

METHODIK ZUR GANZHEITLICHEN ANALYSE BODENGEBUNDENER INFRASTRUKTUR FÜR URBAN AIR MOBILITY

Jil Eitgen
Institut für Flugzeug-Produktionstechnik
Technische Universität Hamburg, 21073 Hamburg, Deutschland

Dr. Tim Fraske
Digital City Science
HafenCity Universität Hamburg, 20457 Hamburg, Deutschland

Gazmend Mavraj
Fakultät für Maschinenbau
Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, 22008 Hamburg, Deutschland

Majed Swaid
Institut für Luftverkehr
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 21079 Hamburg, Deutschland

Daniel Kloock-Schreiber
Institut für Lufttransportsysteme
Technische Universität Hamburg, 21079 Hamburg, Deutschland

Ole Röntgen
Institut für Verkehrsplanung und Logistik
Technische Universität Hamburg, 21073 Hamburg, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schüppstuhl
Institut für Flugzeug-Produktionstechnik
Technische Universität Hamburg, 21073 Hamburg, Deutschland

Zusammenfassung

Dieser Artikel stellt den methodischen Prozess einer Szenarienentwicklung sowie einer simulationsgestützten Analyse für die bodengebundene Infrastruktur von UAM dar. Als innovative Lösung verspricht UAM im Personentransport Angebote im Gesamtverkehr zu schaffen, um das zukünftige Mobilitätsangebot in Metropolregionen zu verbessern. Die Gestaltung der Nachfrageszenarien befindet sich in einer stetigen Aushandlung zwischen den Akteuren und wird beeinflusst von der technischen Entwicklung, der sozioökonomischen Realisierbarkeit und den zugrunde liegenden Diskursen, die diese Form der Mobilität umgeben. Die Anforderungen an die bodengebundene Infrastruktur sind essentiell für eine realistische Beurteilung der Kapazitäten und Flugmissionen, der städteplanerischen und architektonischen Umsetzung, den Synergien zu anderen Verkehrssystemen sowie einer Berücksichtigung sozialer Aspekte in der Stadt. Der erste methodische Baustein beleuchtet den kreativen Prozess dieser Szenarienentwicklung, einschließlich einer Faktorenanalyse, der Ableitung schlüssiger Nachfrageszenarien sowie der Identifizierung konkreter Standorte für Vertiports am Beispiel der Metropolregion Hamburg. Vier thematische Szenarien werden in diesem Kontext tiefergehend diskutiert: die Anbindung peripherer Räume, Pendlerbewegungen, touristische Nutzung sowie die Überwindung von Mobilitätsengpässen. Im zweiten Abschnitt liegt der Fokus auf der technischen Umsetzung und Analyse der Topologien, Wartungs- und Reparatursystemen, dem Energiemanagement sowie der Wechselwirkung zwischen diesen Subsystemen.

Keywords

UAM, VTOLs, Szenarienentwicklung, Zukunftsrobustheit, Infrastruktur, Topologien, MRO, Energiemanagement, Vertiport

NOMENKLATUR

EASA = European Union Aviation Safety Agency

EMS = Energiemanagementsystem

FATO = Final Approach and Take-Off Area

KPI = Key Performance Indikator

MRO = Maintenance, Repair and Overhaul

ÖPNV = Öffentlicher Personennahverkehr

UAM = Urban Air Mobility

VTOL = Vertical Take-Off and Landing Aircraft

1. EINLEITUNG

Die zunehmende Urbanisierung und die damit verbundenen Mobilitäts Herausforderungen erfordern innovative Lösungen, um Verkehrsbelastungen zu reduzieren und die Lebensqualität in Städten zu verbessern. UAM bietet eine vielversprechende Alternative zu herkömmlichen Verkehrsmitteln im Personentransport, um den wachsenden Mobilitätsbedarf effizient zu decken. Hierfür ist eine ganzheitliche Analyse der bodengebundenen Infrastruktur essenziell. Der vorliegende Artikel untersucht die Integration der Infrastruktur im Hinblick auf Topologien, MRO und EMS für luftgestützte Mobilität in der Metropolregion Hamburg. Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten Hamburgs in der Definition als Metropolregion wird die Systemgrenze für Untersuchungen um die innerstädtische Mobilität, d.h. UAM, gezogen, welche von regionalen und interregionalen Konzepten abzugrenzen ist. Letztere werden hier als Schnittstelle betrachtet, nicht aber in Gänze analysiert. Der Infrastrukturbegriff bezieht sich in dieser Arbeit stets auf den Umfang des Vertiports, d.h. die benötigte bodengebundene Infrastruktur zur Abfertigung eines VTOLs von einer Landung bis zum nächsten Abflug umsetzen zu können. Der Funktionsablauf besteht aus Beladung (Passagiere, Logistik, Antrieb), MRO (Inspektion, Wartung, Reparatur) sowie den Bodenbewegungen (Landung, Abflug, Bewegung, Parken). Diese Umfänglichkeit ist ausreichend, um eine erste Funktionsdemonstration der Methodik und einhergehenden simulativen Analyse gewährleisten zu können. Die Untersuchung findet in zwei Iterationen statt: (1) Die Ableitung von Szenarien aus einer Faktorenanalyse, Nachfragemodellierung und Identifizierung sowie Evaluation potenzieller Vertiport-Standorte; (2) die methodische Darstellung einer tool-gestützten Optimierung der Vertiport-Netzwerke, die Prüfung der Lufttüchtigkeit durch bodengebundene MRO sowie Angaben zum Energiebedarf und die Netzwerkauslastung durch das EMS. Durch die Betrachtung dieser einzelnen Komponenten sollen sowohl potenzielle Synergien als auch Herausforderungen bei der Implementierung dieser neuen Mobilitätsform offengelegt werden. Das Ziel dieses Papers ist die Darstellung des methodischen Ablaufs einer Szenarienentwicklung. Rahmenbedingungen einzelner Szenarien werden vorgestellt und räumliche Anforderungsprofile für die potenziellen Vertiport-Standorte werden abgeleitet. Diese werden anschließend in der Metropolregion Hamburg beispielhaft so identifiziert, dass sich ein Vertiport-Gesamtnetz für einen operativen Ablauf ergibt, in dem sich kritische Elemente wie Konzepte zur MRO und EMS evaluieren lassen. So lässt sich durch die anschließende technische Modellierung ermitteln, ob und unter welchen Voraussetzungen das Netzwerk in der Lage ist, die sich aus den Szenarien ergebenden Nachfragen im

urbanen Verkehr abzubilden. In weiteren Rückkopplungsschritten lässt sich das Gesamtnetzwerk so verfeinern. Ausgehend von den Erkenntnissen aus früheren Arbeiten [5, 6, 11, 12] adressieren wir bestehende Forschungslücken und verknüpfen insbesondere technisch-konzeptionelle Modellierungen in einem konkreten räumlichen Anwendungsfall.

Diese Arbeit folgt der übergeordneten Forschungsfrage:

- *“Wie kann die bodengebundene Infrastruktur von Urban Air Mobility durch Betrachtung ihrer einzelnen Komponenten ganzheitlich optimiert werden?”*

Zur näheren Analyse werden folgende Unterpunkte berücksichtigt:

- *“Wie können mithilfe von Szenariotechnik potenzielle Vertiport-Standorte identifiziert und evaluiert werden?”*
- *“Wie kann die Interoperabilität von Vertiport-Netzwerken, MRO und EMS das UAM-Gesamtsystem optimieren?”*

Die vorliegende Arbeit nutzt sowohl qualitative als auch quantitative Methoden, welche letztlich in eine Gesamtsimulation für ein UAM-System in Hamburg einfließen. Zusammenfassend bietet dieser Artikel einen umfassenden Einblick in die Möglichkeiten zur Optimierung von UAM-Systemen. Die Untersuchung dieser Komponenten und ihrer Wechselwirkungen ermöglicht es, neue Erkenntnisse und Lösungsansätze für die Herausforderungen der luftgestützten Mobilität zu gewinnen. Die Ergebnisse dieser Studie tragen dazu bei, die Grundlagen für die erfolgreiche Implementierung von Passagierdrohnen in städtischen Verkehrssystemen zu schaffen und gleichzeitig die Betriebseffizienz, Sicherheit und Nachhaltigkeit zu erhöhen, sowie zukünftige Forschungsfelder und Entwicklungsbedarf im Bereich urbaner Luftmobilität zu identifizieren.

2. SZENARIOENTWICKLUNG

Aufgrund der zeitlichen Unschärfe hinsichtlich der Implementierung der Entwicklungen in der UAM ist es notwendig, technische Entwicklungen zukunftsrobust auszulegen. Essenz dafür ist die Anwendung und Entwicklung einer geeigneten Methodik. Die Szenarienentwicklung stellt einen kreativen qualitativen Ansatz innerhalb zukunftsrobuster Methodiken dar, um denkbare Zukunftspfade für eine sozio-technische Entwicklung zu identifizieren [7]. Anders als Vorhersagemodelle, basierend auf statistischen Annahmen, zielt eine widerspruchsfreie Szenarienentwicklung darauf ab, technische und operative Abläufe darzustellen (exploratives Szenario) und diese auf ein spezifisches Anwendungsziel hin evaluierbar (normatives Szenario) zu machen [1]. Ziel der Szenarienentwicklung ist es, möglichst konsistente und praktisch denkbare Nachfrageszenarien für den VTOL-Verkehr in der Metropolregion Hamburg zu erstellen und anschließend in einer Gesamtsimulation darzustellen. Die Betrachtung der bodengebundenen Infrastruktur stellt neben der Nachfrageanalyse einen zentralen

Ausgangspunkt für die Modellierung der tatsächlichen Flugbewegungen dar. Die methodische Logik der Szenarienentwicklung beinhaltet drei zentrale Bausteine. Erstens eine Faktorenanalyse, in der eine Vielzahl von Parametern selektiert, evaluiert und hinsichtlich ihrer wechselseitigen Abhängigkeiten kategorisiert wurden. Zweitens die Bildung von Nachfrageszenarien, die basierend auf einem nutzungsspezifischen Ziel definiert werden. Drittens, die Identifizierung von Standorten für Vertiports innerhalb der Metropolregion an zuvor definierten Orten, welche für die Erfüllung der Nachfrageziele relevant sind.

2.1. Faktorenanalyse

Sowohl Vorteil als auch Herausforderung für die Faktorenanalyse ist, dass der Forschungsansatz in dem zugrunde liegenden Projekt mehrere sehr unterschiedliche Disziplinen zusammenbringt [8]. Um alle Blickwinkel auf das Thema UAM zu berücksichtigen, werden zu Beginn der Faktorenanalyse die Beiträge aller beteiligten Partner und Experten gesammelt. Dafür werden im Rahmen von Workshops, konzipiert als World Café [2], relevante Faktoren identifiziert. Die Workshops sind unterteilt in Phasen zur Dokumentation und Sammlung der Faktoren aus den einzelnen Disziplinen und Phasen zur Diskussion dieser und Ableitung weiterer Faktoren basierend auf dem Austausch der Experten. An diese kreative Phase schließt sich die erste Analysephase an. Hier werden sämtliche gesammelte Faktoren in unterschiedliche Cluster unterteilt und nach gleicher Bedeutung zusammengefasst. Anschließend erfolgt unter Einbeziehung der beteiligten Experten eine Gewichtung der Faktoren in Form einer Reihenfolge. Weiterhin wird die hohe Zahl der gesammelten Faktoren reduziert, indem schwach gewichtete Faktoren vernachlässigt werden. Mit den verbleibenden Faktoren wird durch eine Fokusgruppe eine Cross Impact Analysis durchgeführt [18]. Es erfolgt ein Vergleich der Faktoren untereinander, sowie eine Untersuchung ob und wie stark Abhängigkeiten zwischen den Faktoren bestehen. Auf Basis der Analyse wird eine Reihenfolge der Faktoren abgeleitet. Diese Faktoren werden als Grundlage für den Aufbau, die Betrachtung und Variation der Szenarien genutzt.

2.2. Bildung der Nachfrageszenarien

Die Entwicklung von UAM ist geprägt von großer Unsicherheit zwischen den beteiligten Akteuren, sowie strategisch und politisch motivierten Aussagen und Positionierungen. Während der Rechtsrahmen durch die U-Space-Verordnung der EU¹ eine Richtlinie zur Überführung in die nationale Gesetzgebung bietet, verbleibt die Diskussion von gewinnbringenden Geschäftsmodellen auf theoretischen Annahmen [4]. Daran anschließend stellen sich zudem Fragen zum Nutzwert von UAM aus der Perspektive des gesamten Verkehrssystems.

- Welchen Anteil kann UAM am Modal Split einer Metropolregion realistisch erreichen?

- Wie können soziale und ökologische Umwelteinflüsse minimiert werden?

Basierend auf der Priorisierung in der Faktorenanalyse lassen sich vier potenzielle Szenarien für die Nutzung von UAM in der Metropolregion Hamburg ableiten, welche die Grundlage für die weitere Evaluation stellen. Im Folgenden sollen die vier Szenarien und ihre Kernaussagen dargestellt werden. Merkmale und Standorte der aufgestellten Szenarien finden sich in Tabelle 1 und Abbildung 4.

Tabelle 1: Merkmale und Standorte aufgestellter Szenarien

Szenario	Merkmale	Standorte
Peripherie	Raumbezogen (Zentrum <-> Peripherie) Preissensibilität: Hoch Zielsetzung: Unsicher, geringe Datengrundlage	8 (Zentren) 6 (Peripherie)
Pendler	Akteursbezogen (Arbeitszentren <-> Wohnzentren) Preissensibilität: Mittel bis hoch Zielsetzung: Existierende Nachfrage und Angebotserweiterung	9 (Arbeitszentren) 19 (Wohnzentren)
Tourismus	Fallspezifisch je nach touristischer Nutzung Preissensibilität: niedrig (Cruise Center, Events) bis hoch (Tagestourismus und Naherholung) Zielsetzung: Flexibel, hohe Skalierbarkeit	9 (Destinationen) 3 (Hotels, exemplarisch)
Engpass	Kontextabhängig in Bezug zu den anderen Szenarien Zielsetzung: Entlastung temporär überlasteter Verkehrswege	Ergibt sich aus bestehendem Netzwerk

1. *Peripherie-Szenario*: Neben der exklusiven Anwendung von UAM innerhalb urbaner Gebiete wird zunehmend das Nutzungspotenzial für rurale und interregionale Konzepte diskutiert. Die Grundidee dieses Anwendungsfalles zielt auf die Verbesserung der verkehrlichen Anbindung des Stadtzentrums an die urbane Peripherie ab. Basierend auf einer existierenden quantitativen Erreichbarkeitsanalyse nach Peter et al. identifizieren wir so zunächst Gebiete in der Metropolregion Hamburg, welche mit einer Fahrtzeit von 30 Minuten (ÖPNV, Auto) nur eine geringe Zahl an erreichbaren Arbeitsplätzen aufweisen [15]. Zusätzlich

¹ Durchführungsverordnung (EU) 2021/664, der Kommission vom 22. April 2021 über einen Rechtsrahmen für den U-Space, Amtsblatt der Europäischen Union L 139/161, 23.4.2021.

dürfen die Gebiete über keinen bestehenden Anschluss an das Bahnnetz verfügen und müssen mindestens 10000 Einwohnende aufweisen, um grundsätzlich als relevanter Ort für UAM-Nachfrage berücksichtigt werden zu können. Der zusätzliche Kostenaufwand für die potenziellen Nutzenden muss vor allem über eine deutliche Zeitersparnis mit konkurrierenden Verkehrsmitteln begründet werden. Das Szenario zielt auf eine gemeinwohlorientierte Nutzung ab, um die Anbindung für ländliche Wohnbevölkerung zu erhöhen oder im Umkehrschluss auch städtischer Bevölkerung einen schnelleren Zugang zur Naherholung zu gewährleisten. Zudem sind infrastrukturelle Standorte der UAM in der Peripherie potenziell leichter zu realisieren, da sie in Bezug auf Flächenversiegelung, Wettbewerbsdruck und Verkehrsbelastung unter geringerer Belastung als im urbanen Raum stehen. Das Szenario lässt Spielraum für eine Abschätzung von Subventionskosten. Es bedarf neben der Abdeckung der Peripherie ebenfalls eine grundlegende Anzahl an Standorten mit einer hohen Zentralität, was planerisch und finanziell eine größere Herausforderung darstellt. Da es sich um ein raumbezogenes Szenario handelt, bleibt zudem die eigentliche Zielgruppe innerhalb der Peripherie ein offenes Element, sowohl in ihrer demografischen (Anzahl der Nutzer, Altersstruktur) als auch sozio-ökonomischen (Akzeptanz, Kaufkraft) Dimension.

2. Pendler-Szenario: UAM als ergänzende Mobilitätsform zur Erfüllung von Pendelbewegungen stellt eines der meist diskutierten Szenarien in existierenden Diskursen und Studien dar [16]. In diesem Szenario ermöglicht UAM eine schnellere und zuverlässigere Anbindung von Pendlern aus zentralen Wohnorten im Hamburger Umland mit zentralen Arbeitsorten. Andersrum ermöglicht es der Wohnbevölkerung im Stadtzentrum eine verbesserte Erreichbarkeit für Arbeitsorte im Umland. Als Pendler werden hier sozialversicherungspflichtige Beschäftigte angenommen, welche in der Woche zwischen zwei und fünfmal zwischen ihrem Wohn- und Arbeitsort in einer anderen Gemeinde verkehren und deren Reisezeit zwischen diesen Punkten etwa 45 bis 90 Minuten für eine Fahrt beansprucht. Potenzielle Nutzende sind bereit, für eine höhere Beförderungsqualität in Form von Zeitersparnis mehr Geld als mit bodengebundenen Verkehrsmitteln auszugeben, wodurch die Ausgaben jedoch in einer Relation zum Komfortgewinn stehen müssen. Basierend auf existierenden Pendlerstatistiken^{1,2} werden die Wohnorte mit der höchsten Summe an Ein- und Auspendlern als Grundlage für die Verortung von Pendelbewegungen benannt. Ergänzend werden zentrale Arbeitsschwerpunkte und Großunternehmen mit einer hohen Anzahl an Mitarbeitenden an einem einzelnen Standort identifiziert. Eine Grundproblematik bei der Definition von Pendelbewegungen ist die oftmals

unzureichende Gliederung existierender Datensätze, welche nur einen groben quantitativen Überblick gibt. So müssen die Standorte in der Praxis einen höheren Anspruch an Genauigkeit erfüllen, um hinsichtlich Kosten- und Nutzenverhältnis für Kunden attraktiv zu werden. Zudem ist das Szenario primär auf klar definierte Zeitfenster an bestimmten Wochentagen beschränkt, was gegebenenfalls erhöhte Anforderungen an die Abfertigungsrate pro Vertiport zur Folge haben kann. Gleichzeitig kann durch das zeitlich begrenzte, hohe Verkehrsaufkommen ein signifikantes Maß an Leerflügen verursacht werden.

3. Tourismus-Szenario: In einem dritten Szenario wird die touristische Nutzung von UAM evaluiert. Neben der zusätzlichen Mobilitätsoption durch UAM wird eine touristische Nutzung insbesondere dann interessant, wenn sie entweder intrinsisch (Flugtaxi-Nutzung wird als Teil des touristischen Aufenthalts wahrgenommen) oder in einem übergeordneten Geschäftsmodell eine zusätzliche Attraktivitätssteigerung eines bereits bestehenden Angebots liefert. Die Anwendungsfälle lassen sich hierbei in vier grundlegende Kategorien einteilen. Erstens, die Anbindung von Veranstaltungsstätten wie Stadien (z.B. Volkspark) und Theatern (Stage-Theater am südlichen Elbufer). Diese anlassbezogene Nutzung wird vor allem bei teureren und nicht alltäglichen Nachfragen wie einem Musical-Besuch interessant, bei der der Preis für das Flugtaxi aufgrund des ohnehin hohen Ticketpreises nicht als überzogen wahrgenommen wird. Während solche „VIP-Modelle“ aus rein ökonomischer Betrachtung schlüssig wirken, so ist der Einfluss von UAM auf die Verkehrsentlastung bei Massenveranstaltungen wie Fußballspielen jenseits der 10.000-Zuschauer Marke aufgrund der infrastrukturellen Anforderungen herausfordernd. Zweitens, kann der Transport von Kreuzfahrtpassagieren zwischen Hotels und Terminals als ein ökonomisch vielversprechendes Geschäftsmodell hervorgehoben werden [9]. Hamburg verfügt über drei zentrale Cruise-Center an der Elbe, womit der Einsatz von UAM durch Direktverbindungen zu den Hotels am ehesten einer klassischen Taxi-Nutzung entspricht. Ähnlich wie im ersten Fall gehen hier die Kosten für den Flug in den hohen Gesamtkosten einer Kreuzfahrt auf. Zudem können Hotels durch den Zubau von Vertiports als potenzielle Investoren infrage kommen, um selbst von dem erweiterten Angebot für Gäste zu profitieren. Die dritte Kategorie bildet die Anbindung von touristischen Attraktionen wie der Elbphilharmonie, was sich prinzipiell mit Geschäftsmodellen wie dem Angebot von Rundflügen verbinden lässt. Als vierter touristischer Ansatz erfolgt die Anbindung von Parks und Wildparks in der Umgebung Hamburgs, um kürzere Wege zur Naherholung oder für Tagestouristen zu ermöglichen. In dieser Nutzung stellt der Preis für die Flugtaxis jedoch eine kritische Barriere dar, da

¹ Bundesagentur für Arbeit. Gemeindedaten der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten nach Wohn- und Arbeitsort - Deutschland, Länder, Kreise und Gemeinden (Jahreszahlen). <https://statistik.arbeitsagentur.de/DE/Navigation/Footer/Top-Produkte/Gemeindedaten-sozialversicherungspflichtig-Beschaeftigter-Nav.html>. Letzter Aufruf: 30.08.2023.

² Handelskammer Hamburg. Die 100 mitarbeiterstärksten Unternehmen der Metropolregion Hamburg 2015. <https://www.ihk.de/blueprint/servlet/resource/blob/1463038/27fc4baa66cee7859cbef13e6d9f15b1/liste-der-100-groessten-unternehmen-der-mrh-23-03-15-data.pdf>. Letzter Aufruf: 30.08.2023

die eigentliche Tätigkeit nur einen geringen finanziellen Aufwand mit sich bringt.

4. **Engpass-Szenario:** Das vierte Szenario zielt ab auf die Nutzung von UAM zur Entlastung temporär überlasteter Verkehrswege, welche so bei individueller Nachfrage umflogen werden. Hierbei werden bestehende Nachfragerouten unterstützt und zusätzliche Kapazitäten geschaffen. Das Szenario ist eng gekoppelt an bestehende Überlastungen, welche insbesondere durch physische Barrieren in der Stadt bedingt sind. In Hamburg stellen speziell die Elbe als auch die Außenalster natürliche Barrieren dar, welche wiederum zu verkehrlich stark frequentierten Routen und Orten führen (z.B. Elbtunnel). Da zumindest in der Anfangszeit und dem initialen Aufbau von UAM davon ausgegangen werden muss, dass keine wesentlichen Kapazitäten für einen messbaren Einfluss im Modal Split zu erwarten sind, zielt das Szenario primär auf individuellen Bedarf ab, bei dem sich der Nutzer aus bestehenden Überlastungen im ÖPNV oder bodengebundenen Verkehr "freikauf". Dementsprechend setzt das Szenario jedoch eine hohe Kaufbereitschaft voraus. Die Überbrückung von Engpässen dient höchstwahrscheinlich, gerade im Hinblick auf lose UAM Netzwerke, nicht als Hauptzweck eines UAM Netzwerks, da Engpässe häufig auf einer größeren Route auftreten, die jeweiligen Start- und Zielpunkte der potenziellen Nutzer aber stark voneinander abweichen. Die reine Überbrückung eines Engpasses stellt somit noch keinen Mehrwert dar, da ein doppelter Umstieg auf andere Verkehrsmittel notwendig wäre. Zudem ist die Anzahl an Verkehrsteilnehmern an Verkehrsknotenpunkten wie dem Elbtunnel derart hoch, dass eine quantitative Entlastung durch UAM realistisch kaum denkbar ist. Darüber hinaus treten die meisten Staus nur in kleinen Zeitfenstern pro Tag auf, was eine Nachfrage für UAM zusätzlich limitiert.

2.3. Vertiport-Standortidentifikation

Basierend auf der Operationalisierung der Szenarien und den notwendigen Parametern zur Verortung der Vertiports, werden zunächst grobe Standorte identifiziert. Zunächst lassen sich periphere Ortschaften sowie verkehrlich definierte Bereiche, beispielsweise Bahnhöfe, grob definieren. Im Anschluss muss eine konkrete Platzierung erfolgen, welche in räumlicher Nähe zu diesen Gebieten liegen sollte. So können die mit anderen Verkehrsmitteln zurückgelegten Wege möglichst kurz und zeitsparend gehalten werden. Die Platzierung erfolgt über ein geografisches Informationssystem, wobei in einer explorativen Vorgehensweise unterschiedliche Aspekte berücksichtigt wurden. So spielt neben der räumlichen Nähe die maximal verfügbare Fläche eine zentrale Rolle bei der Standortfindung. Zudem werden bevorzugt Gebäude oder Flächen ausgewählt, welche keiner Wohnnutzung unterliegen, sodass das Potenzial für Störungen durch Lärmemissionen für die Umgebung sinkt. Die bevorzugte Platzierung auf Dächern beugt einer zusätzlichen Flächenversiegelung in der Stadt vor. Insbesondere existierende Parkhäuser wurden hierbei vornehmlich

ausgewählt. Wenn eine Platzierung auf einem Dach an einem bestimmten Standort nicht realisierbar ist, werden größere Freiflächen wie Parkplätze oder Wiesen als potenzielle Nutzungsflächen definiert. Bei existierenden Parkplätzen wird eine zusätzliche Überbauung für die Vertiports angenommen, um sowohl die Kapazitäten für den bodengebundenen Verkehr nicht zu verringern als auch den Lärmemissionen entgegenzuwirken. Insgesamt wurden 56 Vertiport Standorte innerhalb der Metropolregion festgelegt, wobei sich 54 an den Nachfrageszenarien orientieren (siehe Tabelle 1) sowie zwei großflächige Hubs, die einen Ort für MRO und die missionsabhängige Unterbringung der Flotte zur Verfügung stellen. Die Standortidentifikation orientiert sich stark an dem Narrativ der Szenarien sowie einer nachfrageorientierten räumlichen Analyse. Es erfolgt jedoch keine Analyse zur tatsächlichen Realisierbarkeit der Feinstandorte im Rahmen dieser Methodik, beispielsweise hinsichtlich der Architektur und Statik sowie unmittelbarer Zugangswege, Barrierefreiheit, Eigentumsverhältnisse oder Kosten für die Umnutzung, Bebauung und Instandhaltung der notwendigen Infrastruktur. Zudem erfolgt keine tiefere Prüfung der Einhaltung des Lärmschutzes und der Grenzwerte hinsichtlich weiterer ökologischer und sozialer Dimensionen.

3. TOOLGESTÜTZTE SIMULATION

Die UAM kann als vielschichtiges Optimierungsproblem abgebildet werden. Dabei ergibt sich die Variantenvielfalt aus der Anzahl der Stakeholderpositionen und deren Umgebungen. Niklaß et al. fassen den beschriebenen Zustand als chaotisches Projekt auf, bis die einfließenden Positionen klar positioniert und analysiert sind [13]. Um dies abzubilden, ist es empfehlenswert, ein UAM Modell innerhalb einer toolgestützten Simulation aufzubauen. Die Annahmen sowie die Randbedingungen für dieses Optimierungsproblem ergeben sich aus der Analyse innerhalb der Szenarientwicklung. Die gefundenen Parameter werden dann in Zielfunktionen und Eingabeparameter überführt. In dieser Hinsicht lassen sich mathematische Formulierungen finden, die die Zusammenhänge der UAM widerspiegeln. Um eine vielschichtige Analyse im Einklang mit dem variantenstarken Formulierungsproblem UAM gewährleisten zu können, ist es notwendig, die Optimierung hinsichtlich verschiedener Zielparameter durchzuführen. Weiterführende Analysen ergeben, inwiefern Synergieeffekte zwischen verschiedenen Parametern genutzt werden können. In dieser Arbeit soll gezielt die bodengebundene Infrastruktur untersucht werden, weshalb die Verknüpfung der zutreffenden Inhaltspakete in dieser Hinsicht dargestellt wird. Nachfolgend werden aktuelle Erkenntnisse zur Netzwerkoptimierung, Infrastruktur und zum Energiemanagementsystem skizziert und Einflüsse untereinander hervorgehoben.

3.1. Netzwerkoptimierung

Das Ziel der Netzwerkoptimierung ist die Entwicklung und Anwendung eines strategischen Planungsverfahrens, um die minimalen lokalen Kapazitäten für Kennzahlen wie Parkpositionen, Ladeinfrastruktur und Verkehrsabläufe pro Minute zu ermitteln. Dabei werden effiziente Flottenoperationen angestrebt, um Leerflüge zu minimieren und die Flottengröße, -zusammensetzung und den Energiebedarf zu optimieren. Das Problem der Netzwerkoptimierung ist bereits aus verschiedenen Perspektiven heraus untersucht worden. Der Zusammenhang zwischen Positionierung von Vertiports und der resultierenden Nachfrage wird in Wu und Zhang [22] dargestellt. Ein Ansatz zur Quantifizierung des Zusammenhangs zwischen der notwendigen Netzwerkdichte und dem resultierenden Bevölkerungsanteil mit adäquatem Zugang zum UAM Verkehrssystem wird in Maget et al. vorgestellt [10]. Ein weiterer Ansatz zum Netzwerkentwurf für On-Demand UAM unter Berücksichtigung eines multi-modalen Ansatzes wird in Peng et al [23]. präsentiert, wobei hier eine optimierte Vertiportpositionierung und Passagierzuzuweisung zu Vehikeln umgesetzt wird, um die mögliche Reisezeiteinsparung der Passagiere zu maximieren. Im Projekt i-LUM kommt der in Swaid et al. präsentierte Ansatz [19] zur Anwendung. Dieses Konzept sieht vor, eine effiziente Flottenzusammensetzung und die dazugehörigen Vehikelbetriebspläne zu ermitteln, welche anschließend analysiert werden, um die Kapazitätsanforderungen für ein als Input verwendetes Netzwerk aus Vertiportpositionen zu bestimmen. Dieser Ansatz umfasst eine exemplarische Kapazitätsbedarfsanalyse am Beispiel von Parkpositionen und Batterieladeinfrastruktur. Der Ansatz besteht aus vier Schritten. Zunächst wird ein UAM-Netzwerk auf Basis von Vertiport-Positionen definiert, wobei jeder Vertiport mit unbegrenzter Kapazität initialisiert wird. Zudem werden Vehikeltypen und deren Leistungsmerkmale wie Betriebsgeschwindigkeit, Energiebedarf pro Missionsphase, Batteriekapazität und Passagieranzahl definiert. Im zweiten Schritt wird ein Verkehrsszenario in Form eines Missionspools erstellt, wobei jede Mission definiert wird durch einen Start- und Ziel-Vertiport, durch die Anzahl der Passagiere, sowie durch die gewünschte Abflugzeit. Im dritten Schritt wird die Flotte sukzessiv generiert, indem die Einträge aus dem Missionspool den Vehikeln zugewiesen werden. Ein graphenbasiertes Optimierungsmodell nutzt dabei den Missionspool, um Vehikel-spezifische Betriebspläne mit dem Dijkstra-Algorithmus zu bestimmen. In diesem Kontext werden drei Bedingungen an die Betriebspläne gestellt.

- Ein Vehikel muss für alle im Betriebsplan enthaltenen Missionen genügend Sitzkapazität aufweisen.
- Die Betriebspläne müssen vom jeweiligen Vehikel zeitlich durchführbar sein. Dabei werden Puffer für Bodenabfertigung und Batterieladezeit berücksichtigt.
- Die energetische Durchführbarkeit muss gewährleistet werden, sodass der Batterie eines Vehikels stets

innerhalb seiner Betriebsgrenzen (zwischen Null und 100 Prozent) operiert.

Die Anzahl der abgedeckten Passagierkilometer wird als Optimierungsgröße verwendet, um die Gesamtdistanz, die von Passagieren pro Tag zurückgelegt wird, zu maximieren. Im letzten Schritt werden Flottengröße und die Flottenzusammensetzung analysiert sowie Betriebspläne für Vehikel und Vertiport-Positionen abgeleitet, um lokale Lastprofile für die Batterieladeleistung und geparkte Vehikel zu bewerten. Kapazitätsanforderungen für Vertiport-Positionen werden aus den ermittelten Lastspitzen abgeleitet.

3.2. Infrastrukturen

Damit Flugbewegungen zum urbanen Passagiertransport effizient durchgeführt werden können, müssen im Zuge der Systemauslegung miteinander vernetzte Aspekte des luft- und bodenseitigen Infrastrukturentwurfes berücksichtigt werden [6]. Im Wesentlichen konzentriert sich dies auf das Luftraummanagement und die Infrastrukturen in Variantenvielfalt für den Bereich der VTOLs. Weitere werden im folgenden Abschnitt näher dargestellt.

3.2.1. Topologien

Skizziert werden feste Topologien und die Analyse von KPIs dieser Infrastrukturen in Veröffentlichungen wie Preis, Taylor, Vascik et al. sowie Zelinski [17, 20, 21, 24]. Problematische Entwicklungen ergeben sich aus der begrenzten Optimierbarkeit hinsichtlich frei zu wählender Zielfunktionen, die sich aus Stakeholderanalysen herausarbeiten lassen. Daher haben Park et al. erstmals das Vertiport Design Problem eingeführt [14]. Hierbei wird die beschriebene Problematik gelöst, indem die Topologie als variabel betrachtet wird. Das Design ergibt sich aus einem mathematischen Optimierungsproblem, dessen Zielfunktionen mit Nettogewinn und Kapazität betitelt werden. Eine Erweiterung der Zielfunktionen ergibt sich durch die Einbindung der physischen Abmaße, Turnaround- und Gate-Zeit, der Sicherheit und der Lärmemissionen. Um das Design möglichst zukunftsrobust zu halten, ist es notwendig, die Anzahl an Eingabeparametern auf ein Minimum zu beschränken [6]. Es sind hier quadratische Mindestprofile zugrunde zu legen, deren Anordnung Ziel der beschriebenen Optimierung ist. Die Analyse dieser quadratischen Grundformen wird weiterhin verfolgt, da die EASA als Maßgabe quadratische oder runde Formen für FATOs und die Parkflächen aufzeigt [4]. Es lässt sich zeigen, dass die Eignung von quadratischen Flächen für das Infrastrukturdiesign deutlich höher ist als die der runden Flächen. Die Aneinanderreihung von kreisförmigen Flächen ergibt undefinierte Leerräume, ebenso ist die Darstellung einer durchgängigen Außenkante nicht möglich. Aus der Analyse der notwendigen technologischen Infrastruktur am Boden lässt sich die Einteilung in die folgenden Flächen zugrunde legen: FATO, Gate, Taxiroute, Terminal, Transportvehikel-, Kontroll-, Park- und Lärmschutzfläche. Die Aufgaben der einzelnen

Flächen im Zuge der Vehikelabfertigung zwischen Landung und dem nächsten Abflug ergeben sich dabei wie folgt.

- FATO: Starts und Landungen
- Gates und Terminal: Passagier- und Logistikbewegungen
- Taxirouten: Bewegungen der VTOLs
- Kontroll- und Parkflächen: Post- und Pre-Flight-Checks sowie Treibstofflogistik

Das Optimierungstool liefert als Ergebnis eine der ausgewählten Zielfunktionen möglichst gerechte Topologie. Abbildung 1 zeigt ein mögliches Ergebnis hinsichtlich einer verbesserten Taxiway-Auslastung und Verbindung der Subsysteme durch Taxiways. Abhängig von der benötigten Infrastruktur am jeweiligen UAM Netzwerkknotenpunkt ergeben sich Grundstrukturen der Vertiports. Sie unterscheiden sich in der physischen Größe und der Ablaufprozessschritte. Flächenzuordnungen ergeben sich aus der Analyse wie folgt.

- Terminal (T): Wartebereich, Sicherheitskontrollen
- Gate (G): Passagierein- und -ausstieg, Gepäckein- und -ausladung
- Taxi-Route (TR): Bereich für Bodenbewegungen der VTOLs
- FATO (F): Start- und Landebereich
- Parkfläche: MRO-Bereich (PM), Kontrollmöglichkeit (PK), Laden
- Lärmschutzfläche (LS): Lärmdämmung
- Transportvehikelfläche (TV): Bereitstellung der Transportvehikel
- Kontrollfläche (K): Post- und Pre-Flight-Kontrollen, Laden

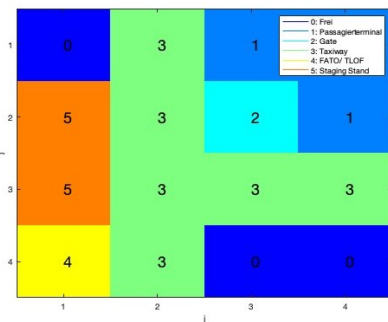


Abbildung 1: Topologie als mögliches Ergebnis nach der Optimierung hinsichtlich der Taxiway-Auslastung und -Konnektivität

3.2.2. Wartung und Reparatur

Die Idee des MROPorts erhält eine der erstmaligen Betrachtungen in Eltgen et al. [6]. Aus einer Bedarfsanalyse kristallisieren sich zwei Layouts heraus, die Bedarfsgerechtigkeit aufweisen. Dies ist zum einen das einetägige Dachlayout und das zweietägige freistehende Layout. Beide verfügen über FATO, Treibstofflogistik, Parkbereiche, die Wartungs- und Reparaturhalle, Reinigungsstation und einen Aufenthaltsbereich für Mitarbeitende, da Vollautomatisierung ökonomisch und

technisch als nicht sinnvoll erwiesen hat. Der Einfluss der Standortidentifikation innerhalb der Modellierung lässt sich nutzen, um MROPort Standorte zu identifizieren. Das Vertiport Design Problem von Park et al. findet in der eigenen Erweiterung Anwendung im MROPort Tool [14]. Das Tool zeigt neben dem physischen System der bodengebundenen Infrastrukturen auch das Missionsverwaltungssystem innerhalb der Wartung und Reparatur auf. Dabei fließen Bedarfsparameter und Eigenschaften der jeweiligen VTOLs ein. Als Ergebnis werden Ausfallzeiten der VTOLs und damit einhergehende Zeitpläne und Kapazitäten der Wartung und Reparatur im Sinne einer vorhersehenden Wartung nach Lebenszyklusanalyse berechnet. Zusätzlich werden Auslieferungen an Drittanbieter im Sinne der Part 145 einbezogen [3]. Notwendige Einflüsse zeigen sich in den Operationszeiten, die durch Bedarfs- und Netzwerkanalyse sowie das Energiemanagement im Sinne der electrical Vertical Take-Off and Landing Aircrafts (eVTOLs), maßgeblich bestimmt werden.

3.2.3. Energiemanagementsystem

Das Energiemanagementsystem enthält Informationen wie Energiebedarf, Ladeleistung, Reichweite, Ladezustand, Ladedauer einzelner Vehikel, sowie die elektrische Netzauslastung in einem bestimmten Gebiet. Um weitere Aussagen treffen zu können, ist insbesondere die Energiebedarfsmodellierung einer Drohne hierbei essentiell. Hierzu sind einige Vorarbeiten in Mavraj et al. durchgeführt worden [12]. Der Zweck der Modelle ist es, den elektrischen Bedarf von Drohnen und Drohnenverkehr zu ermitteln, um sie als Verbraucher bei der Planung zukünftiger Energienetze zu berücksichtigen. Die Modelle müssen in der Lage sein, eine große Menge unterschiedlicher Drohnenflüge realistisch abzubilden, ohne dass jede Einzelmission detailliert ausgeplant wird. Auf diese Weise sollen bspw. logistische Netzwerke mit vielen verschiedenen Drohnen und dynamischen Start- und Zielpunkte abgebildet werden können, um eine realistische Abschätzung der hierzu benötigten Energie zu erhalten. Die Modelle des Energiemanagementsystems werden in der Entwicklungsumgebung MATLAB Simulink erstellt. Die wesentlichen Bestandteile der Simulation sind das Drohnenmodell, das den Energiebedarf von Drohnenflügen zwischen zwei Bodenstationen bestimmt, das Stationsmodell, das den Bedarf der Stationen beim Ground-Handling berechnet, und einige Datenmodule, die die Modelle mit nötigen Informationen, wie Wetter oder Missionsplänen, versorgt. Die einzelnen Modelle sind dabei modular aufgebaut, um wiederkehrende Funktionen effizient zu nutzen und ggf. nötige Anpassungen unkompliziert implementieren zu können. Das Modell „Flight Time and Drone Consumption“ bestimmt die Dauer eines Drohnenfluges zwischen zwei Stationen sowie die elektrische Energie, welche die Drohne während des Fluges benötigt. Hierbei wird neben einer realistischen Streckenlänge und den Flugparametern auch der Wind zum Zeitpunkt des Fluges berücksichtigt. Das „Flight Time

and Drone Consumption“-Modell besteht im Wesentlichen aus den folgenden Teilmodulen: Distance und Energy Consumption. Das „Distance“-Modul bestimmt die Länge der Flugroute für einen Drohnenflug zwischen der gewählten Start- und Zielstation. Um für das Bedarfsmodell eine realistische Routenlänge abzuschätzen, wird zunächst der direkte Abstand zwischen den GPS-Koordinaten der Start- und Zielstation berechnet. Im „Energy Consumption“-Modul wird der Energiebedarf der gewählten Drohne auf der Flugroute sowie die Flugdauer bestimmt. Für jedes Drohnenprofil sind Daten über ihren Energiebedarf und ihre Fluggeschwindigkeiten in den jeweiligen Flugzuständen hinterlegt. Diese werden genutzt um für jede einzelne Flugphase, den erwarteten Energiebedarf und die nötige Zeit zu bestimmen. Die ermittelten Werte werden summiert und der Gesamtenergiebedarf des Fluges und die Flugdauer an die folgenden Module übergeben. Die Modelle „Origin“ und „Destination“ bestimmen die elektrische Energie, die bei einer Start- und Zielstation über einen Tag benötigt wird und stellt diese über die Zeit aufgelöst dar. Berücksichtigt wird der Bedarf einer Kinematik zum Ein-/Ausdocken, Be- und Entladen der Drohne, das Laden der Drohne und das Beheizen oder Kühlen des Innenraums der Station. Das „Heating“-Modul bestimmt den Energiebedarf, der bei den Stationen für die Klimasysteme anfällt. Diese sind nötig, da sowohl Drohnensysteme als auch die internen Systeme der Stationen im Lagerzustand auf ca. 20°C temperiert werden sollten, um eine optimale Einsatzbereitschaft zu gewährleisten und ihre Lebensdauer nicht unnötig zu verringern. Der Energiebedarf der Klimasysteme setzt sich aus zwei Anteilen zusammen. Ein kontinuierlicher Anteil, der sich aus dem stetigen Wärmeübergang an den Außenwänden der Stationen im geschlossenen Zustand ergibt und ein Anteil, der anfällt, wenn beim Ein- oder Ausdocken das Tor der Station geöffnet wird und ein Luftaustausch mit der Umgebung stattfindet. Das „Loading“-Modul ermittelt den Energiebedarf, der in den Stationen beim Be- oder Entladen der Drohne entsteht. Im „Docking“-Modul wird, ähnlich zum „Loading“-Modul, der Energiebedarf beim Ein- und Ausdocken von Drohnen bestimmt. Das „Charging“-Modul errechnet im „Destination“-Stationsmodul die Ladezeit, die nötig ist, um die Drohne nach dem Flug wieder aufzuladen. Die im Flug umgewandelte Energie erhält das Modul aus dem „Flight Time and Drone Consumption“-Modell. Die Ladeleistung ist im Modul hinterlegt und wird anhand der Ladeströme und Spannungen verschiedener Drohnensysteme ermittelt. Mit diesen Daten wird die Dauer des Ladevorgangs bestimmt. In „Flight Route“ werden die Start- und Zielstationen ausgewählt. Hier ist eine Auswahl verschiedener Stationen hinterlegt. Im „Traffic“-Modul werden die Missionsparameter, Flugprofile, Drohnen und alle anderen Randbedingungen für die Mission festgelegt. Hier kann vorgegeben werden, wann der erste Flug des Tages startet, wie viele Flüge und mit welcher Frequenz die Flüge stattfinden sollen, welche Drohnenart verwendet werden soll, welche Sicherheits- und Verlustfaktoren zu

berücksichtigen sind und wie die Flugprofile aussehen sollen. Der Energiebedarf wird exemplarisch für drei Missionen in Abbildung 2 für einen Zeitraum von 24 Stunden dargestellt.

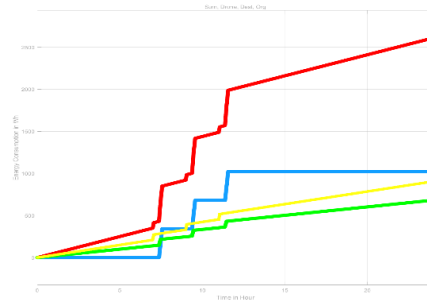


Abbildung 2: Energiebedarf ausgewählter Missionen; die rote Kurve repräsentiert den gesamten ermittelten Energiebedarf aus „Origin“, „Destination“ und „Drone Energy Consumption“

3.2.4. Wechselwirkungen der Subsysteme

Im Projekt i-LUM ist ein Workflow zur Gesamtsystemsimulation definiert worden, welcher in Form drei seriell verschalteter Teilworkflows untergliedert ist. Der erste Teilworkflow entspricht der ersten *Iteration* zur Ableitung von Szenarien, Nachfragemodellierung und Ermittlung möglicher Standorte. Als Ergebnis dieses Teilworkflows wird eine Liste von Missionen erstellt, aus der sämtliche UAM Verkehrsbewegungen für die weitere Simulation resultieren. Diese Daten dienen als Eingabeparameter für den zweiten Teilworkflow, welcher in Abbildung 3 dargestellt wird. In diesem Teilworkflow wird auf Basis des Szenarios eine vollständige Auslegung der lokalen Topologien durchgeführt, sodass als Ergebnis für alle untersuchten Standorte das jeweilige Design hinsichtlich der Anordnung von Landeflächen, Parkpositionen, Gates und Taxiwegen vorliegt. Dazu werden die Eingabedaten zunächst an das in Abbildung 3 mittig angeordnete Modell zur Netzwerkoptimierung und Umlaufplanung übermittelt. Analog zum Vorgehen aus Swaid et al. wird hier auf Basis einer Vehikelumlaufplanung mit unbegrenzter Anzahl von verfügbaren Vehikeln eine Flottenauslegung durchgeführt, sodass die benötigte Flotte inklusive aller Betriebspläne vorliegt, um das Nachfrageszenario auszuführen [19]. Dazu werden vom Modell für elektrische Energiesysteme über die vorwärts gerichtete Datenverbindung F1 Vehikel-spezifische Charakteristika bereitgestellt, um die Missionspläne der Vehikel unter Einhaltung energetischer und zeitlicher Vorgaben erstellen zu können. Dazu zählen insbesondere die Batteriekapazität, welche die maximale Reichweite eines Vehikels begrenzt, die elektrische Leistungsaufnahme pro Missionsphase, sowie die zeitlichen Abhängigkeiten der Batterieladeprozesse am Boden. Mit Fertigstellung der Flottenauslegung und Umläufe können schließlich die Anforderungen an das elektrische Netz und an die lokalen Vehikelabfertigungsprozesse bestimmt werden. Über die

rückwärts gerichtete Datenverbindung R1 werden die resultierenden Lastverläufe zurück an das Modell für elektrische Energiesysteme gesendet, um die lokalen Anforderungen an das elektrische Netz durch die aufgetragenen Batterieladeströme zu analysieren. Über die vorwärts gerichtete Datenverbindung F2 werden für alle Positionen die lokalen Anforderungen übermittelt, welche sich über den Tag hinweg an die Bodeninfrastruktur durch die Abfertigung von Vehikeln ergibt. Als Kenngrößen zur topologischen Auslegung können beispielsweise die Anzahl abzufertigender Verkehrsbewegungen pro Minute dienen, sowie die Anzahl der lokal parkenden Vehikel. Aus diesen Anforderungen werden schließlich die optimierten Topologien berechnet, woraus sich beispielsweise der Gesamtflächenbedarf der Infrastruktur für nachgelagerte Kosten-Nutzen-Betrachtungen ableiten lässt. Zudem werden die Missionspläne aller Vehikel für eine nachgeschaltete Trajektorienberechnung, Dekonfigierung und Gesamtsystembewertung an den nachfolgenden, dritten Teilworkflow weitergegeben.

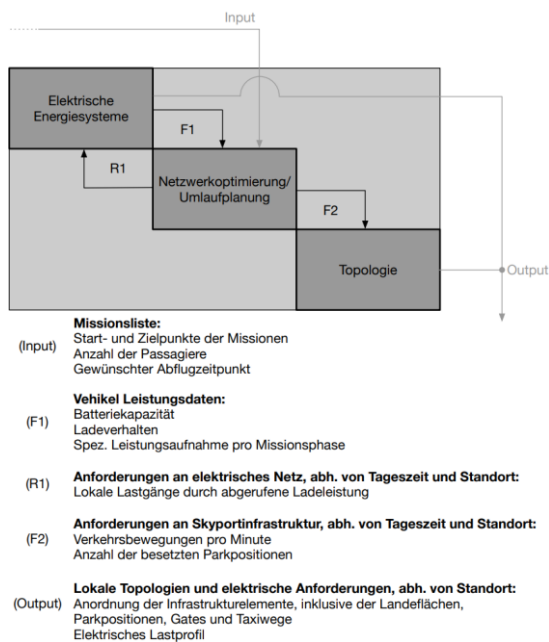


Abbildung 3: Wechselwirkungen zwischen den Tools der bodengebundenen Infrastruktur

4. ZUSAMMENFASSUNG

Dieses Paper präsentiert die methodischen Einzelelemente und ihre logischen Zusammenhänge sowie ihre Einbindung in die Möglichkeit einer simulativen Infrastrukturanalyse. Diese Arbeit leistet methodische Bausteine als Beitrag zum Aufbau einer UAM Gesamtsystemsimulation, um sowohl Zukunftsrobustheit als auch Nachvollziehbarkeit der zukünftigen Entwicklungen gewährleisten zu können. In der Evaluation der methodischen Gesamtanalyse zeigt sich, dass die Privatisierung als ökonomischer Haupttreiber für die Nachfragemodellierung sinnvoll ist. Limitationen finden sich in der fehlenden finalen Evaluation der Szenarien. Die Eingrenzung auf spezifische Ziele ist subjektiv beeinflusst im Sinne einer Stakeholderorientierung, obwohl die

Möglichkeitsräume theoretisch unbegrenzt sind. Oftmals tritt in diesem Hinblick eine Vernachlässigung von Nachhaltigkeitsdimensionen, Modal Split sowie neuen Pfadentwicklungen auf. In der Betrachtung des Gesamtsystems werden tiefe Analysevorgänge oftmals stärker fokussiert, als die Maximierung des allgemeinen Nutzens. Die Verwendung von Szenariotechnik und entsprechenden Methodiken hat in dieser Arbeit dazu geführt, dass Einflüsse und Randbedingungen für konkrete technische Entwicklungen – wie hier die Missionsplanung, Topologie, MRO und das Energiemanagement – objektiv, nachvollziehbar sowie strukturiert herbeigeführt werden konnten. Im Ausblick zeigt sich die Möglichkeit einer empirischen Evaluation sowie die Einbindung des Teilworkflows in einen UAM Gesam workflow, um weitere Synergieeffekte strukturiert identifizieren zu können.

5. DANKSAGUNG

Dieses Konferenz-Paper basiert auf Arbeiten im Verbundprojekt i-LUM (innovative Luftgestützte Urbane Mobilität). Das Vorhaben wird gefördert von der Landesforschungsförderung Hamburg im Rahmen der HamburgX-Projekte.

6. LITERATUR

- [1] Börjeson, L., Höjer, M., Dreborg, K. H., Ekvall, T., & Finnveden, G. (2006). Scenario types and techniques: towards a user's guide. *Futures*, 38(7), 723-739.
- [2] Brown, J. (2010). The world café: Shaping our futures through conversations that matter. *ReadHowYouWant.com*.
- [3] EASA (2015). Acc Acceptable Means of Compliance (AMC) and Guidance Material (GM) to Annex II (PART-145) to Regulation (EU) No 1321/2014. Issue 2. Annex II to ED Decision 2015/029/R.
- [4] EASA (2021). Second Publication of Proposed Means of Compliance with the Special Condition VTOL. Doc. No: MOC-2 SC-VTOL Issue: 1.
- [5] Eltgen, J. & Schüppstuhl, T. (2022). Technical concepts for inspecting UAVs for damage. In 33th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS 2022. ICAS. Stockholm, Schweden.
- [6] Eltgen, J. & Schüppstuhl, T. (2023). MROPort for Airworthiness Checks of VTOLs in a Future-Proof Environment. In: AIAA Aviation 2023, San Diego, USA.
- [7] Gausemeier, J., Fink, A., Schlake, O. (1998). Scenario management: An approach to develop future potentials. *Technological Forecasting and Social Change*, 59(2).
- [8] Kloock-Schreiber, D., Swaid, M., Gollnick, V., Fay, A., Niklaß, M. (2022). Innovative urban air mobility from the perspective of the Hamburg metropolitan region.
- [9] López Baeza, J., Noennig, J. R., Weber, V., Grignard, A., Noyman, A., Larson, K., ... & Baldauf, U. (2020). Mobility Solutions for Cruise Passenger Transfer: An Exploration of Scenarios Using Agent-Based Simulation Models. *Towards User-Centric Transport in Europe 2: Enablers of Inclusive, Seamless and Sustainable Mobility*, 89-101.
- [10] Maget, C., Gutmann, S., and bogenberger, K. "Model-based evaluations Combining Autonomous Cars and a Large-Scale Passenger Drone Service: the bavarian Case Study." 2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC 2020, rhodes, Greece, 20-23 September 2020.
- [11] Mavraj, G., Eltgen, J., Fraske, T., Swaid, M., Berling, J., Röntgen, O., Fu, Y., & Schulz, D. (2022). A systematic review of ground-based infrastructure for the innovative urban air mobility. *Transactions on Aerospace Research*, 2022(4), 1-17.

[12] Mavraj, G., Fu, Y., Avdevičius, E., & Schulz, D. (2022). Analyse von Energieverbrauchsmodellen für elektrisch betriebene Transportdrohnen. *Hamburger Beiträge zum technischen Klimaschutz*.

[13] Niklaß, M., Dzikus N., Swaid M., Berling J., Lührs B., Lau A. Terekhov I., and Gollnick V. (2020). "A Collaborative Approach for an Integrated Modeling of Urban Air Transportation Systems," *Aerospace 2020*, 7, 50; doi: 10.3390/aerospace7050050

[14] Park, B. T., Kim, S. H. (2022). Vertiport Design Optimization using Integer Programming. 2022 IEEE/AIAA 41st Digital Avionics Systems Conference (DASC). DOI: 10.1109/DASC55683.2022.9925809

[15] Peter, M., Glatthaar, M., & Mau, O. (2017). Erreichbarkeiten in der Metropolregion Hamburg. (siehe online: www.geoportal-hamburg.de)

[16] Ploetner, K. O., Al Haddad, C., Antoniou, C., Frank, F., Fu, M., Kabel, S., ... & Zhang, Q. (2020). Long-term application potential of urban air mobility complementing public transport: an upper Bavaria example. *CEAS Aeronautical Journal*, 11, 991-1007.

[17] Preis, L. (2021). Quick Sizing, Throughput Estimating and Layout Planning for VTOL Aerodromes – A Methodology for Vertiport Design. *AIAA AVIATION 2021 FORUM*. DOI: 10.2514/6.2021-2372

[18] Stover, J. G., & Gordon, T. J. (1978). Cross-impact analysis. *Handbook of futures research*, 301-327.

[19] Swaid, M., Pertz, J., Niklaß, M. and Linke, F. (2023). "Optimized capacity allocation in a UAM vertiport network utilizing efficient ride matching", *AIAA Aviation 2023 Forum*; <https://doi.org/10.2514/6.2023-3577>

[20] Taylor, M., Saldanli, A., Park, A. (2020). Design of a Vertiport Design Tool. 2020 Integrated Communications Navigation and Surveillance (ICNS) Conference.

[21] Vascik, P. D., Hansman, R. J. (2019). Development of Vertiport Capacity Envelopes and Analysis of their Sensitivity to Topological and Operational Factors. *AIAA SciTech 2019 Forum in San Diego, CA*. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2019-0526>

[22] Wu, Z. and Zhang, y. "Integrated Network Design and Demand Forecast for on-Demand Urban Air Mobility." *Engineering* Vol. 7, No. 4 (April 2021): pp. 473–487.

[23] X. Peng, V. Bulusu and R. Sengupta, "Hierarchical Vertiport Network Design for On-Demand Multi-modal Urban Air Mobility," 2022 IEEE/AIAA 41st Digital Avionics Systems Conference (DASC), Portsmouth, VA, USA, 2022, pp. 1-8, doi: 10.1109/DASC55683.2022.9925782.

[24] Zelinski, S. (2020). Operational Analysis of Vertiport Surface Topology. 2020 IEEE/AIAA 39th Digital Avionics Systems Conference (DASC), 10.1109/DASC50938.2020.9256794

A. ANHANG

Vertiports	
▲ 1 - Hbf	★ 31 - Stade
▲ 2 - Finkenwerder	★ 32 - Seevetal
▲ 3 - Flughafen	★ 33 - Pinneberg
▲ 4 - Altona Bhf	★ 34 - Ahrensburg
▲ 5 - Messe	★ 35 - Buxtehude
▲ 6 - Elbphilharmonie	★ 36 - Winsen Luhe
▲ 7 - Stadtpark	★ 37 - Buchholz
▲ 8 - Schwarze Berge Wildpark	★ 38 - Reinbek
▲ 9 - TUHH/InnoPort	★ 39 - Henstedt-Ulzburg
▲ 10 - Helmholtz Geesthacht	◇ 40 - Wedel
● 11 - Uni HH	◆ 41 - Bad Oldesloe
● 12 - Geesthacht	◆ 42 - Kaltenkirchen
● 13 - Rosengarten	◆ 43 - Quickborn
● 14 - Drochtersen	◆ 44 - Bad Segeberg
● 15 - Glinde	◆ 45 - Schenefeld
● 16 - Bleckede	◆ 46 - Stage Theater
● 17 - Jork	◆ 47 - Cruise Center Steinwerder
● 18 - City Nord	◆ 48 - Cruise Center Baakenhöft
● 19 - City Süd	◆ 49 - Cruise Center Altona
□ 20 - Innenstadt (Ost)	▼ 50 - Reeperbahn
■ 21 - Otto Bramfeld	▼ 51 - Volkspark
■ 22 - NDR Lokstedt	▼ 52 - Hbf (Hub)
■ 23 - UKE Eppendorf	▼ 53 - Finkenwerder (Hub)
■ 24 - Mercedes Hausbruch	▼ 54 - Hotel 1
■ 25 - Philips Ohlsdorf	▼ 55 - Hotel 2/Laeiszhalle
■ 26 - Beiersdorf Eimsbüttel	▼ 56 - Hotel 3
■ 27 - Billbrook (Still)	□ Landesgrenze Hamburg
■ 28 - Elmshorn	
■ 29 - Neu Wulmstorf	
★ 30 - Norderstedt	

Hintergrundkarte:
(c) OpenStreetMap

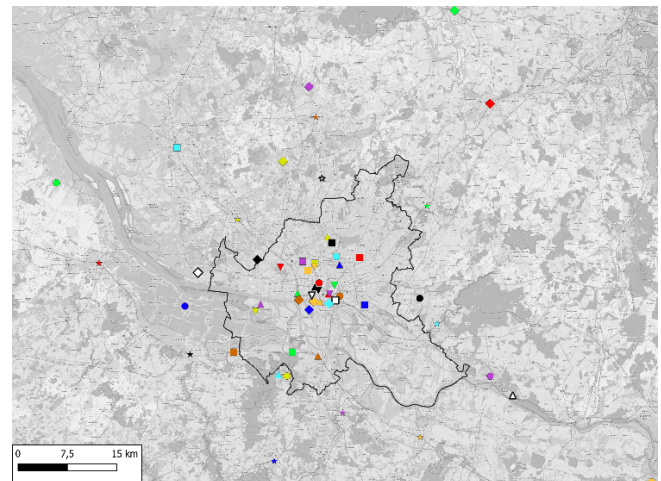


Abbildung 4: Karte von Vertiportstandorten in Hamburg, Deutschland, und Umgebung aus der Szenarienanalyse