU) 2021/666 (EC, 2021c). Bei einer Umsetzung der Paketlieferung mittels Drohnen sind die aktuell geltenden luftrechtlichen und gesetzlichen Vorgaben einzuhalten, was einen wirtschaftlichen Drohnenbetrieb erschwert. In Anbetracht der genannten U-space Entwicklungen und der Herausforderungen, die sich aus den bestehenden Regularien ergeben, sollten Anpassungen an den rechtlichen Rahmenbedingungen in Betracht gezogen werden, um den zukünftigen Anforderungen an den Drohnenbetrieb besser gerecht zu werden und Innovationen in diesem Bereich zu fördern. Die Einführung eines U-spaces lt. DVO (EU) 2021/664 könnte zusätzlich einen effizienten Betrieb erleichtern.

2.4 Untersuchungen zu logistischen Belieferungskonzepten mit Drohnen

In diesem Kapitel wird eine umfassende Literaturanalyse zur Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten von Drohnen für die logistische Zustellung, insbesondere auf der letzten Meile, durchgeführt. Dabei werden verschiedene Drohnen-Belieferungskonzepte untersucht, die in den letzten Jahren entwickelt wurden. Berücksichtigt wurde relevante Literatur, die zwischen 2016 und 2021 veröffentlicht wurde. Die Analyse konzentriert sich auf die Technologien und Strategien, die zur Implementierung dieser Konzepte verwendet wurden, sowie auf die Herausforderungen, die noch gelöst werden müssen.

Die Literaturanalyse dient in diesem Fall dazu, den aktuellen Stand der Forschung und Praxis in Bezug auf den Einsatz von Drohnen in der logistischen Zustellung, insbesondere auf der letzten Meile, umfassend zu erfassen und zu bewerten. Diese Methode ermöglicht es, verschiedene Forschungsansätze und praktische Anwendungen miteinander zu vergleichen und deren Vor- und Nachteile herauszuarbeiten. Dabei wurden unterschiedliche wissenschaftliche Studien und technische Berichte ausgewertet, um sowohl theoretische Konzepte als auch reale Einsatzszenarien zu beleuchten. Die Analyse konzentriert sich dabei hauptsächlich auf das Design von Zustellsystemen mit Drohnen sowie auf die Identifikation von Herausforderungen, die bei der Implementierung dieser Technologien in der Praxis auftreten können. Durch diese systematische Auswertung der Literatur können sowohl technische als auch logistische Rahmenbedingungen erfasst werden, die den Einsatz von Drohnen in der Güterzustellung betreffen, sowie innovative Lösungsansätze, die zur Überwindung bestehender Hürden vorgeschlagen wurden.

Die Analyse zeigt, dass das wachsende Güterverkehrsaufkommen, insbesondere durch den E-Commerce, die Logistikunternehmen vor große Herausforderungen stellt. Der Wettbewerb zwischen verschiedenen Transportunternehmen wie Amazon, DHL, DPD und UPS hat den Druck erhöht, Lieferungen effizient und zu niedrigen Kosten abzuwickeln. Traditionell erfolgte die Zustellung überwiegend über Lkw, die Pakete von Verteilzentren zu den Endkunden transportierten. Alternative Konzepte, wie die Nutzung von Elektrofahrzeugen, Lastenrädern oder Paketstationen, haben in jüngster Zeit an Bedeutung gewonnen. Allerdings haben Drohnen als Transportmittel für die „letzte Meile“ großes Potenzial gezeigt, insbesondere im Hinblick auf die Reduktion von Treibhausgasemissionen und Transportkosten. Drohnen bieten eine vielversprechende Lösung, um die Effizienz der Zustellung zu steigern und gleichzeitig die Transportkosten und Umweltbelastungen zu reduzieren. Verschiedene Konzepte, wie die reine Drohnenlieferung, hybride Lkw-Drohnen-Systeme und die Nutzung von Drohnen in Kombination mit stationären oder mobilen Ladestationen, werden diskutiert. Diese Ansätze zielen darauf ab, die Reichweiten- und Nutzlastbeschränkungen von Drohnen zu überwinden und eine effiziente und nachhaltige Zustellung zu ermöglichen. Die Analyse betont auch die Notwendigkeit zusätzlicher Infrastrukturen, wie z. B. Drohnen-Vertihubs und Ladestationen, um den flächendeckenden Einsatz von Drohnen zu ermöglichen.

Im Zuge der Forschung wurden mehrere logistische Lieferkonzepte entwickelt, die den Einsatz von Drohnen in der Güterzustellung berücksichtigen. Vier Hauptansätze stechen dabei hervor:

1. Nur-Drohnen-Belieferung: Hier erfolgt die Zustellung ausschließlich per Drohne, ohne Beteiligung von Lkw. Drohnen liefern Pakete direkt an die Endkunden, was jedoch zusätzliche Infrastrukturen wie Drohnen-Ladestationen oder Drohnen-Vertihubs erforderlich macht (Aurambout et al., 2019; Garcia & Santoso, 2019; Benarbia & Kyamakya, 2021; Roca-Rui & Menendez, 2019; Song et al., 2019; Brunner et al., 2019). Diese Vertihubs sind zentrale Einrichtungen, die es den Drohnen ermöglichen, Pakete zu laden und ihre Reichweite zu erhöhen. Studien zeigen jedoch, dass Drohnen aufgrund ihrer begrenzten Nutzlast und Reichweite nicht immer effizient eingesetzt werden können (Coelho et al., 2017; Feng et al., 2018). Beispielhafte Anwendungen dieser Technik sind die Drohnen-Lieferdienste von Unternehmen wie Amazon Prime Air (Curnlander et al., 2017) oder Domino's Pizza (Benarbia & Kyamakya, 2021).

2. Drone-inner & Truck-outer: Bei diesem Ansatz bedienen Drohnen Kunden, die näher am Depot oder Verteilzentrum liegen, während Lkw für weiter entfernte Lieferungen zuständig sind. Dieses Konzept teilt das Zustellgebiet in einen inneren und einen äußeren Bereich, wobei Drohnen und Lkw unabhängig voneinander operieren. Eine Variation dieses Modells sieht vor, dass Drohnen Pakete zu Mikro-Depots in der Nähe der Kunden bringen, von wo aus Lkw die Endzustellung übernehmen.

3. Truck-inner & Drone-outer: Hier erfolgt die Zustellung in umgekehrter Weise: Lkw beliefern die nähergelegenen Kunden, während Drohnen für weiter entfernte Zustellungen eingesetzt werden. Auch dieses Modell wurde in verschiedenen Studien (Garcia & Santoso, 2019; Frachtenberg, 2019; Benarbia & Kyama-ky, 2021) getestet und bietet Potenzial für eine effizientere Gestaltung der Lieferkette, insbesondere in Gebieten mit großen Entfernung.

4. Hybrides Truck-Drohnen-System: Ein intensiv erforschtes Konzept ist das hybride Modell, bei dem Drohnen und Lkw gemeinsam arbeiten, um Pakete zuzustellen. Der Lkw dient hierbei als mobile Basisstation für die Drohnen, die vom Lkw aus starten, Pakete an Kunden liefern und anschließend wieder zum Lkw zurückkehren. Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass die Drohnen durch die begrenzte Reichweite des Lkw unterstützt werden, wodurch größere Liefergebiete abgedeckt werden können. Es gibt verschiedene Varianten dieses Konzepts, etwa Lkw mit einer oder mehreren Drohnen oder sogar Systeme, bei denen Drohnen von verschiedenen Lkw genutzt werden können. Solche Modelle versprechen eine hohe Effizienz und Flexibilität im Zustellprozess.

Das Konzept der reinen Drohnenbelieferung weist einige technologische Herausforderungen auf. Aufgrund der eingeschränkten Flugdauer und Nutzlastkapazität der Drohnen sind Ladestationen oder mobile Plattformen erforderlich, um deren Reichweite zu maximieren. Die hybriden Konzepte bieten eine Möglichkeit, die Batterieproblematik zu lösen, indem sie Drohnen während ihrer Touren aufladen oder ihre Akkus austauschen. Solche mobilen Systeme bewegen sich über das Einsatzgebiet und passen ihre Position dynamisch an die Bedürfnisse der Drohnen an. Auch die Einrichtung stationärer oder beweglicher Ladestationen in der Zielregion könnte den Einsatz von Drohnen in der Logistik verbessern. Beim hybriden Lieferansatz, der am häufigsten untersucht wird, arbeiten Drohnen und Lkw eng zusammen. Der Lkw dient nicht nur als Transportmittel für Pakete, sondern auch als Lade- und Startplattform für Drohnen. Drohnen übernehmen dabei die Zustellung an schwer zugängliche oder weiter entfernte Kunden, während der Lkw seine reguläre Route fortsetzt. Studien (Daknama & Kraus, 2017; Bertolaso et al., 2016; Feng et al., 2018) zeigen, dass dieser Ansatz insbesondere in Ballungsgebieten oder Gebieten mit hoher Nachfrage sinnvoll ist. Einige Systeme erlauben es sogar, dass Drohnen zwischen verschiedenen Lkw wechseln, um die Effizienz zu steigern (Daknama & Kraus, 2017; Liu et al., 2018).

Ein weiteres Modell ist die gleichzeitige Belieferung durch Lkw und Drohnen. Dabei liefern beide Transportmittel gleichzeitig an Kunden, wobei die Drohnen ihre Pakete direkt vom fahrenden Lkw aufnehmen (Carlsson & Song, 2018; Campbell et al., 2018; Agatz et al., 2018; Boysen et al., 2018; Kitjacharoenchai & Lee, 2019; Liu et al., 2018; Roca-Riu & Menendez, 2019; Yoon, 2018; Scott & Scott, 2017). Durch GPS-Tracking und kameragestützte Systeme kann die Drohne den Lkw auch während der Fahrt präzise lokalisieren und darauf landen, um weitere Lieferungen aufzunehmen (Kitjacharoenchai & Lee, 2019). Dieser Ansatz erhöht die Flexibilität und Geschwindigkeit der Zustellung erheblich. Ein zusätzlicher innovativer Aspekt ist das Konzept des Crowdsourcings, bei dem private Drohnenbetreiber in den Lieferprozess integriert werden (Behroozi & Ma, 2020). Diese Crowdsourcing-Drohnen übernehmen die „letzte Meile“ der Zustellung, nachdem ein Lkw die Pakete in eine Nachbarschaft oder ein bestimmtes Gebiet geliefert hat. Dieses Konzept könnte langfristig zu einem vollständig autonomen Lieferökosystem führen.

Abschließend lässt sich feststellen, dass Drohnen eine vielversprechende Ergänzung zur traditionellen Logistik darstellen. Sie bieten insbesondere in Kombination mit Lkw-Lieferungen innovative Lösungen, um den wachsenden Anforderungen der städtischen Logistik gerecht zu werden. Gleichzeitig bestehen weiterhin technische und logistische Herausforderungen, die vor einer flächendeckenden Einführung gelöst werden müssen, wie etwa die Verbesserung der Batteriekapazität, die Optimierung der Routenplanung sowie die rechtlichen Rahmenbedingungen für Drohnenflüge in urbanen Gebieten. Dennoch bieten die verschiedenen untersuchten Konzepte einen klaren Ausblick auf die Zukunft der urbanen Logistik, in der Drohnen eine zentrale Rolle spielen könnten.

2.5 Potenzialanalyse von Gütersegmenten für Drohnen

Nachdem im vorherigen Kapitel unterschiedliche Belieferungskonzepte untersucht wurden, geht es nun um die Frage, welche Güter sich für den Transport mit Drohnen eignen. Die methodische Herangehensweise an die Analyse des Potenzials von Dronentransporten im Güterverkehr verzichtet bewusst auf den PRISMA-Ansatz, da dieser typischerweise auf die systematische Analyse umfangreicher wissenschaftlicher Literatur abzielt, welche in diesem spezifischen Bereich nur in begrenztem Umfang verfügbar ist. Anstelle dessen stützt sich die Analyse auf Berichte und Praxisbeispiele, die vor allem aus Presseartikeln und den Websites von Logistikdienstleistern sowie Drohnenherstellern stammen. Dabei konzentriert sich die Analyse überwiegend auf Praxisbeispiele aus verschiedenen Regionen weltweit, mit einem besonderen Fokus auf Europa (z. B. Deutschland, Finnland, Frankreich, Island, Schweiz) und englischsprachige Länder (Australien, Ghana, USA) sowie weitere Länder wie Ruanda, Tansania und China. Es wird dabei keine systematische oder vollständige Erfassung aller Projekte angestrebt, sondern es werden exemplarisch relevante Anwendungsfälle aus den Jahren 2014 bis 2021 dargestellt. Diese umfassen Beispiele aus unterschiedlichen Entwicklungsphasen, darunter Testflüge, Pilotprojekte, einmalige Einsätze sowie Anwendungen im laufenden Betrieb. Diese Quellen wurden selektiv ausgewertet und ihre Ergebnisse in übersichtlicher Form dargestellt.

Eine zentrale Herausforderung bestand darin, eine theoriegeleitete Analyse durchzuführen, die die technischen Eigenschaften von Drohnen (UAS) in Bezug auf die Transportanforderungen verschiedener Güterarten untersucht. Dafür wurden in einem ersten Schritt die technologischen und operativen Limitationen von UAS dargestellt und mit den spezifischen Anforderungen der unterschiedlichen Güterarten abgeglichen. Dies ermöglichte eine fundierte Identifikation der Güterarten, die sich für den Dronentransport eignen, und schloss gleichzeitig jene aus, die aufgrund technischer Einschränkungen oder anderer Faktoren ungeeignet sind. Der systematische Vergleich von Dronenfähigkeiten und Gütermerkmalen bildet somit den Kern der Methodik.

In der umfassenden Untersuchung wird das Potenzial von Drohnen im Güterverkehr anhand von Praxisbeispielen beleuchtet. Die Analyse zeigt, dass Drohnen sowohl im städtischen als auch im ländlichen Raum zunehmend als Transportmittel genutzt werden, wenngleich der Einsatz in vielen Fällen noch auf Pilotprojekte beschränkt ist. In der Praxis gibt es bereits zahlreiche Beispiele für den Einsatz von Drohnen im Güterverkehr, die in vier Kategorien unterteilt werden können: Warenlieferung, Paketlieferung, medizinischer Transport und Werkslogistik. Diese Beispiele umfassen laufende Operationen und Pilotprojekte weltweit, wie etwa die Lieferung von Konsumgütern in städtischen Gebieten, die Zustellung von Paketen in schwer zugänglichen Gebieten, den Transport medizinischer Güter über feste Flugrouten und den innerbetrieblichen Transport von Materialien zwischen Werken.

Warenlieferungen sind eine breit gefächerte Kategorie, die unterschiedliche Arten von Konsumgütern umfasst, darunter Lebensmittel, Metallwaren, Drogerieartikel und zubereitete Speisen. Diese Art der Dronennutzung findet sowohl im laufenden Betrieb als auch in temporären Feldversuchen statt, insbesondere in urbanen Räumen. Wing, eine Tochterfirma von Alphabet, betreibt seit 2019 Dronenlieferungen in Städten wie Helsinki (Wing, 2019a), Christiansburg (Wing, 2019b), Logan (Wing, 2019c) und Canberra (Wing, 2019d). Über eine App können Kundinnen und Kunden Lebensmittel, Snacks oder Metallwaren bestellen, die dann per Drohne aus einer Höhe von sieben Metern abgesetzt werden (Vincent, 2021). In Reykjavik arbeitet Flytrex mit der Plattform aha.is zusammen, um Lebensmittel und Elektronikartikel zu liefern (Nichols, 2018; Ross, 2018). Auch in China wurde 2018 ein Dronenlieferdienst für zubereitete Speisen im Shanghai Jinshan Industrial Park gestartet, bei dem feste Flugrouten und Zwischenstationen für die Abholung genutzt werden (Li, 2018). Einmalige Projekte wie Amazons On-Demand-Dronenlieferungen in Großbritannien 2016 (Bond, 2016) oder Walmarts Feldversuche in den USA 2020 (Ward, 2020) zeigen ebenfalls die Bandbreite der Anwendungsmöglichkeiten. Auch in Deutschland wurden Pilotprojekte zur Dronenzustellung erprobt, darunter die Zeitungslieferung in ländlichen Regionen, um Zustellkosten zu senken und die logistischen Herausforderungen in dünn besiedelten Gebieten zu überwinden (Wilkens, 2017). Seit kurzem werden in Lüdenscheid, Deutschland, Ersatzteile per Linienflugverkehr mittels Drohnen an Geschäftskundinnen und -kunden geliefert (Haße, 2024).

Paketlieferungen fokussieren sich speziell auf den Transport von Paketen in schwer zugängliche Regionen, wie zum Beispiel abgelegene Bergdörfer. Seit 2016 liefert DPD in Südfrankreich regelmäßig Pakete per Drohne an abgelegene Firmenverbünde (sUAS News, 2016). Eine zweite Route wurde 2019 in der Region Chartreuse eingeführt, wo Drohnen Pakete an eine Auffangstation liefern, was die Transportzeit erheblich verkürzt (DPDgroup, 2019). DHL führte 2016 einen dreimonatigen Pilotversuch in den Alpen durch, bei dem Pakete über eine acht Kilometer lange Strecke auf die Winklmoosalm transportiert wurden (Kolokythas 2016). Dabei kam eine automatisierte Be- und Entladestation zum Einsatz. Dieses Projekt wurde jedoch 2021 eingestellt, da regulatorische Hürden und hohe Sicherheitsanforderungen den Droneneinsatz, insbesondere in städtischen Gebieten, erschwerten. Ein ähnliches Projekt zum Transport von Paketen zwischen dem deutschen Festland und den Inseln Juist und Norderney konnte die grundsätzliche Machbarkeit nachweisen (Moormann, 2015). Ein kommerzieller Betrieb konnte anschließend aber nicht etabliert werden. Weitere Tests, wie der von UPS im ländlichen Florida 2017 (Perez & Kolodny, 2017), zeigten die Vorteile von Drohnen, die Pakete von Lieferfahrzeugen aus transportierten und die reguläre Route des Fahrzeugs unterstützten. Auch im urbanen Raum von Vantaa in Finnland testete Skyparts direkte Paketlieferungen von Verteilzentren zu Supermärkten, wo Kunden ihre Pakete an Drohnen-Landeplätzen abholen konnten (Brown, 2019).

Der **medizinische Transport** ist eine der häufigst genutzten Anwendung für Drohnen (Stewart, 2018; ETHealthWorld, 2019; Porter, 2020; Stonor, 2021; Swiss Post, 2021; DHL, 2018), was

insbesondere auf den hohen gesellschaftlichen Nutzen zurückzuführen ist. Oft sind nur feste Flugrouten zwischen medizinischen Einrichtungen notwendig, was die Genehmigung von Drohnenflügen erleichtert. Seit 2016 betreibt Zipline in Ruanda und Ghana ein Drohnennetzwerk, das medizinische Güter wie Blutkonserven, Impfstoffe und Arzneimittel in abgelegene Regionen liefert (Stewart 2018). In den USA wurde während der Corona-Pandemie eine Drohnenflugroute in North Carolina eingerichtet, um Schutzausrüstung und medizinische Güter zu transportieren (Porter, 2020). In der Schweiz nutzt die Drohnenfirma Matternet in Zusammenarbeit mit der Swiss Post feste Flugrouten für den Transport von Laborproben zwischen Krankenhäusern (Swiss Post 2021; Matternet 2022) und auch in Deutschland wurde der Transport von Laborproben mittels Drohnen erprobt (Labor Berlin, 2020). Zudem führte DHL bereits 2014 ein Pilotprojekt in Deutschland durch, bei dem eine Drohne Notfallmedikamente auf die Nordseeinsel Juist transportierte (DHL 2018). Aktuell befinden sich in Deutschland mehrere städtische Drohnenprojekte für den medizinischen Transport im Aufbau, darunter das „Medifly“-Projekt in Hamburg (Hamburg News, 2020) und das „Kodrona“-Projekt in Siegen (Westfälenspiegel, 2020), bei denen Drohnen Proben und medizinische Güter zwischen Krankenhäusern transportieren sollen.

Werkslogistik ist eine weitere Anwendungsmöglichkeit für Drohnen, bei der Materialien oder Ersatzteile zwischen verschiedenen Standorten eines Unternehmens transportiert werden. Dies ist vor allem dann sinnvoll, wenn die zu transportierenden Güter nicht allzu schwer oder sperrig sind und der regelmäßige Transport zwischen festen Standorten erfolgt. Ein Pilotprojekt von Emqopter in Bad Neustadt demonstrierte 2017 den Transport von Ersatzteilen, Hauspost und sogar Essen zwischen zwei Werken eines Automobilzulieferers (Wolfangel, 2018). Ein weiteres Projekt fand 2020 zwischen zwei Standorten des Chemieunternehmens Merck statt, wo Pigmentproben per Drohne transportiert wurden (Klinke, 2020).

Zusammenfassend zeigt die Untersuchung, dass Drohnen im Güterverkehr ein großes Potenzial bieten, insbesondere in spezifischen Anwendungsbereichen wie der medizinischen Logistik und der Werkslogistik. Drohnen können besonders in abgelegenen oder schwer zugänglichen Regionen einen effizienten und zeitsparenden Transport ermöglichen. Viele Projekte befinden sich jedoch noch im Teststadium, und der breite Einsatz von Drohnen wird durch regulatorische, technische und sicherheitsrelevante Herausforderungen eingeschränkt. Dennoch weisen die beschriebenen Praxisbeispiele auf eine zukunftsträchtige Entwicklung hin, die insbesondere in spezialisierten Transportbereichen bereits heute greifbare Vorteile bietet. Für einen großflächigen Einsatz von Drohnenbelieferungen scheinen Warenlieferungen und, vor allem wegen des hohen Aufkommens, Paketlieferungen großes Potenzial mit weitreichenden Auswirkungen zu haben.

3 Modellierung und Simulation

Ausgehend von den identifizierten Rahmenbedingungen für die unbemannte Luftfahrt erfolgt in diesem Kapitel die Modellierung einer Verkehrsverlagerung auf Drohnen. Dafür werden zunächst geeignete Szenarien entwickelt, die anschließend in den Modellen simuliert werden. Abschließend erfolgt die Darstellung der wesentlichen Ergebnisse aus den Modellen.

3.1 Szenariendefinition und -entwicklung

Um die Auswirkungen einer Verlagerung des Verkehrs vom Boden in die Luft auf Mensch und Umwelt untersuchen zu können, spielt es eine entscheidende Rolle, welche Art von Verkehr in welchem Umfang den Verkehrsträger wechselt.

Der Fokus dieser Studie lag auf der Nutzung von Drohnen bzw. UAS in den folgenden Anwendungsfeldern:

- ▶ Freizeit
- ▶ Warentransport inkl. Paketlieferungen
- ▶ Inspektion/Monitoring
- ▶ Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS).

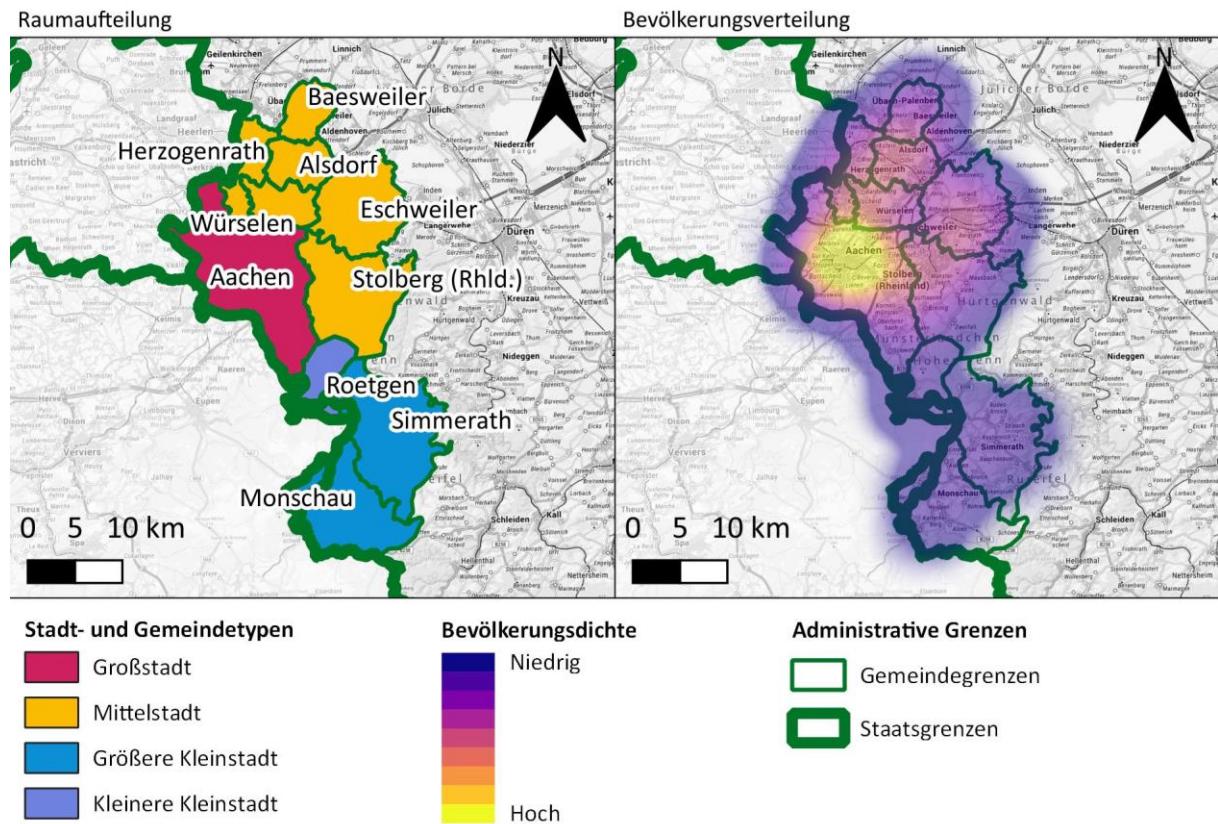
Anwendungen aus dem Bereich der bemannten Luftfahrt waren nicht Teil der Betrachtungen. Die genannten Anwendungsfälle weisen Unterschiede in der Art und Häufigkeit der UAS-Nutzung auf. Zentraler Bestandteil des vorliegenden Endberichts ist die Abschätzung von Verkehrs mengen und den daraus resultierenden Auswirkungen am Boden und in der Luft. Hierzu kam ein System aus ineinander greifenden Simulationsmodellen zum Einsatz (siehe Kapitel 3.2). Insofern war es eine wesentliche Anforderung an die Szenariengestaltung, dem quantitativen Charakter der Verkehrsmodellierung gerecht zu werden. Von den vier oben genannten Anwendungsfeldern ist, ausgehend vom Ist-Zustand im heute vorhandenen reinen Bodenverkehr, der Warentransport inkl. Paketlieferungen dasjenige mit der höchsten zu erwartenden Verkehrsleistung. Diesem Umstand wurde im Rahmen der Szenarienentwicklung Rechnung getragen, sodass ein Hauptaugenmerk auf dem Wirtschaftsverkehr und dessen Teilbereich Güterverkehr lag.

Da die weitere Entwicklung des unbemannten Luftverkehrs nicht zuverlässig prognostiziert werden kann, war es geboten, mehrere mögliche Zukunftsszenarien in Erwägung zu ziehen und zu untersuchen. Die Ermittlung geeigneter Szenarien funktioniert nach dem Prinzip „Was wäre, wenn“. Auch wenn der Ausgang zukünftiger Entwicklungen unbekannt ist, so ist es doch möglich, wechselseitige Zusammenhänge zwischen bestimmten Vorgängen abzuschätzen. Für viele mögliche Annahmen bzgl. der zukünftigen Entwicklung lässt sich bestimmen, ob sie sich gegenseitig eher hemmen oder begünstigen. Diese Denkweise liegt der Methode der Szenariotechnik zugrunde. Sie ermöglicht es, potenzielle zukünftige Entwicklungen systematisch und nachvollziehbar abzubilden. Die gewonnenen Szenarien sind in sich konsistent, das bedeutet, die Kombination der einzelnen Entwicklungsdimensionen ist plausibel. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung kam die Szenariotechnik nach Weimer-Jehle (2018) zum Einsatz. Das Verfahren ist softwaregestützt und wird auch als Cross-Impact-Bilanzanalyse (CIB) bezeichnet.

Das Untersuchungsgebiet war in allen Szenarien die Städteregion Aachen (Abbildung 5). Sie besteht aus zehn Städten und Gemeinden, in denen rund 563.000 Menschen leben (Städteregion Aachen, 2024). Sie liegt am westlichen Rand Deutschlands und grenzt an die Niederlande sowie an Belgien. Ihre Gesamtfläche beträgt ca. 700 km² (Städteregion Aachen, 2024). Für die

Untersuchung zu Chancen und Risiken der unbemannten Luftfahrt eignet sie sich insbesondere wegen ihrer heterogenen Siedlungsstruktur. Mit der Stadt Aachen als Oberzentrum existiert ein zentral gelegener urbaner Bereich. Die Gemeinden Monschau, Simmerath und Roetgen im Süden bilden einen ländlichen Bereich, der in das Mittelgebirge Eifel hineinreicht und teils auf dem Gebiet des gleichnamigen Nationalparks liegt. Im Norden und Nordosten der Städteregion befindet sich ein Konglomerat aus Mittelstädten, das urbane und suburbane Bereiche beinhaltet. Die Effekte der COVID-Pandemie wurden nicht berücksichtigt. Für alle zugrunde liegenden Daten wurden somit die jeweils verfügbaren Werte bis einschließlich 2019 herangezogen.

Abbildung 5: Überblick des Untersuchungsgebiets Städteregion Aachen



Quellen: Eigene Darstellung mit Daten von BBSR 2023, BKG 2023b, Rödding 2020

Hintergrundkarte: TopPlusOpen (BKG, 2023a)

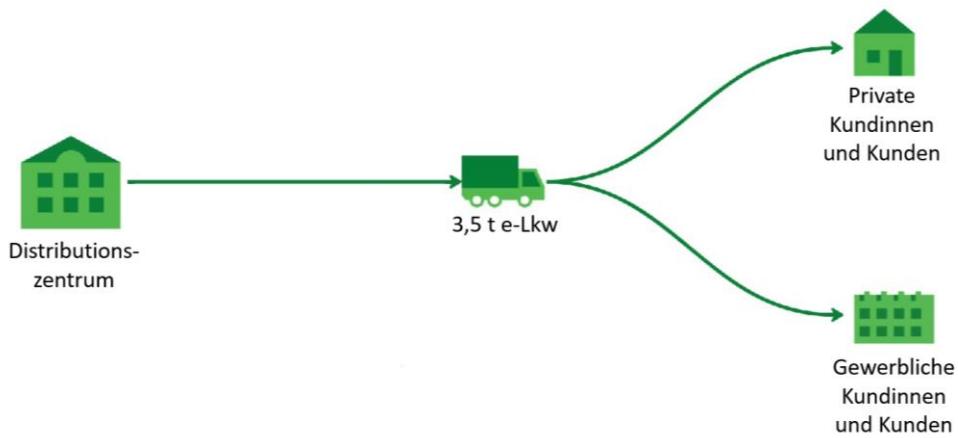
Ausgehend von der Szenariotechnik wurden drei Szenarien identifiziert. Das Szenario A – Status quo diente als Referenz, um die Auswirkung des Drohnenverkehrs in dem Szenario B – Paketstationen und Szenario C – Direktbelieferung zu bewerten. Die beiden Szenarien mit Drohnenverkehr decken nicht alle möglichen zukünftigen Einsatzmöglichkeiten von Drohnen ab. Vielmehr stellen sie zwei mögliche Varianten der zukünftigen Entwicklung dar, die jeweils in sich konsistent sind. Auf diese Weise sind eine modelltechnische Annäherung und Untersuchung möglich. Im Folgenden werden die drei Szenarien im Detail beschrieben.

3.1.1 Szenario A – Status quo

Das Szenario A – Status quo diente als Referenz für alle nachfolgenden Untersuchungen. Es stellt den Ist-Zustand dar, bei dem kein bzw. kein ausgeprägter Drohnenbetrieb stattfindet. Es werden in den vier betrachteten Anwendungsfeldern allenfalls vereinzelt UAS eingesetzt. Bemannte Flugtaxis sind, wie auch in den folgenden zwei Szenarien (siehe Kapitel 3.1.2 und 3.1.3), nicht

vorhanden. Die folgende Abbildung 6 zeigt exemplarisch das verfolgte Belieferungskonzept für Szenario A – Status quo.

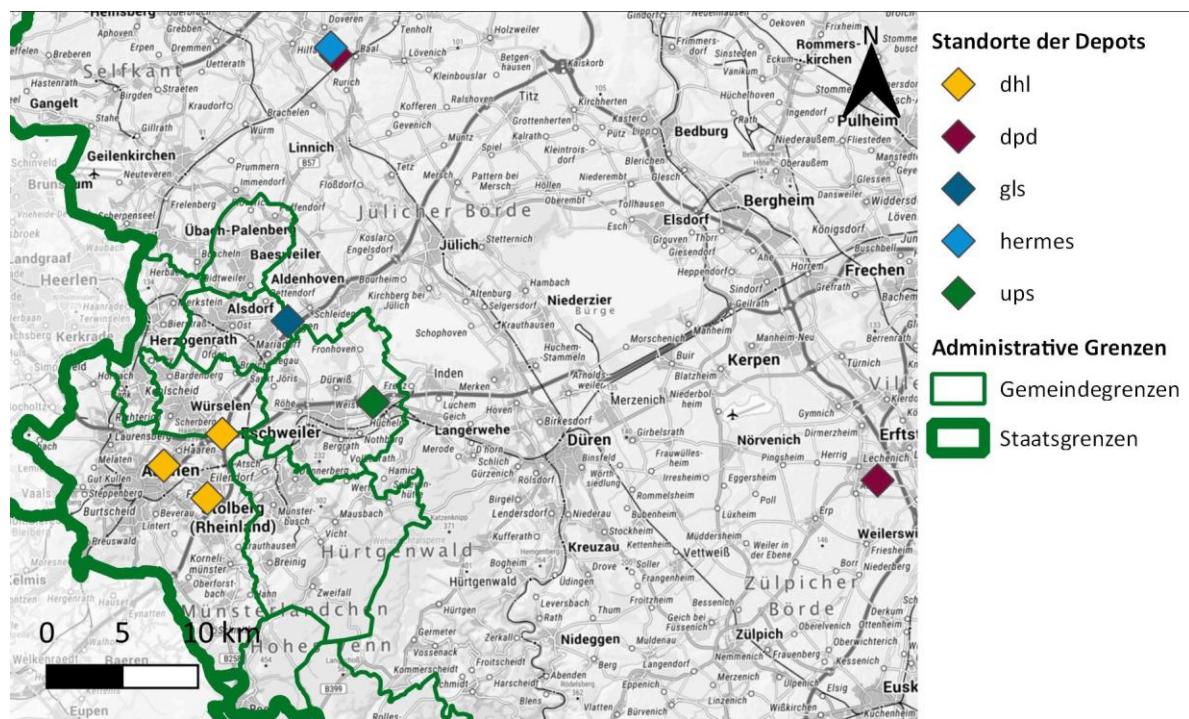
Abbildung 6: Szenario A – Status quo



Quellen: Eigene Darstellung, RWTH-ISB 2024

Die urbane Mobilität, in diesem Kontext die Ortsveränderung von Personen und Gütern, wird durch den Bodenverkehr abgewickelt. Dieser setzt sich aus Fuß- und Radverkehr, dem MIV sowie dem öffentlichen (Nah-)Verkehr (ÖV) zusammen. Bezogen auf das Untersuchungsgebiet, die Städteregion Aachen, umfasst der ÖV Busse, Taxen und Regionalzüge. Der von Kurier-, Express- und Paketdienstleistern (KEP-Dienstleistern) abgewickelte Pakettransport erfolgt mit Kleintransportern. Dabei handelt es sich bei dieser Untersuchung um elektrisch betriebene e-Lkw mit 3,5 t zulässiger Gesamtmasse (zGM). Diese sind jeweils an einem von acht real existierenden Distributionszentren (siehe Abbildung 7) der einzelnen Paketdienstleister stationiert und liefern die einzelnen Pakete an die Kundinnen und Kunden aus. Bei der Auslieferung werden stets mehrere Lieferziele zu einer Tour zusammengefasst. Bei den ausgelieferten Paketen handelt es sich um Business-to-Customer (B2C) oder Business-to-Business (B2B) Sendungen. B2B-Sendungen zeichnen sich dadurch aus, dass regelmäßig mehrere Pakete gleichzeitig an dieselbe Empfängerin oder denselben Empfänger geliefert werden.

Abbildung 7: Standorte der einzelnen Distributionszentren



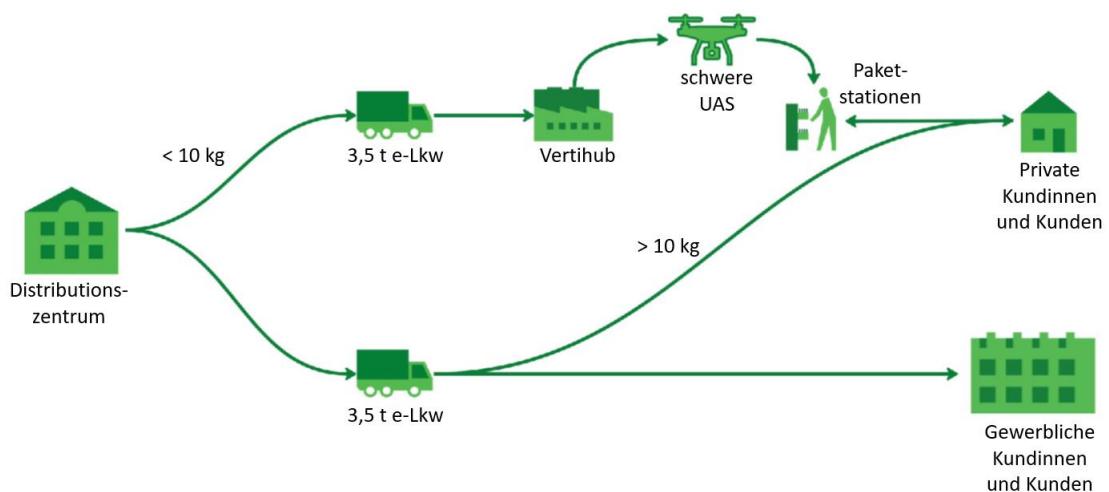
Quellen: Eigene Darstellung mit Daten von Paketda 2022, RWTH-ISB 2023

Hintergrundkarte: TopPlusOpen (BKG, 2023a)

3.1.2 Szenario B – Paketstationen

Im Unterschied zum Szenario A – Status quo wurde in Szenario B – Paketstationen ein Teil des Gütertransports der KEP-Dienstleister vom Boden in die Luft verlagert. Zusätzlich zu den acht Distributionszentren existieren zwei fiktive Vertihubs, an denen die Drohnen beladen und gestartet werden. Zuerst gelangen die Sendungen per elektrischen Kleintransportern von den acht Distributionszentren zu den zwei zentral gelegenen Vertihubs. Von dort aus beliefern Schwerlastdrohnen die in der Städteregion verteilten 317 Paketstationen. Abbildung 8 zeigt schematisch das Belieferungskonzept.

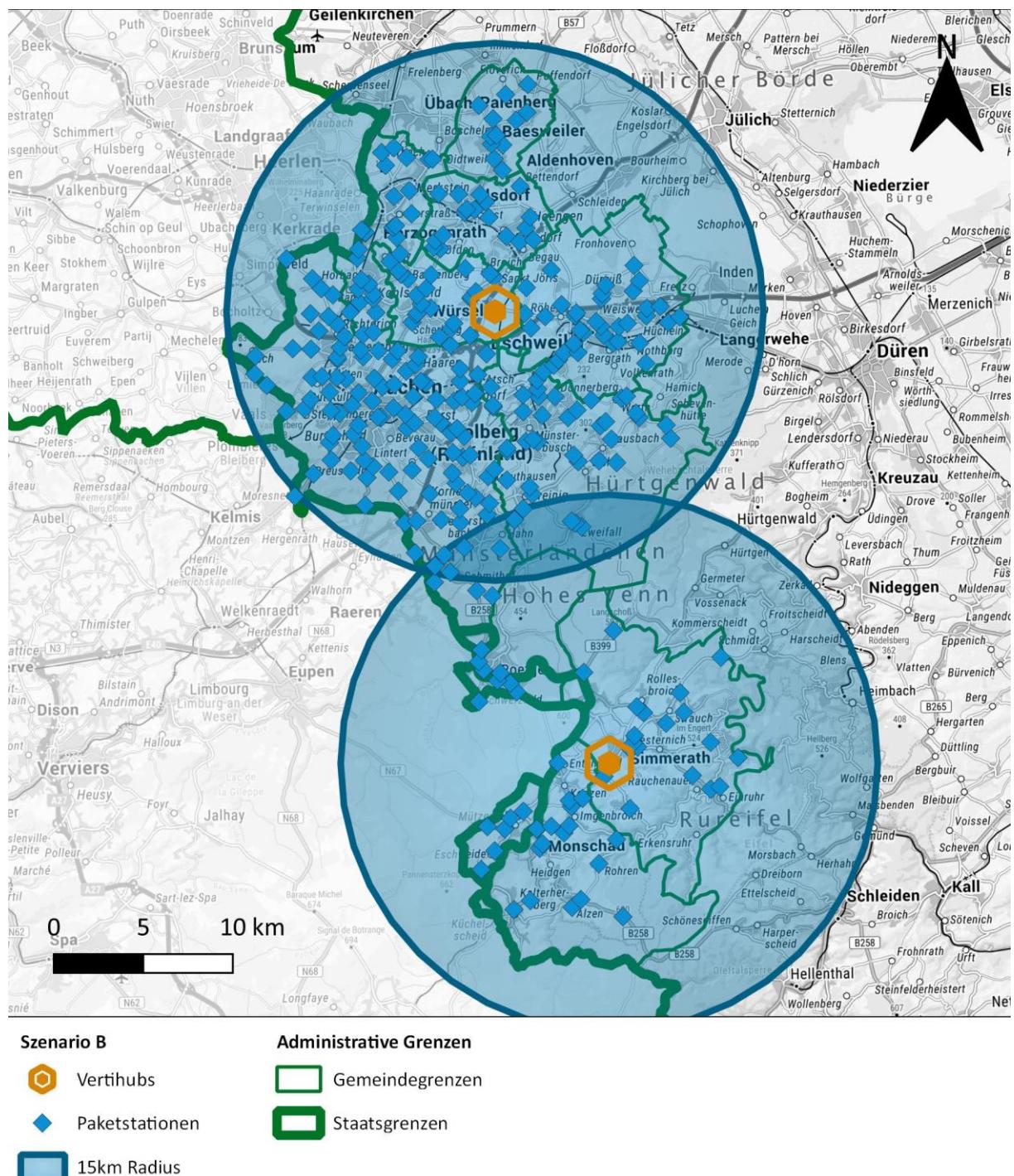
Abbildung 8: Szenario B – Paketstationen



Quellen: eigene Darstellung, RWTH-ISB 2024

Die Standorte der Paketstationen wurden dabei primär an real existierenden Tankstellen, Parkplätzen, Taxiständen, Bushaltestellen und bestehenden Flugverkehrsflächen angeordnet und hinsichtlich einer gleichmäßigen Abdeckung der Bevölkerung optimiert (siehe Abbildung 9).

Abbildung 9: Gewählte Standorte im Szenario B – Paketstationen



Quellen: eigene Darstellung mit Daten von BKG 2023, OpenStreetMap 2022, RWTH-ISB 2023

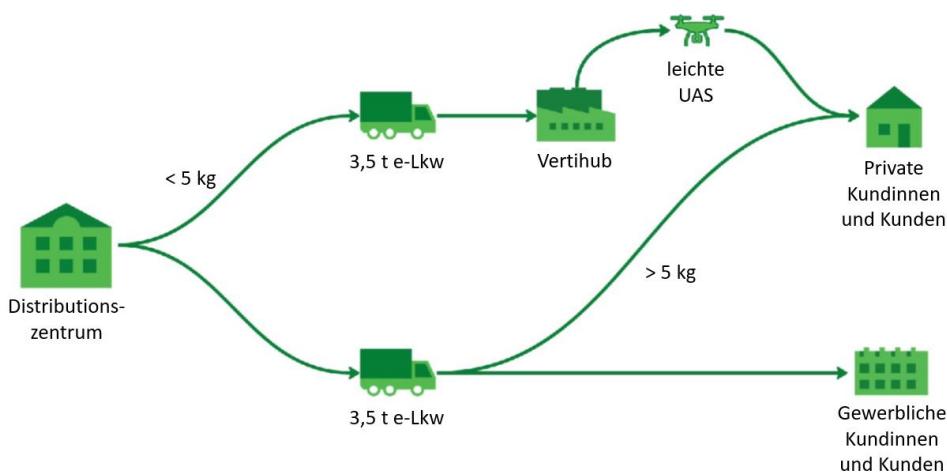
Hintergrund: TopPlusOpen (BKG, 2023a)

Den letzten Beförderungsabschnitt, die sogenannte „letzte Meile“, übernehmen die Empfängerinnen und Empfänger selbst durch die Abholung ihrer Sendungen bei den Paketstationen. Aufgrund der Transportkapazität der Drohnen wurden Sendungen mit einem Gewicht über 10 kg sowie alle B2B-Sendungen von dem beschriebenen Lieferverfahren ausgenommen. In diesen beiden Fällen erfolgt die Lieferung konventionell mit elektrischen Kleintransportern vom Distributionszentrum zu den Empfängerinnen und Empfängern. Der Ablauf der Lieferungen in Szenario B – Paketstationen ist in Abbildung 8 dargestellt. Die Drohnen sind elektrisch betrieben und erreichen, abhängig von den vorherrschenden Flugbedingungen, eine Geschwindigkeit zwischen 5 m/s und 10 m/s. Die Kapazität des Akkus ermöglicht eine Flugzeit von etwa 45 bis 60 min, bevor die Drohne zum Vertihub zurückkehren muss. Dadurch ergibt sich ein Aktionsradius um die Basisstation von mindestens 9 km bis, unter günstigsten Bedingungen, maximal 18 km.

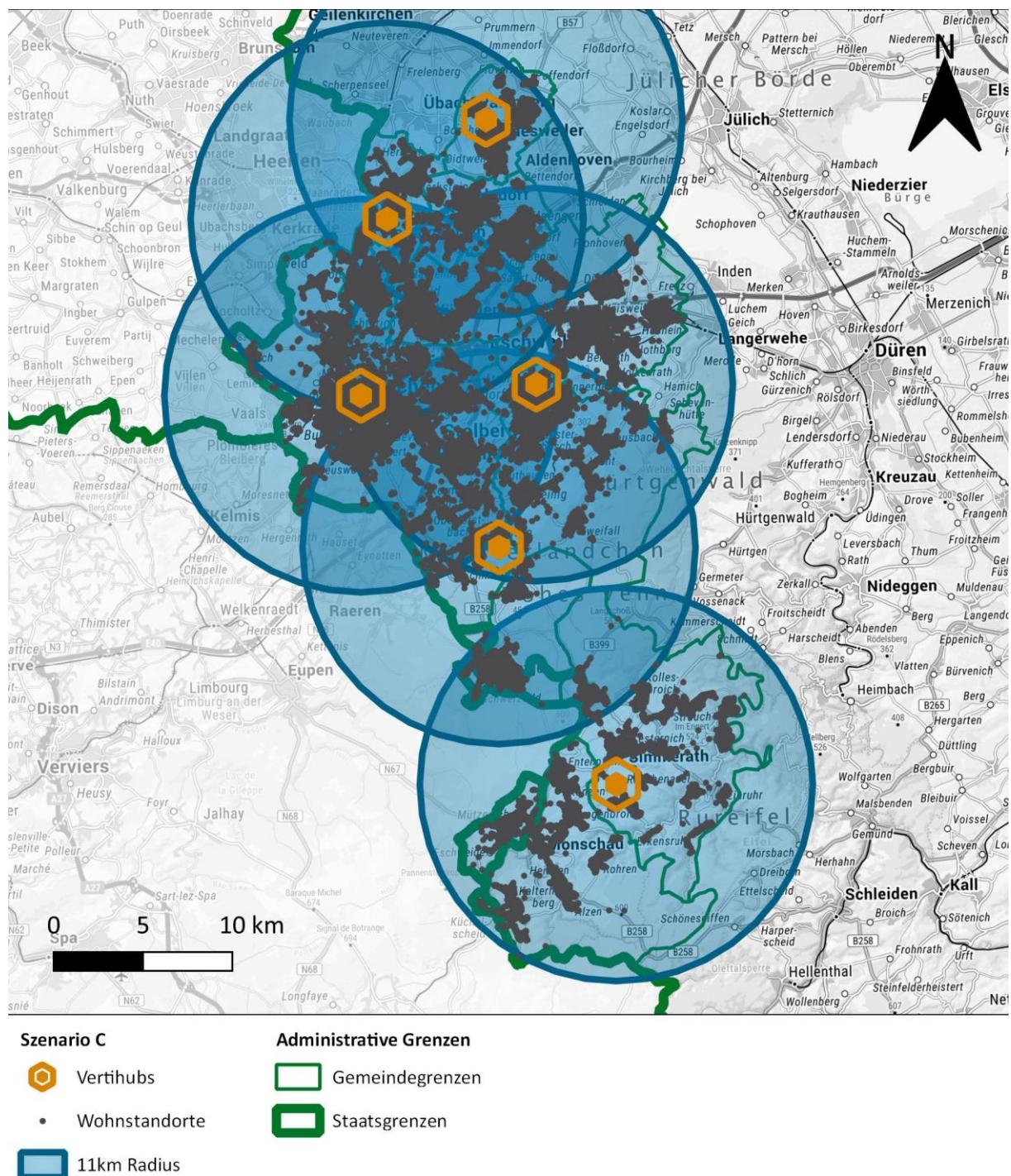
3.1.3 Szenario C – Direktbelieferung

In Szenario C – Direktbelieferung erfolgt die Lieferung der Sendungen mittels Drohne direkt an die Kundinnen und Kunden. Im Unterschied zum Szenario B – Paketstationen kommen leichte UAS mit einer Nutzlast von max. 5 kg zum Einsatz. Die leichteren Drohnen ermöglichen eine Landung auch in innerstädtischen Bereichen, sodass in Zukunft alle Haushalte direkt auf oder an ihrem Grundstück beliefert werden können. Je nach Wetterverhältnissen erreichen sie eine Fluggeschwindigkeit von 10 bis 18 m/s und die im Akku gespeicherte Energie reicht für eine Flugzeit von ca. 30 min. Ihre Reichweite ermöglicht einen Aktionsradius von mindestens 9 km, vom Vertihub aus betrachtet. Herrschen bestmögliche Bedingungen, erweitert sich der Aktionsradius auf max. 16 km. Als Stützpunkte für die leichten Drohnen existieren sechs auf das Untersuchungsgebiet verteilte Vertihubs (siehe Abbildung 11). Der Transport von Paketen von den acht Distributionszentren zu den Vertihubs erfolgt mit Kleintransportern. Durch die geringere Nutzlast der Drohnen von 5 kg im Gegensatz zu 10 kg im Szenario B – Paketstationen muss ein höherer Anteil der Pakete aufgrund ihres Gewichts konventionell per Kleintransportern ausgeliefert werden. Zudem sind in diesem Szenario geeignete Freiflächen für die Zustellung erforderlich. Solche Freiflächen können beispielsweise auf Hausdächern, in Gärten oder auf Einfahrten bereitgestellt werden (siehe Kapitel 2.2.1). Sollten aufgrund der Vorgaben des Bebauungsplans oder der Bauweise angrenzender Gebäude keine geeigneten Freiflächen vorhanden sein, wird angenommen, dass die Zustellung entweder über benachbarte Grundstücke oder in der Nähe verfügbare Freiflächen erfolgen kann. B2B-Sendungen werden unabhängig von ihrem Gewicht konventionell am Boden ausgeliefert. Das Belieferungskonzept ist schematisch in Abbildung 10 dargestellt.

Abbildung 10: Szenario C – Direktbelieferung



Quellen: eigene Darstellung, RWTH-ISB 2024

Abbildung 11: Gewählte Standorte im Szenario C – Direktbelieferung

Quellen: eigene Darstellung mit Daten von BKG 2023, OpenStreetMap 2022, RWTH-IBS 2023
 Hintergrund: TopPlusOpen (BKG, 2023a)

3.2 Modellierung und Parametrisierung

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurden verschiedene Simulationsmodelle zur Abbildung des bodenseitigen Personen- als auch des Güterverkehrs sowie des unbemannten Luftverkehrs eingesetzt, um die Effekte des Einsatzes unbemannter Luftfahrt im Vergleich zur bislang

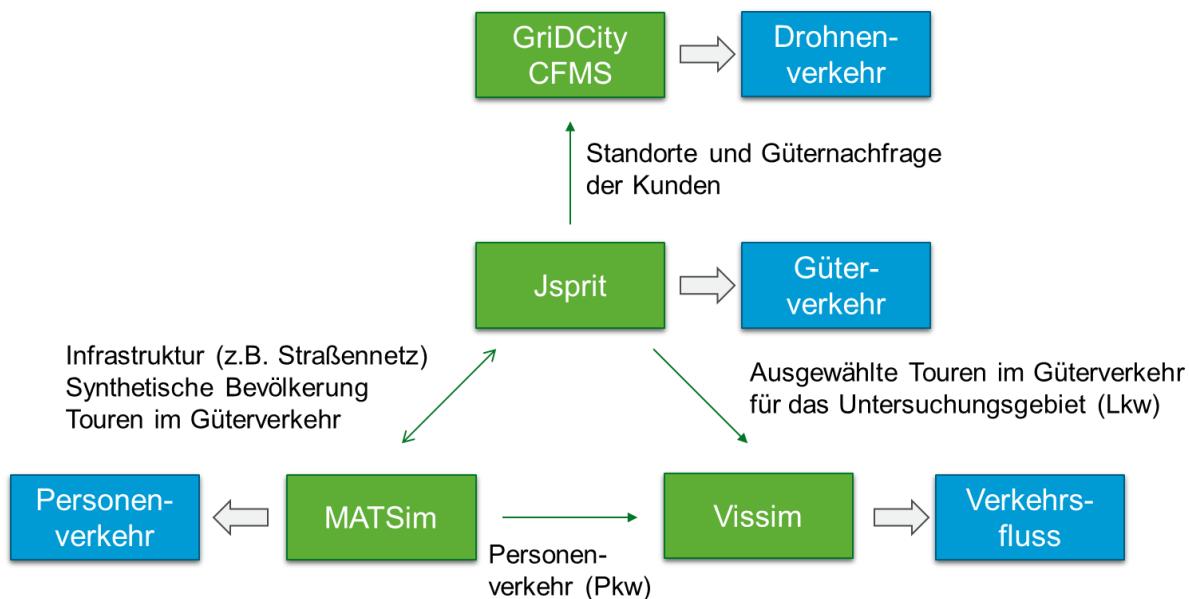
bodenseitigen Abwicklung des Güterverkehrs im Detail zu untersuchen. Das Modell für den bodenseitigen Personenverkehr berücksichtigt alle Verkehrsmodi (z. B. auch Fuß- und Radverkehr). Für die Umlegung und die darauf aufbauende Berechnung der Streckenbelastungen ist jedoch lediglich der motorisierte Verkehr relevant.

Im Folgenden werden die Vorteile durch die Kombination der Modelle aufgezeigt:

- ▶ Durch den **kombinierten Einsatz von Modellen des bodengebundenen Verkehrs und des Luftverkehrs** können Verlagerungseffekte des Güterverkehrs vom Boden in die Luft abgebildet werden.
- ▶ Die **Kombination von Güter- und Personenverkehrsmodellen des bodengebundenen Verkehrs** erlaubt die realistische Abbildung von Entlastungseffekten (u. a. Auswirkungen auf Staus bzw. Verlustzeiten und Transportzeiten).
- ▶ Der **kombinierte Einsatz von Umlegungsmodellen für den bodengebundenen Verkehr und Simulationsmodellen für detaillierte Verkehrsflussuntersuchungen** dient zur realitätsnahen Darstellung von Staueffekten, die durch Lieferverkehre in Städten auf atypische Art und Weise verursacht werden, und der diesbezüglichen Entlastung durch Drohnen.

Vor diesem Hintergrund wurden diverse Modelle miteinander verknüpft. Zur Modellierung des Luftverkehrs wurden Gridcity (Peinecke, 2017) und CFMS (Naser et al., 2021) verwendet. Zur Modellierung des bodengebundenen Personenverkehrs MATSim (Axhausen et al., 2016), des bodengebundenen Güterverkehrs Jsprit (Schröder et al., 2012) und der verkehrstechnischen Untersuchung des Verkehrsflusses (Vissim 2023). Alle Simulationsinstrumente wurden bei Bedarf an die örtlichen Gegebenheiten der Städteregion Aachen angepasst, um eine realistische Simulation zu erhalten. Abbildung 12 zeigt eine Übersicht über die verschiedenen Modelle und deren Datenschnittstellen.

Abbildung 12: Verwendete Modelle im Forschungsvorhaben und deren Datenschnittstellen



Quellen: eigene Darstellung, DLR e.V., RWTH-ISB

Mittels Jsprit wurden die Touren der elektrisch betriebenen e-Lkw erzeugt, die zu MATSim, Vissim und Gridcity transferiert wurden. Der Dateninput aus Jsprit war für MATSim von Relevanz, um den Güterverkehr mit dem gesamten Personenverkehr in der Städteregion Aachen zu

simulieren und auf der Basis die Widerstände im Infrastrukturnetz für den Güterverkehr realitätsnah darstellen zu können. Durch die gemeinsame Simulation des Personen- und Güterverkehrs konnten in MATSim stark belastete Streckenabschnitte identifiziert werden. Die betroffenen Straßenabschnitte wurden in Vissim exemplarisch aufgebaut, simuliert und anschließend die Ergebnisse auf die Region hochgerechnet. An Gridcity wurden die Touren übermittelt, die für den Luftverkehr vorgesehen sind. Hierbei waren vornehmlich die Start- und Landepunkte von Relevanz. Startpunkte waren in diesem Kontext die Distributionszentren und Vertihubs der KEP-Dienstleister. Die zu beliefern Paketstationen (Szenario B) und Privathaushalte (Szenario C) waren in diesem Fall die Landepunkte. In Gridcity wurden diese Anforderungen mittels einer Planung mit der Software CFMS (Copter Flight Management System) in Trajektorien umgesetzt, die anschließend statistisch analysiert wurden.

3.2.1 Modellierung des bodengebundenen Verkehrs

Der bodengebundene Verkehr umfasst sowohl den Güterverkehr als auch den Personenverkehr. Die Modellierung der Güterverkehrs nachfrage wurde mittels MATSim und Jsprit nach Schröder et al. (2012) durchgeführt. Zur detaillierten Untersuchung der entwickelten Szenarien (Kapitel 3.1) wurden die mikroskopische, agentenbasierte Verkehrssimulation MATSim (Axhausen et al., 2016) und das integrierte Logistik-Modul Jsprit eingesetzt. MATSim diente hierbei zur Abbildung des Verhaltens und der Entscheidungsprozesse heterogener Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger im Güterverkehr auf infrastruktureller Ebene. Dagegen diente Jsprit zur Tourenoptimierung. Mittels Jsprit kann bisher jedoch nur ein verhaltenshomogener Sektor im Güterverkehr zeitgleich simuliert werden. Im Rahmen von MATSim/Jsprit wird ein typischer Tag simuliert. Für die Optimierung der Transportkosten mittels Jsprit gelten folgende Nebenbedingungen:

- ▶ Die Belieferungsfahrten zu den Kundinnen und Kunden beginnen und enden beim jeweiligen Distributionszentrum.
- ▶ Die Belieferungsmengen an die Kundinnen und Kunden sind im Voraus bekannt.
- ▶ Die Auslieferzeiten der Belieferungen können durch Zeitfenster beschränkt werden.
- ▶ Jeder Frachtführerin bzw. jedem Frachtführer wird ein Fuhrpark zugewiesen, der aus unterschiedlichen Fahrzeugtypen besteht. Die Fahrzeugtypen unterscheiden sich hinsichtlich Kapazität und Kosten.
- ▶ Einem Fahrzeug kann höchstens eine Route pro Tag zugewiesen werden.

Zur Modellierung des Personen- und Güterverkehrs am Boden eignen sich Verkehrsmodelle zur quantitativen Abschätzung der Auswirkungen von Maßnahmen oder von veränderten Randbedingungen in Bezug auf den Verkehr. In diesem konkreten Fall wurde ein Verkehrsmodell für die Städteregion Aachen verwendet, welches im Rahmen früherer Forschungsprojekte aufgebaut und kalibriert wurde (ISB, 2018). Es deckt sowohl die Stadt Aachen als auch umliegende ländliche Gebiete ab und eignet sich deshalb gut zur Untersuchung des Bodenverkehrs.

Das Modell bildet das Verkehrsgeschehen mikroskopisch ab, indem es die Mobilität einzelner Personen simuliert. Diese Personen werden auch als Agentinnen bzw. Agenten bezeichnet. Die Implementierung basiert auf der Software MATSim, welche quelloffen ist und ursprünglich an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich entwickelt wurde (Axhausen et al., 2016). Es steht eine Reihe von Modulen zur Erweiterung zur Verfügung, die eine Anpassung der Software an spezielle Anforderungen ermöglichen. Für das vorliegende Projekt kam das

Zusatzmodul „*freight*“ zum Einsatz. Dieses Modul ermöglicht eine Verknüpfung des extern modellierten Güterverkehrs mit der vorhandenen Personenverkehrssimulation.

Die Grundlage des Modells bildet eine synthetische Bevölkerung, die die demografischen Verhältnisse in der Städteregion Aachen widerspiegelt. Die Bevölkerung teilt sich in verschiedene Personengruppen auf, die jeweils charakteristische Eigenschaften hinsichtlich ihres Mobilitätsverhaltens aufweisen. Dies betrifft die Anzahl der Wege pro Tag, die Palette an möglichen Aktivitäten sowie die typischen Startzeiten und Dauern dieser Aktivitäten (Rödding, 2020). Auf Basis der synthetischen Bevölkerung ist der Personenverkehr im Modell abgebildet. Für dieses Projekt waren die Pkw-Fahrten das maßgebliche Produkt aus der Simulation des Personenverkehrs. Das Modell beinhaltet zwar auch Wege zu Fuß und mit dem Rad, diese tragen jedoch nicht zur Auslastung des Straßennetzes bei und beeinflussen daher den Lieferverkehr nicht. Ebenfalls im Modell vorhanden ist der öffentliche Verkehr. Busse sind gemäß Fahrplan in das Modell eingepflegt und bewegen sich im Netz. Ihr Aufkommen ist über einen Tag betrachtet unabhängig davon, wie hoch die ÖV-Nachfrage ausfällt.

Das Untersuchungsgebiet Städteregion Aachen kann nicht streng isoliert betrachtet werden, da verkehrliche Wechselwirkungen mit der Umgebung bestehen. Neben dem Binnenverkehr innerhalb des Untersuchungsgebiets sind auch Ziel-, Quell- und Durchgangsverkehre zu berücksichtigen. Das zugrunde liegende Straßennetz und die synthetische Bevölkerung erstrecken sich über das eigentliche Untersuchungsgebiet hinaus. Der Umgebungsbereich ist allerdings in einem wesentlich geringeren Detaillierungsgrad abgebildet. So kann z. B. davon ausgegangen werden, dass es für Bereiche außerhalb der Städteregion genügt, nur die Hauptverkehrsstraßen zu betrachten, da diese den zu erwartenden Ziel-, Quell- und Durchgangsverkehr für das Untersuchungsgebiet bereits detailgetreu abbilden.

Der Personenverkehr stellt in MATSim die Grundbelastung des Straßennetzes dar. Der modellierte Güterverkehr wird zusätzlich zu dieser Grundbelastung auf das Netz umgelegt. Wenn ein Güterfahrzeug zum Be- oder Entladen anhält, verlässt es die Simulation und hat während dieser Zeit keinen Einfluss auf die verfügbare Kapazität. Diese Modellierung des Güterverkehrs basiert auf der Annahme, dass Fahrzeuge an einem Ort zum Halten kommen, an dem sie den übrigen fließenden Verkehr nicht beeinträchtigen. In der Realität ist das jedoch nicht immer der Fall. Der Güterverkehr, vor allem der in diesem Projekt betrachtete KEP-Verkehr, hält oftmals am Straßenrand oder in zweiter Reihe und nimmt dadurch Einfluss auf den fließenden Verkehr (Schäfer et al., 2015). Aus diesem Grund erfolgte der Aufbau einer gesonderten Simulationsumgebung mit der Software Vissim, um die Auswirkungen eines Haltevorgangs von Lieferfahrzeugen auf den fließenden Verkehr zu bestimmen. Bei der Software handelt es sich um eine mikroskopische, multimodale Verkehrsflusssimulationssoftware der PTV Group (VISSIM, 2023), welche physische und psychologische Aspekte der simulierten Personen berücksichtigt. Grundlage hierfür bildet das Fahrzeugfolgemodell nach Rainer Wiedemann (1974). Da der Aufbau einer mikroskopischen Simulation für das komplette Untersuchungsgebiet nicht möglich war, wurden drei exemplarische Straßenkategorien mit jeweils zwei unterschiedlichen Haltepositionen (Fahrbahnrand und Radverkehrsinfrastruktur) untersucht. Um zufällige Einflüsse zu reduzieren, wurden über 100 Simulationsläufe mit alternierenden Startzufallszahlen simuliert und ausgewertet. Die Simulationsdauer betrug 60 Minuten, wobei das Lieferfahrzeug erst nach 10 Minuten in die Simulationsumgebung eingefahren ist. Der Simulationsvorlauf ermöglicht eine „Aufwärmphase“ der Simulation, in welcher die anderen Fahrzeuge bereits in die Simulation einfahren und eine entsprechende Grundbelastung erzeugen. Allgemein wurde der Radverkehr nicht simuliert, um nur den Einfluss des haltenden Lieferfahrzeugs isoliert auf den fließenden Verkehr ermitteln zu können. Der Radverkehr würde ein zusätzliches Hindernis für den fließenden Verkehr darstellen und eine Auswertung bzw. Interpretation der Ergebnisse erschweren. Die erzielten Ergebnisse

sind dennoch relevant, da der Radverkehr in der Realität, auch unter beengten Platzverhältnissen, das Lieferfahrzeug (gemeinsam mit dem Pkw-Verkehr) überholt. Abschließend erfolgte eine Hochrechnung der entstandenen Verlustzeiten auf die gesamte Region.

3.2.2 Modellierung des Drohnenverkehrs

Die Modellierung des Drohnenverkehrs basiert auf dem, aus der Personen- und Güterverkehrsmodellierung entstandenen Bedarf an luftseitigen Transportketten. Hierbei wurden die luftseitigen Simulationen mit dem DLR-Simulator Gridcity durchgeführt (Peinecke, 2017; Naser et al., 2021). Gridcity ist ein Szenariengenerator, der, basierend auf Modellparametern, große Szenarien von Flug- oder Bodenbewegungen in einem urbanen Umfeld generieren kann. Die Idee ist dabei, zunächst die Bewegungen aller Luftraumteilnehmerinnen und -teilnehmer, in diesem Fall der Drohnen, zu planen und vorherzusagen. Zu diesem Zweck wurden Start- und Zielpunkte sowie Startzeiten benötigt. Des Weiteren wurden für alle Drohnen Leistungsdaten benötigt, das heißt, mit welchen Geschwindigkeiten, Steig- und Sinkraten usw. geflogen werden kann. Basierend darauf wurden dann 4D-Trajektorien geplant. Diese wurden in einer Schnellzeitsimulation in statistische Daten überführt.

Die Simulation des Drohnenverkehrs wurde in drei Schritten durchgeführt:

1. Fluganforderungen

Zunächst wurde eine Liste von Fluganforderungen, bestehend aus einem Startpunkt (d. h. Startkoordinaten), frühestem Startzeitpunkt und Zielpunkt (d. h. Zielkoordinaten), generiert.

2. Trajektorien

Basierend auf den Fluganforderungen sowie den Luftfahrzeugeigenschaften (z. B. Fluggeschwindigkeit) wurde eine Liste von Trajektorien erstellt, die realistische Start- und Landezeiten sowie Flugzeiten zum Ziel berücksichtigen. Dies geschieht im Modul „gridcity“.

3. Statistische Karten

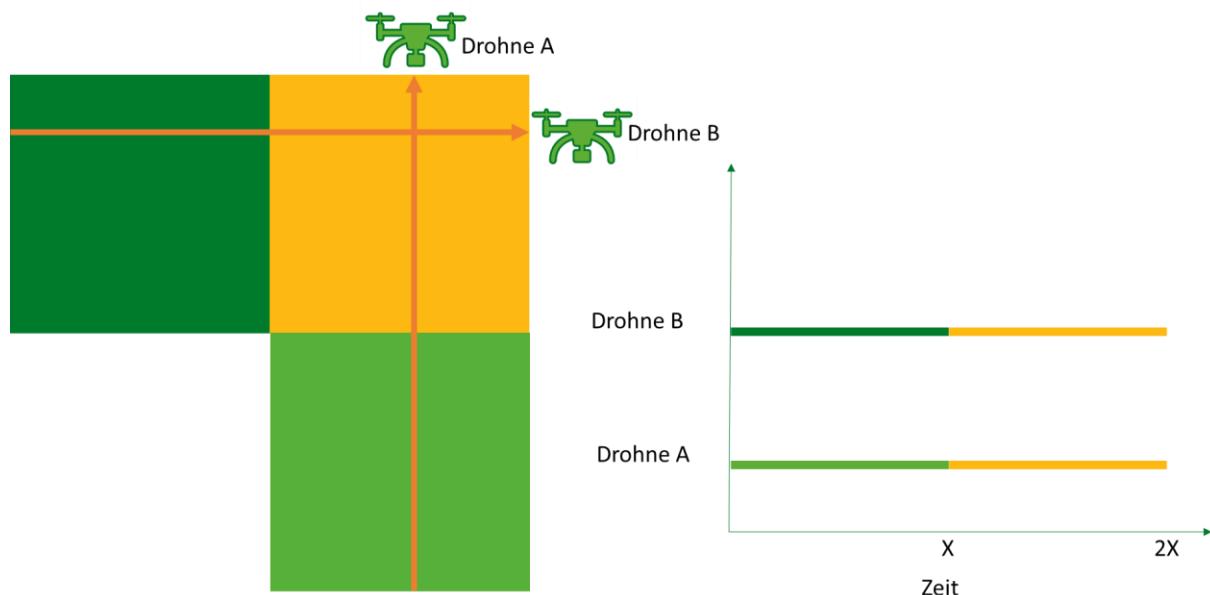
Aus der Liste dieser Trajektorien wurden Karten (d. h. „Heatmaps“) erstellt, die bestimmte statistische Werte im räumlichen Zusammenhang darstellen. Dies können z. B. Dichte- oder Konkurrenzkarten sein oder Immissionskarten für Lärm (d. h. Lärmbelastungskarten). Dies geschieht im Modul „gridcity_run“.

Im Rahmen der Simulation des Drohnenverkehrs entstanden statistische Karten für drei Arten von Maßzahlen: (Luftverkehrs-)Dichte, (Luftverkehrs-)Konkurrenz bzw. (Luftverkehrs-)Gleichzeitigkeit und (Präsenz-)Wahrscheinlichkeit. Diese wurden in Kapitel 3.3.5 zur Bewertung der visuellen Beeinträchtigung herangezogen.

Die *Dichte* ist dabei wie folgt definiert:

Für eine gegebene Zelle der zu berechnenden Dichtekarte werden die Aufenthaltsintervalle für alle Drohnen bestimmt. Die Summe dieser Intervalle geteilt durch die Gesamtdauer der Simulation ergibt die durchschnittliche Dichte des Verkehrs in dieser Zelle. Alle Maßzahlen können dabei für beliebige Formen und Größen von Zellen berechnet werden, etwa rechteckige, dreieckige oder hexagonale Zellen. In diesem Bericht ist jede Zelle ein Rechteck von $0,005^\circ \times 0,005^\circ$ Längen- und Breitengrad. Dies entspricht einer Kantenlänge von etwa 555 m nördlich und 354 m östlich, also einer Fläche von etwa $0,2 \text{ km}^2$. Demgemäß ist die Einheit für Dichte in diesem Bericht $1/0,2 \text{ km}^2$.

Abbildung 13: Bestimmung der statistischen Maßzahlen



Quelle: eigene Darstellung, DLR e.V. 2023

Das Beispiel aus Abbildung 13 veranschaulicht die Bestimmung der Dichte wie folgt: Die Drohne A startet in der hellgrünen Zelle und durchfliegt diese in Zeit X. Die Drohne B startet zur gleichen Zeit in der dunkelgrünen Zelle und durchfliegt diese mit der gleichen Geschwindigkeit wie Drohne A ebenfalls in Zeit X. Beide durchfliegen anschließend in einer Zeit X die gelbe Zelle. Somit beträgt die Gesamtdauer der Simulation 2X. Insgesamt hat damit Hellgrün eine Dichte von $d_{hg} = \frac{X}{2X} = \frac{1}{2}$, Dunkelgrün $d_{dg} = \frac{X}{2X} = \frac{1}{2}$, und Gelb $d_g = \frac{X+X}{2X} = 1$.

Die Dichte ist eine Maßzahl für die mittlere Belastung einer Zelle.

Die *Konkurrenz* bzw. *Gleichzeitigkeit* ist wie folgt definiert:

Für eine gegebene Zelle der zu berechnenden Dichtekarte werden die Aufenthaltsintervalle für alle Drohnen bestimmt. Das Maximum der Anzahl der Drohnen über das gesamte Aufenthaltsintervall gibt dann die Konkurrenz an. Sie bestimmt, wie viele Drohnen maximal gleichzeitig in der Zelle sind. In Abbildung 13 ergibt sich die Konkurrenz für die gelbe Zelle zu 2, für Hellgrün und Dunkelgrün jeweils zu 1.

Die *(Präsenz-)Wahrscheinlichkeit* ist wie folgt definiert:

Für eine gegebene Zelle der zu berechnenden Dichtekarte wird die Vereinigung aller Aufenthaltsintervalle für alle Drohnen bestimmt. Die Gesamtlänge (Summe) dieser Intervalle geteilt durch die Gesamtdauer der Simulation ergibt die durchschnittliche Präsenzwahrscheinlichkeit des Verkehrs in dieser Zelle. Für Abbildung 13 ergibt sich die Wahrscheinlichkeit für die gelbe Zelle zu $dp_g = \frac{X}{2X} = 0,5$, da die Hälfte der Simulationszeit mindestens eine Drohne in Gelb präsent ist. Dies gilt analog für die beiden anderen Zellen.

Die Wahrscheinlichkeit ist eine Maßzahl für eine Risikobelastung der Zelle und kann z. B. in eine visuelle Beeinträchtigung umgerechnet werden.

Zur Berechnung der beschriebenen Maßzahlen müssen eine Reihe von Annahmen getroffen werden. Im Rahmen dieser Simulation wird eine mittlere Reisegeschwindigkeit der Drohnen entsprechend der Szenarien angenommen, d. h. 10 m/s in Szenario B – Paketstationen und 18 m/s in Szenario C – Direktbelieferung.

Zusätzlich werden zwei Varianten in der luftseitigen Simulation durchgeführt:

1. Eine direkte Flugplanung der Drohnen ohne Flugbeschränkungsgebiete (ED-R).
2. Eine Flugplanung unter Berücksichtigung derzeitig bekannter Flugbeschränkungsgebiete.

Folgend der LuftVO, Paragraph § 21h (BMJ, 2023d), werden verschiedene geographische Gebiete als Flugbeschränkungsgebiete definiert, in denen ein Drohnenbetrieb nicht erlaubt ist. Zu diesen Flugbeschränkungsgebieten gehören:

- ▶ (unkontrollierte) Flugplätze in einem Abstand von 1,5 km
- ▶ (kontrollierte) Flughäfen in einem Abstand von 1,0 km
- ▶ Krankenhäuser in einem Abstand von 100 m
- ▶ Regierungs- und Justizgebäude in einem Abstand von 100 m (wie z. B. Bundesministerien, Gebäude der Verfassungsorgane des Bundes und der Länder, Liegenschaften von Polizei und anderen Sicherheitsbehörden, Justizvollzugsanstalten, Einrichtungen des Maßregelvollzugs, militärische Anlagen und Organisationen)
- ▶ Kritische Infrastruktur in einem Abstand von 100 m (wie z. B. Energieerzeugungs- und Energieverteilungsanlagen)

Abbildung 14 zeigt die sich so für die Städteregion Aachen ergebenden Flugbeschränkungsgebiete. Es ist zu beachten, dass im Bereich des Forschungsflugplatzes Aachen-Merzbrück ein Korridor eingefügt wurde, um einen Anflug der Paketdrohnen zu ihren Zielorten überhaupt zu ermöglichen. In Zukunft ist jedoch denkbar, dass gerade an bestehender Infrastruktur für den Luftverkehr sowohl der Personen- als auch der Güterverkehr in der Luft abgewickelt werden kann. Dadurch würde sich die Flächeninanspruchnahme minimieren.

Abbildung 14: Flugbeschränkungsgebiete für Flugbetrieb mit Drohnen

Quellen: eigene Darstellung, DLR e.V. 2023

Hintergrund: TopPlusOpen (BKG, 2023a)

Unter Berücksichtigung dieser Flugbeschränkungsgebiete bei der Flugverfahrensplanung fliegen die Drohnen auf schnellstem Wege vom Start- zum Zielpunkt. Je nach Himmelsrichtung steigen sie hierzu auf sechs verschiedene Höhen (160, 180, 200, 220, 240 und 260 m über Grund), um die Anzahl potenzieller Konflikte durch sich im Luftraum begegnende Drohnen minimal zu halten. Die vorgeschlagenen Flughöhen müssten aktuell über eine spezielle Betriebsgenehmigung vorab beantragt werden und bedürfen der Genehmigung der nationalen Luftfahrtbehörden. Zukünftig könnte dies jedoch über einen urbanen U-space in der Städteregion Aachen ohne vorherige Beantragung ermöglicht werden. Die unterschiedlichen Flughöhen stellen einen konfliktfreien Betrieb mehrerer Luftraumteilnehmer im unkontrollierten Luftraum sicher. Ein Konflikt mit der existierenden bemannten Luftfahrt kann (nahezu) ausgeschlossen werden, da bei Flügen nach Sichtflugregeln eine Mindestflughöhe von 300 m über Städten, anderen dicht besiedelten Gebieten und Menschenansammlungen im Freien gilt (vgl. LuftVO § 37, BMJ, 2023d). Für Start

und Landung der Drohnen wird eine Steig- bzw. Sinkrate von 3 m/s angenommen. Da zeitweise Flugaufträge gleichzeitig bei einem Startpunkt eingehen, wird angenommen, dass zwischen zwei Starts mindestens 300 s vergehen müssen, um den Startplatz freizumachen. Am Zielpunkt verweilt die Drohne 120 s, um die Lieferung zu entladen. Jede Drohne kehrt nach Ablieferung zu ihrem Startpunkt zurück.

Derzeit existieren keine anerkannten Studien größeren Umfangs, die die Geräuschimmissionen zukünftigen Drohnenverkehrs abschätzen könnten. Um die Geräuschbelastung des Drohnenbetriebs aus der luftseitigen Simulation basierend auf wenigen bisher bekannten Daten zu ermitteln, wird eine erste Abschätzung möglicher Belastungen wie folgt vorgenommen:

Die Flugbahnen der unbemannten Luftfahrzeuge (d. h. Drohnen) wurden als Punktfolge in einem zeitlichen Abstand von einer Sekunde simuliert. An jedem Koordinatenpunkt (t, x, y, h) einer solchen Flugbahn bzw. Trajektorie sind damit die Geschwindigkeit und Flugrichtung gegeben und die Geräuschemission bekannt. Für die modellierten Drohnen wird ein Schallleistungspegel von 101,0 dB(A) (Szenario B – Paketstationen) bzw. 99,0 dB(A) (Szenario C – Direktbelieferung) angenommen (Treichel, 2022). Die Werte wurden ohne Nutzlast ermittelt und sind daher im Realbetrieb höher anzunehmen. Als Richtwirkung wird der volle Raumwinkel von 4π am Mittelpunkt der Drohne angenommen. Dies entspricht einer freien Raumwirkung ohne weitere Hindernisse.

Es wird für jede einzelne Trajektorie i der A-bewertete Schalldruckexpositionspegel (Einzelereignispegel) bestimmt:

Formel 1: A-bewerteter Schalldruckexpositionspegel

$$L_{pAE,i} = 10 \log \left(\frac{1}{t_0} \int \frac{p_{A,i}(t)^2}{p_0^2} dt \right) dB \quad (1)$$

Die Referenzzeit ist hier $t_0 = 1 \text{ sec}$, $p_A(t)$ als der A-bewertete Schalldruckverlauf. Der Bezugsschalldruck $p_0 = 2 * 10^{-5} \text{ Pa}$ bzw. der A-bewertete Schalldruckpegelverlauf $L(p_A, i)(t)$ wird für jeden Punkt (j, k) eines regelmäßigen Immissionsgitters (einer Rasterlärmkarte) mit einer Maschenweite von 100 m berechnet. Zur Bestimmung des A-bewerteten Schalldruckpegelverlaufs werden die Emissionspegel zum jeweiligen Immissionsort propagiert. Anschließend wird die frequenzunabhängige geometrische Dämpfung (Abstandsmaß)

Formel 2: Frequenzunabhängige geometrische Dämpfung

$$D_s = -10 \lg \left(\frac{s^2}{s_0^2} \right) dB \quad (2)$$

und die frequenzbandabhängige atmosphärische Dämpfung (Luftabsorptionsmaß)

Formel 3: Frequenzunabhängige atmosphärische Dämpfung

$$D_{L,n} = -d_n \frac{s}{s_0} dB \quad (3)$$

mit den Dämpfungskoeffizienten d_n für jedes n -te Frequenzband nach ISO 9613-2, dem Abstand s und der Bezugsentfernung $s_0 = 1 \text{ m}$ (siehe oben) für die Schallausbreitung verwendet. Bodeneffekte werden bei der Schallausbreitung nicht berücksichtigt.

Diese einzelnen Immissionsgitter mit den Schalldruckexpositionspegeln für jede Trajektorie i werden dann für einen A-bewerteten äquivalenten Dauerschallpegel

Formel 4: A-bewerteter äquivalenter Dauerschallpegel

$$L_{pAeq,T} = 10 \lg \left(\frac{t_0}{T_E} \sum_{i=1}^N 10^{L_{pAE,i}/10} \right) dB \quad (4)$$

mit T_E als Erhebungszeit superponiert. Da die Gesamtaufzeit der Simulation derzeit 30 h beträgt ist dies der Referenzzeitraum. Dadurch wird der Dauerschallpegel für das untersuchte Gebiet bestimmt.

In den nachfolgenden Berechnungen zur Geräuschbelastung (vgl. Kapitel 3.3.5) wird kein weiterer Dämpfungsfaktor einbezogen, da es sich um eine Abschätzung der ungefähren Größenordnung des Drohnenlärm handelt. Aus Vereinfachungsgründen werden Dämpfungseigenschaften vom Boden oder Geräuschreflektionen durch Gebäude bei den Immissionsberechnungen nicht berücksichtigt. Diese sind insbesondere von lokalen Gegebenheiten abhängig, weswegen eine Auswertung anhand der Simulation nur bedingt allgemeine Rückschlüsse erlauben würde. Auch stellte sich in den Berechnungen heraus, dass der Einfluss der Wetterbedingungen nur marginal ist. In diesem Bericht werden nur die Ergebnisse der Lärmberechnungen bei 10 °C und 70 % relativer Luftfeuchte angegeben (siehe DIN ISO 9613-2).

3.3 Modellierungs- und Simulationsergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Modellierungs- und Simulationsergebnisse für die drei modellierten Szenarien aufgezeigt und erörtert. Die Grundlage ist hierbei die zuvor vorgestellte Modellierung des Bodenverkehrs und des luftseitigen Drohnenverkehrs. Es werden die Flächeninanspruchnahme der Start- und Landeinfrastruktur untersucht sowie die verkehrliche, ökonomische und energetische Auswirkung. Für den Drohnenverkehr erfolgt zudem die Betrachtung von sozialen und gesundheitlichen Auswirkungen sowie von der Robustheit des Betriebs.

3.3.1 Flächeninanspruchnahme

Durch den Einsatz von Drohnen für die Paketlieferungen entsteht der Bedarf nach Fläche für die Start- und Landeinfrastruktur. Die Inanspruchnahme von Fläche sollte dabei aus Nachhaltigkeitsgründen nach Möglichkeit auf ein Minimum beschränkt und der Fokus auf eine Flächenkonversion gelegt werden. Allgemein ist vor allem im urbanen Raum von diversen Nutzungsansprüchen und daraus entstehenden Konkurrenzen um die Fläche auszugehen, sodass im Rahmen des Planungsprozesses die unterschiedlichen Ansprüche gegeneinander abgewogen werden sollten.

Im Rahmen der Modellierung wurden für die beiden Szenarien innerhalb der Städteregion Aachen potenzielle Standorte für die Errichtung von Vertihubs ermittelt. Hierzu werden zunächst Ausschlussflächen, die keinen Drohnenbetrieb erlauben, auf Grundlage des geltenden Flächennutzungsplans für die Region Aachen definiert (Stadt Aachen, 2024). Diese Ausschlussflächen sind Wohnbauflächen, störanfällige Einrichtungen (z. B. Krankenhäuser) und sicherheitsrelevante Einrichtungen (z. B. Polizeieinrichtungen). Es werden explizit weitere aktuell geltende Ausschlussflächen für den Drohnenbetrieb, wie beispielsweise gewerbliche Bauflächen und Flächen für den Gemeinbedarf, eingeschlossen, da diese politisch motiviert in Zukunft auch für den Luftverkehr freigegeben werden könnten.

Für das Szenario B „Paketstationen“ müssen sowohl die Start- als auch die Landepunkte definiert werden. Im Rahmen der Standortfindung erfolgt ein zweistufiger Prozess, der zunächst die Paketstationen als Landepunkte und anschließend die Vertihubs als Startpunkte identifiziert. Die potenziellen Standorte der Paketstationen werden in Abhängigkeit von der Nachfrage optimal platziert. Basierend auf den Literaturauswertungen (siehe Kapitel 2.2.2) eignen sich die folgenden Verkehrsflächen als potenzielle Standorte:

- ▶ Bushaltestellen
- ▶ Parkmöglichkeiten
- ▶ Tankstellen
- ▶ Taxistände
- ▶ Flugverkehrsflächen

Bei diesen Verkehrsflächen kann von einem für die geplante Nutzung in den Szenarien ausreichendem Platzangebot ausgegangen werden. Weiterhin sind die Verkehrsflächen flächig im Untersuchungsgebiet vorhanden und generieren funktionsbedingt ein erhöhtes Personenverkehrsauftkommen. Ebenso handelt es sich um bereits versiegelte Flächen, die um die Nutzung als Paketstation erweitert werden können, sodass keine oder eine geringe zusätzliche Flächeninanspruchnahme entsteht. Im Zuge der Flächenauswahl mittels der Location-Allocation-Methodik wurden 317 Standorte für Paketstationen in der Region Aachen ausgewählt. Für die Vertihubs wurden zwei Standorte ermittelt. Hierbei handelt es sich um den Flugplatz Aachen-Merzbrück sowie einen Heliporterlandeplatz mit angrenzender Freifläche des Katastrophenschutzes und Hilfeleistungszentrums in Simmerath.

Für das Szenario C „Direktbelieferung“ bedarf es mehrerer Vertihubs als Startpunkte. Für die Landepunkte gilt die Annahme, dass in Zukunft eine Drohnenbelieferung in unmittelbarer Nähe der jeweiligen Haushalte möglich sein wird. Somit reduziert sich die Standortsuche im Szenario C „Direktbelieferung“ auf die Vertihubs als Startpunkte. Potenzielle Standorte der Vertihubs sind identisch zu den möglichen Flächen für die Paketstationen im Szenario B „Paketstationen“. Aufgrund der zu erwartenden Größe eines Vertihubs (siehe Kapitel 2.2.2) wurden nicht alle Bushaltestellen, sondern nur Busbahnhöfe als potenzielle Standorte berücksichtigt. Nach der Flächenauswahl mittels der Location-Allocation-Methodik wurden sechs Standorte für Vertihubs identifiziert und ausgewählt.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die berücksichtigten Verkehrsflächen ein ausreichend dichtes Netz für die modellierten Szenarien der Drohnenlogistik ermöglichen. Dabei ist davon auszugehen, dass theoretisch keine neue Fläche versiegelt werden müsste, sondern primär eine Flächenkonversion zu erfolgen hätte. Dieses Vorgehen bietet insofern den Vorteil, als dadurch eine Komponente im Zuge der Umweltverträglichkeitsprüfung vereinfacht würde. Allerdings bleibt abzuwagen, ob nicht andere Nutzungszwecke als Drohnenbelieferung zu priorisieren wären. Zudem müssen die dem Modell zugrunde liegenden Prämissen geprüft werden, weswegen für jeden Standort der Start- und Landeinfrastruktur eine Einzelprüfung nötig scheint.

Handlungsempfehlung Nr. 4

Es erscheint empfehlenswert, bereits existierende Infrastruktur für einen möglichen Drohnenbetrieb zu nutzen, indem beispielsweise Gebäudedächer oder Parkhäuser als Start- und Landeplätze der Drohnen weiterentwickelt werden.

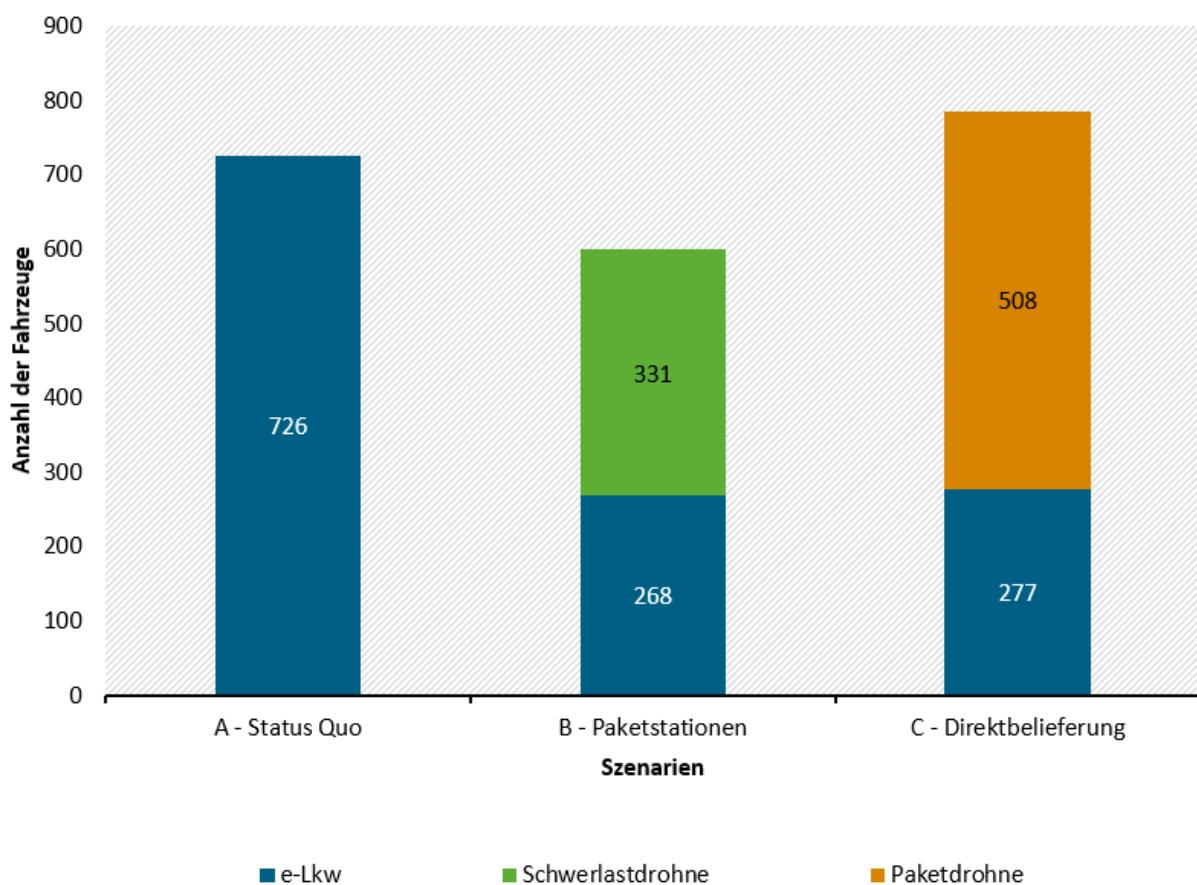
3.3.2 Verkehrliche Auswirkungen

Durch die Verlagerung eines Teils der Paketnachfrage in die Luft ist von einer geringen Veränderung der Lage im Bodenverkehr auszugehen. Diese verkehrlichen Auswirkungen wurden anhand der Modelle simuliert. Dabei ergeben sich allgemeine Kenngrößen für das Logistikkonzept hinsichtlich der benötigten Fahrzeuge und Drohnen, der Anzahl an Touren und Flügen sowie der zurückgelegten Strecke. Zudem erlaubt die dezidierte Modellierung, die Verlagerungseffekte

abzubilden, um so die Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit und den Verkehrsfluss zu untersuchen.

Zunächst wird auf die Größe der Fahrzeugflotte im Vergleich der Szenarien zueinander eingegangen. Abbildung 15 zeigt die Anzahl an benötigten Fahrzeugen inkl. Drohnen je Belieferungsszenario. Es ist zu erkennen, dass für das Szenario „Paketstationen“ mit nur knapp 600 die geringste Anzahl an Fahrzeugen benötigt wird. Im Gegensatz dazu benötigt das Szenario „Direktbelieferung“ mit 785 Fahrzeugen die höchste Anzahl. Im Vergleich zum Status quo mit 726 benötigten Fahrzeugen reduziert sich für das Szenario „Paketstationen“ die Fahrzeuganzahl um 18 %, für das Szenario „Direktbelieferung“ erhöht sie sich dagegen um 8 %. Ausschlaggebend für die geringere Anzahl an Fahrzeugen für das Szenario „Paketstationen“ ist, dass die Lieferung nicht direkt an die Endkundinnen und Endkunden, sondern an die insgesamt 317 Paketstationen im Untersuchungsgebiet erfolgt. Die Vielzahl an Fahrzeugen für eine „Direktbelieferung“ ergibt sich aus der geringen Transportkapazität der kleinen Paketdrohnen von nur 5 kg. E-Lkw werden in beiden Szenarien in ähnlicher Stückzahl von rund 270 Fahrzeugen benötigt, um beispielsweise schwere Pakete zu transportieren oder gewerbliche Lieferungen (B2B) zu realisieren.

Abbildung 15: Vergleich der Szenarien zu Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge



Quelle: eigene Darstellung, RWTH-ISB, DLR e.V. 2023

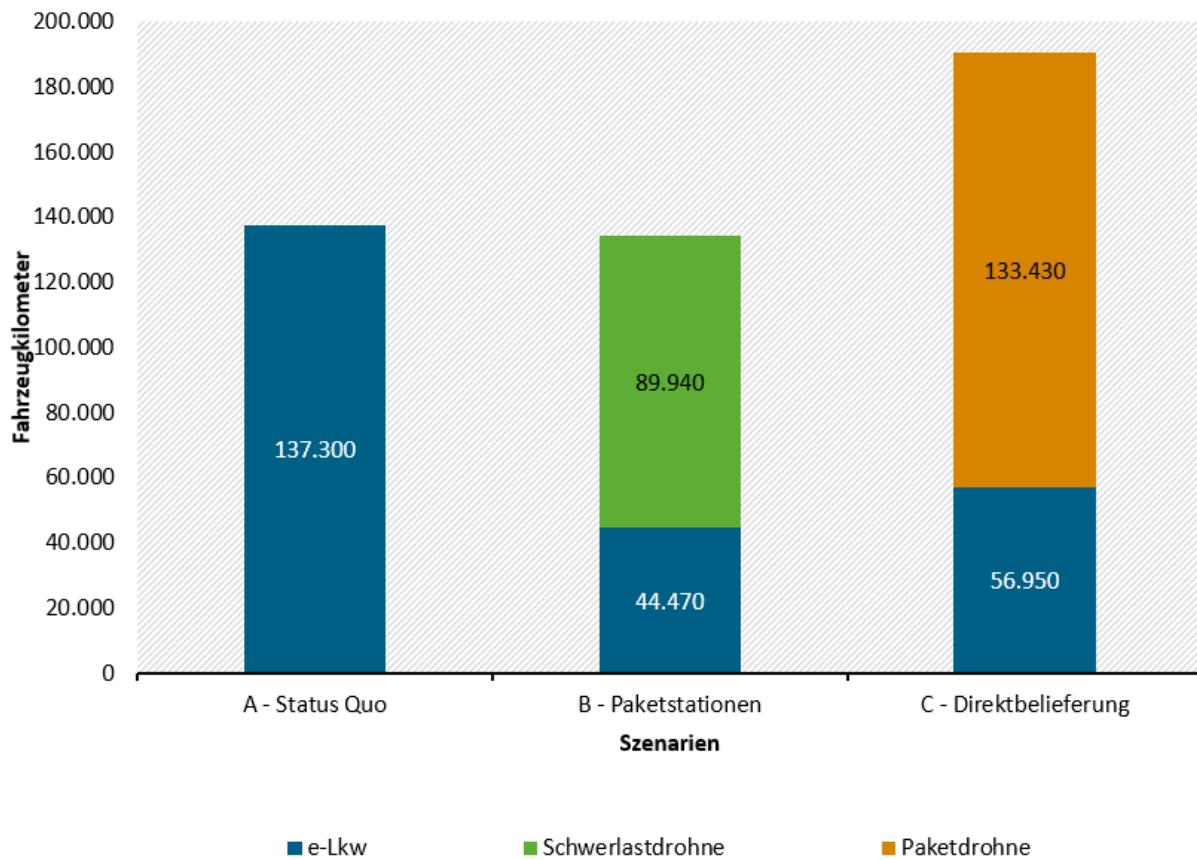
Abbildung 16 zeigt die Simulationsergebnisse zur Laufleistung (d. h. Fahrzeugkilometer) ohne Flugbeschränkungsgebiete, differenziert nach Fahrzeugtypen der drei Szenarien im Vergleich. Im Szenario B – Paketstationen (ca. 134 400 km) wird insgesamt um 2 % weniger Laufleistung im Vergleich zum Szenario A – Status quo (ca. 137 300 km) durchgeführt. Damit werden im Vergleich zu den beiden anderen Szenarien zwar die wenigsten Kilometer zurückgelegt, aber nur geringfügig weniger als beim Status quo. Im Szenario C – Direktbelieferung werden insgesamt

ca. 190 400 km absolviert. Dies entspricht ca. 40 % mehr Laufleistung im Vergleich zum Status quo. In den Szenarien mit Droneneinsatz entfallen jeweils gut zwei Drittel der Laufleistung auf die Drohnen, der Rest auf die e-Lkw. In Summe besitzt das Szenario B – Paketstationen die geringste Fahrzeug-Laufleistung. Jedoch wäre unter Berücksichtigung von Flugbeschränkungsgebieten die benötigte Laufleistung der Drohnen in beiden Szenarien höher.

Entscheidend für die hohe Laufleistung der Drohnen ist, dass e-Lkw aufgrund ihres hohen Ladevolumens viele Auslieferungen zu einer Tour zusammenfassen können. Drohnen hingegen müssen nach jeder Lieferung leer zum Start- und Landeplatz (d. h. Vertihub) des Distributionszentrums zurückfliegen, bevor sie dort weitere Ladung aufnehmen können. Weitere Faktoren, die einen Einfluss auf die Laufleistung der eingesetzten Fahrzeuge haben, sind unter anderem:

- ▶ Dezentrale Lage der Distributionszentren im Gegensatz zu zentral gelegenen Vertihubs
- ▶ Umwegfaktor im Bodenverkehr im Gegensatz zu Direktflügen entlang der Luftlinie
- ▶ Tourenplanung im Bodenverkehr, z. B. aufgrund von festgelegten Lieferzeitfenstern

Abbildung 16: Vergleich der Szenarien zu Laufleistung (ohne Flugbeschränkungsgebiete)



Quelle: eigene Darstellung, RWTH-ISB, DLR e.V. 2023

In beiden Szenarien mit Dronenverkehr (B – Paketstationen, C – Direktbelieferung) liegt der Rückgang der Fahrleistung am Boden in einer ähnlichen Größenordnung und beträgt für die ganze Modellregion je nach Szenario 68 % bzw. 59 %. Die beiden Szenarien unterscheiden sich dadurch, dass die Paketlieferung per Drohne entweder direkt zu den Empfängerinnen bzw. Empfängern oder an eine Paketstation erfolgt. Auf die konventionelle Auslieferung von Paketen durch Straßenfahrzeuge kann nicht komplett verzichtet werden, da ein Teil der Sendungen die maximale Nutzlast der Drohnen (je nach Szenario 5 kg bzw. 10 kg) überschreitet.

Der Rückgang des KEP-Verkehrs ist zwar deutlich, bezogen auf den gesamten bodengebundenen Verkehr stellen die Lieferfahrzeuge jedoch nur einen geringen Anteil dar. Bei Betrachtung des gesamten Verkehrs ist ein Rückgang der Fahrleistung von lediglich ca. 1 % zu verzeichnen. Dies gilt für beide Szenarien der Drohnenlieferung.

Inwieweit sich der leichte Rückgang der Gesamtfahrleistung auf die Verkehrssicherheit auswirkt, kann nur abgeschätzt werden. Zwar entschärft sich mit weniger Fahrleistung das Unfallgeschehen prinzipiell; umgekehrt führt geringere Verkehrsstärke aber auch zu höheren Geschwindigkeiten, was wiederum zu einer leichten Verschärfung des Unfallrisikos beiträgt. Insgesamt ist davon auszugehen, dass der Rückgang der Gesamtfahrleistung sich neutral bis positiv auf die Verkehrssicherheit auswirkt.

In Bezug auf den Verkehrsfluss ist in den beiden Szenarien mit Drohnenverkehr eine Verbesserung zu erwarten. Die Anzahl der Haltevorgänge der KEP-Fahrzeuge reduziert sich um etwa 85 % bei Nutzung von „Paketstationen“ und um etwa 80 % bei „Direktbelieferung“. Dadurch wird der fließende Verkehr deutlich weniger von haltenden Fahrzeuge beeinträchtigt. Die hohe Anzahl wegfällender Haltevorgänge führt zu einer deutlichen Reduktion der Verlustzeiten für den gesamten fließenden Verkehr, auch wenn die Verbesserung für das einzelne Fahrzeug als gering eingeschätzt werden kann.

Zusammenfassend würde sich im Szenario „Paketstationen“ ein Vorteil durch die Drohnen ergeben, der sich in einer geringeren Fahrzeuganzahl und Laufleistung widerspiegelt. Hingegen würde das Szenario „Direktbelieferung“ zu einem Anstieg beider Kenngrößen führen. Die Verlagerungswirkung von Boden- zu Lufttransport würde im Kontext der derzeitigen gesamten Verkehrsmenge am Boden lediglich zu geringen Effekten in Bezug auf die Verkehrssicherheit und den Verkehrsfluss führen.

Handlungsempfehlung Nr. 5

Bezogen auf verkehrliche Auswirkungen erscheint besonders ein Szenario mit einer Drohnenbelieferung an Paketstationen, an denen sich die Kundinnen und Kunden ihre Pakete selbstständig abholen können, vorteilhaft. Dies würde zu einer geringeren Fahrzeuganzahl und Laufleistung dieser führen und könnte zu geringen positiven Effekten in Bezug auf Verkehrssicherheit und Verkehrsfluss führen.

3.3.3 Ökonomische Auswirkungen

Im folgenden Abschnitt werden die ökonomischen Effekte auf den Bodenverkehr und die ökonomischen Effekte auf den Drohnenverkehr für die drei untersuchten Szenarien (Status quo, Paketstationen, Direktbelieferung) analysiert. Die Berechnung der Gesamttransportkosten des Bodenverkehrs erfolgt für die eingesetzten leichten e-Lkw. Die in dieser Studie verwendeten Werte basieren auf dem IVECO Daily Electric (2016). Die Berechnung basiert auf den Formalisierungen von Thaller (2018) nach Aschauer et al. (2015), VDI (2002), Wittenbrink (2011) und Wittenbrink (2014) und kann zur Berechnung der Transportkosten für verschiedene Lkw-Typen verwendet werden.

Die Gesamttransportkosten der e-Lkw setzen sich aus drei großen Teilkosten zusammen: den Fixkosten, den variablen Kosten und den Personalkosten (Thaller, 2018).

- Fixkosten sind die Kosten, die mit dem Besitz eines Fahrzeugs verbunden sind, unabhängig davon, wie viel es genutzt wird. Sie setzen sich zusammen aus den gesamten Versicherungskosten, den Zinskosten (Kapitalverzinsung), dem Wertverlust und den sonstigen Kosten (Lagerung/Garage, Fuhrparkmanagementkosten usw.).

- Die variablen Kosten werden als Betriebskosten betrachtet und hängen davon ab, wie viel ein Fahrzeug genutzt wird. Sie setzen sich zusammen aus den Wartungskosten, den Kosten für den Kraftstoffverbrauch, den Kosten für die Leistungsabschreibung und den Reifenkosten.
- Die Personalkosten sind zeitabhängige Kosten, die mit den Löhnen der Fahrerinnen und Fahrer verbunden sind.

Tabelle 3 zeigt die Parameter für die Kostenberechnung für den e-Lkw aus IVECO Electric (2016).

Tabelle 3: Fahrzeugcharakteristika des e-Lkw 3,5 t zGM der KEP-Dienstleister

Fahrzeugcharakteristika – e-Lkw			
Fahrzeugkapazität	122,00	PE/F	IVECO Daily Electric (2016)
Fixe Kosten	67,76	€/Tag	
Variable Kosten	32,71	ct/km	
Zeitabhängige Kosten	15,12	€/h	
Energieverbrauch	0,42	kWh/km	
Max. Geschwindigkeit	70,00	km/h	

Aus der Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge und der Gesamtlaufleistung der Fahrzeuge (siehe Kapitel 3.3.2) in Kombination mit der Transportlaufzeit aus der Simulation lassen sich drei verschiedene Kostenarten bestimmen. Diese summiert ergeben die Gesamtkosten des Bodenverkehrs. Tabelle 4 gibt die täglichen Kosten für den bodengebundenen Güterverkehr mittels KEP-Fahrzeuge für die modellierten Szenarien an.

Tabelle 4: Abschätzung der täglichen Kosten für den bodengebundenen Güterverkehr mittels KEP-Fahrzeuge für die modellierten Szenarien

Kostenarten (in €)	Status quo	Paketstationen	Direktbelieferung
Fixkosten	49 200,00	36 800,00	38 600,00
Variable Kosten	44 900,00	14 500,00	18 600,00
Personalkosten	91 600,00	34 600,00	41 200,00
Gesamtkosten Bodenverkehr	185 500,00	85 900,00	98 400,00

Die ökonomischen Effekte des Drohnenverkehrs lassen sich in ähnlicher Weise bestimmen, wobei auch hier folgende Kostenarten berücksichtigt werden:

- Fixkosten (z. B. Anschaffungskosten der Drohnen, Infrastrukturkosten u. a. für den Aufbau eines Vertihubs, Versicherungskosten für den Betrieb der Drohnen)
- Variable Kosten (z. B. Reparaturkosten an u. a. Drohnen und Vertihubs, Stromkosten für den Betrieb der Drohnen, Kosten für externe Dienstleistungen u. a. zur kommerziellen Nutzung des unteren Luftraums)
- Personalkosten (z. B. Fernföhrungspilotinnen und Fernföhrungspiloten an einer Bodenkontrollstation, Wartungspersonal)

Anschließend lassen sich aus diesen drei Kostenarten die Gesamtkosten des zukünftigen Drohnenbetriebs durch Addition bestimmen.

Da aktuell noch keine verlässliche Datenlage zur quantitativen Abschätzung der einzelnen Kosten für einen zukünftigen Drohnenbetrieb für den Anwendungsfall der Paketlieferung mittels Drohnen existiert, werden sowohl optimistische als auch pessimistische Randbedingungen zur Abschätzung der einzelnen Kostenarten herangezogen, um einen Bereich aufzuspannen, in dem sich die Betriebskosten bewegen könnten. Hierbei versteht man unter optimistischen Randbedingungen beispielsweise kostengünstige Anschaffungspreise für die erforderlichen Paketdrohnen, vergleichsweise geringe Stromkosten für das Laden der Akkumulatoren der Drohnen sowie vergleichsweise geringe Personalkosten, da von einem sehr hohen Automatisierungsgrad beim zukünftigen Betrieb der Drohne auszugehen ist. Diese optimistischen Randbedingungen sollen das untere Spektrum der zu erwartenden Gesamtkosten beim kommerziellen Betrieb von Paketdrohnen für Szenarien „Paketstationen“ und „Direktbelieferung“ abbilden.

Unter der Annahme von pessimistischen Randbedingungen ist beispielsweise von höheren Kosten für die Beschaffung der Drohnen auszugehen sowie von höheren Stromkosten und höheren Personalkosten. Diese pessimistischen Randbedingungen sollen das obere Spektrum der zu erwartenden Gesamtkosten beim kommerziellen Drohnenbetrieb der Szenarien B – Paketstationen und C – Direktbelieferung abbilden.

Zusätzlich zu den optimistischen und pessimistischen Randbedingungen gibt es noch weitere Modellannahmen, die sich teilweise aus der vorhergehenden Modellierung ableiten lassen. Basierend auf den durchgeführten Modellierungen zu den Szenarien B – Paketstationen und C – Direktbelieferung wird deutlich, dass bei der schieren Anzahl der benötigten Drohnen (vgl. Abbildung 15) dieser Betrieb nur in einem hochautomatisierten Gesamtsystem erfolgen kann. Somit ist davon auszugehen, dass der Drohnenbetrieb zentral durch mehrere Personen an einer oder mehreren Bodenkontrollstationen ferngeführt und überwacht wird (d. h. Fernführungspilotinnen und Fernführungspiloten). Zusätzlich ist davon auszugehen, dass die Nutzung des unteren Luftraums durch die Etablierung von U-space (vgl. Kapitel 2.3.2) zukünftig gebührenpflichtig sein wird, da U-space verschiedene Dienste zur Steigerung der Sicherheit im unteren Luftraum kommerziell anbieten wird.

Eine detaillierte Auflistung der einzelnen Elemente der jeweiligen Kostenarten für den Drohnenbetrieb (d. h. Fixkosten, variable Kosten und Personalkosten) ist tabellarisch sowohl für optimistische als auch pessimistische Randbedingungen für die beiden modellierten Szenarien im Anhang A.2 aufgeführt. Hierbei wurde die jeweilige Flottengröße beim Direktflug ohne Flugbeschränkungsgebiete als Basis genommen.

Zusammengefasst gibt Tabelle 5 die täglichen Kosten für den Drohnenbetrieb bei optimistischer und pessimistischer Auslegung für die Szenarien B – Paketstationen und C – Direktbelieferung an.

Tabelle 5: Abschätzung der täglichen Kosten für den Drohnenbetrieb bei optimistischer und pessimistischer Auslegung für die Szenarien B – Paketstationen und C – Direktbelieferung

Kostenarten (in €)	Paketstationen		Direktbelieferung	
	Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Fixkosten	9 700,00	22 700,00	17 700,00	27 900,00
Variable Kosten	4 500,00	8 800,00	4 000,00	9 100,00

Kostenarten (in €)	Paketstationen		Direktbelieferung	
	Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Personalkosten	6 400,00	9 300,00	9 700,00	14 100,00
Gesamtkosten Drohnenverkehr	20 600,00	40 800,00	31 400,00	51 100,00

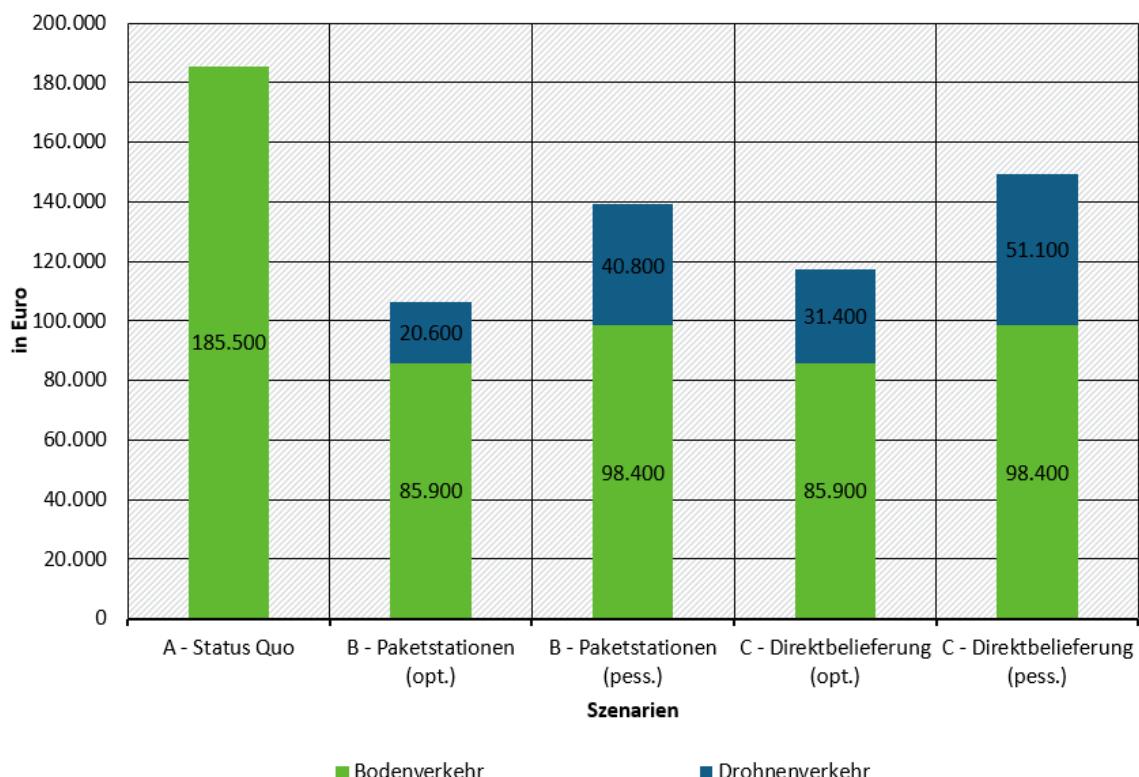
Im Vergleich zum Status quo (vgl. Tabelle 4) erscheinen aus ökonomischer Sicht beide modellierten Szenarien (Paketstationen, Direktbelieferung) unter optimistischen sowie pessimistischen Rahmenbedingungen betriebswirtschaftlich vorteilhaft zu sein. Eine weitere wichtige ökonomische Kenngröße sind die Kosten pro Kilometer (vgl. Tabelle 6). Diese lassen sich aus den vorangegangenen Berechnungen sowie der gesamten benötigten Flugstrecke für die Szenarien B – Paketstationen und C – Direktbelieferung (vgl. Abbildung 16) ableiten.

Tabelle 6: Abgeschätzte Kosten pro Flugkilometer

Szenario	Flugkilometer [km]	Kosten [€/km]	
		optimistisch	pessimistisch
Szenario B	89 940,00	0,23	0,45
Szenario C	134 427,00	0,18	0,38

Abbildung 17 gibt die täglichen Gesamttransportkosten für den Boden- und Drohnenverkehr wieder. Bei beiden modellierten Szenarien mit Drohnenbetrieb ist eine deutliche Einsparung der Transportkosten im Vergleich zum Status quo zu sehen. Dies gilt bei beiden Szenarien sowohl bei der Annahme von optimistischen als auch pessimistischen Rahmenbedingungen.

Abbildung 17: Tägliche Gesamttransportkosten für den Boden- und Drohnenverkehr



Quelle: Eigene Darstellung, DLR e.V., RWTH-ISB

Aus der ökonomischen Sichtweise verdeutlicht der Szenarienvergleich der Simulationsergebnisse, dass die direkte Belieferung der Kunden durch Drohnen in städtischen Gebieten eine erhebliche Herausforderung darstellt, da eine (sehr) große Anzahl von Drohnen erforderlich ist. Dies würde eine hohe Investition der Drohnenbetreiber bzw. der Logistikdienstleister voraussetzen, um die benötigte Infrastruktur (z. B. Start- und Landeplätze), die hohe Anzahl an Drohnen sowie das Personal vorhalten zu können. Eine Einschränkung bei den Ergebnissen zu den Transportkosten für die eingesetzten Drohnen ist, dass es sich dabei bislang um erste sehr theoretische Kostenabschätzungen mit großen Unsicherheiten handelt, die in weiteren Forschungsaktivitäten genauer bestimmt werden müssen.

Handlungsempfehlung Nr. 6

Die Ergebnisse führen zu der Empfehlung, eine Hybridlösung mit Drohnenbetrieb, e-Lkw und Lastenrädern anzubieten, um die Anfangsinvestitionen in Infrastruktur (z. B. Vertihubs) gering zu halten und die Skalierbarkeit und Nachhaltigkeit von Lieferungen in städtischen Gebieten zu gewährleisten.

3.3.4 Energetische Auswirkungen

Im folgenden Abschnitt werden die energetischen Auswirkungen der modellierten Szenarien untersucht, um deren ökologische Auswirkungen beurteilen zu können. Zunächst wird der Energieverbrauch der bodengebundenen Fahrzeuge erörtert und anschließend der Energieverbrauch des Drohnenbetriebs in beiden Szenarien dargelegt.

Die Betrachtung des Energieverbrauchs der Fahrzeuge der bodengebundenen Logistik bezieht sich auf die Menge an elektrischer Energie, die für den Betrieb des Fahrzeugs und seiner Komponenten wie Motor, Batterie und andere Systeme benötigt wird. Der Energieverbrauch wird in der Regel in Kilowattstunden (kWh) gemessen und kann in Abhängigkeit von Faktoren wie Fahrstil, Gelände, Temperatur sowie Größe und Effizienz der Batterie variieren.

Umrechnungsfaktoren für den Energieverbrauch sind ein wichtiges Hilfsmittel für Entscheidungsträger, da sie eine standardisierte Methode zur Schätzung des Energieverbrauchs von Fahrzeugen bieten. Mithilfe von Umrechnungsfaktoren lässt sich der Energieverbrauch verschiedener Fahrzeugtypen vergleichen, sodass fundierte Entscheidungen über deren Nutzung und Betrieb getroffen werden können.

Zur Berechnung des Energieverbrauchs dieser elektrisch betriebenen Fahrzeuge werden zwei Schlüsselinformationen benötigt.

- ▶ Gesamtfahrleistung in km
- ▶ Umrechnungsfaktor für den Energieverbrauch in kWh/km

Der Gesamtenergieverbrauch ergibt sich aus der Multiplikation der Gesamtkilometerleistung mit dem Energieverbrauchsfaktor. Der Energieverbrauch eines e-Lkw kann basierend auf den Daten des IVECO Daily Electric (2016) mit 0,4218 kWh/km festgelegt werden. Aus der Laufleistung der eingesetzten e-Lkw kann dann der Energieverbrauch für jedes Szenario ermittelt werden. Tabelle 7 gibt die Laufleistung und Energieverbräuche der eingesetzten e-Lkw an.

Tabelle 7: Laufleistung und Energieverbrauch der eingesetzten e-Lkw

Art	Szenario A - Status quo	Szenario B - Paketlieferung	Szenario C - Direktbelieferung
Laufleistung [km]	137 301,00	44 471,00	56 953,00
Energieverbrauch [kWh]	57 913,00	18 757,00	24 022,00

In der hier vorliegenden Energieverbrauchsbetrachtung wird der Energieverbrauch der Drohnen im operationellen Betrieb betrachtet. Konkret beschränkt sich die nachfolgende Energieverbrauchsbetrachtung auf Multikopter-Drohnen, wie sie in der luftseitigen Verkehrsmodellierung zum Einsatz kamen. Hierbei wurden nur Direktflüge vom Start- zum Zielpunkt ohne Berücksichtigung von Flugbeschränkungsgebieten betrachtet. Insbesondere fokussieren wir uns hierbei auf zwei unterschiedliche Arten von Multikoptern:

- a) einen Quadrokopter (vier Propeller) mit einer Nutzlast von 5 kg („kleine Paketdrohne“)
- b) einen Oktokopter (acht Propeller) mit einer Nutzlast von 10 kg („Schwerlastdrohne“)

Folglich beinhaltet die durchgeführte Energieverbrauchsberechnung keine weiteren Arten von Drohnen, insbesondere auch keine Starrflügler-Drohnen.

Der Energieverbrauch von Drohnen ist stark von äußeren Einflüssen während des Betriebs abhängig. Zum einen zählen dazu Einflussfaktoren, die vorher zu einem gewissen Teil planbar und veränderbar sind. Zu diesen plan- und veränderbaren Einflussfaktoren zählen:

- Einsatzart (z. B. Paketlieferung, Such- und Rettungsmission)
- Einsatzort (z. B. Gebirge, Stadt etc.)
- Missionsprofil bzw. Missionstrajektorie
- Zuladung (d. h. Payload)

In der vorliegenden Energieverbrauchsbetrachtung gehen wir von den modellierten Einsatzszenarien aus (vgl. Kapitel 3.1), sodass die oben aufgeführten Einflussfaktoren bekannt sind. Hierbei handelt es sich um eine Paketlieferung in einer städtischen Umgebung. Somit kann davon ausgegangen werden, dass keine größeren Höhenänderungen innerhalb einer Auslieferung überwunden werden müssen. Lediglich für die Start- und Landephase wird von einer signifikanten Höhenänderung bis zur Flughöhe im Streckenflug ausgegangen. Die Zuladung sowie die grundsätzliche Missionstrajektorie sind ebenfalls bekannt und hängen von der gewählten Drohnenart ab.

Zum anderen existieren Einflussfaktoren, die nur schwer planbar und während des Betriebes nicht veränderbar sind. Zu diesen schwer planbaren und unveränderbaren Einflussfaktoren zählen:

- Windrichtung
- Windstärke
- Böen
- Temperatur

Diese Faktoren haben einen entscheidenden Einfluss auf den Energieverbrauch der Drohne. Insbesondere die Windstärke, Böen und Umgebungstemperatur beeinflussen den Energieverbrauch der Drohne maßgeblich. Um hier eine grobe Abschätzung zu den Energieverbräuchen der „kleinen Paketdrohne“ treffen zu können, wurden in experimentellen Flugversuchen die Energieverbräuche bei unterschiedlichen äußeren Bedingungen gemessen. Die Ergebnisse der durchgeführten Flugversuche inklusive der Messung der Energieverbräuche werden in Anhang A.3 dargestellt (Gasche, 2023). Für die Schwerlastdrohnen wurden Akku-Messungen im Labor vorgenommen. Auch die Ergebnisse dieser Labormessung sind im Anhang A.3 hinterlegt.

Anzumerken ist, dass die Energieverbrauchswerte im Anhang ohne Berücksichtigung einer Nutzlast ermittelt wurden, sodass diese nicht direkt genutzt werden können. Bei einem kommerziellen Drohnenbetrieb zur Lieferung von Paketen sind die Pakete als Nutzlast zu betrachten und müssen daher bei den Energieverbrauchswerten berücksichtigt werden. Eine genaue Bestimmung der exakten Energieverbrauchswerte ist aufgrund der Vielzahl der möglichen Nutzlastgrößen nicht möglich. Dennoch lässt sich aus Erfahrungswerten eine grobe Abschätzung der Erhöhung der Verbrauchswerte für die maximal mögliche Nutzlastgröße für beide Drohnenarten bestimmen. Diese grobe Abschätzung wird im Nachfolgenden durch den „Nutzlastfaktor“ n_f wiedergegeben. Die maximale Nutzlastgröße für beide Drohnenarten ist:

- ▶ Kleine Paketdrohne: max. Nutzlast 5 kg
- ▶ Schwerlastdrohne: max. Nutzlast 10 kg

Da die maximale Nutzlast die Abflugmasse beider Drohnenarten verdoppelt, ist auch davon auszugehen, dass der Energieverbrauch dadurch verdoppelt wird. Der Nutzlastfaktor für beide Drohnenarten ist somit $n_f = 2$. Dies bedeutet, dass sich bei maximal zulässiger Nutzlast der Energieverbrauch der jeweiligen Drohne verdoppelt.

Tabelle 8 gibt den Gesamtenergiebedarf der Drohnen in Szenario B – Paketstationen und C – Direktbelieferung an. In Abhängigkeit von der zurückgelegten Distanz (d. h. Flugstrecke) und der Anzahl der Flüge kann der gesamte Energieverbrauch grob abgeschätzt werden. Aus der Flugstrecke der Szenarien und der durchschnittlichen Reichweite pro Ladezyklus lässt sich die Anzahl der benötigten Ladezyklen und daraus letztendlich der gesamte Energiebedarf bestimmen.

Tabelle 8: Gesamtenergieverbrauchswerte der Drohne für Szenario B und C

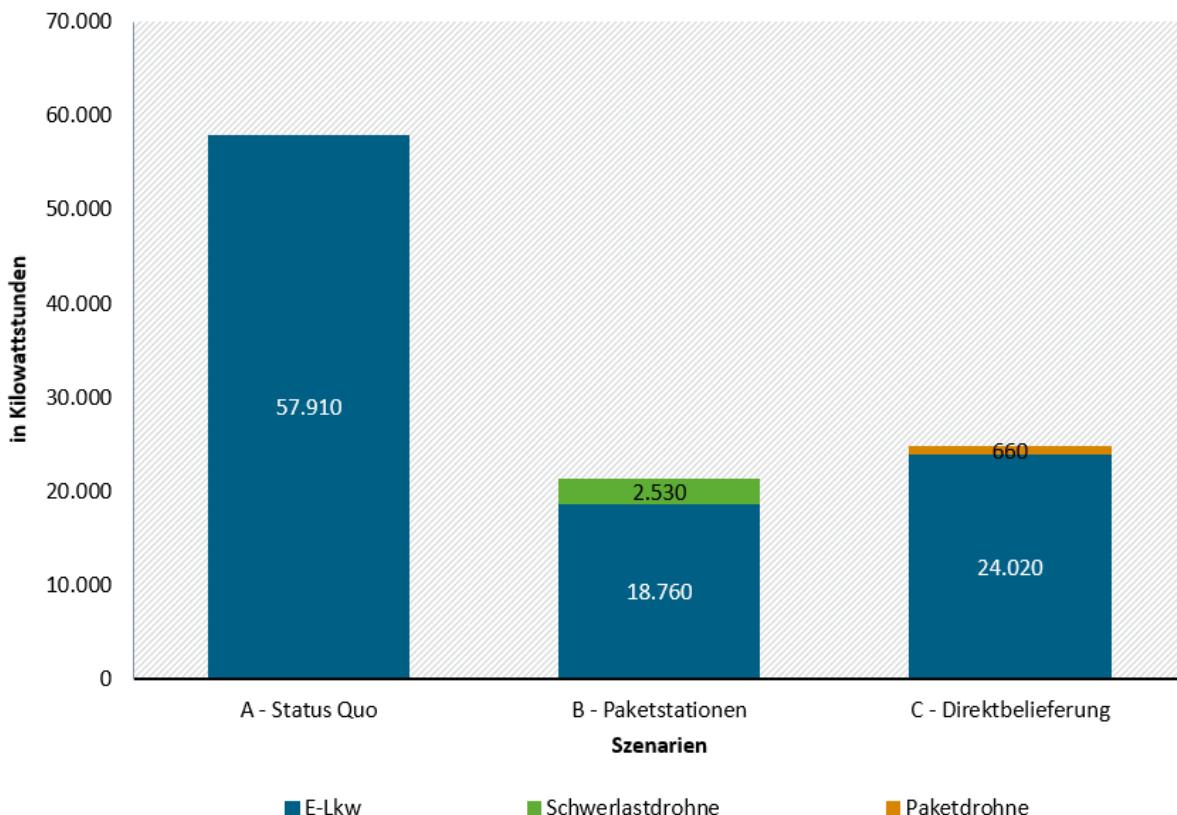
Parameter	B – Paketstationen	C – Direktbelieferung
Gesamte Flugstrecke [km]	89 940,00	133 427,00
Durchschnittliche Reichweite pro Ladezyklus [km/Ladezyklus]	6,25	6,75
Energiebedarf pro Ladezyklus [Wh/Ladezyklus]	175,75	33,34
Ladezyklen	14 391,00	19 767,00
Energiebedarf gesamt [kWh]	2 529,22	659,03

Zusammenfassend stellt Abbildung 18 den Gesamtenergieverbrauch für die drei simulierten Belieferungsszenarien dar. Beim Status quo beträgt der Gesamtenergieverbrauch der eingesetzten e-Lkw insgesamt knapp 58 000 kWh. Im Vergleich wird im Szenario B – Paketstationen mit der Verlagerung auf Schwerlastdrohnen eine Senkung des Energieverbrauchs um 63 % erzielt, während im Szenario C – Direktbelieferung durch die Verlagerung auf Paketdrohnen eine Reduzierung um 57 % zu verzeichnen ist. Im Vergleich zum Szenario B – Paketstationen ist bei der

Direktbelieferung ein höherer Energieverbrauch zu beobachten, da die geringere Nutzlast der Paketdrohnen zu einer höheren Verteilung von Paketen auf den Bodenverkehr und damit zu einer Erhöhung der Laufleistung der e-Lkw führt.

Hierbei ist zu erwähnen, dass der Energieverbrauch der jeweiligen Drohnen durch Flugversuche ohne Nutzlast bestimmt wurde. Unter der Annahme, dass die eingesetzten Paketdrohnen in der Realität mindestens bei der Hälfte ihrer Touren eine Nutzlast transportieren würden (d. h. Paketlieferung zum Kunden; Rücktour zum Depot leer), wurde eine Verdopplung des spezifischen Energieverbrauchs der Drohnen angenommen, um zu realistischeren Einschätzungen des Energieverbrauchs zu kommen. Die ermittelten Energieverbrauchswerte sind jedoch sehr grobe Annäherungen und müssen durch weitergehende Forschungsaktivitäten präzisiert werden.

Abbildung 18: Vergleich der Belieferungskonzepte zum Energieverbrauch



Quelle: Eigene Darstellung, DLR e.V., RWTH-ISB

Handlungsempfehlung Nr. 7

Bezogen auf die energetischen Auswirkungen erscheint ein Drohnenbetrieb für die Paketzustellung empfehlenswert. Jedoch sind die gewonnenen Ergebnisse lediglich erste grobe Annäherungen und müssen durch weitere Untersuchungen verifiziert werden.

3.3.5 Soziale Akzeptanz und gesundheitliche Auswirkungen

In diesem Abschnitt wird zunächst die soziale und gesellschaftliche Akzeptanz eines urbanen und regionalen Drohnenbetriebs erörtert. Dabei wird auf den Ergebnissen und Erkenntnissen vorhandener Literatur aufgebaut (vgl. Kapitel 2.1). Anschließend wird die zusätzlich entstehende Geräuschbelastung durch Drohnen und deren visuelle Beeinträchtigung erörtert.

In Bezug auf die soziale Akzeptanz des Drohnenbetriebs geht aus der Literaturanalyse (vgl. Kapitel 2.1) hervor, dass es in der Gesellschaft ein geteiltes Meinungsbild hinsichtlich eines zukünftigen Drohnenbetriebs gibt. Die Meinung bezüglich Drohnen wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Einerseits spielen demografische Faktoren wie Geschlecht, Alter, Bildung, Einkommen und Wohnort eine Rolle. Andererseits beeinflussen auch Erfahrungen, Informationen zu Vorteilen und Risiken sowie die Transparenz über die Gründe für den Droneneinsatz die Haltung der Bevölkerung.

Handlungsempfehlung Nr. 8

Es wird empfohlen, eine transparente Vermittlung von Informationen, vorzugsweise durch die Politik, über die Gründe für den Einsatz von Drohnen sowie die damit einhergehenden Vor- und Nachteile anzustellen. Hierbei sollte darauf geachtet werden, dass über Chancen und Risiken des Droneneinsatzes ausgewogen informiert wird.

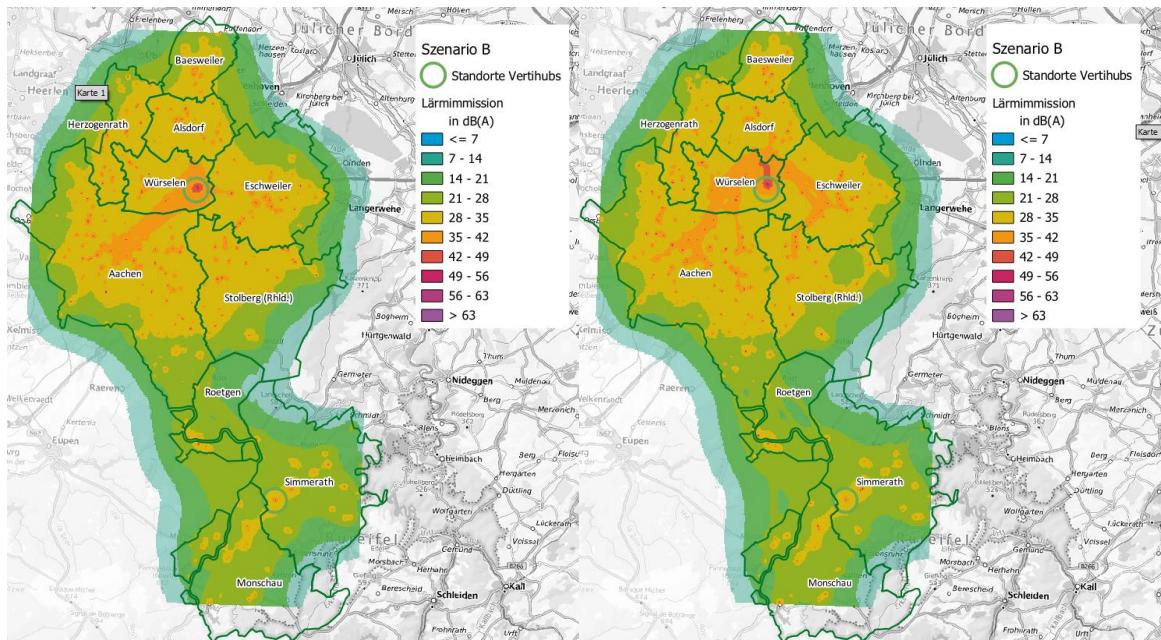
Umgebungslärm im Allgemeinen stellt gemäß der Weltgesundheitsorganisation (WHO, 2018) eines der größten umweltbedingten Gesundheitsrisiken dar. Gleichermassen wurden auch in der Literaturanalyse negative Effekte und Sorgen im Zusammenhang mit der Geräuschentwicklung von Drohnen gefunden. In welchem Ausmaß Dronengeräusche als belastend wahrgenommen werden, wird durch verschiedene Flugparameter (z. B. Flughöhe, Flugdistanz, Flugmodus) und Droneneigenschaften (z. B. Größe der Drohne, Modell), aber auch durch den Kontext (Ort, Uhrzeit, Sichtbarkeit der Drohnen) sowie persönliche Einstellungen beeinflusst. Insgesamt scheint die Beziehung zwischen diesen Einflussfaktoren komplex zu sein und bedarf weiterer Forschung.

Ausgehend von der Modellierung wird im Folgenden die zu erwartende Geräuschbelastung für die Szenarien mit Drohnenbetrieb präsentiert, wobei Flughöhen der Drohnen zwischen 160 m und 260 m gewählt wurden. Bei Start und Landung der Drohnen steigen bzw. sinken die Drohnen senkrecht bis zur gewünschten Flughöhe. Insgesamt wurde bei der Untersuchung nach Dronenflügen ohne und mit Flugbeschränkungsgebieten unterschieden. Dabei sind jeweils mehrere Drohnen gleichzeitig in unterschiedlichen Höhen unterwegs.

Für das Szenario „Paketstationen“ wurde angenommen, dass die eingesetzten Drohnen 10 kg Nutzlast transportieren können. Es ergibt sich eine maximale Geräuschbelastung von 56,0 dB(A) am Standort des am höchsten frequentierten Vertihubs in Würselen – ohne Berücksichtigung von Flugbeschränkungsgebieten (vgl. Abbildung 19). Werden diese mit einbezogen, ergibt sich eine maximale Geräuschbelastung von 66,0 dB(A) an einem Immissionsort in Eschweiler. Abbildung 20 zeigt die modellierte Geräuschbelastung für dieses Szenario.

Für das Szenario „Direktbelieferung“ wurde angenommen, dass die eingesetzten Drohnen 5 kg Nutzlast transportieren können. Es ergibt sich eine maximale Geräuschbelastung von 67,0 dB(A) an einem Landepunkt in Bettendorf bei Alsdorf ohne Berücksichtigung von Flugbeschränkungsgebieten. Werden diese mit einbezogen, ergibt sich eine maximale Geräuschbelastung von 64,5 dB(A) an einem Landepunkt nahe Oberforstbach südlich von Aachen. Durch die Berücksichtigung von Flugbeschränkungsgebieten wurden die Flugrouten der Drohnen so angepasst, dass öfter mehrere Drohnen auf ähnlichen Flugstrecken umgeleitet werden, wodurch Drohnen lokal stärker konzentriert werden. Abbildung 20 zeigt die modellierte Geräuschbelastung für dieses Szenario.

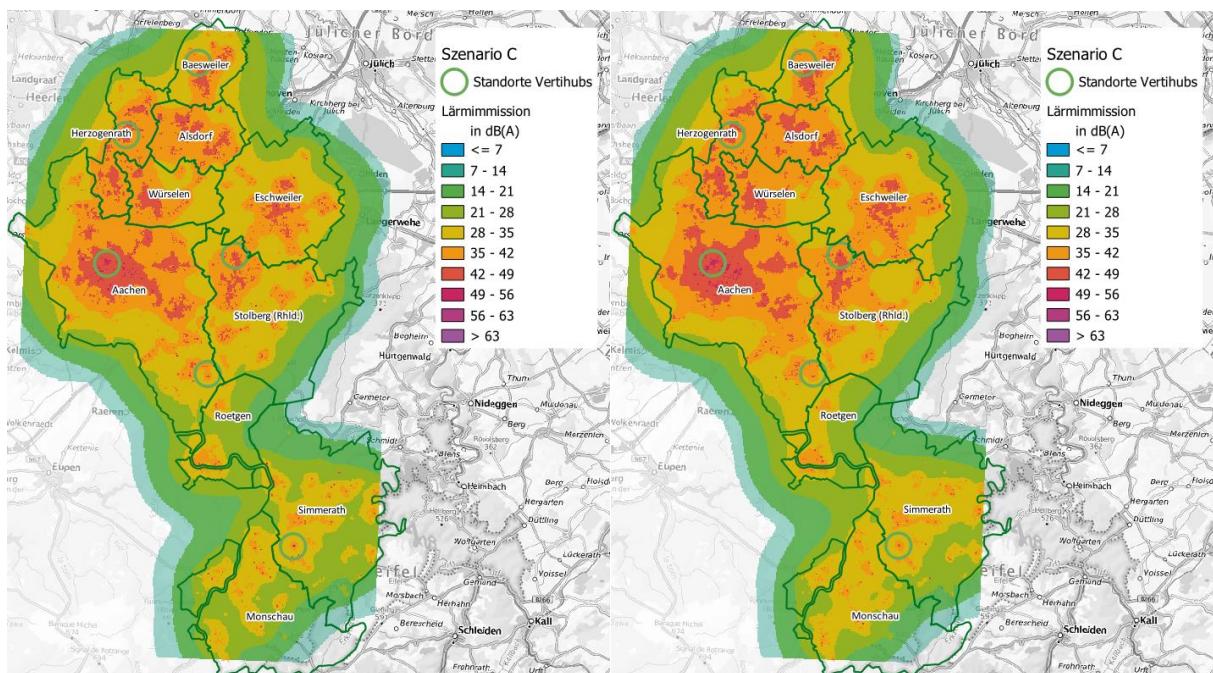
Abbildung 19: Geräuschbelastung durch Drohnenbetrieb im Szenario „Paketstationen“ – ohne (links) und mit (rechts) Flugbeschränkungsgebieten



Quelle: Eigene Darstellung, DLR-FL

Kartendarstellung: © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, TopOpenPlus

Abbildung 20: Geräuschbelastung durch Drohnenbetrieb im Szenario „Direktbelieferung“ – ohne (links) und mit (rechts) Flugbeschränkungsgebieten



Quelle: Eigene Darstellung, DLR-FL

Kartendarstellung: © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, TopOpenPlus

Aus den beiden vorherigen Abbildungen wird ersichtlich, dass die Geräuschbelastung in der Umgebung der Vertihubs zwischen 28 und 56 dB(A) beträgt. Die Werte wurden ohne Nutzlast ermittelt und sind daher im Realbetrieb höher anzunehmen. Punktuell können jedoch deutlich höhere Geräuschbelastungen auftreten, wie Tabelle 9 zeigt.

Tabelle 9: Maximale Geräuschbelastung durch Drohnenbetrieb für beide Szenarien

Szenario	Flugwegplanung mit Berücksichtigung von Flugbeschränkungsgebieten	Maximale Geräuschbelastung mit Ortsangabe [dB(A)]
Paketstationen	Nein	56,0 (Würselen)
	Ja	66,0 (Eschweiler)
Direktbelieferung	Nein	67,0 (Bettendorf)
	Ja	64,5 (Oberforstbach)

Zusammenfassend zeigen die Simulationsergebnisse, dass höhere Geräuschbelastungen vornehmlich an den Start- und Landepunkten der Drohnen zu erwarten sind. Diese sollten dementsprechend sinnvoll ausgewählt werden. Im Streckenflug bei Beachtung der modellierten Flughöhen ist kaum eine Geräuschbelastung am Boden zu erwarten.

Handlungsempfehlung Nr. 9

Eine breit angelegte Öffentlichkeitsarbeit könnte dazu beitragen, die Start- und Landepunkte im Einvernehmen mit der lokalen Bevölkerung auszuwählen, da dort eine erhöhte Geräuschbelastung wahrscheinlich ist. Zudem wird den Drohnenherstellern und -betreibern empfohlen, möglichst geräuscharme Drohnen einzusetzen, um die Akzeptanz potenziell zu erhöhen. Studien haben gezeigt, dass insbesondere die Drohnenpropeller durch ihre Vibrationen einer der Geräuschemittanten sind (Noda, 2018).

Handlungsempfehlung Nr. 10

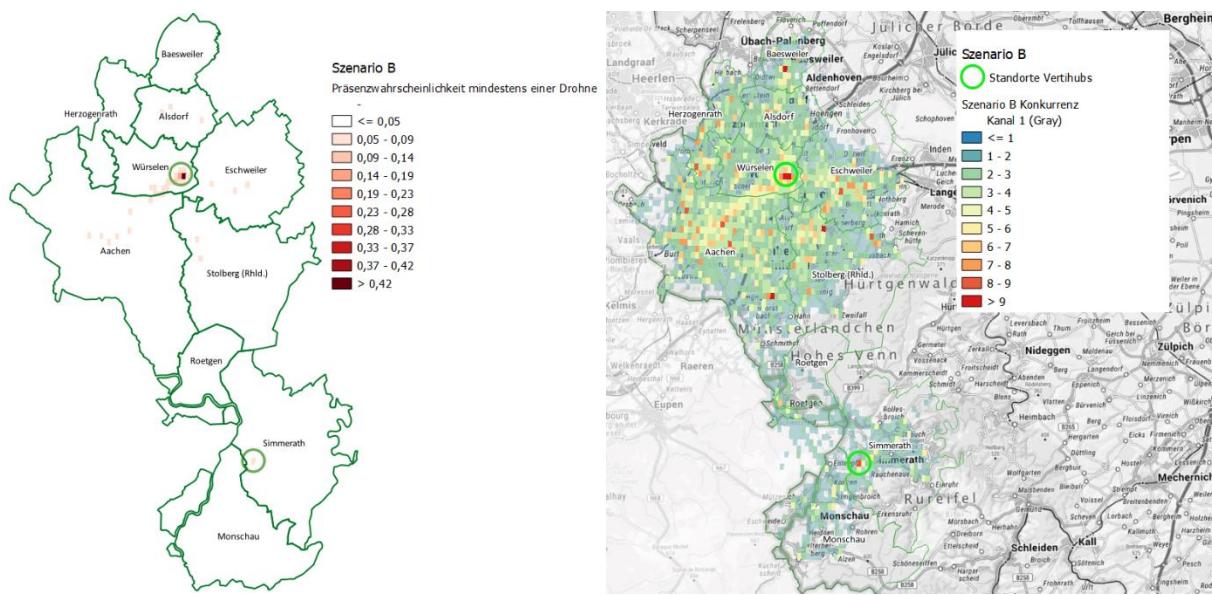
Die erhöhte Geräuschbelastung an den Start- und Landeplätzen der Drohne führt zu der Empfehlung, lokal Maßnahmen zur Geräuschreduzierung vorzunehmen (z. B. Schallschutzfenster, Schallschutzwände). Diese Maßnahme muss jedoch unter Berücksichtigung der Flugsicherheit erfolgen.

Zur Bestimmung der visuellen Beeinträchtigung der Bevölkerung durch einen zukünftigen, möglicherweise stark auftretenden Drohnenverkehr existieren noch keine anerkannten Maßzahlen. Es erscheint jedoch naheliegend, dass die visuelle Beeinträchtigung durch Drohnen vermutlich von zwei Faktoren beeinflusst wird:

- ▶ Präsenzwahrscheinlichkeit: Wahrscheinlichkeit, eine Drohne zu einem beliebigen Zeitpunkt am Himmel wahrzunehmen.
- ▶ Gleichzeitigkeit (sog. „Konkurrenz“): Anzahl gleichzeitig am Himmel wahrgenommener Drohnen.

Beide Maßzahlen wurden für die modellierten Szenarien bestimmt und sind in Abbildung 21 und Abbildung 22 dargestellt.

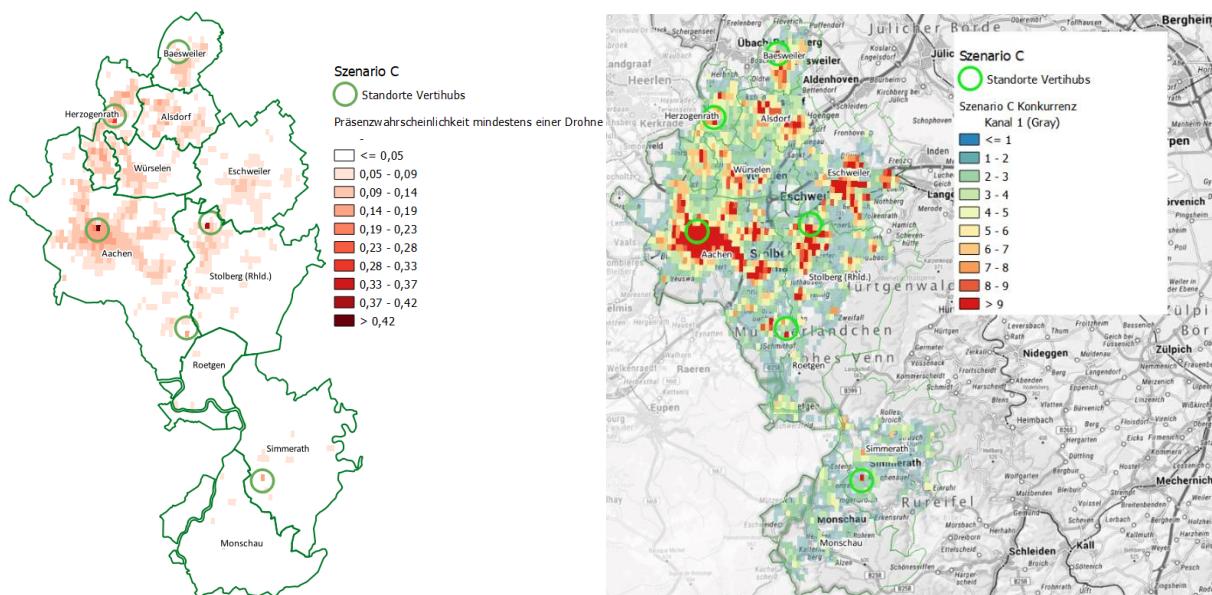
Abbildung 21: Präsenzwahrscheinlichkeit (links) und Gleichzeitigkeit (rechts) im Szenario „Paketstationen“



Quelle: Eigene Darstellung, DLR-FL

Hintergrund: OpenStreetMap OSM 2023

Abbildung 22: Präsenzwahrscheinlichkeit (links) und Gleichzeitigkeit (rechts) im Szenario „Direktbelieferung“



Quelle: Eigene Darstellung, DLR-FL

Hintergrund: OpenStreetMap OSM 2023

Tabelle 10: Präsenzwahrscheinlichkeit und Gleichzeitigkeit der Drohnen

Szenario	max. Präsenzwahrscheinlichkeit	mittlere Präsenzwahrscheinlichkeit	max. Gleichzeitigkeit	mittlere Gleichzeitigkeit
Paketstationen	43 %	5 %	> 8	0 - 2
Direktbelieferung	42 %	14 %	> 10	0 - 2

Aus Tabelle 10 wird ersichtlich, dass die mittlere Präsenzwahrscheinlichkeit sowie die maximale Gleichzeitigkeit in Szenario „Direktbelieferung“ höher als in Szenario „Paketstationen“ sind. Damit ist auch die Wahrscheinlichkeit, eine Drohne zu einem beliebigen Zeitpunkt am Himmel wahrzunehmen, und die Anzahl gleichzeitig am Himmel wahrgenommener Drohnen erhöht. In beiden Szenarien ist die maximale Präsenzwahrscheinlichkeit, die jeweils an Vertihubs ermittelt wurde, deutlich erhöht.

Insgesamt lässt sich dennoch annehmen, dass eine visuelle Beeinträchtigung der Bevölkerung durch die für beide Szenarien ermittelten Werte, insbesondere unter Berücksichtigung der mittleren Präsenzwahrscheinlichkeit und der mittleren Gleichzeitigkeit der Drohnen, unwahrscheinlich ist. Jedoch muss hier auch zwischen objektiv gemessenen Einschränkungen und den wahrgenommenen bzw. empfundenen Einschränkungen seitens der Bevölkerung unterschieden werden. Die Wahrnehmung von Drohnen in der Stadt kann von der realen Belastung abweichen. Erste Versuchsstudien geben hierzu nur eingeschränkt Aufschluss, da diese oft unter Zuhilfenahme der virtuellen Realität durchgeführt wurden und möglicherweise nicht auf die reale Welt übertragbar sind. Ob Untersuchungen zur Wahrnehmung und Bewertung des Landschaftsbildes von Windkraftanlagen (Nohl, 2017) auch auf Drohnen übertragen werden können, ist bisher nicht bekannt.

Handlungsempfehlung Nr. 11

Die relativ hohe maximale Präsenzwahrscheinlichkeit der Drohnen an den Vertihubs führt zu der Empfehlung, der Auswahl der Standorte für Start- und Landepunkte (d. h. Vertihubs) besonderes Hauptaugenmerk zu geben. Hierbei sind Faktoren wie Geräuschbelastung, Flächenkonversion etc. zu berücksichtigen.

3.3.6 Robustheit des Drohnenverkehrs

Ein grundlegendes Problem ergibt sich aus der Abhängigkeit des Drohnenbetriebs vom Wetter. Zur Bewertung der Robustheit des Drohnenverkehrs wurden daher die Wetterdaten vom Deutschen Wetterdienst (DWD) für den Zeitraum vom 13.05.2021 bis zum 13.11.2022 in der Wetterstation Aachen-Orsbach (DWD, 2023a) erfasst. Für die Analyse wurden die Werte FX (max. Windgeschwindigkeit), FM (Mittel der Windstärke), RSKF (Niederschlagsart) und SDK (Tagessumme der Sonnenscheindauer) herangezogen. Des Weiteren wird ein Datensatz des DWD zur Bestimmung der maximalen Tageslichtstunden für alle Tage benutzt. Diese werden auf dem Flughafen Mönchengladbach bestimmt. Entscheidend ist der Beginn der „Bürgerlichen Dämmerung“, die auch in der zivilen Luftfahrt zugrunde gelegt wird, da kommerzielle Drohnenflüge in der Nacht momentan nicht erlaubt sind. Die bürgerliche Dämmerung bezeichnet den Zeitraum, in dem die Sonne nicht tiefer als 6 - 6,5° unter dem Horizont steht (DWD, 2023b). Des Weiteren wird angenommen, dass Drohnen im Szenario, abweichend zur Durchschnittsgeschwindigkeit der Drohnen bei Windstille in Kapitel 3.2.2, maximal mit 20 m/s fliegen können. Diese realistische Maximalgeschwindigkeit wird angenommen, um auch bei mäßigen Windverhältnissen die Manövrierefähigkeit der Drohnen zu gewährleisten. Diese Maximalgeschwindigkeit entspricht derzeit der durchschnittlichen Fähigkeit von kleinen bis mittleren Transportdrohnen mit Drehflügelantrieben (z. B. Quadrokopter, Oktokopter).

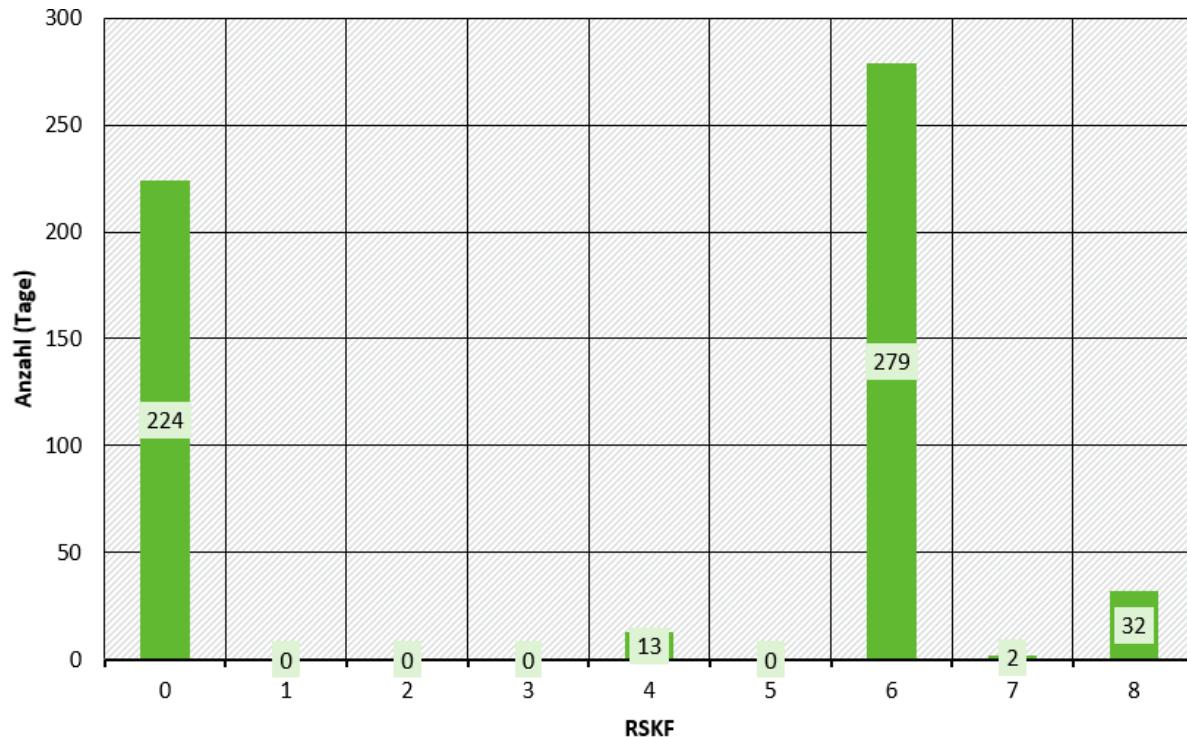
Um zu bestimmen, an welchen Tagen ein sicherer und/oder wirtschaftlicher Betrieb von Drohnen möglich ist, werden folgende Modellannahmen getroffen:

1. Eine Drohne mit einer Maximalgeschwindigkeit von 20 m/s kann im Mittel bis zu 50 % dieses Werts, d. h. 10 m/s Windgeschwindigkeit, tolerieren und dabei noch wirtschaftlich

arbeiten. Wirtschaftlich heißt hier, dass der Zielpunkt noch mit der gleichen Akkuladung ohne zwischenzeitliches Aufladen erreicht werden kann.

2. Ein sicherer Betrieb ist nur möglich, wenn die Differenz der Maximalgeschwindigkeit zur Geschwindigkeit der Spitzenböen höchstens 4 m/s beträgt. Dies entspricht einer Spitzengeschwindigkeit der Böen von 16 m/s.
3. Ein Drohnenbetrieb bei Regen- oder Schneefall ist nicht möglich.

Abbildung 23: Niederschlag an einzelnen Tagen des Messzeitraums



Quellen: Eigene Darstellung, DLR e.V. 2023

Abbildung 23 zeigt den Niederschlag an einzelnen Tagen des Messzeitraums (DWD, 2022). Es ist ersichtlich, dass an 224 von 550 Tagen kein Niederschlag registriert wurde (Klasse 0), an allen anderen Tagen gab es eine Form von Niederschlag². In einer pessimistischen Auswertung wäre an keinem dieser insgesamt 326 Niederschlagstage ein Drohnenbetrieb möglich. Jedoch ist zu bedenken, dass Niederschläge oft nur kurz andauern und so nicht den gesamten Tag blockieren. Um dies zu berücksichtigen, kann die Dauer der Sonnenstunden einbezogen werden.

Abbildung 24 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Sonnenscheindauer im Messzeitraum. Es ist ersichtlich, dass an 136 Tagen weniger als 1 Stunde die Sonne scheint (SDK 0 und 1 zusammen), alle höheren Werte verteilen sich gleichmäßig über Häufigkeiten von etwa 30 Tagen.

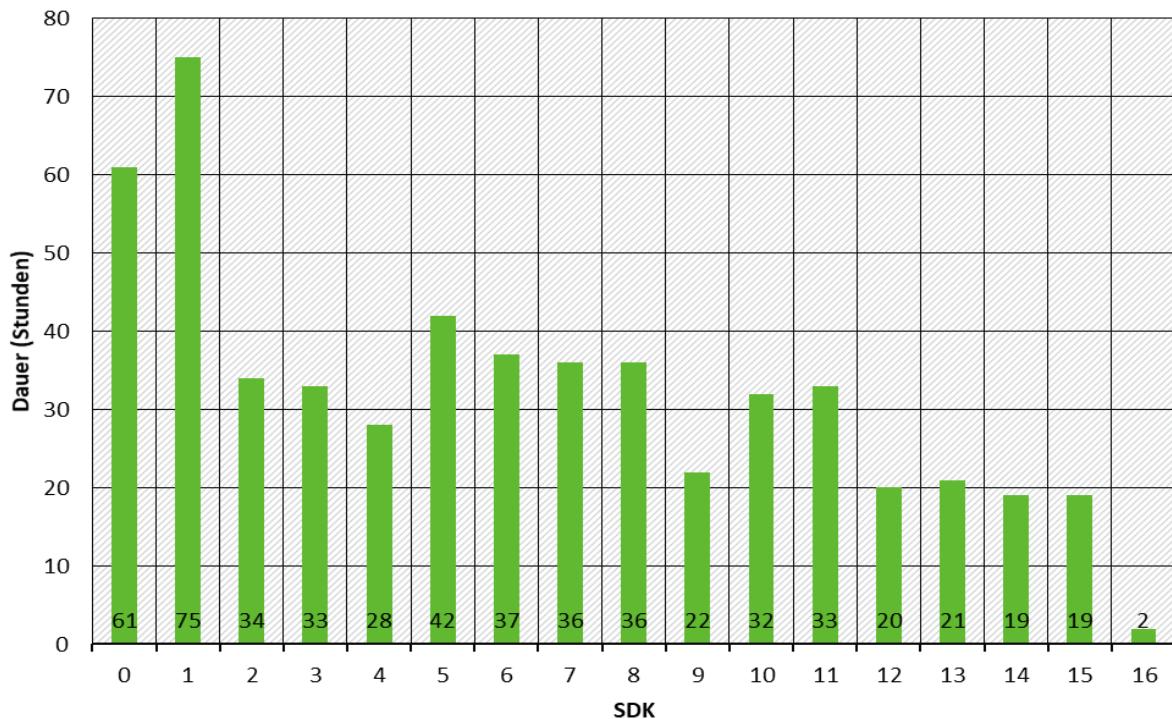
Des Weiteren wird aus den Daten des DWD ersichtlich, dass an 62 von 550 Tagen eine maximale Windgeschwindigkeit über 16 m/s gemessen wurde und an 9 von 550 Tagen die mittlere Geschwindigkeit über 10 m/s liegt.

Im Vergleich der Kriterien zeigt sich, dass einzelne Kriterien keine genaue Aussage darüber liefern, ob ein sicherer und wirtschaftlicher Drohnenbetrieb möglich ist. So wäre allein aufgrund der mittleren Windgeschwindigkeit an nur 9 Tagen im Zeitraum kein wirtschaftlicher Betrieb möglich, wogegen die Spitzenböen an 62 Tagen allein schon einen sicheren Betrieb

² Niederschlagsarten: Klasse 0: kein Niederschlag, Klasse 4: Form des Niederschlags nicht bekannt, Klasse 6: nur Regen, Klasse 7: nur Schnee, Klasse 8: Regen und Schnee und/oder Schneeregen (DWD Wetterdaten, 2022)

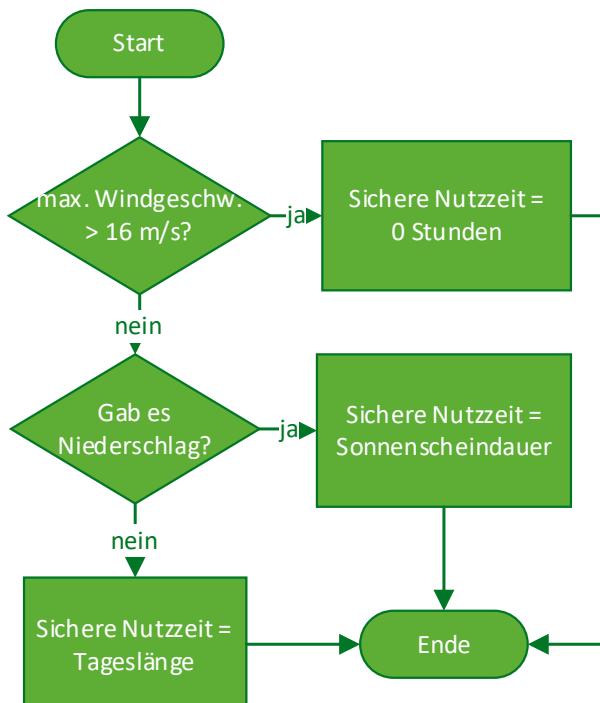
ausschließen. Es sollen daher die Kriterien kombiniert werden. Daher wird für jeden Tag des Zeitraums folgender Entscheidungsschlüssel (siehe Abbildung 25) zur Bestimmung der *sicheren Nutzzeit* angewendet.

Abbildung 24: Häufigkeitsverteilung der Sonnenscheindauer im Messzeitraum



Quellen: eigene Darstellung, DLR e.V. 2023

Abbildung 25: Bestimmung der sicheren Nutzzeit

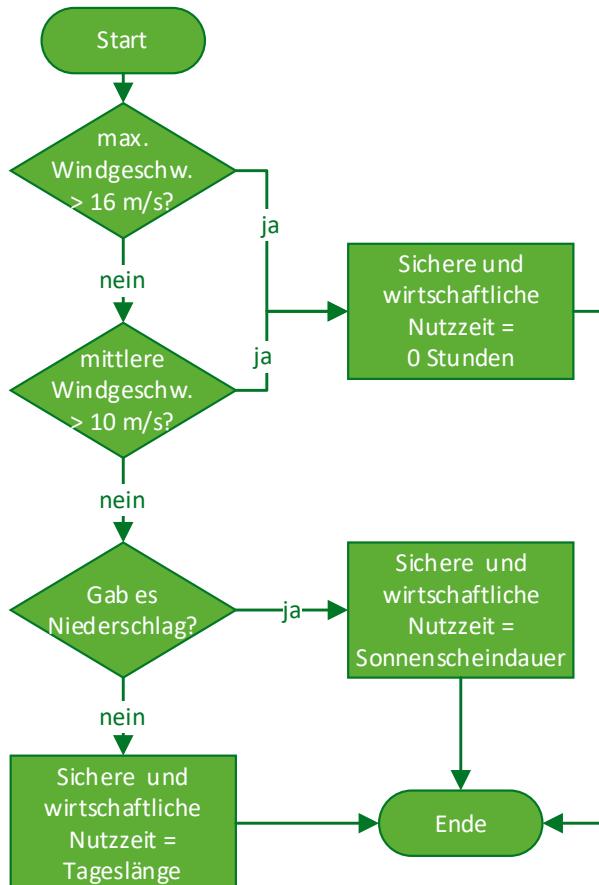


Quellen: Eigene Darstellung, DLR e.V. 2024

Der aufgeführte Entscheidungsschlüssel liefert für den gesamten Messzeitraum insgesamt eine sichere Nutzzeit von ca. 4 163 h. Da im Messzeitraum insgesamt 7 756 h Tageslichtzeit liegen, entspricht dies etwa 53,7 %.

Um zusätzlich auch wirtschaftlich zu sein, muss die mittlere Windgeschwindigkeit unter 10 m/s betragen. Daher ergibt sich, wieder für jeden Tag des Messzeitraums angewendet, folgender Entscheidungsschlüssel zur *sicheren und wirtschaftlichen Nutzzeit* (siehe Abbildung 26).

Abbildung 26: Bestimmung der sicheren und wirtschaftlichen Nutzzeit



Quellen: Eigene Darstellung, DLR e.V. 2024

Es zeigt sich, dass das zusätzliche Kriterium „mittlere Windgeschwindigkeit“ keine Veränderung ergibt, d. h., jeder sichere Tag im Messzeitraum ist auch ein wirtschaftlicher Tag. Der aufgeführte Entscheidungsschlüssel liefert eine für den Messzeitraum insgesamt sichere und wirtschaftliche Nutzzeit von 4 163 h. Da im Messzeitraum insgesamt 7 756 h Tageslichtzeit liegen, entspricht dies etwa 53,7 %.

Insgesamt lässt sich jeder Tag in eine von 5 möglichen Nutzklassen einteilen:

- ▶ **Klasse A:** sicher und wirtschaftlich
- ▶ **Klasse B:** sicher, aber nicht wirtschaftlich
- ▶ **Klasse C:** nicht sicher durch Windböen
- ▶ **Klasse D:** teilweise nicht sicher durch Niederschlag
- ▶ **Klasse E:** nicht sicher durch Windböen und Niederschlag

Tage der Klassen A und B sind dabei voll nutzbar. Tage der Klasse D können zumindest teilweise (während der Sonnenstunden) als nutzbar betrachtet werden. Für den Messzeitraum ergeben sich die Werte und Anteile wie in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Klassifizierung einzelner Tage im Messzeitraum

Klasse	Klasse A	Klasse B	Klasse C	Klasse D	Klasse E
Tag	222	0	2	266	60
Anteil [%]	40,36	0,00	0,36	48,36	10,91

Aus den vorliegenden Daten lässt sich eine – vorsichtig pessimistische – Abschätzung der Nutzung des Luftraums der Städteregion Aachen ableiten. Danach können an mindestens 89 % der Tage und zu 53,7 % der verfügbaren Tageslichtzeit ein Drohnenbetrieb sicher und wirtschaftlich durchgeführt werden. Tage- oder wochenlange Perioden, in denen ein Drohnenbetrieb nicht möglich ist, konnten nicht identifiziert werden.

Aufgrund des zur Verfügung stehenden Datenmaterials müssen Tage, an denen hohe Windschwindigkeiten auftreten, ganz ausgeschlossen werden. Da solche Konditionen oft nicht den ganzen Tag betreffen, ist zu erwarten, dass der Anteil tatsächlich nutzbarer Tageslichtzeit höher liegen könnte. Zusätzlich ist anzumerken, dass ein möglicher Drohnenbetrieb bei Nacht in dieser Analyse nicht berücksichtigt wurde. Zum einen sind aktuell die regulatorischen Voraussetzungen für einen Nachtbetrieb nicht vorhanden. Zum anderen lassen sich aus den vorliegenden Wetterdaten keine auf einzelne (Nacht-)Stunden aufgeteilten Aussagen zum jeweiligen Niederschlag treffen, sodass bei Niederschlag an einem bestimmten Tag nur über die Sonnenstundendauer der Zeitraum ohne Niederschlag ermittelt werden kann. In der Nacht ist die Sonnenscheindauer jedoch nicht gegeben.

Handlungsempfehlung Nr. 12

Für einen ganzjährigen Drohnenbetrieb sind besonders wetterresistente Drohnen erforderlich. Aus Sicht des Betreibers ist eine sorgfältige Abwägung zu treffen, ob die Vorteile eines ganzjährigen Drohnenbetriebs die Nachteile in Form von möglicherweise höheren Anschaffungs- und Betriebskosten übersteigen.

4 Fazit zu Chancen und Risiken der unbemannten Luftfahrt

Der vorliegende Bericht zeigt die Chancen und Risiken der unbemannten Luftfahrt für das Szenario der Paketbelieferung auf. Zu diesem Zweck wurde für die Städteregion Aachen eine Modellierung des Personen- und Güterverkehrs aufgebaut. Mit diesem wurden zwei Szenarien einer Drohnenbelieferung mit Paketen untersucht:

- ▶ Szenario Paketstationen: Schwerlastdrohnen liefern von Vertihubs Pakete zu diversen Paketstationen, an welchen die Pakete von den Kundinnen und Kunden abgeholt werden.
- ▶ Szenario Direktbelieferung: Leichte Drohnen liefern von Vertihubs Pakete direkt auf das Grundstück bzw. in die unmittelbare Umgebung der Kundinnen und Kunden.

Anhand der Modellierung sowie in Ergänzung mit einer detaillierten Literaturrecherche konnten folgende Chancen und Risiken identifiziert werden (siehe auch Tabelle 12):

Rechtliche Rahmenbedingungen

Als **Chance** vereinfachen zukünftige europäische Luftraumkonzepte (d. h. U-space) einen flächendeckenden und effizienten Drohnenbetrieb. Diese Konzepte können die Integration von Drohnentechnologien in städtische und ländliche Gebiete erleichtern und eine innovative Nutzung des Luftraums ermöglichen. Als **Risiko** können die aktuellen rechtlichen Rahmenbedingungen für den Bau von Vertihubs gesehen werden, die eine erhebliche Herausforderung für den wirtschaftlichen Drohnenbetrieb darstellen. Bestehende Gesetze und Vorschriften sind (noch) nicht auf die besonderen Anforderungen von Drohneninfrastrukturen ausgelegt. In städtischen Gebieten fehlen beispielsweise Regelungen für neue Nutzungsarten, die Vertihubs mit sich bringen. Zusätzliche Risiken bestehen bei der Interaktion von Drohnen mit dem Bodenverkehr, etwa beim Start- und Landevorgang im öffentlichen Raum, was unter anderem zu Konflikten mit der Straßenverkehrsordnung führen könnte. Weiterhin erfordern spezifische Landesbauordnungen eine Prüfung der öffentlichen Sicherheit und Ordnung sowie der Gestaltung, was zusätzliche Genehmigungsverfahren und rechtliche Hürden mit sich bringen kann.

Flächeninanspruchnahme

Die Flächeninanspruchnahme durch Vertihubs bietet sowohl Chancen als auch Risiken in urbanen Kontexten. Eine vielversprechende **Chance** besteht darin, Vertihubs auf Gebäudedächern zu installieren, was nicht nur den Flächenverbrauch minimiert, sondern auch bestehende Strukturen effizient nutzt. Zudem könnte die Umwidmung vorhandener Logistikinfrastruktur zu einer Flächenkonversion führen, die eine nachhaltige Nutzung von Ressourcen fördert, ohne zusätzliche Flächen zu beanspruchen. In dicht besiedelten urbanen Gebieten besteht jedoch das **Risiko**, dass die Verfügbarkeit geeigneter Flächen für Vertihubs gering ist, was die Implementierung erschwert. Darüber hinaus könnte der Aufbau neuer Infrastrukturen zur Schaffung von Landeplätzen zur Versiegelung zusätzlicher Flächen führen, was negative ökologische Auswirkungen zur Folge haben kann. Zudem ist abzuwegen, ob eine Flächen- und Infrastrukturumwandlung für z. B. Vertihubs nicht anderweitig benutzt werden könnte (z. B. Photovoltaikanlagen auf Dächern).

Städtebauliche Einbindung der Vertihubs

Die städtebauliche Einbindung von Vertihubs bietet zahlreiche **Chancen** für die urbanen Räume. Durch die Integration dieser Standorte in bestehende Gebäudestrukturen können nicht nur innovative Lösungen für den städtischen Verkehr geschaffen werden, sondern auch lokale Wirtschaftszweige gestärkt werden. Dies geschieht durch die Schaffung neuer Arbeitsplätze und die Förderung von Innovationen, die den Innovationscharakter der Stadt weiterentwickeln.

Gleichzeitig gibt es jedoch auch **Risiken**, die berücksichtigt werden müssen. Konflikte mit bestehenden Nutzungen von Flächen und Gebäuden (z. B. Photovoltaikanlagen) können entstehen. Zudem könnten Geräuschbelastungen, verursacht durch die Drohnen, insbesondere in der Nähe der Vertihubs, negative Auswirkungen auf die Lebensqualität der umliegenden Bevölkerung haben.

Verkehrliche Erschließung der Vertihubs

Eine **Chance** bei der verkehrlichen Erschließung der Vertihubs ist die Bündelung von Lieferverkehren, da nur der Vertihub als zentraler Punkt angeliefert werden muss. Dadurch können andere Straßenzüge entlastet werden. Ein mögliches **Risiko** für die Einbindung von Vertihubs in städtische Gebiete ist die komplexe Koordination zwischen Boden- und Luftverkehr. Je nach Betriebsform erfolgt ein Umschlag von Gütern zwischen Boden- und Luftverkehr, der aufgrund der begrenzten Lagerkapazitäten am Vertihub zeitlich abgestimmt sein muss. Zudem ist mit einem erhöhten Verkehrsaufkommen an den Paketstationen zu rechnen, da die Kundinnen und Kunden regelmäßig ihre Pakete dort anliefern bzw. abholen. Dies impliziert ein zusätzliches Sicherheitsrisiko für den Straßen-, Fuß- und Radverkehr an den Vertihubs, da hier mit einem erhöhten Verkehrsaufkommen und einem hohen Ablenkungspotenzial durch startende und landende Drohnen zu rechnen ist.

Soziale Akzeptanz

Informationskampagnen, die die Vor- und Nachteile des hier angedachten Einsatzzwecks der Drohnen transparent kommunizieren, bieten die **Chance**, die Akzeptanz von Drohnen in der Bevölkerung zu erhöhen. Durch die gezielte Kenntlichmachung der Einsatzzwecke lassen sich das Verständnis und damit die Akzeptanz weiter fördern. Allerdings besteht auch das **Risiko**, dass durch gesellschaftliche Widerstände die Genehmigungsprozesse für einen kommerziellen Drohnenbetrieb verlängert werden. Dies würde die Implementierung einer Drohnenlogistik erheblich erschweren bzw. verhindern. Zudem sind Sicherheitsbedenken in der Bevölkerung oft tief verwurzelt und lassen sich nur schwer ausräumen, was zusätzliche Risiken für die Akzeptanzbildung darstellt. Eine proaktive Ansprache dieser Bedenken ist daher unerlässlich, um den Drohnenbetrieb nachhaltig zu unterstützen.

Gesundheitliche Auswirkung

Ein zukünftiger kommerzieller Drohnenbetrieb könnte die **Chance** bieten, die Anzahl an Verkehrsunfällen mit Beteiligung von KEP-Fahrzeugen zu reduzieren. Dies könnte zu einer Reduzierung der Personenschäden im Straßenverkehr führen. Jedoch sind die **Risiken** und potenziellen gesundheitlichen Auswirkungen der erhöhten Geräuschbelastung durch den Einsatz von Drohnen vorhanden. Insbesondere an den Start- und Landeplätzen (d. h. Vertihubs) der Drohnen sind erhöhte Geräuschbelastungen wahrscheinlich.

Visuelle Wahrnehmung

Die visuelle Wahrnehmung von Drohnen spielt eine zentrale Rolle in der öffentlichen Akzeptanz. Eine **Chance** liegt darin, dass durch die vergleichsweise geringen Größen vieler Drohnen und mit zunehmender Flughöhe die visuelle Wahrnehmung der Drohnen sinken kann. Jedoch zeigen die ermittelten Präsenzwahrscheinlichkeiten und Gleichzeitigkeiten, die an den Vertihubs bei bis zu 43 % liegen können, das **Risiko**, dass ihre Sichtbarkeit und potenzielle Störwirkung für die Bevölkerung und Anwohner erhöht sind. Durch diese erhöhte visuelle Beeinträchtigung können negative Erfahrungen begünstigt werden. Um diese Risiken zu minimieren, ist es wichtig, geeignete Maßnahmen wie beispielsweise die kontinuierliche Beteiligung der Bevölkerung zur sinnvollen Auswahl der Platzierung von Vertihubs vorzunehmen.

Verkehrliche Auswirkungen

Als **Chancen** können bei den verkehrlichen Auswirkungen zunächst einmal die Einsparung an Fahrzeugen, Fahrten und Laufleistung für den bodengebundenen KEP-Verkehr durch Einsatz von Drohnen genannt werden. Diese Einsparungen sind teilweise erheblich. Zudem kann mit einer leichten Verbesserung des Verkehrsflusses durch weniger bodengebundenen Verkehr und insbesondere weniger Haltevorgänge ausgegangen werden. Als **Risiko** fällt zum einen die hohe Anzahl an Drohnenflügen auf, die mit der geringen Kapazität und Nutzlast der Drohnen zusammenhängt. Zum anderen fällt auf, dass die Drohnen viele „Leerkilometer“ auf dem Weg zurück zu den Vertihubs zurücklegen müssen, um wieder neue Pakete zu beladen. Insgesamt haben die Einsparungen im bodengebundenen KEP-Verkehr auch nur geringe (positive) Auswirkungen auf den Verkehr am Boden, da der KEP-Verkehr nur einen relativ geringen prozentualen Anteil am gesamten bodengebundenen Verkehr ausmacht.

Verkehrssicherheit

Als **Chancen** in Bezug auf die Verkehrssicherheit kann der leichte Rückgang der Gesamtfahrleistung am Boden bedingt durch die Verringerung des KEP-Verkehrs genannt werden. Diese Verringerung hat eine neutrale bis positive Wirkung auf das gesamte Unfallgeschehen. Als **Risiko** des Rückgangs der Gesamtfahrleistung kann jedoch erwähnt werden, dass dies potenziell zu höheren Geschwindigkeiten des bodengebundenen Verkehrs und somit zu (möglicherweise) schweren Unfällen führen kann. Zudem besteht das Risiko, dass die Fahrerinnen und Fahrer des bodengebundenen Straßenverkehrs durch die fliegenden Drohnen ablenkt sind und somit die Verkehrssicherheit negativ beeinflussen. Ein weiteres Risiko entsteht durch die Ausfallwahrscheinlichkeit von Drohnen, da aktuell ohne Zertifizierung und regelmäßige Wartung Ausfälle einzelner Systemkomponenten der Drohnen möglich sind. Hinzu kommt die potenzielle Gefahr durch Sabotage, die es zu verhindern gilt.

Robustheit des Drohnenverkehrs

Die Nutzung von Drohnen bietet die **Chance**, logistische Prozesse unabhängiger vom Verkehrsfluss am Boden zu machen. Vereinzelt kann diese Form der Paketzustellung die Zustellgeschwindigkeit erhöhen und auch die Betriebskosten senken. Jedoch sind mit dem Einsatz von Drohnen auch erhebliche **Risiken** verbunden. Ein zentrales Problem ist die unbeständige Wetterlage im Untersuchungsgebiet, die dazu führt, dass nur 53,7 % der Tageslichtstunden für den Drohnenbetrieb effektiv genutzt werden können. Dies limitiert nicht nur die operative Kapazität, sondern kann auch die Zuverlässigkeit der Lieferungen beeinträchtigen. Zusätzlich ist die Anfälligkeit der Drohnen für mutwillige oder kriminelle Sabotage ein ernstes Sicherheitsrisiko. Derzeit verfügen viele Drohnen über keine verschlüsselte Kommunikationstechnologie, was bedeutet, dass sie potenziell Ziel von Hackerangriffen oder Störungen durch Dritte sein können. Ein weiteres Risiko ist die Ausfallwahrscheinlichkeit der eingesetzten Drohnen, die bei bis zu 0,01 % liegen kann. Diese Ausfälle sind auf die Verwendung nicht luftfahrtzertifizierter Komponenten zurückzuführen, die nicht den strengen Sicherheitsstandards der Luftfahrtindustrie entsprechen.

Auswirkungen auf Transportkosten

Eine **Chance** entsteht, indem die täglichen Transportkosten für Drohnenverkehr voraussichtlich geringer sind als für den bodengebundenen Lieferverkehr. Die Analysen haben gezeigt, dass beide modellierten Szenarien („Paketstationen“, „Direktbelieferung“) kostengünstiger als das Szenario Status quo sind. Als **Risiko** eines zukünftigen kommerziellen Drohnenbetriebs können jedoch die Anfangsinvestitionen in die Infrastruktur für Drohnen und Vertihubs genannt werden. Zudem ist es aufgrund der beschränkten Nutzlast und Robustheit der Drohnen notwendig, eine bodengebundene Infrastruktur aus KEP-Fahrzeugen vorzuhalten, um einen ganzjährigen und störungsarmen Paketlieferdienst gewährleisten zu können.

Energetische Auswirkungen

Der Einsatz von Drohnen scheint **Chancen** zur Energieeinsparung im Vergleich zu herkömmlichen Transportmethoden zu bieten. Jedoch muss angemerkt werden, dass die fehlende Praxiserfahrung im großflächigen Einsatz von Drohnen zu Unsicherheiten bezüglich ihrer tatsächlichen Energiebilanz führt, was als **Risiko** angesehen werden muss. Um fundierte Aussagen über die energetischen Auswirkungen des Drohnenbetriebs zu treffen, sind umfassende Untersuchungen und Langzeitstudien notwendig, die den Energieverbrauch systematisch analysieren.

Zusammenfassend zeigt Tabelle 12 die Chancen und Risiken der unbemannten Luftfahrt nach Themengebiet.

Tabelle 12: Übersicht zu den Chancen und Risiken der unbemannten Luftfahrt nach Themengebiet

Auswirkungen der unbemannten Luftfahrt	Chancen	Risiken
Rechtliche Rahmenbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> - Zukünftige europäische Luftraumkonzepte (d. h. U-space) vereinfachen einen flächendeckenden Drohnenbetrieb. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aktuell geltende rechtliche Rahmenbedingungen erschweren einen wirtschaftlichen Drohnenbetrieb.
Flächeninanspruchnahme	<ul style="list-style-type: none"> - Installation der Vertihubs auf Gebäudeböden oder Umwidmung bestehender Logistikinfrastruktur führt lediglich zu Flächenkonversion. 	<ul style="list-style-type: none"> - Geringe Flächen für Vertihubs in dicht besiedelten urbanen Gebieten verfügbar. - Durch den Aufbau neuer Infrastruktur könnte zusätzliche Fläche versiegelt werden. - Eigentumsverhältnisse können zu langen Verfahren führen.
Städtebauliche Einbindung der Vertihubs	<ul style="list-style-type: none"> - Integration von Vertihubs in bestehende Gebäudestrukturen - Stärkung lokaler Wirtschaftszweige durch Innovationen und neue Arbeitsplätze - Stärkung des Innovationscharakters einer Stadt 	<ul style="list-style-type: none"> - Konflikte mit bestehenden Nutzungen von Flächen und Gebäuden - Lärmimmissionen, insbesondere an Vertihubs - Schlechte Integration in das bestehende Stadtbild, insbesondere bei Denkmalschutz
Soziale Akzeptanz	<ul style="list-style-type: none"> - Informationskampagnen können die Akzeptanz eines Drohnenbetriebs erhöhen. - Kenntlichmachung des Einsatzzwecks von Drohnen erhöhen deren Akzeptanz. 	<ul style="list-style-type: none"> - Gesellschaftliche Widerstände können zu langen Genehmigungsprozessen führen oder den Drohnenbetrieb ganz verhindern. - Sicherheitsbedenken der allgemeinen Bevölkerung sind nur schwer entgegenzukommen.
Gesundheitliche Auswirkungen	<ul style="list-style-type: none"> - 	<ul style="list-style-type: none"> - Erhöhte Geräuschbelastung an den Vertihubs
Visuelle Wahrnehmung	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Flughöhen und verhältnismäßig kleine 	<ul style="list-style-type: none"> - Relativ hohe Präsenzwahrscheinlichkeit führt zu visueller Wahrnehmung am Himmel

Auswirkungen der unbemannten Luftfahrt	Chancen	Risiken
Verkehrliche Auswirkungen	<ul style="list-style-type: none"> - Drohnen reduzieren die Sichtbarkeit am Himmel. - Einsparung an Fahrzeugen, Fahrten und Laufleistung für den bodengebundenen KEP-Verkehr durch Einsatz von Drohnen - Verbesserung des Verkehrsflusses durch weniger bodengebundenen Verkehr 	<ul style="list-style-type: none"> - Erhöhte Beeinträchtigung an den Vertihubs - Geringe Kapazität der Drohnen und daher hohe Anzahl an Flügen nötig, viele „Leerkilometer“ - Insgesamt nur geringe (positive) Auswirkungen auf den Verkehr am Boden
Verkehrssicherheit	<ul style="list-style-type: none"> - Leichter Rückgang der Gesamtfahrleistung am Boden bedingt eine neutrale bis positive Wirkung auf das Unfallgeschehen. 	<ul style="list-style-type: none"> - Rückgang der Gesamtfahrleistung kann zu höheren Geschwindigkeiten und somit Unfällen führen - Ablenkung des bodengebundenen Straßenverkehrs durch fliegende Drohnen - Relativ hohe Ausfallwahrscheinlichkeit einzelner Systemkomponenten der Drohnen könnte zu Abstürzen führen
Robustheit Drohnenbetrieb	<ul style="list-style-type: none"> - logistische Prozesse unabhängiger vom bodenseitigen Verkehrsfluss 	<ul style="list-style-type: none"> - Starke Abhängigkeit von der Wetterlage - Hohe Anfälligkeit für mutwillige oder kriminelle Sabotage - Relativ hohe Ausfallwahrscheinlichkeit einzelner Systemkomponenten der Drohnen
Auswirkungen auf Transportkosten	<ul style="list-style-type: none"> - Die Transportkosten für Drohnenverkehr sind voraussichtlich kostengünstiger als die Transportkosten für den bodengebundenen Lieferverkehr. 	<ul style="list-style-type: none"> - Anfangsinvestitionen in die Infrastruktur für Drohnen (z. B. Vertihub) notwendig - Aufgrund der beschränkten Nutzlast und Robustheit der Drohnen ist eine parallele Infrastruktur am Boden nötig, wodurch doppelte Aufwände entstehen. - Unterschätzen der Transportkosten für Drohnen ohne weitere empirisch fundierte Werte als Grundlage zur Transportkostenberechnung
Energetische Auswirkungen	<ul style="list-style-type: none"> - Energieeinsparung durch Drohnenbetrieb erscheint möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Aufgrund fehlender Praxiserfahrung weitere Untersuchungen zur genauen Energiebilanz nötig
Verkehrliche Erschließung der Vertihubs	<ul style="list-style-type: none"> - Bündelung von Lieferverkehren, da nur der Vertihub als zentraler Punkt angeliefert werden muss 	<ul style="list-style-type: none"> - Komplexe Koordination von Boden- und Luftverkehr - Sicherheitsrisiken für Fuß- und Radverkehr an den Vertihubs

Auswirkungen der unbemannten Luftfahrt	Chancen	Risiken
		<ul style="list-style-type: none"> - Erhöhter Verkehr an den Paketstationen möglich

Eine abschließende Abwägung der Chancen und Risiken zeigt aus Sicht der Autorinnen und Autoren, dass sich in Deutschland unter den aktuellen Rahmenbedingungen der Einsatz von Drohnen nur in spezifischen Einzelfällen anbietet. Als mögliche Chancen könnten sich Zeitersparnisse, geringere Betriebskosten und energetische Einsparungen ergeben. Demgegenüber stehen zahlreiche Risiken und Unsicherheiten. Während durch den U-space die Regelung des Luftraums voranschreitet, befassen sich die aktuellen rechtlichen Rahmenbedingungen derzeit nicht mit der Start- und Landeinfrastruktur. Entsprechend bedarf es aufwändiger Einzelfallprüfungen, die einen wirtschaftlichen Drohnenbetrieb erschweren. Zudem kommt ein großer Unsicherheitsfaktor hinsichtlich der sozialen Akzeptanz eines solchen Drohnenbetriebs, der zu aufwändigen Marketing-Kampagnen und Beteiligungsprozessen führen kann. Aus gesundheitlicher Sicht wirken sich im Umfeld der Start- und Landeinfrastruktur die Geräuschbelastung und visuelle Beeinträchtigung negativ aus. Auch betriebswirtschaftlich bestehen erhebliche Bedenken, da zum einen für schwere Pakete nach wie vor ein paralleles Konzept am Boden notwendig ist und zum anderen die Wetterbedingungen keinen kontinuierlich verlässlichen Betrieb zulassen. Für Unternehmen hätte dies unmittelbare Auswirkungen auf ihre Wettbewerbsfähigkeit im Vergleich zu Unternehmen, die ausschließlich am Boden agieren. Hinzu kommt, dass hohe Investitionskosten am Anfang getätigt werden müssten. Zusammenfassend scheint eine flächendeckende Verlagerung des Transportes auf Drohnen derzeit somit unrealistisch.

5 Literatur

Aalmoes, R., & Sieben, N. (2021). Visual and audio perception study on drone aircraft and similar sounds in an Urban Air Mobility setting. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (Vol. 263, No. 4, pp. 2510-2521). Institute of Noise Control Engineering. <https://doi.org/10.3397/in-2021-2160>

Abro, G. E. M., Zulkifli, S. A. B., Masood, R. J., Asirvadam, V. S., & Laouiti, A. (2022). Comprehensive review of UAV detection, security, and communication advancements to prevent threats. *Drones*, 6(10), 284. <https://doi.org/10.3390/drones6100284>

Agatz, N., Bouman, P., & Schmidt, M. (2018). Optimization approaches for the traveling salesman problem with drone. *Transportation Science*, 52(4), 965-981. <https://doi.org/10.1287/trsc.2017.0791>

Allen, J., Piecyk, M., Piotrowska, M., McLeod, F., Cherrett, T., Ghali, K., Nguyen, T., Bektas, T., Bates, O., Friday, A., Wise, S. & Austwick, M. (2018). Understanding the impact of e-commerce on last-mile light goods vehicle activity in urban areas: The case of London. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61, pp.325–338. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.07.020>

Aschauer, G., Gronalt, M., & Mandl, C. (2015). Modelling interrelationships between logistics and transportation operations—a system dynamics approach. *Management research review*, 38(5), 505-539. <https://doi.org/10.1108/mrr-11-2013-0271>

Aurambout, J. P., Gkoumas, K., & Ciuffo, B. (2019). Last mile delivery by drones: An estimation of viable market potential and access to citizens across European cities. *European Transport Research Review*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/s12544-019-0368-2>

Aydin, B. (2019). Public acceptance of drones: Knowledge, attitudes, and practice. *Technology in society*, 59, 101180. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2019.101180>

Axhausen, K. W., Horni, A., & Nagel, K. (2016). *The multi-agent transport simulation MATSim* (p. 618). Ubiquity Press.

Behroozi, M., & Ma, D. (2020). Crowdsourced delivery with drones in last mile logistics. *Algorithmic Approaches for Transportation Modeling, Optimization, and Systems*, 12. <https://doi.org/10.4230/oasics.atmos.2020.17>

Benarbia, T., & Kyamakya, K. (2021). A literature review of drone-based package delivery logistics systems and their implementation feasibility. *Sustainability*, 14(1), 360. <https://doi.org/10.3390/su14010360>

Bertolaso, A., Raeissi, M. M., Farinelli, A., & Muradore, R. (2016). Using petri net plans for modeling uav-ugv cooperative landing. In *ECAI 2016* (pp. 1720-1721). IOS Press. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-672-9-1720>

Bond, J.-M. (2019). *Amazon announces first successful home delivery via drone*. Verfügbar unter <https://www.dailydot.com/debug/amazon-prime-air-launches-first-delivery/> [Zugriff am 09.09.2021].

Boucher, P. (2016). ‘You wouldn’t have your granny using them’: drawing boundaries between acceptable and unacceptable applications of civil drones. *Science and engineering ethics*, 22, 1391-1418. <https://doi.org/10.1007/s11948-015-9720-7>

Boysen, N., Briskorn, D., Fedtke, S., & Schwerdfeger, S. (2018). Drone delivery from trucks: Drone scheduling for given truck routes. *Networks*, 72(4), 506-527. <https://doi.org/10.1002/net.21847>

Brown, A. (2019). *Skyports and partners to complete first urban e-commerce deliveries by drone in Helsinki*. Verfügbar unter <https://geospatialworld.net/news/skyports-and-partners-to-complete-first-urban-e-commerce-deliveries-by-drone/> [Zugriff am 09.09.2021].

Brunner, G., Szebedy, B., Tanner, S., & Wattenhofer, R. (2019, June). The urban last mile problem: Autonomous drone delivery to your balcony. *2022 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 1005–1012. <https://doi.org/10.1109/icuas.2019.8798337>

Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) (2023a). *WMS TopPlusOpen*. Verfügbar unter <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/wms-topplusopen-wms-topplus-open.html> [Zugriff am 23.04.2023].

Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) (2023b). *Verwaltungsgebiete 1:250 000*. Verfügbar unter <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitale-geodaten/verwaltungsgebiete/verwaltungsgebiete-1-250-000-stand-01-01-vg250-01-01.html> [Zugriff am 12.01.2023].

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (2023). *Laufende Stadtbeobachtung - Raumabgrenzungen - Stadt- und Gemeindetypen in Deutschland*. Verfügbar unter: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/raumbeobachtung/Raumabgrenzungen/deutschland/gemeinden/StadtGemeindetyp/StadtGemeindetyp.html> [Zugriff am 04.08.2024].

Bundesministerium der Justiz (BMJ) (2023a). *Baugesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 3. November 2017 (BGBl. I S. 3634), das zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 20. Dezember 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 394) geändert worden ist*. Verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/bbaug/BauGB.pdf> [Zugriff am 27.09.2024].

Bundesministerium der Justiz (BMJ) (2023b). *Baunutzungsverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 21. November 2017 (BGBl. I S. 3786), die zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 3. Juli 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 176) geändert worden ist*. Verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/baunvo/BauNVO.pdf> [Zugriff am 27.09.2024].

Bundesministerium der Justiz (BMJ) (2023c). *Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274; 2021 I S. 123), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 24. Februar 2025 (BGBl. 2025 I Nr. 58) geändert worden ist*. Verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/bimschg/BImSchG.pdf> [Zugriff am 23.03.2023].

Bundesministerium der Justiz (BMJ) (2023d). *Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO) § 21h Regelungen für den Betrieb von unbemannten Fluggeräten in geografischen Gebieten nach der Durchführungsverordnung (EU) 2019/947*. Verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/luftvo_2015/_21h.html [Zugriff am 23.02.2022].

Bundesministerium der Justiz (BMJ) (2021). *Planzeichenverordnung vom 18. Dezember 1990 (BGBl. 1991 I S. 58), die zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 14. Juni 2021 (BGBl. I S. 1802) geändert worden ist*. Verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/planzv_90/PlanZV.pdf [Zugriff am 22.04.2024].

Bundesministerium der Justiz (BMJ) (2023e). *Raumordnungsgesetz vom 22. Dezember 2008 (BGBl. I S. 2986), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist*. Verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/rog_2008/ROG.pdf [Zugriff am 22.04.2024].

Bundesministerium der Justiz (BMJ) (2024). *Straßenverkehrsgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 5. März 2003 (BGBl. I S. 310, 919), das zuletzt durch Artikel 70 des Gesetzes vom 23. Oktober 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 323) geändert worden ist*. Verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/stvg/StVG.pdf> [Zugriff am 22.04.2024].

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2019): Planung von Lastenradumschlagsknoten. Ein Leitfaden für Kommunen und Wirtschaft zur Planung von Umschlagspunkten für neue, urbane Logistikkonzepte. Magdeburg.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUV) (2017). *Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Änderung der Sechsten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm)*. Verfügbar unter <https://www.bundesanzeiger.de/pub/publication/OFBzcshZEF1cw24D25Y/content/OFBzcsh-ZEF1cw24D25Y/BAnz%20AT%2008.06.2017%20B5.pdf?inline> [Zugriff am 21.11.2024].

Bundesverband der deutschen Luftfahrtverkehrswirtschaft (BDL) (2022). *Was denken die Deutschen über Advanced Air Mobility?*. Verfügbar unter <https://www.bdl.aero/de/publikation/analyse-des-deutschen-drohnenmarktes/#:~:text=Der%20deutsche%20Drohnen-markt%20ist%20gegenw%C3%A4rtig,und%20Japan%20den%20vierten%20Platz> [Zugriff am 17.03.2023].

Burukina, O., & Khavanova, I. (2020). Human–Drone Interaction: Virtues and Vices in Systemic Perspective. In *Advances in Human Factors in Robots and Unmanned Systems: Proceedings of the AHFE 2019 International Conference on Human Factors in Robots and Unmanned Systems, July 24–28, 2019, Washington DC, USA 10* (pp. 217–229). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20467-9_20

Busch, T. (2022). *Darf man Drohnen per Luftgewehr abwehren?* SPIEGEL. Verfügbar unter <https://www.spiegel.de/netzwelt/gerichtsurteile-zu-drohnen-darf-man-drohnen-per-luftgewehr-abwehren-a-27507b49-084c-4299-b1e8-b86a475451f6> [Zugriff am 07.10.2022].

Callanan, J., Ghassemi, P., DiMartino, J., Dhameliya, M., Stocking, C., Nouh, M., & Chowdhury, S. (2020). Ergonomic impact of multi-rotor unmanned aerial vehicle noise in warehouse environments. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 100, 1309–1323. <https://doi.org/10.1007/s10846-020-01238-5>

Campbell, J. F., Sweeney, I. I., Donald, C., Zhang, J., & Pan, D. (2018). Strategic design for delivery with linked transportation assets: trucks and drones. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/34894>

Carlsson, J. G., & Song, S. (2018). Coordinated logistics with a truck and a drone. *Management Science*, 64(9), 4052–406. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2017.2824>

Çetin, E., Cano, A., Deransy, R., Tres, S., & Barrado, C. (2022). Implementing mitigations for improving societal acceptance of urban air mobility. *Drones*, 6(2), 28. <https://doi.org/10.3390/drones6020028>

Chang, V., Chundury, P., & Chetty, M. (2017, May). Spiders in the sky: User perceptions of drones, privacy, and security. In *Proceedings of the 2017 CHI conference on human factors in computing systems* (pp. 6765–6776). <https://doi.org/10.1145/3025453.3025632>

Cheyno, E. (1967, October). Vertiport design and operations. In *4th Annual Meeting and Technical Display* (p. 891). <https://doi.org/10.2514/6.1967-891>

Clothier, R. A., Greer, D. A., Greer, D. G., & Mehta, A. M. (2015). Risk perception and the public acceptance of drones. *Risk analysis*, 35(6), 1167–1183. <https://doi.org/10.1111/risa.12330>

Coelho, B. N., Coelho, V. N., Coelho, I. M., Ochi, L. S., K, R. H., Zuidema, D., Lima, M. S., & Da Costa, A. R. (2017). A multi-objective green UAV routing problem. *Computers & Operations Research*, 88, 306–315. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.04.011>

Connors, H. C. (1968). Heliports—Key Catalyst in VTOL Industry Growth. *SAE Transactions*, 906–922.

Curlander, J. C., Gilboa-Amir, A., Kissner, L. M., Koch, R. A., & Welsh, R. D. (2017). *U.S. Patent No. 9,777,502*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Daknama, R., & Kraus, E. (2017). Vehicle routing with drones. *arXiv preprint arXiv:1705.06431*.

Daskilewicz, M., German, B., Warren, M., Garrow, L. A., Boddupalli, S. S., & Douthat, T. H. (2018). Progress in vertiport placement and estimating aircraft range requirements for eVTOL daily commuting. In *2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference* (p. 2884). <https://doi.org/10.2514/6.2018-2884>

Destatis (2020). *Verkehrsunfälle - Fachserie 8 Reihe 7 - 2019*. Statistisches Bundesamt. Verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/Publikationen/Downloads-Verkehrsunfaelle/verkehrsunfaelle-jahr-2080700197004.pdf> [Zugriff am 03.04.2022].

Deutscher Wetterdienst DWD (2022). *Wetterdaten: Klimadaten Deutschland – Monats- und Tageswerte (Archiv)*. <https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/klarchivtagmonat.html> [Zugriff am 09.10.2022].

Deutscher Wetterdienst DWD (2023a). *Wetterdaten für Wetterstation Aachen-Orsbach*. Verfügbar unter: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/klarchivtagmonat.html> [Zugriff am 09.10.2022].

Deutscher Wetterdienst DWD (2023b). *Bürgerliche Dämmerung*. Verfügbar unter: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv3=100596&lv2=100578> [Zugriff am 09.10.2022].

DHL (2018). *Rapid response from the air: medicines successfully delivered using a parcel drone in east Africa*. <https://www.dhl.com/global-en/home/press/press-archive/2018/rapid-response-from-the-air-medicines-successfully-delivered-using-a-parcel-drone-in-east-africa.html> [Zugriff am 09.09.2021].

DHL (2019). *Daten & Fakten - Das Elektrofahrzeug StreetScooter*. Verfügbar unter <https://www.dpdhl.com/content/dam/dpdhl/de/media-center/media-relations/documents/2019/fact-sheet-streetscooter-de.pdf> [Zugriff am 10.10.2021].

DPDgroup (2019). *2nd line for parcel delivery by drone in France*. Verfügbar unter <https://www.dpd.com/group/en/2019/11/07/2nd-line-for-parcel-de-livery-by-drone-in-france/> [Zugriff am 09.09.2021].

EASA. (2022). *Prototype Technical Design Specifications for Vertiports*. Verfügbar unter <https://www.easa.europa.eu/document-library/general-publications/prototype-technical-design-specifications-vertiports> [Zugriff am 17.01.2022].

Eißfeldt, H., Vogelpohl, V., Stoltz, M., Papenfuß, A., Biella, M., Belz, J., & Kügler, D. (2020). The acceptance of civil drones in Germany. *CEAS Aeronautical Journal*, 11(3), 665-676. <https://doi.org/10.1007/s13272-020-00447-w>

Elevate, U. (2016). *Fast Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation*. Verfügbar unter https://evtol.news/__media/PDFs/UberElevateWhitePaperOct2016.pdf [Zugriff am 22.05.2022]

EmQopter (2023). *Die erste genehmigungsfähige voll autonome Lieferdrohne*. Verfügbar unter <https://www.emqopter.de/de/lieferdrohne.php> [Zugriff am 23.04.2024].

ETHHealthWorld (2019). *Govt of Maharashtra, Zipline and SII announce India's first autonomous instant drone delivery service*. Verfügbar unter <https://health.economictimes.indiatimes.com/news/medical-devices/govt-of-maharashtra-and-zipline-announce-indias-first-autonomous-instant-drone-delivery-service/71149101> [Zugriff am 09.09.2021].

Europäische Kommission (2021). *DURCHFÜHRUNGSVERORDNUNG (EU) 2021/664 DER KOMMISSION vom 22. April 2021 über einen Rechtsrahmen für den U-Space (Text von Bedeutung für den EWR)*. Amtsblatt der Europäischen Union. Verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32021R0664> [Zugriff am 11.06.2022].

Europäische Kommission (2021). *DURCHFÜHRUNGSVERORDNUNG (EU) 2021/665 DER KOMMISSION vom 22. April 2021 zur Änderung der Durchführungsverordnung (EU) 2017/373 der Kommission hinsichtlich der Anforderungen an Anbieter, die Flugverkehrsmanagementdienste/Flugsicherungsdienste und sonstige Netzfunktionen des Flugverkehrsmanagements in dem im kontrollierten Luftraum ausgewiesenen U-Space-Luftraum erbringen (Text von Bedeutung für den EWR)*. Amtsblatt der Europäischen Union. Verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32021R0665> [Zugriff am 11.06.2022].

Europäische Kommission (2021). *DURCHFÜHRUNGSVERORDNUNG (EU) 2021/666 DER KOMMISSION vom 22. April 2021 zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 923/2012 hinsichtlich der Anforderungen an den Flugbetrieb der bemannten Luftfahrt im U-Space-Luftraum (Text von Bedeutung für den EWR)*. Amtsblatt der Europäischen Union. Verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32021R0666> [Zugriff am 11.06.2022].

Federal Aviation Administration (FAA) (2012). *Advisory Circular 150/5390-2C - Heliport Design*. Verfügbar unter https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/150_5390_2c.pdf [Zugriff am 02.12.2022]

Fadhil, D. N. (2018). A GIS-based analysis for selecting ground infrastructure locations for urban air mobility. *inlangen]. Master's Thesis, Technical University of Munich*, 31.

Feng, Y., Zhang, C., Baek, S., Rawashdeh, S., & Mohammadi, A. (2018). Autonomous landing of a UAV on a moving platform using model predictive control. *Drones*, 2(4), 34. <https://doi.org/10.3390/drones2040034>

Ferreira, T., & Kalakou, S. (2021). Strategic planning for urban air mobility: Perceptions of citizens and potential users on autonomous flying vehicles. In *Advances in Mobility-as-a-Service Systems: Proceedings of 5th Conference on Sustainable Urban Mobility, Virtual CSUM2020, June 17-19, 2020, Greece* (pp. 286-295). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61075-3_28

Frachtenberg, E. (2019). Practical drone delivery. *Computer*, 52(12), 53-57. <https://doi.org/10.1109/mc.2019.2942290>

Gabani, P. R., Gala, U. B., Narwane, V. S., Raut, R. D., Govindarajan, U. H., & Narkhede, B. E. (2021). A viability study using conceptual models for last mile drone logistics operations in populated urban cities of India. *IET Collaborative Intelligent Manufacturing*, 3(3), 262-272. <https://doi.org/10.1049/cim2.12006>

Garcia, O., & Santoso, A. (2019). Comparative evaluation of drone delivery systems in last-mile delivery.

Gasche, S. (2023). *Integration of Battery Fuel Consumption Models into a Path Planning Problem for Unmanned Aircraft Systems* (Master dissertation, Technische Universität Darmstadt)

German, B., Daskilewicz, M., Hamilton, T. K., & Warren, M. M. (2018). Cargo delivery in by passenger evtol aircraft: A case study in the san francisco bay area. In *2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting* (p. 2006). <https://doi.org/10.2514/6.2018-2006>

Grossi, C., Martin, L., & Wolter, C. (2021). Obtaining public opinion about sUAS activity in an urban environment. In *Advances in Human Factors in Robots, Drones and Unmanned Systems: Proceedings of the AHFE 2020 Virtual Conference on Human Factors in Robots, Drones and Unmanned Systems, July 16-20, 2020, USA* (pp. 49-55). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51758-8_7

Gwak, D. Y., Han, D., & Lee, S. (2020). Sound quality factors influencing annoyance from hovering UAV. *Journal of sound and vibration*, 489, 115651. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115651>

Haddad, C. A., Chaniotakis, E., Straubinger, A., Plötner, K., & Antoniou, C. (2020). Factors affecting the adoption and use of urban air mobility. *Transportation research part A: policy and practice*, 132, 696-712. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.12.020>

Hamburg News (2020). Medifly: Drohnen-Transport medizinischer Güter wird 2021 ausgebaut. Verfügbar unter <https://www.hamburg-news.hamburg/innovation-wissenschaft/medifly-drohnen-transport-medizinischer-gueter-wird-2021-ausgebaut> [Zugriff am 09.09.2021].

Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA, 2022).

Haße, D. (2024). *Klein aber mit viel Potenzial: Wie der LogistikdrohnenLinienflugbetrieb abhebt*. Verfügbar unter <https://www.airliners.de/reportage-potenzial-logistikdrohnen-linienflugbetrieb-abhebt/73089> [Zugriff am 14.03.2024]

Herdel, V., Yamin, L. J., Ginosar, E., & Cauchard, J. R. (2021, September). Public drone: Attitude towards drone capabilities in various contexts. In *Proceedings of the 23rd International Conference on Mobile Human-Computer Interaction* (pp. 1-16). <https://doi.org/10.1145/3447526.3472053>

Hoenen, S. (2022). *Anforderungskatalog für Kommunen zur Umsetzung eines Cityhubs. Gestaltung eines Planungsprozesses zur Etablierung eines Cityhub-Vorhabens*. Verfügbar unter https://www.isb.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaabxcldur&download=1 [Zugriff am 04.07.2023].

Horizont (2022). *Heinen Verlag testet Zustellung per Drohne*. Verfügbar unter <https://www.horizont.net/medien/nachrichten/die-zeitung-aus-der-luft-heinen-verlag-testet-zustellung-per-drohne-204767> [Zugriff am 21.12.2022].

Hui, C. J., Kingan, M. J., Hioka, Y., Schmid, G., Dodd, G., Dirks, K. N., ... & Shim, Y. M. (2021). Quantification of the psychoacoustic effect of noise from small unmanned aerial vehicles. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(17), 8893. <https://doi.org/10.3390/ijerph18178893>

Louen, C., Schrömbges, M., Brost, W. & Burla, P. (2018). *Microscopic Agent-based Travel Demand Model for the Region of Aachen*. Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr der RWTH Aachen University. Verfügbar unter https://www.isb.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaabhdspv [Zugriff am 16.11.2022].

International Organization of Standardization (ISO) (2024). *Akustik - Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung - Teil 2: Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 (Ingenieurverfahren) für die Vorhersage der Schalldruckpegel im Freien*. Verfügbar unter <https://www.dinmedia.de/de/norm/iso-9613-2/376738950> [Zugriff am 03.03.2022].

IVECO Daily Electric (2016). *Der Neue Daily Electric*. Iveco. Verfügbar unter https://www.iveco.com/Germany/collections/catalogues/Documents/Neue_Materialien_DE/Daily_Electric.pdf [Zugriff am 21.02.2023].

Johnston, T., Riedel, R., & Sahdev, S. (2020). To take off, flying vehicles first need places to land. *McKinsey Center for Future Mobility*, 2-8.

Keller, M., Hulínská, Š., & Kraus, J. (2021). Integration of UAM into cities—the public view. *Transportation Research Procedia*, 59, 137-143. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.11.105>

Kim, J., Moon, H., & Jung, H. (2020). Drone-based parcel delivery using the rooftops of city buildings: Model and solution. *Applied Sciences*, 10(12), 4362. <https://doi.org/10.3390/app10124362>

Kitjacharoenchai, P., & Lee, S. (2019). Vehicle routing problem with drones for last mile delivery. *Procedia Manufacturing*, 39, 314-324. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107598>

Klauser, F., & Pedrozo, S. (2017). Big data from the sky: popular perceptions of private drones in Switzerland. *Geographica helvetica*, 72(2), 231-239. <https://doi.org/10.5194/gh-72-231-2017>

Klinke, O. (2020). *Drohne statt Transporter: Erfolgreiche Weltpremiere in der standortübergreifenden Werkslogistik*. Verfügbar unter <https://idw-on-line.de/de/news731158> [Zugriff am 09.09.2021].

Kolokythas, P. (2016). *DHL-Paketkopter 3.0 besteht Tests erfolgreich*. Verfügbar unter <https://www.pcwelt.de/news/DHL-Paketkopter-3.0-bestehet-Tests-erfolgreich-9977563.html> [Zugriff am 09.09.2021].

Labor Berlin (2020). *Pressemitteilung: Labor Berlin probt den Ernstfall – Wenn Laborproben mit Drohnen fliegen lernen*. Verfügbar unter https://www.laborberlin.com/wp-content/uploads/2020/11/201117_Pressemitteilung_Drohnen_DEUTSCH-1.pdf [Zugriff am 09.09.2021]

Li, G. (2018). *Ele.me Announces a New Era for Food Delivery: Drones*. Verfügbar unter <https://pandaily.com/ele-me-announces-a-new-era-for-food-delivery-drones/> [Zugriff am 09.09.2021].

Lidynia, C., Philipsen, R., & Ziefle, M. (2017). Droning on about drones—acceptance of and perceived barriers to drones in civil usage contexts. In *Advances in Human Factors in Robots and Unmanned Systems: Proceedings of the AHFE 2016 International Conference on Human Factors in Robots and Unmanned Systems, July 27-31, 2016, Walt Disney World®, Florida, USA* (pp. 317-329). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-41959-6_26

Lim, E., & Hwang, H. (2019). The selection of vertiport location for on-demand mobility and its application to Seoul metro area. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 20, 260-272. <https://doi.org/10.1007/s42405-018-0117-0>

Lineberger, R., Hussain, A., Metcalfe, M., & Rutgers, V. (2019). Infrastructure barriers to the elevated future of mobility. *Deloitte Ser. Future Mobil*. Verfügbar unter https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/5103_Infrastructure-barriers-to-elevated-FOM/DI_Infrastructure-barriers-to-elevated-FOM.pdf [Zugriff am 02.03.2023]

Liu, J., Guan, Z., Shang, J., & Xie, X. (2018). Application of drone in solving last mile parcel delivery. *Journal of Systems Science and Information*, 6(4), 302-319. <https://doi.org/10.21078/jssi-2018-302-18>

Matternet. (2022). *On-demand delivery platform*. Verfügbar unter <https://mttr.net/product> [Zugriff am 09.10.2023].

Ministerium des Landes Nordrhein-Westfalen (NRW) (2024). *Bauordnung für das Land Nordrhein-Westfalen (Landesbauordnung 2018 – BauO NRW 2018)*. Verfügbar unter https://recht.nrw.de/lmi/owa/br_text_anzeigen?v_id=74820170630142752068 [Zugriff am 20.09.2022].

Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, D. G. (2011). Bevorzugte report items für systematische übersichten und meta-analysen: das PRISMA-statement. *DMW-Deutsche Medizinische Wochenschrift*, 136(08), e9-e15. <https://doi.org/10.1055/s-0031-1272982>

Moormann, D. (2015). *DHL Parcelcopter research flight campaign 2014 for emergency delivery of medication*. Verfügbar unter <https://core.ac.uk/download/pdf/36625093.pdf> [Zugriff am 09.09.2021].

Naas, S. (2024). *Hessischer Landtag - Kleine Anfrage: Störungen des Luftverkehrs durch Drohnen*. Verfügbar unter <https://stefan-naas.de/wp-content/uploads/2024/04/00127.pdf> [Zugriff am 25.10.2024].

National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2021). *AAM Ecosystem Community Integration Working Group: Vertiport Location Considerations*. Verfügbar unter <https://aam-cms.marqui.tech/uploads/aam-portal-cms/originals/000fc02e-784c-4b29-a97b-0251005f4815.pdf> [Zugriff am 03.04.2023].

Naser, F., Peinecke, N., & Schuchardt, B. I. (2021). Air taxis vs. taxicabs: A simulation study on the efficiency of UAM. In *AIAA Aviation 2021 Forum* (p. 3202). <https://doi.org/10.2514/6.2021-3202>

Nelson, J. R., Grubesic, T. H., Wallace, D., & Chamberlain, A. W. (2019). The view from above: A survey of the public's perception of unmanned aerial vehicles and privacy. *Journal of urban technology*, 26(1), 83-105. <https://doi.org/10.1080/10630732.2018.1551106>

Nichols, G. (2018). *Iceland's answer to Amazon adds drone routes to urban deliveries*. Verfügbar unter <https://www.zdnet.com/article/icelands-answer-to-amazon-adds-drone-routes-to-urban-deliveries/> [Zugriff am 09.09.2021]

Noda, R., Nakata, T., Ikeda, T., Chen, D., Yoshinaga, Y., Ishibashi, K., ... & Liu, H. (2018). Development of bio-inspired low-noise propeller for a drone. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 30(3), 337-343. <https://doi.org/10.20965/jrm.2018.p0337>

Nohl, W. (2017). Erfassung und Bewertung des Landschaftsbildes im Rahmen der Kompensationsermittlung bei der Errichtung von Windkraftanlagen–Möglichkeiten und Grenzen–. Eberhard Karls Universität.

Northeast UAS Airspace Integration Research Alliance (NUAIR) (2021). *High-Density Automated Vertiport Concept of Operations*. Verfügbar unter <https://ntrs.nasa.gov/citations/20210010603> [Zugriff am 09.03.2024].

Oltvoort, A., de Vries, P., van Rompay, T., & Rosen, D. (2019). "I am the eye in the sky—Can you read my mind?" how to address public concerns towards drone use. In *Persuasive Technology: Development of Persuasive and Behavior Change Support Systems: 14th International Conference, PERSUASIVE 2019, Limassol, Cyprus, April 9–11, 2019, Proceedings* 14 (pp. 103-114). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-17287-9_9

OpenStreetMap (2023). *OpenStreetMap Database*. OpenStreetMap Foundation: Cambridge, UK; 2023.

Paketda (2022). *Brief- und Paketzentren von Deutsche Post DHL*. Verfügbar unter <https://www.paketda.de/paketdepot-dhl.html> [Zugriff am 09.08.2022].

Peinecke, N., & Kuenz, A. (2017, September). Deconflicting the urban drone airspace. In *2017 IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/dasc.2017.8102048>

Peisen, D. J., & Ferguson, S. W. (1996). Vertiport Design Characteristics for Advanced Rotorcraft Technology. *SAE transactions*, 1313-1319. <https://doi.org/10.4271/965521>

Perez, S., & Kolodny, L. (2017). *UPS tests show delivery drones still need work*. Verfügbar unter <https://tech-crunch.com/2017/02/21/ups-tests-show-delivery-drones-still-need-work/> [Zugriff am 09.09.2021].

Planacademy (2018): *What Is Greenfield And Brownfield Engineering?*. Verfügbar unter <https://www.planacademy.com/greenfield-brownfield-engineering-definition/> [Zugriff am 14.01.2022].

Porter, J. (2020). *Zipline's drones are delivering medical supplies and PPE in North Carolina*. Verfügbar unter <https://www.thev-erge.com/2020/5/27/21270351/zipline-drones-novant-health-medical-center-hospital-supplies-ppe> [Zugriff am 09.09.2021].

Preis, L. (2021). Quick sizing, throughput estimating and layout planning for VTOL aerodromes—a methodology for vertiport design. In *AIAA Aviation 2021 Forum* (p. 2372). <https://doi.org/10.2514/6.2021-2372>

PytlikZillig, L. M., Duncan, B., Elbaum, S., & Detweiler, C. (2018). A drone by any other name: Purposes, end-user trustworthiness, and framing, but not terminology, affect public support for drones. *IEEE Technology and Society Magazine*, 37(1), 80-91. <https://doi.org/10.1109/mts.2018.2795121>

Reddy, L. B., & DeLaurentis, D. (2016). Opinion survey to reduce uncertainty in public and stakeholder perception of unmanned aircraft. *Transportation Research Record*, 2600(1), 80-93. <https://doi.org/10.3141/2600-09>

Reddy, L., & DeLaurentis, D. A. (2016). Multivariate Probit Models and Qualitative Analysis of Survey on Public and Stakeholder Perception of Unmanned Aircraft. In *16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference* (p. 3596). <https://doi.org/10.2514/6.2016-3596>

Ridden, P. (2020). *Matternet Station to serve as drone delivery hub for hospitals*. Verfügbar unter <https://newatlas.com/drones/matternet-station-drone-delivery-hub-medical/> [Zugriff am 13.12.2022].

Rimjha, M., & Trani, A. (2021, April). Urban air mobility: Factors affecting vertiport capacity. In *2021 integrated communications navigation and surveillance conference (ICNS)* (pp. 1-14). IEEE. <https://doi.org/10.1109/icns52807.2021.9441631>

Roca-Riu, M. and Menendez, M. (2019). Logistic deliveries with drones: State of the art of practice and research. In *19th Swiss Transport Research Conference (STRC 2019)*. STRC. <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/342823>

Rödding, F. (2020). Generierung von synthetischen Bevölkerungen am Beispiel der Stadt Aachen. *Institut für Städtebauwesen und Stadtverkehr*. RWTH Aachen University.

Ross, P. E. (2018). Iceland's consumers try drone delivery: The startup Aha takes on Amazon with basic drones bearing burgers-[News]. *IEEE Spectrum*, 55(10), 12-13. <https://doi.org/10.1109/mspec.2018.8482412>

Schäfer, P., Schocke, O., & Quitta, A. (2016). Optimierung des Wirtschaftsverkehrs in der Frankfurter Innenstadt. *Straßenverkehrstechnik*, 60(7).

Schroeder, S., Zilske, M., Liedtke, G., & Nagel, K. (2012). Towards a multi-agent logistics and commercial transport model: The transport service provider's view. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 39, 649-663. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.137>

Schüller, H. (2010). Modelle zur Beschreibung des Geschwindigkeitsverhaltens auf Stadtstraßen und dessen Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit auf Grundlage der Straßengestaltung. Dissertation. *Technische Universität Dresden*.

Scott, J., & Scott, C. (2017). Drone delivery models for healthcare. In *Proceedings of the 50th Hawaii international conference on system sciences*. <https://doi.org/10.24251/hicss.2017.399>

Song, B. D., Jun, S., Jung, H. Y., & Lee, S. (2019). Movable Unmanned Aerial System: Optimization of System, Resource Design and Drone Routing. *Procedia Manufacturing*, 39, 300-306. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.336>

Stadt Aachen (2024). *Rechtswirksamer Flächennutzungsplan im Geoportal*. Verfügbar unter <https://geoportal.aachen.de/extern/?lang=de&base-map=web61482881ca3e4ky73o&blop=1&x=294513.5&y=5627463.5&zl=13&hl=0> [Zugriff am 25.02.2022].

Städtekonferenz Mobilität (2019). *Städtische Handlungsfelder in der urbanen Logistik*. Verfügbar unter https://staedteverband.ch/cmsfiles/skm_urbane_logistik_2011030-druck-final_2_1.pdf?v=20201031145116 [Zugriff am 25.02.2022].

Städteregion Aachen (2024). *Über Uns*. Verfügbar unter <https://www.staedteregion-aachen.de/de/navigation/staedteregion/ueber-uns> [Zugriff am 28.10.2024].

Stewart, J. (2018). *The World's Fastest Drones Want to Save Lives in America, Too*. Verfügbar unter <https://www.wired.com/story/zipline-drone-delivery-reno-faa/> [Zugriff am 09.09.2021].

Stolz, M., Reimer, F., Moerland-Masic, I., & Hardie, T. (2021). A User-Centered Cabin Design Approach to Investigate Peoples Preferences on the Interior Design of Future Air Taxis. In *2021 IEEE/AIAA 40th Digital Avionics Systems Conference (DASC)* (pp. 1-7). IEEE. <https://doi.org/10.1109/dasc52595.2021.9594438>

Stonor, C. (2021). *Zipline to deliver Covid-19 vaccines in Nigerian state Kaduna*. Verfügbar unter <https://www.urbanairmobilitynews.com/medical-pharma-ceutical-transport/zipline-to-deliver-covid-19-vaccines-in-nigerian-state-kaduna/> [Zugriff am 09.09.2021].

SUAS News (2016). *DPDgroup drone delivers parcels using regular commercial line*. Verfügbar unter <https://www.suasnews.com/2016/12/dpdgroup-drone-delivers-parcels-using-regular-commercial-line/> [Zugriff am 09.09.2021].

Swiss Post (2021). *Drones: A vision has become reality*. Verfügbar unter <https://www.post.ch/en/about-us/innovation/innovations-in-development/drones> [Zugriff am 09.09.2021].

Tan, L. K. L., Lim, B. C., Park, G., Low, K. H., & Yeo, V. C. S. (2021). Public acceptance of drone applications in a highly urbanized environment. *Technology in Society*, 64, 101462. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2020.101462>

Thaller, C. (2018). *Strategische Verkehrsprognose: Rückkopplung einer makroskopischen Extrapolation mit einer mikroskopischen Verkehrssimulation* (Dissertation, Dortmund, Technische Universität, 2018).

Torens, C., Volkert, A., Becker, D., Gerbeth, D., Schalk, L., Crespillo, O. G., Zhu, C., Stelkens-Kobsch, T., Gehrke, T., Metz, I. C., & Dauer, J. (2021). HorizonUAM: Safety and Security Considerations for Urban Air Mobility. *AIAA Aviation 2019 Forum*. <https://doi.org/10.2514/6.2021-3199>.

Torija, A. J., Li, Z., & Self, R. H. (2020). Effects of a hovering unmanned aerial vehicle on urban soundscapes perception. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 78, 102195. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.11.024>

Torija, A. J., & Nicholls, R. K. (2022). Investigation of metrics for assessing human response to drone noise. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(6), 3152. <https://doi.org/10.3390/ijerph19063152>

Treichel, J., Foerster, J., Volkert, A., & Lieb, T. J. (2022). Applicability of ISO standard 3744 to UA. In *EU-ROREGIO BNAM Joint Acoustics Conference*.

Valqari (2022). *Valqari Landing Station*. Verfügbar unter <https://www.valqari.com/valqari-landing-station/> [Zugriff am 23.04.2022].

Vascik, P. D., & Hansman, R. J. (2017). Evaluation of key operational constraints affecting on-demand mobility for aviation in the Los Angeles basin: ground infrastructure, air traffic control and noise. In *17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference* (p. 3084). <https://doi.org/10.2514/6.2017-3084>

Verband unbemannter Luftfahrt (VUL) (2022): Was denken die Deutschen über Advanced Air Mobility. *Ergebnisse einer repräsentativen Umfrage zu Drohnen und Flugtaxis*. Verfügbar unter <https://www.bdli.de/meldungen/was-denken-die-deutschen-ueber-advanced-air-mobility> [Zugriff am 14.04.2022].

Verein Deutscher Ingenieure (VDI, 2002): VDI-Richtlinie 4400, Blatt 3. Logistikkennzahlen für die Distribution. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2002

Vincent, J. (2021). *Alphabet's drone delivery service Wing hits 100,000 deliveries milestone*. Verfügbar unter <https://www.theverge.com/2021/8/25/22640833/drone-delivery-google-alphabet-wing-milestone> [Zugriff am 09.09.2021].

VISSIM (2023). *PTV Planung Transport Verkehr GmbH*. Verfügbar unter <https://www.ptvgroup.com/de/produkte/ptv-vissim> [Zugriff am 07.06.2021].

Walther, J., PytlakZillig, L., Detweiler, C., & Houston, A. (2019). How people make sense of drones used for atmospheric science (and other purposes): Hopes, concerns, and recommendations. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 7(3), 219-234. <https://doi.org/10.1139/juvs-2019-0003>

Wang, Y., Xia, H., Yao, Y., & Huang, Y. (2016). Flying eyes and hidden controllers: A qualitative study of people's privacy perceptions of civilian drones in the US. *Proceedings on Privacy Enhancing Technologies*. <https://doi.org/10.1515/popets-2016-0022>

Ward, T. (2020). *Walmart Now Piloting On-Demand Drone Delivery with Flytrex*. Verfügbar unter <https://corporate.walmart.com/news-room/2020/09/09/walmart-now-piloting-on-demand-drone-delivery-with-flytrex> [Zugriff am 09.09.2021].

Wei, L., Justin, C. Y., & Mavris, D. N. (2020). Optimal placement of airparks for STOL urban and suburban air mobility. In *AIAA Scitech 2020 Forum* (p. 0976). <https://doi.org/10.2514/6.2020-0976>

Weimer-Jehle, W. (2006). Cross-impact balances: A system-theoretical approach to cross-impact analysis. *Technological Forecasting and Social Change*, 73(4), 334-361. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2005.06.005>

Weimer-Jehle, W. (2018). *ScenarioWizard 4.3: Programm zur qualitativen System- und Szenario-analyse mit der Cross-Impact Bilanzanalyse (CIB)*. Verfügbar unter https://www.cross-impact.de/ressourcen/ScenarioWizard-Manual_dt.pdf [Zugriff am 12.09.2024].

Westfalenspiegel (2020). *Medizindrohne bringt Blutproben*. Verfügbar unter <https://www.westfalenspiegel.de/medizindrohne-bringt-blutproben/> [Zugriff am 09.09.2021].

Wiedemann, R. (1974). Simulation des Verkehrsflusses, in: *Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen*, Heft 8: Universität Karlsruhe.

Wilkens, A. (2017). *Vans & Drones: Mercedes testet Paketlieferung mit Drohnen in Zürich*. Verfügbar unter <https://www.heise.de/newsticker/mel-dung/Vans-Drones-Mercedes-testet-Paketlieferung-mit-Drohnen-in-Zuerich-3847045.html> [Zugriff am 18.11.2021].

Wing (2019a). *Wing to launch early access air delivery program in Finland in June*. Verfügbar unter <https://blog.wing.com/2019/05/wing-to-launch-early-access-air.html> [Zugriff am 09.09.2021].

Wing (2019b). *Wing Launches America's First Commercial Drone Delivery Service to Homes in Christiansburg, Virginia*. Verfügbar unter <https://blog.wing.com/2019/10/wing-launches-americas-first-commercial.html> [Zugriff am 09.09.2021].

Wing (2019c). *Wing Launches Delivery Service in Queensland, Australia*. Verfügbar unter <https://blog.wing.com/2019/09/wing-launches-delivery-service-in.html> [Zugriff am 09.09.2021].

Wing (2019d). *Wing launches commercial air delivery service in Canberra*. Verfügbar unter <https://blog.wing.com/2019/04/wing-launches-commercial-air-delivery.html> [Zugriff am 09.09.2021].

Wittenbrink, P. (2011). *Transportkostenmanagement im Straßengüterverkehr: Grundlagen-Optimierungspotenziale-Green Logistics* (p. 149). Wiesbaden: Gabler.

Wittenbrink, P. (2014). *Transportmanagement: Kostenoptimierung, Green Logistics und Herausforderungen an der Schnittstelle Rampe*. Springer-Verlag. ISBN 978-3-8349-3376-8.

Wolfangel, E. (2018). *Pilottest mit autonomen Paketdrohnen im Werksverkehr*. Verfügbar unter <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Pilottest-mit-autonomen-Paketdrohnen-im-Werksverkehr-4167604.html> [Zugriff am 09.09.2021].

World Health Organization (WHO) (2018). Environmental noise guidelines for the European Region: executive summary. In *Environmental noise guidelines for the European Region: executive summary*.

Yedavalli, P., & Mooberry, J. (2019). *An assessment of public perception of urban air mobility (UAM)*. Airbus UTM: Defining Future Skies. Verfügbar unter <https://www.airbus.com/sites/g/files/jlccta136/files/2022-07/Airbus-UTM-public-perception-study%20-urban-air-mobility.pdf> [Zugriff am 22.03.2023].

Yilmaz, E., Warren, M., & German, B. (2019). Energy and landing accuracy considerations for urban air mobility vertiport approach surfaces. In *AIAA Aviation 2019 Forum* (p. 3122). <https://doi.org/10.2514/6.2019-3122>

Yoon, J. J. (2018). *The traveling salesman problem with multiple drones: an optimization model for last-mile delivery* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).

Zelinski, S. (2020, October). Operational analysis of vertiport surface topology. In *2020 AIAA/IEEE 39th Digital Avionics Systems Conference (DASC)* (pp. 1-10). IEEE. <https://doi.org/10.1109/dasc50938.2020.9256794>

A Anhang

A.1 Detailangaben zu verwendeten Suchsträngen bei der Literaturanalyse zur Akzeptanz von Drohnen

Die folgenden Suchstränge wurden bei der Literaturanalyse zur Akzeptanz von Drohnen (vgl. Kapitel 2) verwendet:

► SCOPUS

```
(TITLE (drone* OR (unmanned AND air*) OR (unmanned AND aer*) OR (air AND taxi) OR (personal AND air AND vehicle*) OR pav OR uam OR uav OR uas OR utm OR rpa OR quadcopter OR multirotor OR multicopter OR (unbemannte AND luft*) OR (unbemannte AND flug*) OR drohne OR lufttaxi OR (urban AND air AND mobility) OR (urban AND air AND taxi)) AND TITLE-ABS-KEY (annoy* OR ärger* OR stress* OR affectiv* OR affektiv* OR health* OR gesundheit* OR psychol* OR accept* OR akzept* OR percept* OR wahrgenommen* OR perceiv* OR wahrnehmung* OR concern* OR sorg* OR opinion* OR meinung* OR intention* OR absicht* OR injur* OR verletz*) AND PUBYEAR > 2009)
```

► Web of Science

```
(TI=(drone* OR (unmanned AND air*) OR (unmanned AND aer*) OR (air AND taxi) OR (personal AND air AND vehicle*) OR pav OR uam OR uav OR uas OR utm OR rpa OR quadcopter OR multirotor OR multicopter OR (unbemannte AND luft*) OR (unbemannte AND flug*) OR drohne OR lufttaxi OR (urban AND air AND mobility) OR (urban AND air AND taxi))) AND (TS=(annoy* OR ärger* OR stress* OR affectiv* OR affektiv* OR health* OR gesundheit* OR psychol* OR accept* OR akzept* OR percept* OR wahrgenommen* OR perceiv* OR wahrnehmung* OR concern* OR sorg* OR opinion* OR meinung* OR intention* OR absicht* OR injur* OR verletz*))
```

► PubMed

```
((drone*[Title]) OR (unmanned air*[Title]) OR (unmanned aer*[Title]) OR (air taxi[Title]) OR (personal air vehicle*[Title]) OR (pav[Title]) OR (uam[Title]) OR (uav[Title]) OR (uas[Title]) OR (utm[Title]) OR (rpa[Title]) OR (quadcopter[Title]) OR (multirotor[Title]) OR (multicopter[Title]) OR (unbemannte luft*[Title]) OR (unbemannte flug*[Title]) OR (drohne[Title]) OR (lufttaxi[Title]) OR (urban air mobility[Title]) OR (urban air taxi[Title])) AND ((annoy*[Title/Abstract]) OR (ärger*[Title/Abstract]) OR (stress*[Title/Abstract]) OR (affectiv*[Title/Abstract]) OR (affektiv*[Title/Abstract]) OR (health*[Title/Abstract]) OR (gesundheit*[Title/Abstract]) OR (psychol*[Title/Abstract]) OR (accept*[Title/Abstract]) OR (akzept*[Title/Abstract]) OR (percept*[Title/Abstract]) OR (wahrgenommen*[Title/Abstract]) OR (perceiv*[Title/Abstract]) OR (wahrnehmung*[Title/Abstract]) OR (concern*[Title/Abstract]) OR (sorg*[Title/Abstract]) OR (opinion*[Title/Abstract]) OR (meinung*[Title/Abstract]) OR (intention*[Title/Abstract]) OR (absicht*[Title/Abstract]) OR (injur*[Title/Abstract]) OR (verletz*[Title/Abstract]))
```

A.2 Detailangaben zu den Kostenarten bei Szenario B und C

Im Folgenden werden die einzelnen Elemente der jeweiligen Kostenarten tabellarisch aufgeführt und sowohl optimistische als auch pessimistische Randbedingungen für die beiden modellierten Szenarien angenommen. Hierbei wurde die jeweilige Flottengröße beim Direktflug ohne Flugbeschränkungsgebiete als Basis genommen.

Tabelle 13 gibt die optimistischen und pessimistischen Fixkosten für das Szenario B – Paketstationen an. Hierbei beträgt die minimale Flottengröße 331 Schwerlastdrohnen und es werden zwei Vertiports benötigt (vgl. Abbildung 15 und Kapitel 3.1.2). Zunächst wurden die Beschaffungskosten der Drohnen aus den aktuell auf dem Markt befindlichen professionellen Lieferdrohnen gemittelt abgeschätzt (EmQopter, 2023). Die Kosten für das Einrichten eines Vertiports wurden aus (Johnston et al., 2020) abgeleitet. Die Kosten für die Einrichtung zusätzlicher Infrastruktur (z. B. Kommunikationsantennen in nicht abgedeckten Gebieten) wurden nur sehr grob durch einen Pauschalbetrag abgeschätzt, da dies im Untersuchungsgebiet kaum benötigt wird. Die jährlichen Versicherungskosten pro Drohne wurden aus Erfahrungswerten abgeleitet.

Tabelle 13: Fixkosten Szenario B - Paketstationen

Kostenarten (in €)	Paketstationen		Direktbelieferung	
	Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Fixkosten	9 700,00	22 700,00	17 700,00	27 900,00
Variable Kosten	4 500,00	8 800,00	4 000,00	9 100,00
Personalkosten	6 400,00	9 300,00	9 700,00	14 100,00
Gesamtkosten Drohnenverkehr	20 600,00	40 800,00	31 400,00	51 100,00

Tabelle 14 gibt die optimistischen und pessimistischen Einschätzungen der variablen Kosten für das Szenario „Paketstationen“ an. Die Wartungs- und Betriebskosten der Drohnen, der beiden Vertiports und der sonstigen Infrastruktur wurden jeweils mit 10 % der Gesamtanschaffungskosten der einzelnen Elemente abgeschätzt. Für die Kosten zur Nutzung der externen Dienstleistungen (z. B. U-space Services) wurde ein Pauschalbetrag angenommen. Die Stromkosten pro Kilowattstunde wurden aus den aktuell auf dem Strommarkt befindlichen Kosten abgeleitet und der Energieverbrauch pro Tag folgt aus den energetischen Abschätzungen (siehe Tabelle 8). Zur Berechnung der jährlichen Stromkosten wurden 304 Arbeitstage zugrunde gelegt.

Tabelle 14: Variable Kosten Szenario B - Paketstationen

Kostenart	Anzahl [-]	Einzelkosten [€]		Summe [€]	
		optimis-tisch	pessimis-tisch	optimistisch	pessimis-tisch
Wartung/Betrieb Drohnen p.a.	331	2 900,00	5 900,00	959 900,00	1 952 900,00
Wartung/Betrieb Vertiports p.a.	2	50 000,00	80 000,00	100 000,00	160 000,00
Wartung/Betrieb sonstiger Infrastruk-tur p.a.	1	10 000,00	20 000,00	10 000,00	20 000,00

Kostenart	Anzahl [-]	Einzelkosten [€]		Summe [€]	
		optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch
Externe Dienstleistung p.a.	1	100 000,00	200 000,00	100 000,00	200 000,00
Stromkosten p.a.	2 529,00 kWh/Tag	0,25/kWh	0,45/kWh	192 221,00	345 997,00

Tabelle 15 zeigt die optimistischen und pessimistischen Kosten für das benötigte Personal im Szenario „Paketstationen“ an. Zunächst wurde hierbei angenommen, dass eine Operateurin oder ein Operateur der Bodenkontrollstation maximal 10 Drohnen gleichzeitig überwachen kann. Zusätzlich wurde angenommen, dass ein/e DrohnenmechanikerIn im Schnitt maximal 100 Drohnen betreuen und warten kann. Des Weiteren wurde angenommen, dass für die Wartung der beiden Vertiports sowie die Wartung der sonstigen Infrastruktur eine weitere Person benötigt wird. Außerdem wurde angenommen, dass der/die OperateurIn der Bodenkontrollstation im optimistischen Fall mit ungefähr TVöD E13 Stufe 1 und im pessimistischen Fall mit ungefähr TVöD E14 Stufe 6 entlohnt wird. Dafür wurde angenommen, dass das Personal eine akademische Ausbildung durchlaufen hat. Für den/die MechanikerIn wurde optimistisch eine Entlohnung in ungefähr TVöD E9c Stufe 1 und im pessimistischen Fall ungefähr TVöD E10 Stufe 6 angenommen. Dabei wird von einer handwerklichen Ausbildung ausgegangen.

Tabelle 15: Personalkosten Szenario B - Paketstationen

Kostenart	Anzahl [-]	Einzelkosten [€]		Summe [€]	
		optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch
OperateurIn Bodenkontrollstation p.a.	33	54 500,00	78 800,00	1 798 500,00	2 600 400,00
MechanikerIn für Drohnen, Vertiports und sonstige Infrastruktur p.a.	4	39 600,00	58 400,00	158 400,00	233 600,00

Im Folgenden werden nun die drei Kostenarten für das Szenario „Direktbelieferung“ dargelegt. In diesem Szenario werden mindestens 508 kleine Paketdrohnen und insgesamt sechs Vertiports (vgl. Abbildung 15 und Kapitel 3.1.3) benötigt. Wie für das Szenario „Paketstationen“ wurden auch hier die verschiedenen Kostenarten grob abgeschätzt. Die Kosten für den Aufbau und die Einrichtung der Vertiports und der Infrastruktur sowie die Versicherungskosten sind dieselben wie im Szenario „Paketstationen“. Die Beschaffungskosten für eine kleine Paketdrohne fallen im Vergleich zu einer Schwerlastdrohne geringer aus. Tabelle 16 stellt die optimistischen und pessimistischen Fixkosten dar.

Tabelle 16: Fixkosten Szenario C - Direktbelieferung

Kostenart	Anzahl [-]	Einzelkosten [€]		Summe [€]	
		optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch
Beschaffung Drohnen	508	15 000,00	39 000,00	7 620 000,00	19 812 000,00
Errichtung Vertiports	6	500 000,00	800 000,00	3 000 000,00	4 800 000,00

Kostenart	Anzahl [-]	Einzelkosten [€]		Summe [€]	
		optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch
Errichtung sonstiger Infrastruktur	1	100 000,00	200 000,00	100 000,00	200 000,00
Versicherung p.a.	508	1 000,00	5 000,00	508 000,00	2 540 000,00

Tabelle 17 gibt die optimistischen und pessimistischen Abschätzungen der variablen Kosten für das Szenario „Direktbelieferung“ an. Hierbei wurden wieder die gleichen Annahmen wie für das Szenario „Paketstationen“ getroffen. Dies bedeutet, dass die Wartungs- und Betriebskosten der Drohnen, Vertiports und sonstiger Infrastruktur mit 10 % der Beschaffungskosten angenommen wurden. Für die externen Dienstleistungen wurde wieder ein Pauschalbetrag angenommen. Die Stromkosten richten sich nach den aktuellen Marktpreisen für eine Kilowattstunde.

Tabelle 17: Variable Kosten Szenario C - Direktbelieferung

Kostenart	Anzahl [-]	Einzelkosten [€]		Summe [€]	
		optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch
Wartung/Betrieb Drohnen p.a.	508	1 500,00	3 900,00	762 000,00	1 981 000,00
Wartung/Betrieb Vertiports p.a.	6	50 000,00	80 000,00	300 000,00	480 000,00
Wartung/Betrieb sonstiger Infrastruktur p.a.	1	10 000,00	20 000,00	10 000,00	20 000,00
Externe Dienstleistungen	1	100 000,00	200 000,00	100 000,00	200 000,00
Stromkosten p.a.	659,00 kWh/ Tag	0,25/ kWh	0,45/kWh	50 086,00	90 155,00

Tabelle 18 gibt die optimistischen und pessimistischen Abschätzungen der Personalkosten für das Szenario „Direktbelieferung“ an. Hierbei wurden dieselben Annahmen getroffen wie für das Szenario B – Paketstationen.

Tabelle 18: Personalkosten Szenario C - Direktbelieferung

Kostenart	Anzahl [-]	Einzelkosten [€]		Summe [€]	
		optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch
OperateurIn Bodenkontrollstation p.a.	51	54 500,00	78 800,00	2 779 500,00	4 018 800,00
MechanikerIn für Drohnen, Vertiports und sonstige Infrastruktur p.a.	6	39 600,00	58 400,00	237 600,00	350 400,00

Die hier aufgelisteten Einzelkosten der verschiedenen Kostenarten fließen in die Berechnung der täglichen Gesamtkosten für den Drohnenbetrieb in der Tabelle 5 ein.

A.3 Detailangaben zu den energetischen Auswirkungen

Tabelle 19 illustriert die Ergebnisse der durchgeführten Flugversuche zum Energieverbrauch der „kleinen Paketdrohne“. Die Flugversuche wurden an einem einzigen Julitag im Jahr 2022 durchgeführt. Über den Tag verteilt änderten sich die Windbedingungen. Der gemessene Wind wurde dabei nach „mäßig“ (6 bis 8 m/s), „stark“ (8 bis 12 m/s) und „böig“ (ohne Werte) unterschieden. Die Außentemperatur reichte von 15 bis 24 °C. Hierbei war die Drohne unbeladen und trug somit keine Nutzlast mit sich.

Tabelle 19: Experimentelle Flugversuche der „kleinen Paketdrohne“ zum Energieverbrauch

Nr.	Flugmodus	Flugzeit [s]	Spannung (Start) [V]	Spannung (Ende) [V]	elektrische Ladung Q [mAh]	Verbrauchswert E_{Drohne} [Wh]	Mittlere Leistungsaufnahme [W]
1	Schwebeflug in einer Halle inkl. mehrmaligem Steigen und Sinken	850,00	16,80	15,12	2 365,44	35,01	148,28
2	Streckenflug bei mäßigem Wind	520,00	16,80	15,59	1 703,68	25,26	174,88
3	Streckenflug bei starkem Wind	300,00	16,80	15,79	1 422,08	21,05	252,60
4	Streckenflug bei böigem Wind	380,00	16,80	15,71	1 534,72	22,71	215,15

Insgesamt wurden vier verschiedene Flugversuche durchgeführt. Der erste Flugversuch wurde in einer Halle ohne Windeinflüsse durchgeführt, wobei mehrmaliges Steigen und Sinken Höhenänderungen im Flugprofil simulieren sollten. Die drei weiteren Flugversuche wurden im Freien bei unterschiedlichen Windbedingungen durchgeführt. Der an diesem Tag vorherrschende Temperaturbereich hatte keinen maßgeblichen Einfluss auf den Energieverbrauch.

In Tabelle 19 sind die erreichte Flugzeit sowie die gemessenen Spannungen des LiPo-Akkus bei Start und Landung angegeben. Anschließend wurde der Akku wieder auf seine maximale Spannung von $V_{Max} = 16,80\text{ V}$ geladen. Die dafür benötigte elektrische Ladung konnte vom Ladegerät abgelesen werden und ist in der Tabelle ebenfalls angegeben. Daraus lässt sich der Energieverbrauch der Drohne wie folgt berechnen:

Formel 5: Energieverbrauch einer Drohne

$$E_{Drohne} = Q * V_{Nenn}$$

Hierbei ist V_{Nenn} die Nennspannung des jeweiligen LiPo-Akkus (in diesem Fall $V_{Nenn} = 14,80\text{ V}$).

Bestimmung des Verbrauchswerts der „kleinen Paketdrohne“

Die Ergebnisse zeigen, dass bei starkem und/oder böigem Wind die maximale Flugzeit stark reduziert wird, da der Energieverbrauch maßgeblich zunimmt. Jedoch wurde bei den hier

durchgeführten Freifeldversuchen stets darauf geachtet, dass eine kritische Entladung des Akkus verhindert wird. Somit sind tiefere Entladungen, als in den Flugversuchen Nr. 2-4 erzielt wurden, grundsätzlich möglich. Dadurch würden die Flugzeit und somit die erreichbare Flugstrecke verlängert werden.

Nimmt man eine minimale, noch im sicheren Bereich liegende Betriebsspannung des LiPo-Akkus von $V_{Min} = 15,20\text{ V}$ an, dann ergibt sich, um diesen wieder auf die maximale Betriebsspannung von $V_{Max} = 16,80\text{ V}$ zu laden, ein Energiebedarf (und damit der Verbrauchswert) der Drohne von $E_{Drohne} = 33,34\text{ Wh}$. Dies gibt also den maximalen Energiebedarf pro Ladezyklus der Drohne an. Tiefere Entladungen würden den LiPo-Akku auf längere Sicht nachhaltig beschädigen.

Energieverbrauch „Schwerlastdrohne“

Der Energieverbrauch der „Schwerlastdrohne“ wurde nicht über experimentelle Flugversuche verifiziert. Jedoch wurde mit Hilfe einer Messkampagne im Labor der Energieverbrauch für ein vollständiges Aufladen eines für diesen Dronentypen notwendigen, nahezu leeren LiPo-Akkus bestimmt.

Tabelle 20: Experimentell bestimmter Energieverbrauch der „Schwerlastdrohne“

Nr.	LiPo-Akku	Ladedauer [s]	Spannung (voll) [V]	Spannung (leer) [V]	elektrische Ladung Q [mAh]	Verbrauchswert E_{Drohne} [Wh]
1	SLS 30000 LiPo Akku	9 000,00	16,80	15,20	11 795,20	175,57

Tabelle 20 zeigt den Energiebedarf für das vollständige Aufladen eines für diesen Dronentyp ausgelegten LiPo-Akkus. Hierbei wurde davon ausgegangen, dass eine Tiefenentladung unter die Betriebsspannung von $V_{Min} = 15,20\text{ V}$ zu jeder Zeit verhindert werden kann, um einer Beschädigung des LiPo-Akkus vorzubeugen. Als nächster Schritt wurde der LiPo-Akku auf seine maximal zulässige Betriebsspannung von $V_{Max} = 16,80\text{ V}$ geladen. Mit Hilfe des Ladegeräts konnte die dafür benötigte elektrische Ladung von $Q_{Ladung} = 11795,2\text{ mAh}$ bestimmt werden. Somit erhält man den benötigten Energiebedarf der „Schwerlastdrohne“ zu $E_{Drohne} = 175,57\text{ Wh}$, wenn man diesen von seiner minimalen Betriebsspannung ($V_{Min} = 15,20\text{ V}$) auf die maximale Betriebsspannung ($V_{Max} = 16,80\text{ V}$) lädt.

Die hier im Detail gezeigten Ergebnisse fließen in die energetische Gesamtverbrauchsberechnung der Tabelle 8 ein.