

# Hochlaufszzenarien und elektrischer Leistungsbedarf von Lufttaxis und Paketdrohnen in der Metropolregion Hamburg

Yuzhuo Fu\*, Gazmend Mavraj, Azrina Mujanovic, Maik Plenz, Detlef Schulz  
*Professur für Elektrische Energiesysteme*  
*Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg*  
 Hamburg, Deutschland  
 \*yuzhuo.fu@hsu-hh.de

**Kurzfassung** – Neben der Energie- und Mobilitätswende beginnt aktuell auch eine konzeptionelle Anpassung im Verkehrssektor, die als Verkehrswende bezeichnet wird. Bedingt durch die zunehmende Urbanisierung, den sich damit verknappenden Verkehrsraum und die Überlastung der bestehenden Verkehrsinfrastruktur in Metropolregionen wird prognostiziert, dass alternative Transportmittel und -wege zukünftig stärker an Relevanz gewinnen werden. Hierzu gehört auch die Luftmobilität (Urban Air Mobility), deren Bedarf in den nächsten Jahren weltweit steigen wird. Um die zukünftigen innovativen urbanen Luftfahrzeuge elektrisch versorgen zu können, ist die Analyse der Energieversorgung von besonderer Bedeutung. In dieser Arbeit werden die Anzahl der Lufttaxis und Paketdrohnen sowie der zugehörige elektrische Leistungsbedarf für die Metropolregion Hamburg für das Jahr 2050 analysiert und abgeschätzt.

**Stichworte** – Urban Air Mobility, Lufttaxi, Paketdrohne, Energieversorgung, Modellierung

## NOMENKLATUR

$A_{\text{Euro,KEP}}$	Anteil von Europa im weltweiten KEP-Aufkommen
$A_{\text{Deu,KEP}}$	Anteil von Deutschland im europäischen KEP-Aufkommen
$A_{\text{H,Bevölk}}$	Anteil von Hamburg an der gesamten Bevölkerung der 18 größten deutschen Städte
$A_{\text{H,Nachfrage}}$	Anteil von Hamburg im Verhältnis zu der weltweiten Nachfrage nach Lufttaxis
BVLOS	Beyond Visual Line of Sight
DTEC EMob	Durchgehend digital gesteuerte Netz- und Ladeinfrastruktur für Land-, Luft- und Wasserelektromobilität
$g_L$	Gleichzeitigkeitsfaktor der Vertiports für Lufttaxis
$g_P$	Gleichzeitigkeitsfaktor der Vertiports für Paketdrohnen
HAP	Hauptarbeitspaket
i-LUM	Innovative luftgestützte urbane Mobilität

KEP	Kurier, Express, Paket
KI	Künstliche Intelligenz
$N_{\text{H,L}}$	Lufttaxianzahl in Hamburg
$N_{\text{H,P}}$	Paketdrohnenanzahl in Hamburg
$N_{\text{L,Vertiport}}$	Lufttaxianzahl pro Vertiport
$N_{\text{P,Vertiport}}$	Paketdrohnenanzahl pro Vertiport
$N_{\text{Welt,L}}$	Weltweite prognostizierte Lufttaxianzahl
$N_{\text{Welt,P}}$	Weltweite prognostizierte Paketdrohnenanzahl
$P_{\text{L,Laden}}$	Ladeleistung der Lufttaxis
$P_{\text{L,max}}$	Die maximale Ladeleistung pro Vertiport für Lufttaxis
$P_{\text{P,Laden}}$	Ladeleistung der Paketdrohnen
$P_{\text{P,max}}$	Die maximale Ladeleistung pro Vertiport für Paketdrohnen
SESAR	Single European Sky Air Traffic Management Research
UAM	Urban Air Mobility

## I. EINLEITUNG

Das Interesse an elektrischer urbaner Luftmobilität (UAM) ist in den letzten Jahren stark gewachsen. Der Grund dafür ist, dass UAM-Konzepten in der Lage sind, schwer zugängliche Bereiche bzw. potentielle oder reale Gefahrengelände zu erschließen sowie zeitkritische Aufgaben mit hoher Mobilität, Sicherheit und geringen Kosten auszuführen. Es sei darauf hingewiesen, dass UAMs viele öffentliche Dienste revolutionieren können, z. B. die Echtzeitüberwachung von Verkehrsströmen, den Transport kritischer Güter sowie die Suche und Rettung.

Darüber hinaus können Lufttaxis den Straßenverkehr in einer Innenstadt entlasten und Paketdrohnen eignen sich für den Transport von zeitkritischen Waren. Diese Optionen müssen näher untersucht werden, um die Einbindung in ein effizientes, umweltfreundliches und intelligentes Verkehrssystem in Metropolregionen zu ermöglichen. Die

Forschungsprojekte „Innovative luftgestützte urbane Mobilität“ (i-LUM, [1]) und das vom „Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr“ (dtec.bw), geförderte Projekt „Durchgehend digital gesteuerte Netz- und Ladeinfrastruktur für Land-, Luft- und Wasserelektromobilität (dtec emob, [2]) entwickeln methodische, systemische und erkenntnisbasierte Grundlagen zur Erarbeitung und Bewertung der Umsetzbarkeit von innovativen Konzepten und Technologien zur luftgestützten urbanen Mobilität für die Metropolregion Hamburg in zukünftigen Szenarien bis 2040/2050. Aufgrund des erwarteten großen Marktwachstums von elektrisch angetriebenen Drohnen, muss das Energieversorgungssystem für solche neuen Verkehrsmittel analysiert werden [1].

Das von der Landesforschungsförderung Hamburg geförderte HamburgX-Projekt i-LUM ist in fünf Hauptarbeitspakete (HAP) unterteilt: Gesellschaftliche Wechselwirkungen und Rechtsrahmen (HAP 1), Nachfragemodellierung und Konzeptentwicklung (HAP 2), Bodengebundene Infrastruktur (HAP 3), Luftraumorganisation und Betrieb (HAP 4) und Gesamtsystemmodellierung und Bewertung (HAP 5).

Hierbei werden neben ingenieurwissenschaftlichen Themen auch zusätzlich interdisziplinär angrenzende Inhalte adressiert, unter anderem soziale, städtebauliche sowie juristische Fragestellungen. Diese sind für eine ganzheitliche Bewertung und kritische Hinterfragung der zu untersuchenden technologischen Entwicklungen von Lufttaxis und Paketdrohnen in der Metropolregion Hamburg notwendig. Im Teil-Arbeitspaket „Konzeptionierung eines Energiemanagement-Systems“, welches zu HAP 3 gehört, wird ein Energiemanagement-System für ein neuartiges Lufttransportkonzept entworfen. Dies wird einen netzverträglichen bzw. netzdienlichen und gleichzeitig sicheren und wirtschaftlichen Betrieb des Gesamtsystems ermöglichen. Es werden charakteristische Größen von möglichen Flugobjekten analysiert, um die Vehikel-seitigen Restriktionen für das Energiemanagement zu ermitteln. Darüber hinaus wird eine Systemsimulation aufgebaut, mit deren Hilfe unterschiedliche Managementsysteme sowie Lade- und Tankkonzepte simuliert werden können.

Der Hochlauf der Elektromobilität in der Hamburger Metropolregion wird in den kommenden Jahren die Anforderungen an die Verteilnetze verändern. Deshalb ist es sehr wichtig, die Beobachtbarkeit und Steuerbarkeit der elektrischen Netze näher zu betrachten. Im Rahmen des Projekts dtec emob werden Ladeinfrastrukturen für verschiedene Mobilitätsträger in den Bereichen Straße (Pkw, Lkw, Pedelecs und E-Scooter), Wasser (Passagier- und Linienschiffe) und Luft (kleine, mittelgroße und Personentransport-Drohnen) untersucht. In diesem Projekt wird auch die Kombinationsmöglichkeit der Ladeinfrastrukturen der betrachteten Mobilitätsträger mit Großladeterminals überprüft. Ziel des Projekts ist ein künstliche Intelligenz (KI)-basiertes Last- und Lademanagementsystem. Dieses System wird aus einem netzseitigen Lastmanagement und einem ladeinfrastrukturseitigen Lademanagement bestehen.

Bisher gibt es noch keine Studien, die Hochlaufszenerarien und auch die Energieverbräuche von Lufttaxis und Paketdrohnen für die Metropolregion Hamburg anhand realer Daten untersuchen. In diesem Artikel werden daher die Ergebnisse von relevanten Studien bezüglich der Prognose über die Entwicklung der luftgestützten Mobilität zusammengefasst. Als erste Annäherung werden hieraus

Prognosedaten für Hamburg abgeleitet. Zur Ermittlung des Leistungsbedarfs der Vertiports (Ladestationen der Drohnen) werden neuartige Methoden entwickelt, um die Abdeckung der ermittelten Bedarfe an Lufttaxis und Drohnen in der Metropolregion zu simulieren. Das Ziel dieses Artikels ist, neben der Untersuchung der Hochlaufszenerarien auch eine Modellierung des Leistungsbedarfs durchzuführen.

Im Abschnitt II folgt eine Übersicht zum Stand der Forschung zu Lufttaxis und Paketdrohnen. Im Abschnitt III werden die Hochlaufszenerarien für Lufttaxis und Paketdrohnen für Hamburg prognostiziert. Diese Erkenntnisse werden im Abschnitt IV bei der Bestimmung des Leistungsbedarfs berücksichtigt und erweitert. Abschließend folgt im Abschnitt V eine Zusammenfassung der Ergebnisse.

## II. STAND DER TECHNIK VON LUFTTAXIS UND PAKETDROHNEN UND DIE MÖGLICHEN ANWENDUNGSFÄLLE

Um eine Prognose für die Hochlaufszenerarien der Lufttaxis und Paketdrohnen in Hamburg ableiten zu können, werden zunächst bestehende Technologien analysiert, um Parameter für die luftgestützte Mobilität zu ermitteln und den Umfang für eine erste Annäherung festzulegen. Diese Erkenntnisse werden im weiteren Schritt für die Untersuchung des elektrischen Leistungsbedarfs berücksichtigt.

### A. Lufttaxis

In Deutschland werden zurzeit Prototypen von Lufttaxis der Hersteller Airbus, Volocopter und Lilium entwickelt. Die Grundeigenschaften der Prototypen variieren in ihrer Passagierkapazität (ein bis sieben Personen), Reichweite (35 – 250 km), Batteriekapazität (38 – 110 kWh), maximale Geschwindigkeit (110 – 28 km/h) und dem Design bzw. der Bauform. TABELLE I zeigt die wesentlichen Eigenschaften eines Lufttaxis, das vier Personen transportieren kann [3].

TABELLE I: DIE WESENTLICHEN PARAMETER EINES TYPISCHEN LUFTTAXIS UND EINER PAKETDROHNE.

Parameter	Lufttaxi	Paketdrohne
Startgewicht	2,2 t	20 kg
Max. Belastung	250 kg	5 kg
Reichweite	50 km	75 km
Max. Geschwindigkeit	120 km/h	100 km/h
Batteriekapazität	110 kWh	1,6 kWh

Die Anwendungsfälle werden nach den Studien [4], [5], [6], [7] im zukünftigen Markt der Lufttaxis in drei Themengebiete unterteilt: *Stadttaxi*, *Flughafen-Transfer* und *Flüge zwischen Städten*. *Stadttaxis* werden Flüge auf Nachfrage zwischen verfügbaren Landstationen (15 – 50 km) bieten. *Flughafen-Transfers* verbinden Hauptverkehrsknoten als Linienflüge auf definierten Strecken, z. B. zwischen Flughäfen und umliegenden Landstationen (15 – 50 km). Die *Flüge zwischen Städten* sollen Kurzstrecken-Linienflüge zwischen angrenzenden Ballungsräumen (50 – 250 km), für regelmäßige Flugverbindungen bieten. Laut [6] wird der Bedarf an diesen drei Anwendungsfällen annähernd gleich verteilt sein: *Stadttaxi* 36 %, *Flughafen-Transfer* 35 %, *Flüge zwischen Städten* 29 %. Der Einsatz von Lufttaxis soll als *Flughafen-Transfer* im Zeitraum ab 2030 – 2040 stattfinden.

Von 2040 bis 2050 sollen Flugtaxis sowohl als *Flughafen-Transfer* als auch als *Stadttaxi* genutzt werden können, sodass ab 2050 alle drei Anwendungsfälle verfügbar sein sollen.

Neben einer besseren Verbindung zwischen Verkehrsknoten (z. B. Flughäfen und Bahnhöfe) und populären Plätzen, können die Lufttaxis in der Zukunft aber auch einen besseren Zugang zu Not- und Katastrophengebieten, z. B. für ländliche Gebiete, ermöglichen [8], [9].

**B. Paketdrohnen**

Derzeit werden Drohnen zum Frachttransport von einer Reihe von Unternehmen entwickelt. Dazu gehören Start-Ups wie Wingcopter und Volocopter sowie große Logistik-Unternehmen wie Amazon, DHL und UPS. Die Prototypen variieren in Form und Größe: So kann zum Beispiel die Drohne von Volocopter für den Gütertransport bis zu 200 kg eingesetzt werden, wohingegen die Drohne von Wingcopter für Pakete bis 1,4 kg ausgelegt ist [10], [11]. Im Weiteren werden nur solche Paketdrohnen betrachtet, die typischerweise eine Flugdauer von 30 Minuten und eine maximale Traglast von 5 kg aufweisen. Die Parameter einer solchen Paketdrohne, am Beispiel von Wingcopter sind in TABELLE I aufgelistet [12].

Paketdrohnen ermöglichen die Erschließung vieler neuer Anwendungsgebiete, beispielsweise den Transport von medizinischen Produkten oder den innerbetrieblichen Transport von KEP-Sendungen (Kurier, Express, Paket) bis zum Endkunden. Der Einsatz von Drohnen zum Transport von medizinischen Produkten hat die höchste Akzeptanz in der Bevölkerung, der Politik und in Unternehmen [13]. Allerdings spielt diese Anwendung wegen des niedrigen Transportvolumens eine geringe Rolle bei der Untersuchung der zusätzlichen Bedarfe im Stromnetz. Obwohl der Einsatz von Paketdrohnen zum innerbetrieblichen Materialtransport durchaus wirtschaftlicher als der Transport mit konventionellen Transportsystemen sein kann [14], macht die Intralogistik in Maschinenbauwerken im Vergleich zu den anderen Energieverbräuchen in der Fertigung nur einen geringen Teil aus. Im Gegensatz dazu ist das KEP-Sendungsaufkommen in Deutschland mit 3,65 Mrd. Sendungen im Jahr 2019 enorm und es wird weiterhin ein starkes Wachstum bis 2050 erwartet [15]. Zusätzlich verursacht der aktuelle Güterverkehr und Pakettransport aufgrund des großen Bedarfs an Infrastruktur für Transporte und Warenumschlag und der Verlagerung von Bahn/Schiff auf die Straße zu hohe Emissionsbelastungen, Verkehrsraumnutzungen und einen hohen Primärenergieverbrauch in Metropolregionen. Hier kann der Einsatz von Paketdrohnen für KEP-Sendung in Zukunft für Entlastung sorgen.

**III. HOCHLAUFSZENARIEN VON LUFTTAXIS UND PAKETDROHNEN**

Die Hochlaufszenerien von Lufttaxis und Paketdrohnen stellen eine mögliche zeitabhängige Marktentwicklung der UAMs dar. Dazu müssen vielfältige Faktoren, wie zum Beispiel Technologie, Wirtschaftlichkeit, Regulierung und gesellschaftliche Akzeptanz berücksichtigt werden. Es existieren Studien, die diese Entwicklung im Rahmen interdisziplinärer Zusammenarbeit untersuchen. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Studien zusammengefasst, um einen Überblick über die Hochlaufszenerien zu bekommen. Alle verwendeten Quelle werden in folgender TABELLE II aufgeführt.

TABELLE II: QUELLEN ZUR ANALYSE DER HOCHLAUFSZENARIEN.

Studien	Verlag	Datum	Regionen	Zeitraum
Urban Air Mobility [4]	Roland Berger	2018	Weltweit	2050
Urban Air Mobility [5]	Roland Berger	2020	Weltweit	2050
The Future of Vertical Mobility [6]	Porsche	2018	Weltweit	2035
European drones Outlook Study [16]	SESA	2016	Europa	2050
Der deutsche Drohnenmarkt [17]	VUL	2019	Deutschland	2030
Der deutsche Drohnenmarkt [18]	VUL	2021	Deutschland	2025

**A. Stand der Literatur**

Die Vorhersagen zur weltweiten Anzahl der Lufttaxis sind in [4], [5], [6] analysiert und in TABELLE II zusammengefasst. Die Studie [4] berücksichtigt als Grundlage die Daten der Pendler, Fluggäste und öffentliche Verkehrsmittel für den Zeitraum 2030 bis 2050. Basierend auf der gesamten Industrientwicklung wird in [5] von den gleichen Autoren geschätzt, dass bis 2050 vermehrt Aufgaben mit Lufttaxis durchgeführt werden. In dieser Studie wird die bestehende Methodik aus [4] ausgebaut und optimiert und eine Prognose über die Anzahl der Personendrohnen für die Zeiträume 2030, 2040 und 2050 erarbeitet. In [6] werden drei Szenarien über die Anzahl der Lufttaxis weltweit vorgestellt, jedoch nur für den Zeitraum von 2025 bis 2035. ABBILDUNG 1 zeigt den Überblick der Vorhersage für die Anzahl der Lufttaxis weltweit.

Zwischen den Hochlaufszenerien ist eine große Varianz zu erkennen. Dabei prognostizieren nur die Studien von Roland Berger [4], [5] den Hochlauf bis in das Jahr 2050.

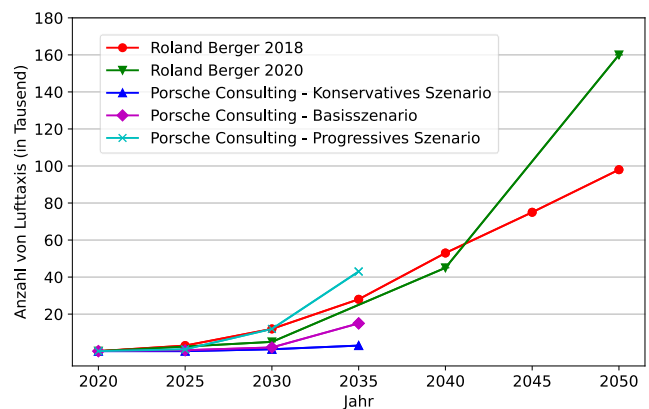


ABBILDUNG 1: ANZAHL DER LUFTTAXIS WELTWEIT NACH [4], [5], [6].

Die Autoren von [7] haben ein Modell entwickelt, wie die Nachfrage nach den Lufttaxis auf der Grundlage von wirtschaftlichen und zeitlichen Faktoren bestimmt werden kann. Laut dieser Studie kann der Einsatz von Lufttaxis im Jahr 2050 in bis zu 70 Großstädten weltweit erfolgen. TABELLE III zeigt sowohl die Anzahl der Passagiere weltweit, die Lufttaxis nutzen würden, als auch den Anteil für Hamburg bzgl. der Nachfrage nach Lufttaxis.

TABELLE III: ANZAHL DER PASSAGIERE VON LUFTTAXIS WELTWEIT UND IN HAMBURG [7].

Prognose	Anzahl Passagiere (Millionen)		Anteil von Hamburg an der weltweiten Nachfrage
	Weltweit	Hamburg	
2030 – 2040	12	0	0 %
2040 – 2050	120	0,5	0,42 %
2050	440	1,5	0,34 %

Bezüglich der Paketdrohnen hat der Verband Unbemannte Luftfahrt den aktuellen Drohnenmarkt und auch die Entwicklung dieses Marktes in 2020 untersucht. In Deutschland sind insgesamt 430.700 Drohnen in Umlauf [18]. Obwohl der größte Teil davon privat genutzt wird, stieg der Anteil rein kommerziell genutzter Drohnen seit 2019 um 138 % auf jetzt 45.200 Drohnen. Es wird erwartet, dass von 2020 bis 2025 die Zahl der kommerziell genutzten Drohnen nahezu um weitere 200 % steigen wird. Laut [18] stellen die Paketdrohnen im Jahr 2025 einen Anteil von ca. 2 % aller kommerziell genutzten Drohnen dar.

Das Single European Sky ATM Research Programme (SESAR) hat im Jahr 2016 eine Studie zur Prognose der Drohnenanwendung in Europa durchgeführt. Dabei wird ein hoher Anstieg des Drohneneinsatzes im kommerziellen und staatlichen Bereich (Überwachung, Inspektion und Transport) in den Jahren 2025 bis 2035 erwartet [16]. Neben der absoluten Anzahl hat SESAR die entsprechenden prozentualen Anteile von unterschiedlichen Anwendungsgebieten ermittelt. Anhand der fortschreitenden Entwicklung von Technologien ist zu erwarten, dass 2050 voraussichtlich eine von vier kommerziell genutzten Drohnen für Warentransport verwendet wird. Laut dieser Studie wiederum können 70.000 Paketdrohnen in 2035 für die Versendung von 200 Millionen Paketen eingesetzt werden.

In der Studie von Porsche [6] wird angenommen, dass die autonomen Drohnen mit der BVLOS (Beyond visual Line of Sight)-Fähigkeit in den nächsten 10 – 25 Jahren auf dem globalen Markt zur Verfügung stehen. Laut dieser Studie werden im Jahr 2035 weltweit ca. 125.000 Drohnen zum Warentransport eingesetzt.

B. Umrechnung der Hochlaufszenerien für Hamburg

Wenn man den relativen Anteil von Hamburg im Verhältnis zu der weltweiten Nachfrage nach [7] betrachtet, kann man unter der Berücksichtigung der Hochlaufszenerien in [4] und [5] ein konservatives und ein progressives Szenario zur Vorhersage der Anzahl von Lufttaxis in Hamburg ermitteln. Die zur Berechnung der Anzahl der Lufttaxis in Hamburg verwendete Methodik, ist in der ABBILDUNG 2 gezeigt.

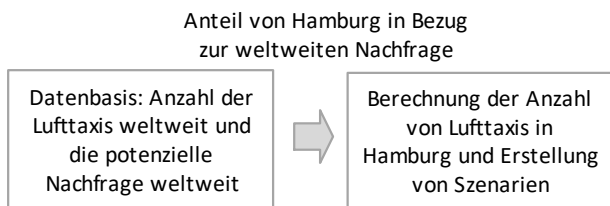


ABBILDUNG 2: METHODIK FÜR DIE BERECHNUNG DER ANZAHL DER LUFTTAXIS IN HAMBURG.

Die Anzahl der Lufttaxis für Hamburg lässt sich dann durch die Gleichung (1) bestimmen:

$$N_{H,L}(t) = N_{Welt,L}(t) \cdot A_{H,Nachfrage}(t) \tag{1}$$

Dabei sind  $N_{H,L}$  die Lufttaxianzahl in Hamburg in einem bestimmten Jahr  $t$ ,  $N_{Welt,L}$  die weltweite prognostizierte Lufttaxianzahl.  $A_{H,Nachfrage}$  gibt den Anteil von Hamburg im Verhältnis zu der weltweiten Nachfrage nach Lufttaxis an. Das Ergebnis für den Zeitraum 2020 bis 2050 wird in ABBILDUNG 3 dargestellt.

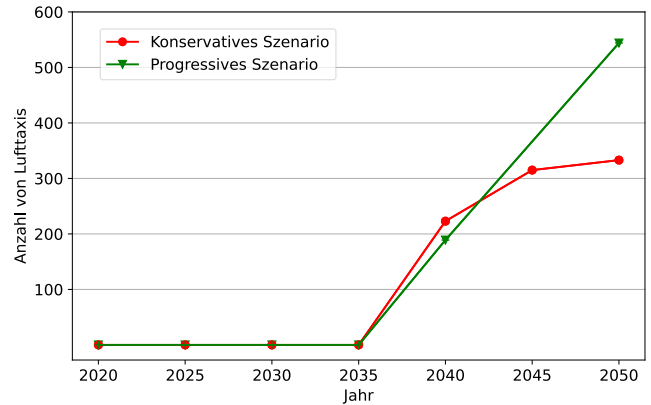


ABBILDUNG 3: HOCHLAUFSZENERIEN DER LUFTTAXIS IN HAMBURG AUS EINER KOMBINATION DER MODELLE IN [4], [5], [7].

Im Gegensatz dazu haben die Studien im Bereich Paketdrohnen ihren eigenen Beobachtungsumfang. Da der Paketdrohneneinsatz in einer Region von zahlreichen Faktoren beeinflusst wird, wird hier zur Vereinfachung des Problems nur zuerst das KEP-Aufkommen berücksichtigt. Die Grundidee ist, dass Länder, die bereits heute schon ein sehr hohes KEP-Aufkommen haben, auch in Zukunft einen höheren Bedarf an Paketdrohnen haben werden. Während insgesamt 12,29 Mrd. KEP-Sendungen in Europa im Jahr 2019 transportiert wurden, fanden davon 3,65 Mrd. Transporte in Deutschland statt [15]. Hamburg macht aktuell einen Anteil von ca. 3 % beim gesamten nationalen KEP-Aufkommen in Deutschland aus [19]. Allerdings haben nur die größten 18 Städte in Deutschland das wirtschaftliche Potenzial für den Betrieb von Paketdrohnen, wenn Nebenbedingungen wie Reichweite (12 km) und beschränkungsfreie Landungen angenommen werden [20]. Daher werden die Drohnen anhand der Bevölkerung der größten Städte auf Hamburg angepasst. Die schematische Darstellung der Methode zur Umrechnung wird durch die ABBILDUNG 4 veranschaulicht. Mit Hilfe der Studien [6], [16], [17], [18] lassen sich die Hochlaufszenerien der Paketdrohnen in Hamburg prognostizieren, die in ABBILDUNG 5 dargestellt sind.

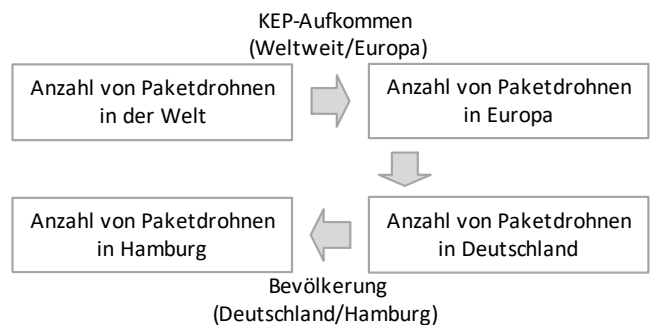


ABBILDUNG 4: METHODIK ZUR UMRECHNUNG DER ANZAHL VON PAKETDROHNIEN IN HAMBURG.

Ähnlich wie Lufttaxis wird die Paketdrohnenanzahl in Hamburg durch die Gleichung (2) ermittelt:

$$N_{H,P}(t) = N_{\text{Welt,P}}(t) \cdot A_{\text{Euro,KEP}} \cdot A_{\text{Deu,KEP}} \cdot A_{H,\text{Bevölk}} \quad (2)$$

Dabei sind  $N_{H,P}$  die Paketdrohnenanzahl in Hamburg in einem bestimmten Jahr  $t$ ,  $N_{\text{Welt,P}}$  die prognostizierte Anzahl in der ganzen Welt.  $A_{\text{Euro,KEP}}$  und  $A_{\text{Deu,KEP}}$  stehen hier jeweils für den Anteil von Europa im weltweiten KEP-Aufkommen und den Anteil von Deutschland im europäischen KEP-Aufkommen.  $A_{H,\text{Bevölk}}$  ist der Anteil von Hamburg an der gesamten Bevölkerung der 18 größten deutschen Städte.

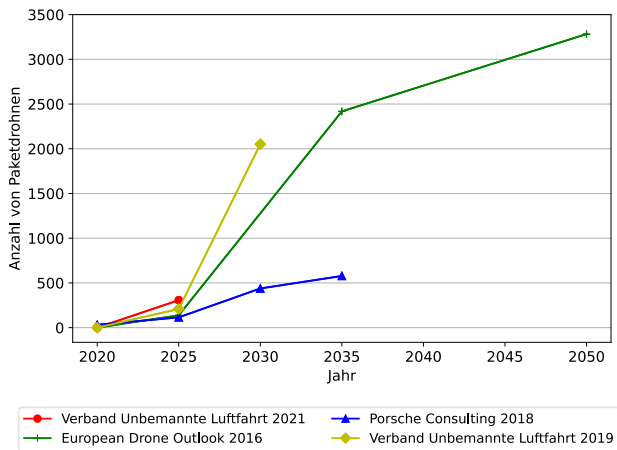


ABBILDUNG 5: HOCHLAUFSZENERARIEN DER PAKETDROHNEN IN HAMBURG NACH DEN ANSÄTZEN VON [6], [16], [17], [18].

### C. Analyse der Hochlaufszenerarien

Ein konservatives und ein progressives Szenario für die Lufttaxis ist in ABBILDUNG 3 dargestellt. Auffällig ist, dass der Einsatz von Lufttaxis sehr wahrscheinlich erst ab dem Jahr 2035 in Hamburg erfolgen wird. Allerdings ist ein starkes Wachstum von 2035 bis 2050 zu erwarten. Der Unterschied zwischen den beiden Szenarien entsteht im Wesentlichen ab 2045, wo das Wachstum im konservativen Szenario stark abflacht.

Durch den Vergleich der vier vorgestellten Hochlaufszenerarien für Paketdrohnen wird in ABBILDUNG 5 veranschaulicht, dass Porsche Consulting [6] die konservativste Prognose zur Entwicklung von Paketdrohnen abgibt. Daher wird diese Prognose als die untere Grenze für Hochlaufprognosen angesehen, bei der es ca. 500 Drohnen für die Paketzustellung in Hamburg bis 2035 geben wird. Das von SESAR erstellte Hochlaufszenerario ist eine mittlere Hochlaufprognose, während der Verband Unbemannte Luftfahrt die progressivste Prognose ermittelt. Es ist zu beachten, dass erhebliche Varianzen zwischen den drei Hochlaufszenerarien zu erkennen sind. Als Gemeinsamkeit wird ein starkes Wachstum von 2025 bis 2035 in allen Szenarien erwartet.

## IV. DER ELEKTRISCHE LEISTUNGSBEDARF VON LUFTTAXIS UND PAKETDROHNEN

Unter Berücksichtigung der ermittelten Hochlaufszenerarien in Abschnitt III wird die luftgestützte Mobilität anhand der sozioökonomischen Struktur in Hamburg bestimmt und die Positionen der Vertiports empfohlen. Danach werden die maximalen Ladeleistungen an jedem Vertiport durch Analyse des Kundenbedarfs unter vereinfachenden Annahmen ermittelt. Die Ergebnisse ermöglichen eine Bewertung der

Auswirkungen der luftgestützten Mobilität auf das elektrische Energieversorgungsnetz in Hamburg.

### A. Lufttaxis

Da Lufttaxis voraussichtlich zumindest anteilig elektrisch angetriebene Flugzeuge sind, werden diese in der Zukunft eine Auswirkung auf das elektrische Netz haben. Ein wichtiger Aspekt ist hierbei der Energiebedarf der Lufttaxis.

Batterien für Lufttaxis werden in [10], [21] aufgelistet. Nach der heutigen Technik ist eine 30 km lange städtische Mission einschließlich Start-, Lande- und Kreuzfahrtphase mit einer Energie von etwa 50 kWh und einer Energiedichte von etwa 250 Wh/kg möglich. Eine Reichweite von 65 km könnte mit einer Energiedichte von 400 Wh/kg möglich sein. Experten der Batterieindustrie erwarten, dass diese Technologie bis 2024 verfügbar sein wird [10]. Die Batterietechniken, die in Autos verwendet werden, sind häufig auf lange Lebensdauern ausgelegt. Dies hat jedoch unweigerlich ein höheres Gewicht (geringere Energiedichten) zur Folge, weswegen diese Technologien nicht für Personendrohnen angewandt werden können. Dies begünstigt häufig Batteriesysteme mit geringerer Lebensdauer, die eine höhere Leistung und Energiedichte (eine hohe Dauerleistung) liefern können.

In [22] werden zwei mögliche Lösungen zum Aufladen von Lufttaxis vorgeschlagen:

- Jeder Vertiport verfügt über mehrere Hochspannungs-Schnellladegeräte sowie über ausreichend Niederspannungs-Ladegeräte für jeden Parkplatz des Lufttaxis, um langsames Aufladen zu ermöglichen.
- Anwendung der Batteriewechsel-Technologie.

Basierend auf der berechneten Anzahl der Lufttaxis in Hamburg in Abschnitt III wird mit Hilfe der Studie [23] ein einfaches Modell zur Berechnung der maximalen Ladeleistung der Lufttaxis in Hamburg entwickelt. Dabei wird die potentielle Nachfrage in Abhängigkeit von der Bevölkerungs- und Einkommensverteilung, der Kreistypklassifikation, Schlüsselindikatoren der Alltagsmobilität in Deutschland und dem Fahrzeiteinsparpotenzial gegenüber alternativen Verkehrsmitteln modelliert. In dieser Studie werden drei verschiedene Szenarien, die sich in der Anzahl der angeschlossenen Bezirke, Routen und Passagiere unterscheiden, betrachtet. Bei der Berechnung der maximalen Ladeleistung werden die folgenden Annahmen getroffen:

- Die Anzahl und Verteilung der Vertiports in Hamburg sind in [23] nach bestimmten Kriterien empfohlen worden, wobei jeder Vertiport die gleiche Anzahl an Lufttaxis  $N_{L,\text{Vertiport}}$  bedienen kann.
- Die Ladeleistung  $P_{L,\text{Laden}} = 22 \text{ kW}$  [24] und der Gleichzeitigkeitsfaktor  $g_L = 0,8$  (d. h. max. 80 % der Lufttaxis werden gleichzeitig auf einen Vertiport aufgeladen.)
- Es werden nur zwei Expansionsphasen betrachtet. Die erste Expansionsphase findet im Zeitrahmen von 2040 – 2050 statt, während die zweite Expansionsphase in 2050 eintritt [23].

Die maximale Ladeleistung pro Vertiport  $P_{L,max}$  wird in Gleichung (3) berechnet:

$$P_{L,max} = P_{L,Laden} \cdot N_{L,Vertiport} \cdot g_L \quad (3)$$

TABELLE IV zeigt die maximale Ladeleistung pro Vertiport für die zwei Expansionsphasen mit Hinblick auf ein konservatives und ein progressives Szenario. Die Analyse ergibt einen minimalen Wert der Ladeleistung pro Vertiport von 0,475 MW und einen maximalen Wert der Ladeleistung von 0,862 MW bei der Gleichzeitigkeit  $g_L = 0,80$ . Es ist zu sehen, dass in der ersten Expansionsphase die maximale Ladeleistung eines progressiven Szenarios niedriger ist als die maximale Ladeleistung eines konservativen Szenarios. Es ist auch zu erkennen, dass die maximale Ladeleistung eines konservativen Szenarios in der ersten Expansionsphase höher ist als die maximale Ladeleistung eines konservativen Szenarios in der zweiten Expansionsphase. Das liegt daran, dass laut [23] mehr Vertiports in Hamburg in Phase II vorhanden sein werden. Die Ergebnisse dieser Analyse können bei der Planung der zukünftigen Energiesysteme, beim Ausbau des elektrischen Netzes und auch bei der Projektierung der Erzeugungskapazitäten unterstützen.

TABELLE IV: MAXIMALE LADELEISTUNG PRO VERTIPORT BEI UNTERSCHIEDLICHEN EXPANSIONSPHASEN UND SZENARIEN.

Expansionsphase	Szenario	Anzahl der Lufttaxi	Anzahl der Vertiports	Maximale Ladeleistung pro Vertiport
Phase I	konservativ	223	7	0,563 MW
	progressiv	189	7	0,475 MW
Phase II	konservativ	333	11	0,528 MW
	progressiv	544	11	0,862 MW

### B. Paketdrohnen

Die Integration der Paketdrohnen in eine Metropolregion ist abhängig von der Sendungsnachfrage, der Wirtschaftsstruktur und der Bevölkerungsdichte in dem jeweiligen Stadtteil. Das bei KE-CONSULT entwickelte Modell KEP-R ist in der Lage, auf Basis von regionalen Strukturdaten (Haushalte, Kaufkraft, sektorale Wertschöpfung usw.) die KEP-Segmente auf regionale Ebenen mit bis zu fünfstelligen Postleitzahlen (PLZ) abzubilden. Das KEP-R Modell zeigt, dass im Jahr 2017 in Hamburg das Sendungsvolumen in der Innenstadt und in einigen Industrie- und Gewerbegebieten deutlich höher war, als das Sendungsvolumen in den Wohngebieten am Rande der Stadt [25]. Zu einer vereinfachten Verteilung der Paketdrohnen werden die folgenden Annahmen getroffen:

- Das Drohnen-Vertiport-Konzept von Amazon wird angenommen [26].
- Alle Vertiports von Paketdrohnen befinden sich in den aktuell existierenden Logistikzentren.
- Da die Reichweite der meisten auf dem Markt befindlichen Paketdrohnen mehr als 20 km beträgt (z. B. Amazon, DPD, Wingcopter), wird der maximal zulässige Lieferradius auf 10 km als eine konservative Annahme festgelegt [27].

- Da einige Logistikzentren sehr nah beieinander liegen, werden insgesamt neun Logistikzentren (Vertiports) für Paketdrohnen angenommen (vgl. ABBILDUNG 6).
- Die Drohnen werden anhand der Sendungsvolumen innerhalb jedes Lieferkreises verteilt.

Die ABBILDUNG 6 stellt die Standorte der Logistikzentren in Hamburg und auch den entsprechenden Deckungsumfang dar [28]. Es ist ersichtlich, dass über dieses Verfahren die Paketdrohnen die ganze Stadt Hamburg gut abdecken können. TABELLE V zeigt die Entwicklung der Drohnenanzahl in jedem Logistikzentrum in Hinblick auf den von SESAR abgeleiteten mittleren Hochlaufverlauf, wobei das Sendungsvolumen innerhalb jedes Lieferkreises berücksichtigt wird.

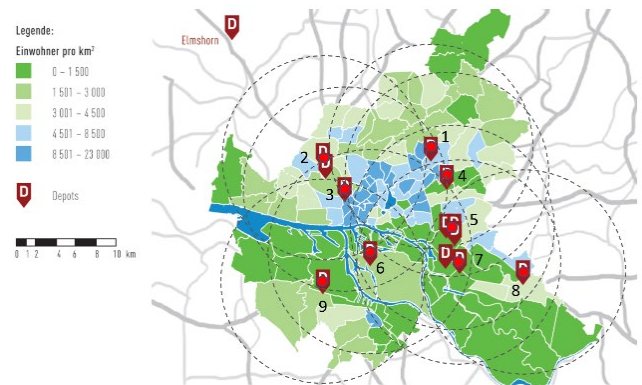


ABBILDUNG 6: STANDORTE DER VERTIPORTS VON PAKETDROHNIEN UND DER DECKUNGSUMFANG JEDES VERTIPORTS [28].

Die Energieverbräuche von Paketdrohnen sind abhängig vom Nutzungsprofil und der Energieeffizienz. Da die großflächige kommerzielle Nutzung von Paketdrohnen noch nicht realisiert ist, existieren keine realen Nutzungsprofile. Zur Vereinfachung der Analyse wird als erste Annäherung nur die maximale Ladeleistung jedes Logistikzentrums untersucht. Dazu werden die folgenden Annahmen getroffen:

- Der Gleichzeitigkeitsfaktor  $g_P$  im Logistikzentrum beträgt 0,8.
- Aktuell liegt die Ladeleistung einer für Paketdrohnen eingesetzten Lithium-Ionen-Batterie mit einer Kapazität von 800 Wh ca. bei 500 W [12]. Zukünftige Schnellladetechnologien sind in der Lage, eine 600 Wh Lithium-Ionen-Batterie mit 1,2 kW Ladeleistung innerhalb 30 Minuten aufzuladen [29]. Daher wird angenommen, dass ab dem Jahr 2035 die Ladeleistung  $P_{P,Laden} = 1,2$  kW beträgt.

Die maximale Ladeleistung jedes Vertiports  $P_{P,max}$  wird durch die Gleichung (4) berechnet:

$$P_{P,max} = P_{P,Laden} \cdot N_{P,Vertiport} \cdot g_P \quad (4)$$

Dabei ist  $N_{P,Vertiport}$  die Drohnenanzahl eines Vertiports. TABELLE V zeigt die Ergebnisse für die Jahre 2035 und 2050. Abgesehen von den letzten drei Logistikzentren werden die Paketdrohnen relativ gleichmäßig über die restlichen sechs Vertiports verteilt. Da die Ladeleistung einer einzelnen Drohne wegen der geringen Batteriekapazität relativ niedrig ausfällt, beträgt die maximale Gesamtladeleistung mit Berücksichtigung aller Vertiports in Hamburg maximal 514 kW. Mit der aktuellen Ladetechnologie kann die

Ladeleistung eines Lkws mehr als 100 kW und zukünftig mehr als 300 kW betragen [30]. Daher machen die Paketdrohnen anhand der Hochlaufszenerarien nur einen kleinen Anteil der Spitzenlasten an einem Logistikzentrum bis 2050 aus.

TABELLE V: DIE ZUGEORDNETEN PAKETDROHNEN UND DER ENTSPRECHENDE LEISTUNGSBEDARF JEDES LOGISTIKZENTRUMS IN HAMBURG.

Logistikzentrum	Sendungen in Mio.	Anteil	Drohnenanz. / max. Ladeleistung im Jahr 2035	Drohnenanz. / max. Ladeleistung im Jahr 2050
1	60,54	16,3 %	394/ 378 kW	535/ 514 kW
2	54,15	14,6 %	353/ 339 kW	479/ 460 kW
3	60,15	16,2 %	392/ 376 kW	532/ 511 kW
4	57,00	15,4 %	372/ 357 kW	505/ 485 kW
5	40,40	10,9 %	263/ 252 kW	358/ 344 kW
6	46,50	12,5 %	302/ 290 kW	410/ 394 kW
7	23,44	6,4 %	155/ 149 kW	210/ 202 kW
8	8,38	2,3 %	56/ 53 kW	75/ 72 kW
9	19,92	5,4 %	131/ 126 kW	177/ 170 kW

## V. ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Artikel wurden die Hochlaufszenerarien von Lufttaxis und Paketdrohnen für die Metropolregion Hamburg modelliert. Während eine Zunahme von Lufttaxis ab dem Jahr 2035 zu erwarten ist, wird ein kräftiges Wachstum der Paketdrohnenzahl bereits ab 2025 eintreten. Für die Hochlaufszenerarien ergeben sich folgende Größen: Voraussichtlich 500 Lufttaxis und 3200 Paketdrohnen werden im Jahr 2050 in Hamburg betriebsbereit sein.

Darüber hinaus wurde eine innovative Methode zur Verteilung der Lufttaxis und Paketdrohnen in Hamburg in Hinblick auf die Wirtschaftsstruktur und Bevölkerung von Stadtteilen entwickelt und vorgestellt. In Kombination mit den Hochlaufszenerarien und den Stand der Technik bezüglich Ladeinfrastrukturen ergibt sich daraus der Leistungsbedarf der Vertiports. Die Analyse ergibt, dass die maximale Ladeleistung an einem Vertiport für die Lufttaxis 800 kW im Jahr 2050 betragen wird. Im Gegensatz dazu liegt die maximale Ladeleistung an einem Vertiport für die Paketdrohnen bei 500 kW. Unter Berücksichtigung der begrenzten Anzahl an Vertiports (7 bis 11 Stück in Hamburg) für Lufttaxis, können die Ladeinfrastrukturen unproblematisch in das hamburger Netz integriert werden, da die Ladeleistung unter 1 MW liegt. Für die weiteren Untersuchungen sollte ein Messstand aufgebaut werden, um ein reales Ladeprofil für einen Vertiport zu erhalten. Der Leistungsbedarf von Paketdrohnen in Logistikzentren ist im Vergleich zu elektrisch angetriebenen Lkws geringer. Für ein effizienteres Flottenmanagement und bessere Wirtschaftlichkeit, erscheint die Erarbeitung eines koordinierten Lademanagementsystems, in einem Logistikzentrum oder über eine ganze Metropole hinweg, unter Berücksichtigung verschiedener Mobilitätsträger – auch der Luftfahrt – notwendig.

## DANKSAGUNG

Das Projekt „innovative Luftgestützte Urbane Mobilität“ (i-LUM) wird durch die Landesforschungsförderung Hamburg im Rahmen der HamburgX-Projekte gefördert. Das Projekt "dtec emob" wird gefördert vom „Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr“ (dtec.bw).

## LITERATUR

- [1] „i-LUM-innovative luftgestützte Urban Mobilität,“ 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://i-lum.de/>.
- [2] „Digitalisierung und Elektromobilität – Netz- und Ladeinfrastruktur,“ 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://dtecbw.de/home/forschung/hsu/digitalisierung-elektromobilitaet/digitalisierung-elektromobilitaet>.
- [3] Airbus, „City Airbus-Technical Specifications,“ 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/urban-air-mobility/cityairbus.html.html#specifications>.
- [4] S. Baur, S. Schickram, A. Homulenko, N. Martinez und A. Dyskin, „Urban Air Mobility - The rise of a new mode of transportation,“ Roland Berger GmbH, München, 2018.
- [5] M. Hader, S. Baur, S. Kopera, T. Schönberg und J. Hasenberg, „Urban Air Mobility I USD 90 billion of potential: How to capture a share of the passenger drone market,“ Roland Berger GmbH, München, 2020.
- [6] G. Grandl, M. Ostgathe, S. Doppler und J. Salib, „The Future of Vertical Mobility – Sizing the market for passenger, inspection, and goods services until 2035,“ Porsche Consulting, 2018.
- [7] T. Mayor und J. Anderson, „Getting mobility off the ground,“ KPMG, 2019.
- [8] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, „Unbemannte Luftfahrtsysteme und innovative Luftfahrtkonzepte – Aktionsplan der Bundesregierung,“ 2020.
- [9] Airbus, „Bringing the Urban Air Mobility Market to Life,“ 2019.
- [10] Volocopter, „The roadmap to scalable urban air mobility,“ 2021.
- [11] Wing, „How it works-Details on our aircraft’s design,“ [Online]. Verfügbar unter: <https://wing.com/how-it-works/>.
- [12] Wingcopter, „Technical Details-Wingcopter 198 Delivery Variant,“ 04 2021. [Online]. Verfügbar unter: [https://wingcopter.com/wp-content/uploads/2021/04/Specsheet\\_Wingcopter-198.pdf](https://wingcopter.com/wp-content/uploads/2021/04/Specsheet_Wingcopter-198.pdf).
- [13] Sky Limits, „Delivery drones and air taxis in city?,“ 2021.
- [14] B. Fritsch, A. Namneck, A. Schwab, L. Kirchner und M. Stonis, „Wirtschaftlichkeitsbewertung von Drohnen zum innerbetrieblichen Materialtransport,“ *Logistics Journal*, 2020.
- [15] KE-CONSULT Kurte&Esser GbR, „KEP-Studie 2020 – Analyse des Marktes in Deutschland,“ 2020.
- [16] SESAR, „European Drones Outlook Study,“ 2016.
- [17] Verband Unbemannte Luftfahrt, „Analyse des deutschen Drohnenmarktes,“ 2019.
- [18] Verband Unbemannte Luftfahrt, „Analyse des deutschen Drohnenmarktes,“ 2021.
- [19] KE-CONSULT, „BIEK-Kompodium Teil 5,“ 2016.
- [20] J.-P. Aurambout, K. Gkoumas und B. Ciuffo, „Last mile delivery by drones: an estimation of viable market potential and access to citizens across European cities,“ *European Transport Research Review*, 2019.
- [21] J.-H. Boelens, „Pioneering the urban air taxi revolution,“ Volocopter, 2019.
- [22] UBER Elevate, „Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation,“ 2016.
- [23] M. Niklaß, N. Dzikus, M. Swaid, J. Berling, B. Lührs, A. Lau, I. Terekhov und V. Gollnick, „A Collaborative Approach for an Integrated Modeling of Urban Air Transportation Systems,“ *Aerospace*, April 2020.

- [24] green motion, „FLIGHT XT,“ [Online]. Verfügbar unter: <https://greenmotion.ch/de/products/flight-xt>. [Zugriff am 06. September 2021].
- [25] S. Altenburg, A. Labinsky, D. Wittowsky, S. Groth, J. Garde, K. Esser und J. Kurte, „Gesamtstädtisches Konzept Letzte Meile,“ 2019.
- [26] J. C. Curlander, A. Gilboa-Amir, L. M. Kisser, R. A. Koch und R. D. Welsh, „Multi-level fulfillment center for unmanned aerial vehicles“, United States Patent US20170175413A1, 2017.
- [27] J. P. Škrinjar, P. Škorput und M. Furdic, „Application of Unmanned Aerial Vehicles in Logistic Processes,“ *New Technologies, Development and Applications*, 2018.
- [28] Bundeverband Paket & Express Logistik, „Nachhaltigkeitsstudie,“ 2017.
- [29] Aura Aerospace, „Breakthrough 10 Minute Charge ‘Battery’ Now Commercially Available,“ 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://aura.aero/energy/breakthrough-10-minute-charge-battery-now-commercially-available/>.
- [30] J. Rosenow, „E-Mobilität: Ein Megawatt Ladeleistung wird künftig normal,“ *kfz-betrieb*, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kfz-betrieb.vogel.de/e-mobilitaet-ein-megawatt-ladeleistung-wird-kuenftig-normal-a-904238/>.