



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Sibel Simlaghai Asl

Entwicklung eines eVTOL-Konzepts für den Großraum Hamburg

*Fakultät Technik und Informatik
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Automotive and
Aeronautical Engineering*

Sibel Simlaghai Asl

**Entwicklung eines eVTOL-Konzepts für
den Großraum Hamburg**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Flugzeugbau
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer: Herr Prof. Dr. Alexander Frenkel

Zweitprüferin: Frau Prof. Dr. Jutta Abulawi

Abgabedatum: 09.10.2023

Zusammenfassung

Sibel Simlaghai-Asl

Thema der Bachelorthesis

Entwicklung eines eVTOL-Konzepts für den Großraum Hamburg

Stichworte

eVTOL-Flugzeug, Lufttaxi, autonomes Fliegen, Elektromobilität, Urbane Luftmobilität, Hamburg

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit umfasst die konzeptionelle Entwicklung elektrisch angetriebener Kleinflugzeuge für den Hamburger Raum. Ziel ist es, eine weitere Möglichkeit der Mobilität für die Bewohner: innen Hamburgs zu bieten und das schnelle Hinterlegen von Routen zu gewährleisten. Ein abschließendes Geschäftsmodell wird die Umsetzung eines Konzepts im Hamburger Raum verdeutlichen und die bestehenden Kosten veranschaulichen.

Name of Student

Sibel Simlaghai-Asl

Title of the paper

Development of an eVTOL concept for Hamburg

Keywords

eVTOL-Aircraft, airtaxi, autonomous flying, electromobility, Urban mobility, Hamburg

Abstract

This work involves the conceptual development of electrically powered small aircrafts for Hamburg. The aim is to provide an additional mobility for the residents of Hamburg and ensure quick routing. A final business model will illustrate the implementation of a concept in the Hamburg area and specify the existing costs.

Vorwort

Das Fliegen in der heutigen Zeit war vor vielen hundert Jahren noch ein Traum für die Menschheit. Von flugunfähigen Modellen, die dem Vogelverhalten ähnlich kommen, bis zu den ersten Flügen, eins ist klar, die Geschichte der Luftfahrt leistet einen großen Wandel in der Mobilitätswelt. Eine große Aufmerksamkeit hat sich in den letzten Jahren den kleinen Fluggeräten, den Drohnen gewidmet. Die unbemannten, ferngesteuerten Flugkörper kommen in unterschiedlichsten Einsatzgebieten vor. Insbesondere ist der Einsatz für die Fotografie und Luftaufnahme sehr effizient, auch die Paketzustellung und Lieferung von Medikamenten können sehr schnell erfolgen (Wolf, 2019). Nun ist schon länger nicht mehr nur der Transport von Gütern von Bedeutung. Seit einigen Jahren ist auch die Beförderung von Personen über kleine Drohnen-Fluggeräte in Sicht. Es befinden sich derzeit viele Ideen und Modelle auf dem Markt und werden hinsichtlich ihrer Funktionalität getestet und verbessert. Der Durchbruch der sogenannten Flugtaxis wird in Zukunft die Mobilitätswelt ergänzen.

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle herzlich bei allen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Bachelorarbeit unterstützt haben. Mein besonderer Dank geht meinem Betreuer, der mich wöchentlich mit inhaltlichem Rat, wertvollen Einsichten und konstruktivem Feedback begleitet hat und mir stets ein vertrauenswürdiger Professor ist. Ebenso möchte ich mich bei denen bedanken, die sich großzügig dazu bereit erklärt haben, an meinen Umfragen teilzunehmen. Zuletzt möchte ich meiner Familie, meinen Freunden und meinem Partner meinen tiefsten Dank aussprechen. Vielen Dank, dass ihr mich in dieser Zeit stets ermutigt und motiviert und mich in schwierigen Momenten des Studiums getröstet habt. Ohne eure Unterstützung hätte ich dieses Studium nicht erfolgreich abschließen können.

Nochmals vielen Dank an alle!



Kurzzusammenfassung

In dieser Arbeit werden drei technische Konzepte für ein elektrisches vertical take off and landing Fluggerät (eVTOL) entworfen. Die Entwicklung der Konzepte erfolgt gemäß den Richtlinien VDI2221. Insbesondere werden die technischen Hintergründe und die Funktionsweise des eVTOLs im Vordergrund stehen. Zunächst wird eine Analyse des aktuellen Stands der Technik durchgeführt. Bereits bestehende Konzepte werden erläutert und ungelöste Probleme und Herausforderungen der eVTOLs identifiziert. Für die Umsetzung des Konzeptes werden insbesondere die Wünsche und Anforderungen der Bewohner: innen in Hamburg als Grundlage berücksichtigt. Basierend auf dieser Umfrage, werden drei Konzepte entwickelt und eine umfassende Beschreibung der technischen Systeme und ihrer Funktionsweise erläutert. Die Konzepte werden im Anschluss kritisch analysiert und es werden mögliche Lücken hervorgehoben. Die Ausarbeitung enthält auch Ideen zur Umsetzung eines Konzeptes in Hamburg und liefert einen Entwurf für ein zukünftiges Geschäftsmodell.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------------|
| Abbildungsverzeichnis | II |
| Tabellenverzeichnis | VI |
| Symbolverzeichnis | VII |
| Abkürzungsverzeichnis | IX |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Motivation | 1 |
| 1.2 Vorgehensweise | 1 |
| 1.3 Zielsetzung | 1 |
| 2 Aktueller Stand der Technik | 2 |
| 2.1 Definition eVTOL | 2 |
| 2.2 Herausforderungen von eVTOL..... | 4 |
| 2.3 Konzepte zu eVTOL | 4 |
| 2.4 VoloCity | 7 |
| 2.5 Lilium-Jet | 8 |
| 2.6 CityAirbus NextGen | 10 |
| 2.7 Vergleich der Prototypen | 11 |
| 3 Marktanalyse | 13 |
| 4 Konzeptentwicklung | 17 |
| 4.1 Anforderungsanalyse..... | 17 |
| 4.2 Funktionsanalyse..... | 25 |
| 4.3 Morphologischer Kasten | 28 |
| 4.4 Konzeptbeschreibung | 32 |
| 4.4.1 Der eSIM-Hexacopter (eSIMHC) | 33 |
| 4.4.2 Der eSIM-Jet (eSIMJT)..... | 42 |
| 4.4.3 eSIM-Prop (eSIMPP)..... | 52 |
| 4.5 Nutzwertanalyse | 62 |
| 5 Geschäftsmodell | 72 |
| 5.1 Einführung | 72 |
| 5.2 Infrastruktur | 72 |
| 5.2.1 Definition Vertiport | 72 |
| 5.3 Kostenanalyse | 84 |
| 6 Zusammenfassung, Fazit und Ausblick | 90 |
| Literaturverzeichnis | 99 |
| Anhangsverzeichnis | 113 |
| Selbstständigkeitserklärung | 114 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1 Kategorisierung von eVTOL Fluggeräten (Ugwueze et al., 2023) | 2 |
| Abbildung 2 Flugphasen eVTOL (Eigene Darstellung) | 3 |
| Abbildung 3 Tesla eVTOL Concept von Alwin Sagstuen (EVTOL.News, 2022) | 4 |
| Abbildung 4 Aeroxo LV ERA Aviabike (EVTOL.News, 2020) | 5 |
| Abbildung 5 Aergility Atlis Gen 1 (EVTOL.News, 2019) | 5 |
| Abbildung 6 CityJumper (EVTOL.News, 2023 B). | 6 |
| Abbildung 7 Investitionen in Flugtaxi-Startups weltweit (Bocksch, 2022). | 6 |
| Abbildung 8 VoloCity: Das erste Flugtaxi von Volocopter (Etherington, 2019) | 7 |
| Abbildung 9 7-Sitzer Lilium Jet (McIntosh, 2021) | 8 |
| Abbildung 10 Konfiguration für 6 Passagiere (McIntosh, 2021) | 9 |
| Abbildung 11 Kabine mit 4 Sitzplätzen (McIntosh, 2021) | 9 |
| Abbildung 12 Der CityAirbus NextGen (Memon, 2023) | 10 |
| Abbildung 13 Stauranking im Jahr 2021 (Meyer-Wellmann, 2022)..... | 13 |
| Abbildung 14 Aktuelle Verkehrslage in Hamburg 29.09.23, 17:25 Uhr (Hamburg, 2023) | 14 |
| Abbildung 15 Hamburg Stadtkarte (Hildebrandt, 2023) | 15 |
| Abbildung 16 Personengruppen von 101 Befragten Hamburger: innen (Simlaghai-Asl, 2023) | 17 |
| Abbildung 17 Mobilität der 101 befragten Hamburger: innen (Simlaghai- Asl, 2023) | 18 |
| Abbildung 18 Kostenloser Flug (Simlaghai-Asl, 2023)..... | 18 |
| Abbildung 19 Bewertung von Aussagen (Simlaghai-Asl, 2023)..... | 19 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 20 Entwicklungsaspekte (Simlaghai-Asl, 2023) | 20 |
| Abbildung 21 Funktion der eVTOL Nutzung (Simlaghai-Asl, 2023) | 20 |
| Abbildung 22 Kosten pro Flug-Minute (Simlaghai-Asl, 2023) | 21 |
| Abbildung 23 Flugrouten (Simlaghai-Asl, 2023) | 21 |
| Abbildung 24 Wünsche/Ideen/Anforderungen der Kunden (Simlaghai-Asl, 2023) | 22 |
| Abbildung 25 Funktionsanalyse..... | 27 |
| Abbildung 26 Darstellung von drei Konzeptlösungen im Morphologischen Kasten | 29 |
| Abbildung 28 3D-Ansicht eSIMHC (Eigene Darstellung) | 33 |
| Abbildung 29 Vorderansicht eSIMHC (Eigene Darstellung) | 34 |
| Abbildung 30 Draufansicht eSIMHC (Eigene Darstellung) | 34 |
| Abbildung 31 Querschnitt eSIMHC (Eigene Darstellung) | 35 |
| Abbildung 32 3D-Ansicht eSIMJT (Eigene Darstellung) | 42 |
| Abbildung 33 Vorderansicht des eSIMJTs (Eigene Darstellung) | 43 |
| Abbildung 34 Einfahren einer Rollstuhlfahrenden Person in den eSIMJT (Eigene Darstellung)..... | 44 |
| Abbildung 35 Platzierung einer Rollstuhlfahrenden Person in der Kabine des eSIMJTs (Eigene Darstellung)..... | 44 |
| Abbildung 36 Das Fly-by-wire System von Honeywell (Honeywell, 2023)..... | 49 |
| Abbildung 37 Beispiel einer Sensorbox der Roland-Bosch GmbH (Ebberg, 2019) | 50 |
| Abbildung 38 3D-Ansicht eSIMProp (Eigene Darstellung)..... | 52 |
| Abbildung 39 Vorderansicht eSIMPP mit einer Neigung von 0° (Eigene Darstellung)..... | 53 |
| Abbildung 40 Draufsicht eSIMPP mit einer Neigung von 0° (Eigene Darstellung) | 53 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 41 Vorderansicht des eSIMPP mit einer Neigung von 90° (Eigene Darstellung)..... | 53 |
| Abbildung 42 Gewichtung der Bewertungskriterien..... | 65 |
| Abbildung 43 Bewertung der drei Konzepte | 66 |
| Abbildung 44 Flugweg eVTOL beim starten (Tauszig, 2022) | 73 |
| Abbildung 45 Kategorie Enhanced: Sicheres fliegen und landen nach einer Katastrophe (Tauszig, 2022) | 73 |
| Abbildung 46 EASA-Konzept: Sicher Landen und Starten (Tauszig, 2022) | 74 |
| Abbildung 47 Bezirk Wandsbek: Decathlon Dach (Scheck et al., 2023)..... | 75 |
| Abbildung 48 Bezirk Bergedorf: City-Center-Bergedorf (Goldschmidt, 2023)..... | 76 |
| Abbildung 49 Bezirk Harburg: Phönix-Center (Küster, 2023) | 76 |
| Abbildung 50 Bezirk Altona: IKEA (Tchoban et al., 2014) | 77 |
| Abbildung 51 Bezirk Altona: Barclays Arena (Frommhold, 2023)..... | 77 |
| Abbildung 52 Bezirk Altona: Blankenese, Falkensteiner Ufer (Ludowig B)..... | 78 |
| Abbildung 53 Bezirk Eimsbüttel: Hagenbecks Tierpark (Google Maps, 2023 A) .. | 78 |
| Abbildung 54 Bezirk Hamburg-Mitte: Hafencity (Astoc)..... | 79 |
| Abbildung 55 Bezirk Hamburg Mitte: Restaurant Alex am Jungfernstieg (RestaurantGuru, 2023)..... | 80 |
| Abbildung 56 Bezirk Hamburg Mitte: Restaurant ALEX Seitenansicht (Schulz, 2020) | 80 |
| Abbildung 57 Bezirk Hamburg Mitte: Hauptbahnhof (Baum et al., 2019) | 81 |
| Abbildung 58 Bezirk Hamburg-Mitte: Finkenwerder (Google Maps, 2023 B) | 82 |
| Abbildung 59 Bezirk Hamburg Nord: Flughafen (Rosenburg, 2022)..... | 82 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 60 Vertiports pro Bezirk in Hamburg..... | 83 |
| Abbildung 61 Flugrouten-Schema zwischen dem Hauptbahnhof und den Bezirken (Eigene Darstellung)..... | 84 |
| Abbildung 62 Route Hauptbahnhof-Flughafen (Google Maps, 2023 C) | 85 |
| Abbildung 63 Der eSIM-Hexacopter, der eSIM-JET und der eSIM-Prop (Eigene Darstellung)..... | 91 |
| Abbildung 64 Darstellung der Vertiports in Hamburg..... | 93 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1 Daten und Eigenschaften von VoloCity, Liliu Jet und CityAirbus NextGen | 11 |
| Tabelle 2 Darstellung der drei Konzeptlösungen im Vergleich | 29 |
| Tabelle 3 Merkmale der Konzepte..... | 60 |
| Tabelle 4 Kilometeranzahl der Routen | 87 |
| Tabelle 5 Informationen zum Geschäftsmodell..... | 88 |
| Tabelle 6 Zusammenfassung der Konzept-Eigenschaften | 92 |
| Tabelle 7 Zusammenfassung des Geschäftsmodells | 94 |

Symbolverzeichnis

| Symbol | Einheit | Beschreibung |
|---------------------|------------------|---|
| $A_{Propeller}$ | m ² | Rotationsfläche der Propeller |
| $B_{Kapazität,S}$ | kWh | Batterie Kapazität für den Schwebeflug |
| $B_{Energiedichte}$ | Wh/kg | Batterie Energiedichte |
| F_A | N | Auftriebskraft |
| g | m/s ² | Erdbeschleunigung |
| G_{eSIMHC} | N | Masse des eSIMHC |
| G_{eSIMJT} | N | Masse des eSIMJT |
| G_{eSIMPP} | N | Masse des eSIMPP |
| $K_{Herstellun}$ | € | Herstellungskosten |
| K_{Ticket} | € | Kosten pro Flugminute |
| m_{Pax} | kg | Masse der Passagiere |
| $MTOW$ | kg | Maximale Startmasse |
| $P_{A,erf}$ | kW | Erforderliche Antriebsleistung beim senkrechtem Start |
| $P_{B,erf}$ | kW | Erforderliche Batterieleistung beim senkrechten Start |
| P_M | kW | Tatsächliche Leistung eines Elektromotors |
| $P_{M,erf}$ | kW | Erforderliche Leistung eines Elektromotors |
| $P_{M,erf,G}$ | kW | Erforderliche Gesamtleistung der Elektromotoren |
| S | km | Strecke |
| t_{Route} | min | Flugdauer |
| t_s | min | Schwebeflugdauer |
| U_{Flug} | € | Umsatz nach einem Flug |

| | | |
|------------------------------|------|---|
| $U1_{t=1std.}$ | € | Umsatz für eine Stunde innerhalb des ersten Flugbetriebs |
| $U2_{t=1std.}$ | € | Umsatz für eine Stunde innerhalb des zweiten Flugbetriebs |
| $U1_{Gesamt}$ | € | Gesamtumsatz im ersten Flugbetrieb |
| $U2_{Gesamt}$ | € | Gesamtumsatz im zweiten Flugbetrieb |
| $U_{Gesamt,Tag}$ | € | Gesamtumsatz einer Strecke pro Tag |
| $U_{Gesamt,Vertiport}$ | € | Gesamtumsatz aller Vertiports |
| $U_{Gesamt,Vertiport,Monat}$ | € | Gesamtumsatz pro Monat |
| $U_{Gesamt,Vertiport,Jahr}$ | € | Gesamtumsatz pro Jahr |
| V_{eSIMHC} | km/h | Geschwindigkeit des eVTOLs |
| X_{eVTOL} | - | Anzahl der eVTOLs |
| $X1_{Fluganzahl1}$ | - | Anzahl Flüge im ersten Flugbetrieb |
| $X2_{Fluganzahl2}$ | - | Anzahl Flüge im zweiten Flugbetrieb |
| X_{Pax} | - | Anzahl Passagiere |
| x_M | - | Anzahl der elektrischen Motoren |
| x_P | - | Anzahl der Propeller |

Griechische Symbole

| Symbol | Einheit | Bedeutung |
|---------------|-------------------|---|
| ρ_{Luft} | kg/m ³ | Dichte der Luft |
| $\eta_{E,L}$ | - | Wirkungsgrad Elektromotor und Leistungselektronik |
| η_M | - | Wirkungsgrad Elektromotor |
| η_L | - | Wirkungsgrad Leistungselektronik |
| $\eta_{P,G}$ | - | Wirkungsgrad Propeller und Getriebe |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-------------|---|
| CFK..... | Kohlenstofffaserverstärktes Kunststoff |
| DaN..... | DekaNewton |
| Db..... | Dezibel |
| EASA..... | Agentur der Europäischen Union für Flugsicherheit |
| eSIMHC..... | electric-SIM-Hexacopter |
| eSIMJT..... | electric-SIM-Jet |
| eSIMPP..... | electric-SIM-Prop |
| eVTOL..... | electric Vertical Take-off and Landing |
| GaN..... | Gallium Nitride |
| GFK..... | Glasfaserverstärktes Kunststoff |
| Km..... | Kilometer |
| Mpa..... | Megapascal |
| MTOW..... | Maximum Take off Weight |
| PAEK..... | Polyaryletherketone |
| PAX..... | Persons approximately |
| PKW..... | Personenkraftwagen |
| RAM..... | Regional Air Mobility |
| SiC..... | Silicon Carbide |
| UAM..... | Urban Air Mobility |
| VTOL..... | Vertical Take-off and Landing |

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der technische Fortschritt in der Luftfahrt schreitet stetig voran und wird in ferner Zukunft neue Innovationen auf den Markt bringen. Eine solche Innovation hat bereits erhebliche Fortschritte gemacht: Flugtaxis, die in Science-Fiction-Filmen oft unübersehbar sind, werden bald Realität werden. Zu diesem Zeitpunkt hat sich die Technologie bereits so weit entwickelt, dass der Einsatz von VTOLs (Vertical Takeoff and Landing Aircraft) für Kurzstreckenflüge nicht mehr in weiter Ferne liegt.

1.2 Vorgehensweise

Um einen Überblick über die Arbeit zu verschaffen, erfolgt zunächst eine Analyse des aktuellen Stands der Technik. Hierbei werden insbesondere bestehende Konzepte und die verschiedenen Funktionsweisen der Prototypen hervorgehoben. Ein Vergleich der vorhandenen Technik und der aktuellen Herausforderung werden als Grundlage für den Entwurf des Konzepts genutzt. Eine weitere Basis bildet eine Umfrage, die sich mit den Anforderungen und Wünschen der Bewohner:innen Hamburgs befasst. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird durch eine Marktanalyse ermittelt, inwiefern die Implementierung von eVTOLs erfolgen kann. Im vierten Kapitel werden drei Konzepte ausgearbeitet und anschließend auf ihre Vor- und Nachteile analysiert und bewertet. Neben der Entwicklung des Konzepts wird auch eine Umsetzung des eVTOL als Geschäftsmodell vorgenommen. Hierbei werden insbesondere die Herstellungskosten pro eVTOL ermittelt.

1.3 Zielsetzung

Die Orientierung in dieser Arbeit liegt darin, dem Leser eine umfangreiche Zusammenfassung über die vorhandenen technischen Lösungen von eVTOLs zu geben. Zudem soll die Möglichkeit einer neuen Mobilitätsart, abgeleitet aus den Anforderungen der Kunden, dargestellt werden. Die Thematisierung der Probleme soll dem Leser Impulse für innovative Lösungsansätze bieten und eine ganzheitliche Betrachtung der eVTOL-Entwicklung ermöglichen.

2 Aktueller Stand der Technik

2.1 Definition eVTOL

Um im weiteren Verlauf ein Überblick über das Thema zu gewinnen, wird zunächst erläutert, was unter dem Begriff VTOL (vertical take off and landing) zu verstehen ist. Dieser englische Begriff stellt bereits den wesentlichen Unterschied zwischen VTOLs und Flugzeugen dar. VTOL-Fluggeräte können senkrecht starten und landen, Flugzeuge sind dazu nicht in der Lage. Wird solch ein Fluggerät elektrisch angetrieben, wird die Bezeichnung mit eVTOL (electric vertical take off and landing) abgekürzt. Viele Hubschrauber fallen ebenfalls in die Kategorie VTOL, da sie im Gegensatz zu Flugzeugen die vertikale Start- und Landefähigkeit besitzen, jedoch nicht zwingend elektrisch angetrieben werden. Abbildung 1 stellt eine Kategorisierung der eVTOL-Fluggeräte dar. Unterschieden werden hierbei Modelle, die Tragflächen besitzen, und solche, die keine Tragflächen haben. Fluggeräte ohne Tragflächen werden als "Multicopter" bezeichnet und werden in Abschnitt 2.4 anhand eines aktuellen Prototyps näher erläutert. Als Vectored Thrust werden die eVTOLs bezeichnet, die für das Starten und Landen und für den Reiseflug dieselben Antriebssysteme verwenden. Wird der Auftrieb und der Schub durch separate Systeme erzeugt, wird die Bezeichnung "Independent Thrust" verwendet. Die Kategorie "Combined Thrust" kombiniert die Arten "Vectored Thrust" und "Independent Thrust" (Ugwueze et al., 2023).

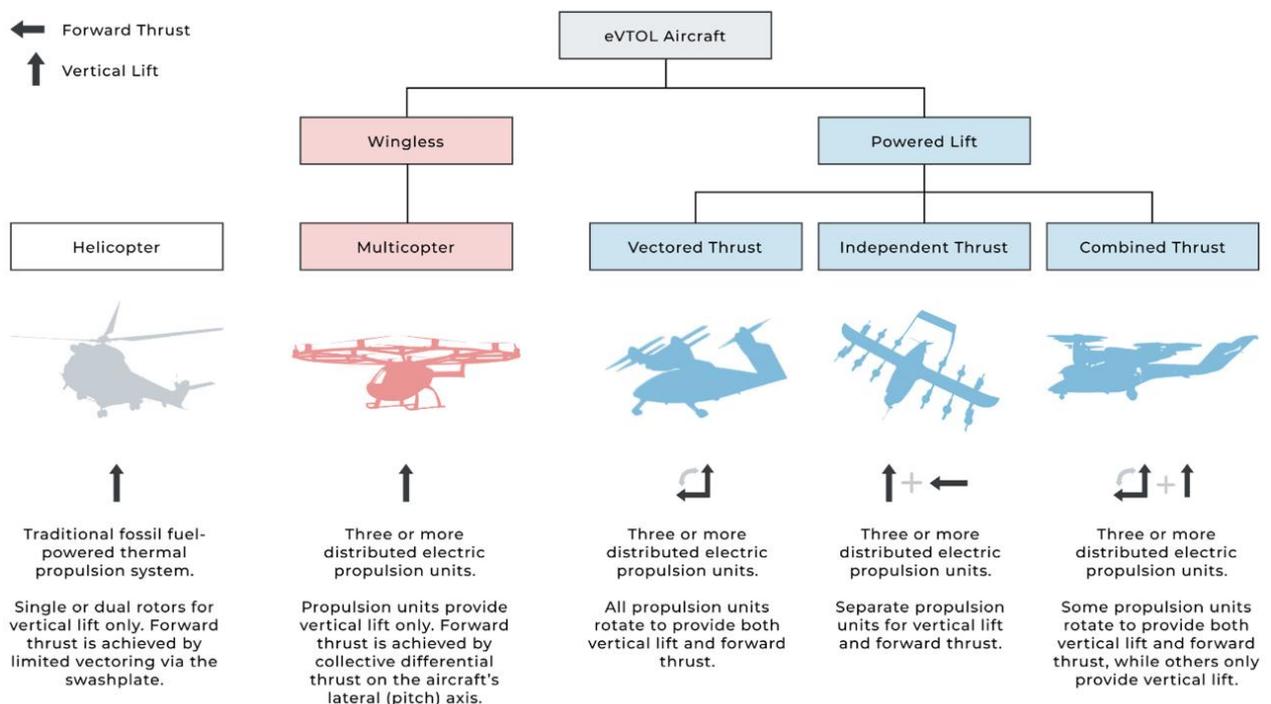


Abbildung 1 Kategorisierung von eVTOL Fluggeräten (Ugwueze et al., 2023)

Zusätzlich werden die Flugphasen eines eVTOLs in 5 Phasen unterteilt, die in Abbildung 2 zu sehen sind. In der ersten Phase erfolgt der vertikale Start, bei dem das eVTOL senkrecht in die Luft steigt. Anschließend wird in der nächsten Phase der Übergang in die horizontale Flugphase dargestellt, wobei die Flughöhe stetig erhöht wird. Diese Phase wird als "Climb" bezeichnet. Die dritte Phase setzt ein, sobald die gewünschte Reiseflughöhe erreicht ist, hierbei bleibt das eVTOL auf einer konstanten Flughöhe. In der "Descent" Phase erfolgt der Übergang vom horizontalen Flug zum vertikalen Flug. Die letzte Phase ist die vertikale Landung, bei dem das eVTOL auf einem geeigneten Landeplatz senkrecht landet (Ugwueze et al., 2023).

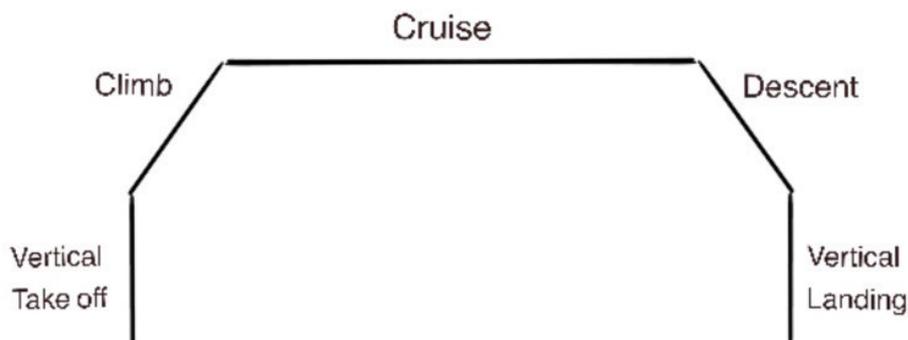


Abbildung 2 Flugphasen eVTOL (Eigene Darstellung)

Ein Fluggerät, das als eVTOL klassifiziert wird und zur Personenbeförderung von A nach B dient, wird auch als "Flugtaxi" bezeichnet. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird jedoch hauptsächlich der Begriff "eVTOL" verwendet. Dabei erfolgt hauptsächlich eine Unterscheidung in Bezug auf die Reichweite dieser eVTOL-Fluggeräte. Die Bezeichnung "UAM" steht für "Urban Air Mobility" und bezieht sich auf Flugstrecken von weniger als 100 Kilometern. Für längere Distanzen wird hingegen der Begriff "RAM" (Regional Air Mobility) verwendet (Hader et al. 2022). In ihrem Erscheinungsbild ähneln eVTOLs entweder Hubschraubern oder größeren Drohnen. Wie in herkömmlichen Taxis werden Personen über bestimmte Luftstrecken befördert, wobei eine geringe Anzahl von Sitzplätzen zur Verfügung stehen wird. Zunächst wird in der Regel ein Pilot am Bord sein. In naher Zukunft wird jedoch angestrebt, dass die Steuerung autonom über Computer und Systeme erfolgt. Wie solche eVTOLs in Zukunft aussehen können, welche Technologien dahinterstecken und welche Konzepte bereits auf den Markt existieren, wird im weiteren Verlauf der Arbeit ausführlich beschrieben (2021, Köllner).

2.2 Herausforderungen von eVTOL

Die Integration von eVTOLs bringt zahlreiche technische, ökologische, wirtschaftliche und soziale Herausforderungen mit sich. Zunächst müssen rechtliche Rahmenbedingungen und gesetzliche Vorschriften für einen sicheren und effizienten Betrieb der eVTOLs festgelegt werden. Dies umfasst auch die Festlegung von Start- und Landeplätzen, wobei aufgrund der Fähigkeit, dass eVTOLs senkrecht Starten und Landen können, keine vollständig neue Infrastruktur erforderlich ist. Die Planung von Flugrouten müssen nach festen Regeln durchgeführt werden, um höchste Sicherheit zu gewährleisten. Darüber hinaus müssen Genehmigungsverfahren geschaffen werden, um die Zertifizierung der eVTOLs zu beschleunigen (Schwerin, 2023). Aus der technischen Betrachtung müssen eVTOLs höchste Sicherheitsstandards erfüllen, dies erfordert eine hohe technische Realisierung neuer Methoden. Denn elektrische Antriebe sind zwar nachhaltiger als fossile Brennstoffe, bringen jedoch eigene Herausforderungen hinsichtlich der Leistung, der Energiedichte und der Lebensdauer mit. Zudem ist die technische Realisierung vollautonomer Flüge noch nicht auf dem Markt vorhanden, sodass der Einsatz von Piloten reguliert werden muss. Dafür müssen die Piloten trainiert und ausgebildet werden. Dies setzt hohe Kosten voraus. Um die Gesamten Kosten zu decken, müssen zunächst wohl hohe Flugpreise angesetzt werden (Baldanza, 2022). Weiterhin muss eine hohe Gesellschaftliche Akzeptanz erreicht werden, um eine erfolgreiche Implementierung der alternativen Mobilität sicherzustellen (Schwerin, 2023).

2.3 Konzepte zu eVTOL

Bisher sind umfassend viele Projekte für eVTOLs am Laufen. Insgesamt sind bereits bis zu 800 Ideen veröffentlicht worden, hierbei handelt es sich nicht bei allen Konzepten um Flugtaxi. Einige unterschiedliche Projekte werden kurz dargestellt, um die Bandbreite der Thematik hervorzuheben (EVTOL.News, 2023 A).

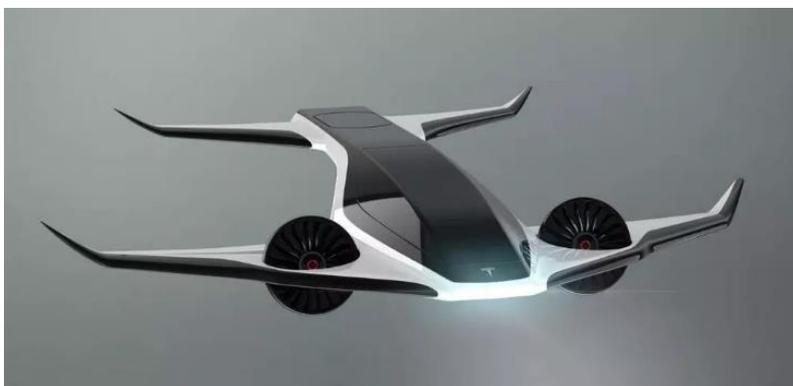


Abbildung 3 Tesla eVTOL Concept von Alwin Sagstuen (EVTOL.News, 2022)

Abbildung 3 stellt das Konzept eines Studenten aus Norwegen dar. Das Konzept hat eine Passagierkapazität von ca. 2 Personen und hat jeweils einen neigbaren Fan in den Tragflügeln, der für alle Flugbewegungen verantwortlich ist (EVTOL.News, 2022).



Abbildung 4 Aeroxo LV ERA Aviabike (EVTOL.News, 2020)

Ein weiteres Konzept, das in Abbildung 4 veranschaulicht wird, ist das Aviabike, welches vom Unternehmen Aeroxo LV in Russland entwickelt wurde. Das eVTOL ist mit insgesamt 16 Propellern ausgestattet und hat bereits im Januar 2019 erfolgreich einen Testflug in Originalgröße absolviert (EVTOL.News, 2020). In Abbildung 5 wird das Konzept Aergility aus Dunnellon, Florida, dargestellt. Das Konzept verfügt über acht Propeller für den Horizontalen und einen Schubpropeller für den Vorwärtsflug. Das Hauptanwendungsgebiet dieses Konzepts liegt in der Beförderung von Gütern in schwer zugängliche und gefährliche Gebiete (EVTOL.News, 2019).



Abbildung 5 Aergility Atlas Gen 1 (EVTOL.News, 2019)

Abbildung 6 stellt das Konzept des CityJumpers dar, welches im Jahr 2018 in Kroatien entwickelt wurde. Das Konzept soll die Kombination eines Bodenfahrzeugs und eines eVTOL Flugzeuges darstellen. Acht Propeller und acht Elektromotoren, die vorne und hinten übereinander angeordnet sind, ermöglichen den Flug in städtischen Umgebungen, während vier Autoräder für

den Einsatz im Straßenverkehr vorgesehen sind. Das Konzept wurde für die Überbrückung des Staus zur Hauptverkehrszeit entwickelt. Die voraussichtliche Betriebsaufnahme ist für das Jahr 2025 geplant (EVTOL.News, 2023 B).



Abbildung 6 CityJumper (EVTOL.News, 2023 B).

Mehr als 200 Luftfahrt Start-ups setzen sich mit eVTOL-Flugtaxi auseinander, diese Entwicklung wirft die Frage auf, welche Prototypen besonders herausstechen und inwieweit der Fortschritt einzelner Start-ups tatsächlich ist (Menn, 2023). In Abbildung 7 werden die Gesamtinvestitionen in Flugtaxi-Startups bis zum Jahr 2021 dargestellt. Unter den aufgeführten Prototypen sind auch zwei deutsche Unternehmen, nämlich Lilium und Volocopter, die als zu den am weitesten entwickelten Prototypen in dieser Branche gehören (Bocksch, 2022).

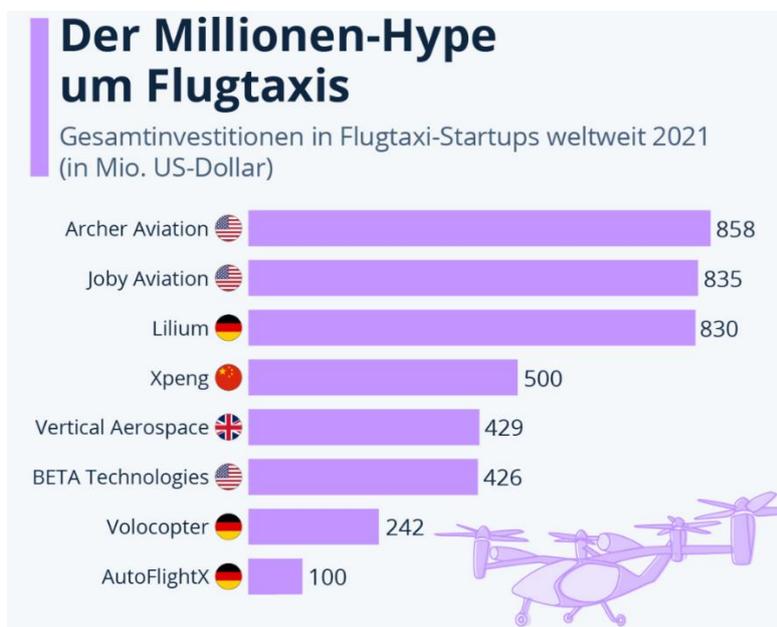


Abbildung 7 Investitionen in Flugtaxi-Startups weltweit (Bocksch, 2022).

In den nachfolgenden Abschnitten werden nun die drei Prototypen dargestellt. Anschließend erfolgt ein Vergleich dieser Prototypen, um ihre jeweiligen Merkmale und Eigenschaften herauszuarbeiten.

2.4 VoloCity

Das deutsche Startup Volocopter sitzt in Bruchsal in Baden-Württemberg, hat ca. 500 Mitarbeiter und beschäftigt sich mit unterschiedlichsten eVTOL Diensten (Menn, 2023). Dazu gehören die Langstrecken-Passagierflugzeuge (VoloRegion), die Schwerlastfrachtdrohnen (VoloDrohne) und die Passagierlufttaxis (VoloCity) (Volocopter, 2023).



Abbildung 8 VoloCity: Das erste Flugtaxi von Volocopter (Etherington, 2019)

Der autonome VoloCity kann eine Geschwindigkeit von 110 km/h erreichen und hat eine Reichweite von 35 Kilometern. Die Passagierkapazität beträgt zwei Personen einschließlich deren Handgepäck. Es ist zu beachten, dass derzeit noch ein Pilot an Bord sein wird, aber in Zukunft eine voll-autonome Steuerung angestrebt wird. Die maximale Nutzlast beträgt 200kg und das Leergewicht 700kg. Das Material setzt sich aus Verbundwerkstoffen zusammen. Insgesamt verfügt der VoloCity über 18 Rotoren und Motoren, die durch Lithium-Ionen-Batterien versorgt werden. Hierfür sind 9 Batterie Packs vorhanden. Die Batterien sind austauschbar, die Ladezeit beträgt in etwa 5 Minuten. Darüber hinaus sorgt das Leitwerk für eine zusätzliche Flugstabilität und soll weiteren Auftrieb erzeugen. Durch die redundante Auslegung wird eine maximale Sicherheit geboten (Volocopter, 2019).

Nun hat Volocopter die Produktion in Bruchsal eröffnet, um nächstes Jahr 2024 startklare Flieger bereitstellen zu können. Es fehlt nur noch die Zertifizierung, die nach Herr Dirk Hoke, CEO von Volocopter, nah bevorsteht. „Wir werden mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit im zweiten Quartal 2024 zertifiziert“ (Menn, 2023). Die Zertifizierung umfasst die Musterzulassung, bei der die Überprüfung der eingehaltenen Bauvorschriften für den Flugzeugtyp erfolgt, die Genehmigung

des Flugbetriebes, das Ausstellen von Pilotenlizenzen und das Zulassen von Landeplätzen. Je nachdem wie groß die Nachfrage ist, können bis zu 50 VoloCitys pro Jahr gebaut werden. Zunächst werden die Flugtaxis mit Piloten getestet und später mit zwei Passagieren betrieben. Geplant ist, wenn die Zertifizierung rechtzeitig erfolgt, 2024 bei den Olympischen Spielen in Paris zu fliegen (Menn, 2023).

2.5 Lilium-Jet

Lilium ist neben Volocopter der Spitzenreiter im Bereich elektrisch betriebener Senkrechtstarter. Allerdings hat sich die ursprüngliche Idee vom Flugtaxi im Laufe des Prozesses verändert. So betont Klaus Roewe, CEO von Lilium: „Wir sind kein Lufttaxi“. Dafür sei wohl der Cashflow zu gering und die Komplexität zu hoch. Die Lilium Jets sollen nun hauptsächlich regionale Flüge übernehmen (NTV, 2023).



Abbildung 9 7-Sitzer Lilium Jet (McIntosh, 2021)

Das eVTOL ist somit nicht für Kurzstrecken innerhalb einer Stadt gedacht, Lilium sieht Entfernungen zwischen 40 und 200 km für ihren Jet vor. In Zukunft soll die Entfernung bis auf 500 km ausgeweitet werden, somit fallen die Lilium-Jets in die Kategorie RAM.

Der Lilium Jet kann für unterschiedliche Einsatzzwecke angepasst werden. Die Kabinenkonfiguration kann Platz für bis zu 6 Passagiere bieten oder alternativ mit 4 Sitzen ausgestattet werden. Die folgenden Abbildungen veranschaulichen eine solche Konfigurationsmöglichkeit.



Abbildung 10 Konfiguration für 6 Passagiere (McIntosh, 2021)



Abbildung 11 Kabine mit 4 Sitzplätzen (McIntosh, 2021)

Der Jet verfügt über vordere Canards und Hauptflügel. Das Antriebssystem besteht aus 36 Propellern, die in den schwenkbaren Tragflächen integriert sind und als Steuerflächen dienen. Als Energiequelle werden Lithium-Ionen-Batterien verwendet. Die Hauptflügelspannweite ist mit 14m begrenzt, um bestehende Hubschrauberlandeplätze zu nutzen. Für Auftrieb sind die Hauptflügel zu 60% verantwortlich, die restlichen 40% teilen sich auf die Canards und dem Rumpf

auf. Eine Geschwindigkeit von ca. 250 km/h kann erreicht werden, vorgesehen sind jedoch 300 km/h. Mit einer akustischen Auskleidung am Flügel, verspricht Lilium eine sehr geringe Lärmemission. Die Geräusche werden eingefangen, bevor sie in die Umgebung gelangen. Der Geräuschpegel wird bei Start und Landung etwa 60dB betragen (McIntosh, 2021). Zum Vergleich: Eine normale Konversation hat eine Lautstärke von 60 dB, während ein Haartrockner mit bis zu 90 dB erheblich lauter ist (Marti, 2021). Gesteuert wird das Fluggerät über ein fly-by-wire System.

2.6 CityAirbus NextGen



Abbildung 12 Der CityAirbus NextGen (Memon, 2023)

Der CityAirbus NextGen ist ein autonomes, voll elektrisch angetriebenes Flugtaxi und bietet Platz für bis zu vier Passagiere. Es ist mit acht Propellern ausgestattet und verfügt über 16 elektrische Antriebssysteme. Die Stromversorgung soll mit Lithium-Ionen-Batterien erfolgen (Head, 2021). Das eVTOL soll eine Reisegeschwindigkeit von 120 km/h erreichen und eine Reichweite von 80 Kilometern zurücklegen. Die Lärmemissionen sollen bei Start und Landungen maximal 70 Dezibel und während des Flugs 65 dB betragen (Alcock, 2023 A). Der V-förmige Heck sorgt für eine verbesserte Stabilität bei vertikalem Start und Landen. Die hinteren Rotoren können zwischen 35° und 45° geneigt werden und sorgen zu 70% für den Vorwärtsschub. Gesteuert wird das Fluggerät durch das fly-by-wire System, indem die Drehzahl, der acht Rotoren variiert wird (Memon, 2023). Als Reisehöhe werden 150 bis 450 m angestrebt. Das eVTOL kommt auch für weitere Einsatzgebiete in Frage, so soll Airbus eine Kooperation mit der norwegischen Luftrettung eingegangen sein, um den Transport medizinischer Bedarfe, wie den Transport von Organen, zu unterstützen. Anfang 2023 hat schon der Zusammenbau des CityAirbus NextGen in Donauwörth begonnen. Für erste Bodentest wird dort auch ein Testzentrum gebaut und voraussichtlich im Oktober fertiggestellt, sodass Anfang 2024 auch erste Lufttests stattfinden können (Horch, 2023).

2.7 Vergleich der Prototypen

Nachdem die drei Prototypen von Lilium, Volocopter und Airbus beschrieben wurden, wird im weiteren Verlauf der Arbeit ein Vergleich dargestellt. Hierbei werden sowohl die Gemeinsamkeiten als auch die Unterschiede hervorgehoben und in einem direkten Kontext zueinander erläutert. Zur besseren Veranschaulichung sind die technischen Daten und Merkmale der eVTOLs in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1 Daten und Eigenschaften von VoloCity, Lilium Jet und CityAirbus NextGen

| | Volocity | Lilium Jet | CityAirbus NextGen |
|-----------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Kategorie | Multicopter | Vectored Thrust | Combined Thrust |
| Architektur | Multicopter- Leitwerk | Vordere Canards und Tragflächen | V-förmiges Heck und Tragflächen |
| Stromversorgung | Lithium-Ionen-Batterie | Lithium-Ionen-Batterie | Lithium-Ionen-Batterie |
| Streckenflug | UAM | RAM | UAM |
| Antrieb | Voll elektrisch 18 Rotoren | Voll elektrisch 36 Propeller | Voll elektrisch 8 Propeller |
| Anzahl Pax. | 2 inkl. Handgepäck | 7 | 4 |
| Lärmpegel | - | 60 dB | 70dB |
| Steuerungssystem | - | Fly-by-Wire | Fly-by-Wire |
| Material | Verbundwerkstoffe | - | - |
| Reichweite | 35 km | Bis 500 km | 80 km |
| Reisegeschwindigkeit | 110 km/h | 300 km/h | 120 km/h |
| Max. Payload | 200 kg | - | - |

Anhand von Tabelle 1 sind verschiedene Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen den Prototypen erkennbar. Der größte Unterschied der Prototypen ist ihre Architektur, wie in der Abbildung 8, Abbildung 9 und Abbildung 12 zu erkennen ist. Der VoloCity hat keine Tragflächen und ähnelt sehr einem Helikopter. Auch die Kufen sind ähnlich zu dem eines Helikopters. Die Architektur des VoloCitys kann nach Abbildung 1 in die Kategorie der Multicopter zugeordnet werden. Mit insgesamt 18 symmetrisch angeordneten Rotoren stellt der VoloCity ein sehr hohes

Redundantes System dar. Das Lilium-Jet unterscheidet sich dadurch, dass hinten die Tragflügel und vorne Canards vorhanden sind. In den Tragflügeln sind 36 Rotoren vorhanden, die für die Steuerung des eVTOLs zuständig sind. Das Antriebssystem ist somit gleichzeitig für den Vor- und Auftrieb zuständig und ist mit Abbildung 1 in die Kategorie Vectored Thrust einzuordnen. Für die Beweglichkeit auf dem Boden, ist eine Fahrwerkskonfiguration vorhanden. Im Gegensatz zum VoloCity verfügt der Lilium-Jet zwei Räder hinten und ein Rad vorne. Das Design ist von außen, als auch von der Inneneinrichtung, hochmodern ausgelegt. Das CityAirbus NextGen ähnelt einem Kleinflugzeug, jedoch zeigt es durch den V-förmigen hinteren Heck eine sehr innovative Architektur auf. Insgesamt besitzt das CityAirbus NextGen 8 Propeller, drei davon sind jeweils an den Tragflügeln und zwei am hinteren Heck integriert. Die am hinteren Heck integrierten Propeller sind neigbar und im Reiseflug hauptsächlich für den Vortrieb zuständig. Dadurch fällt der CityAirbus NextGen in die Kategorie Combined Thrust. Für den Stand auf dem Boden sorgen einfache Beine, sodass sich auch das CityAirbus NextGen in diesem Aspekt von den anderen beiden Prototypen unterscheidet. Die Prototypen von Airbus und Volocopter gehören der Kategorie UAM an, das heißt, es werden kurze Streckenflüge bis 100 km durchfliegen. Dies erklärt auch die moderne Einrichtung des Lilium-Jets, da dieser Regional fliegen soll und vor allem für private Passagiere infrage kommen kann. Auch die Anzahl der Passagiere begründet sich hiermit. Bis zu 6 Passagiere können von Ort zu Ort befördert werden, während das CityAirbus NextGen eine Sitzkapazität von 4 Plätzen bietet und der VoloCity nur 2 Sitzplätze zur Verfügung hat. Eine Gemeinsamkeit ist, dass alle Prototypen voll elektrisch fliegen und zunächst einen Piloten an Bord beauftragen werden. Der Lärmpegel stellt fast keinen Unterschied dar. Es werden höchstens 70dB erreicht, wobei Lilium mit max. 60dB als Spitzenreiter gilt. Sowohl Airbus als auch Lilium nutzen für ihre eVTOLs das Fly-by-Wire System als Steuerungssystem. Einen wesentlichen Unterschied stellt die Reisegeschwindigkeit und die erreichte Reichweite dar. Da sich jedoch Lilium in der Kategorie RAM befindet, wird bezüglich der Reichweite und der Geschwindigkeit kein direkter Vergleich zu den anderen Prototypen gezogen. Das CityAirbus NextGen strebt eine Reisegeschwindigkeit von 120 km/h und eine Reichweite von 80 km an. Im Gegensatz dazu gibt der Volocopter eine Reisegeschwindigkeit von 110 km/h und eine Reichweite von 35 km an, wobei die maximale Nutzlast 200 kg nicht überschreiten darf. Der VoloCity ist aus Verbundwerkstoffen aufgebaut und verspricht ein geringes Gesamtgewicht. Die Stromversorgung der Rotoren wird bei dem Lilium-Jet und beim VoloCity über Lithium-Ionen-Batterien erfolgen. Schlussfolgernd ist zu beachten, dass alle drei Prototypen voneinander unabhängige, funktionierende eVTOLs auf den Markt bringen werden und die Vielfältigkeit der Konstruktion solcher eVTOLs sehr groß ist.

3 Marktanalyse

Hamburg zählt mit seinen fast 1,8 Millionen Einwohnern zu den zehn größten Städten der Europäischen Union (Turulski, 2023). Mit einer Fläche von etwa 755 Quadratkilometern ist Hamburg, nach Berlin, die zweitgrößte Stadt Deutschlands (Keller, 2023). Die Mobilitätsmöglichkeiten innerhalb der Stadt sind vielfältig. Zur Option stehen Bus und Bahnlinien, Fährefahrten, Carsharing, Taxis, E-Scooter, E-Bikes und Stadträder zur Verfügung. Nach einer Studie zufolge, nutzen von 5000 befragten Hamburger: innen, 79% Frauen und 70% Männer, öffentliche Verkehrsmittel. Das eigene Auto wird von Männern zu 50% genutzt und von Frauen zu 44% (Klauer, 2023). Die Nutzung des eigenen PKWs ist während der Pandemie gestiegen, um die Ansteckungsgefahr durch andere Verkehrsteilnehmende zu reduzieren. Insbesondere ist vor allem ab Mitte 2021 der Anstieg der PKW-Nutzung gestiegen, da die Homeoffice Regelung nachgelassen hat und viele Arbeitnehmer: innen wieder täglich ihren Arbeitsweg zurücklegen. Das Ergebnis ist vermehrter Verkehrsstau. Hamburg ist in dieser Hinsicht seit einigen Jahren auf Platz 1 innerhalb Deutschlands, so die Auswertung des Navigationsunternehmens TomTom. Im Jahr 2021 soll das Stauniveau bei 31 % gelegen haben, durchschnittlich sollen somit alle Autofahrer: innen insgesamt 71 Stunden im Stau verloren haben.

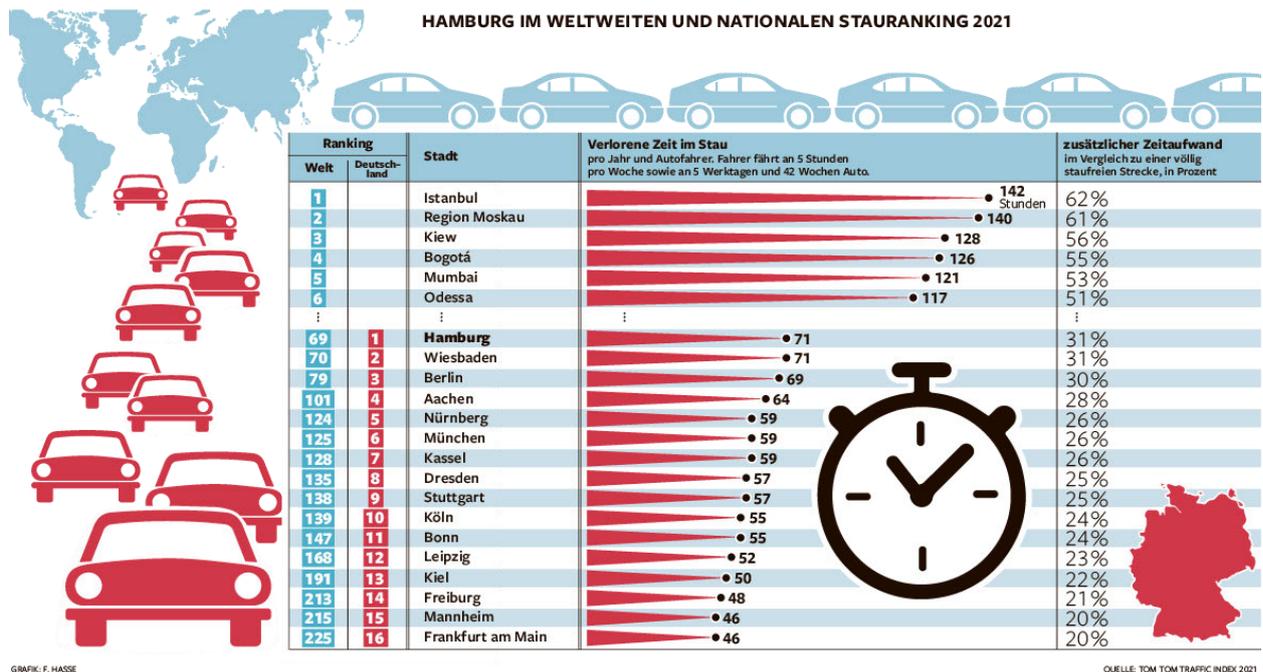


Abbildung 13 Stauranking im Jahr 2021 (Meyer-Wellmann, 2022)

In Abbildung 13 ist die Stau Lage weltweit im Jahr 2021 dargestellt. Hamburg ist dabei auf Platz 69 und wie oben beschrieben, deutschlandweit auf Platz 1. Darüber hinaus kann der Abbildung 14 die aktuelle Verkehrssituation während des Feierabendverkehrs am 29.09.2023 um 17:25 Uhr entnommen werden. Die gelb markierten Routen stellen ein hohes Verkehrsaufkommen dar und die roten Routen stehen für Stau.

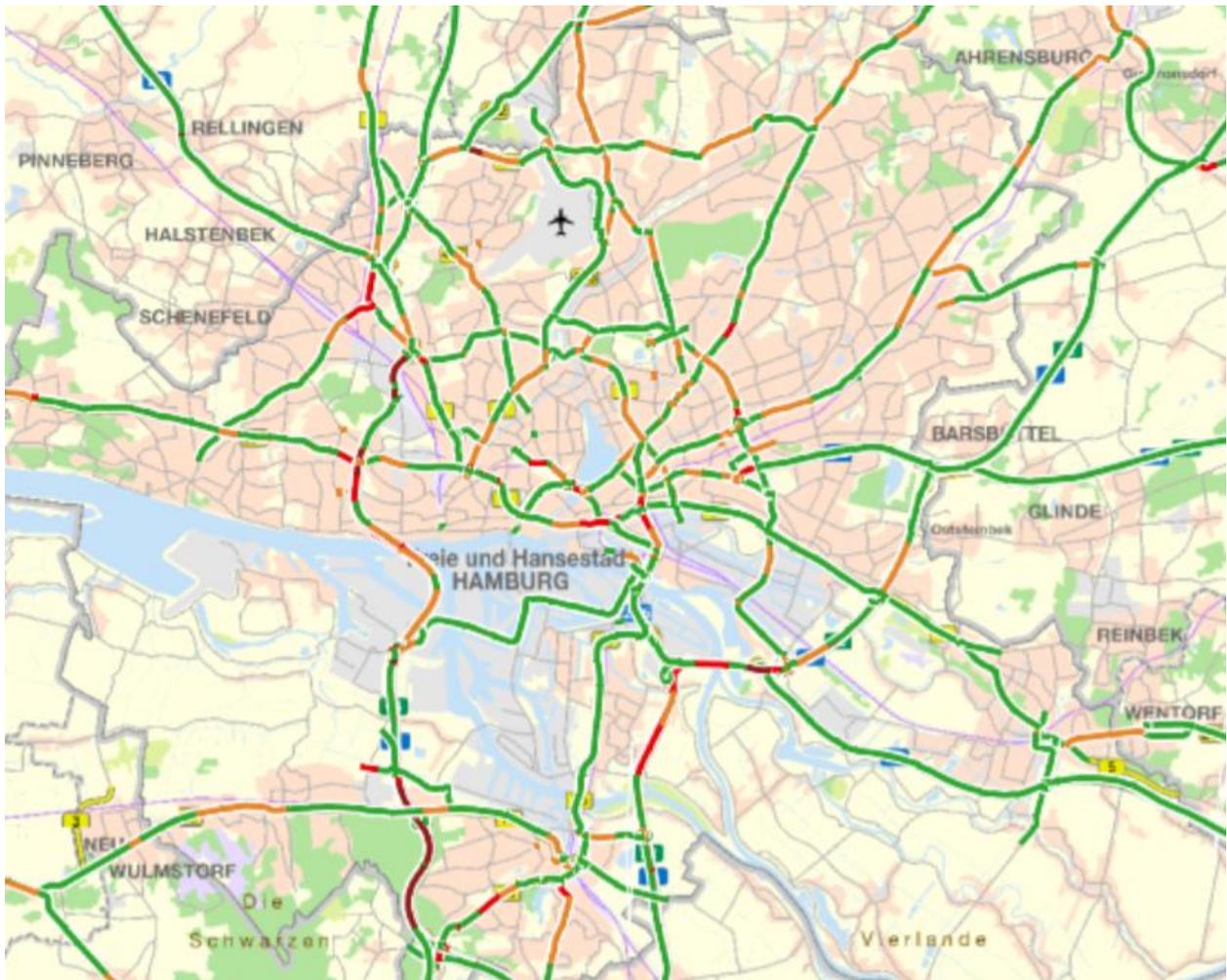


Abbildung 14 Aktuelle Verkehrslage in Hamburg 29.09.23, 17:25 Uhr (Hamburg, 2023)

Um den Verkehrsaufkommen zu entlasten und die zeitliche Kapazität der Bewohner: innen der Großstadt Hamburg im Stau zu reduzieren, müssen Alternative Mobilitätsmöglichkeiten her. (Meyer-Wellmann, 2022). Ein Anteil von 76% der Bewohner: innen Hamburgs glauben an selbstfahrende Autos und Robo-Shuttles in der Zukunft. 45% der Bevölkerung glaubt sogar an eine Umsetzung von fliegenden Taxis (Klauer, 2023). Wie bereits beschrieben, stehen bereits viele Möglichkeiten zur Verfügung, um innerhalb der Stadt von einem Ort zu einem anderen Ort zu gelangen. Die Varianten sind jedoch alle begrenzt auf den Transport über die Straße und das Wasser. Zusätzliche Möglichkeiten, die im Straßen-, Schienen- und Schiffsverkehr angeboten werden, werden eine zusätzliche Erhöhung des Verkehrsaufkommens erzielen. Um dem entgegenzuwirken, kann die Einführung von eVTOLs von Vorteil sein. Bis heute ist die Passagierbeförderung per Luftverkehr innerhalb einer Stadt unbekannt, somit sind innerorts Flüge eine noch nicht umgesetzte Möglichkeit der Passagierbeförderung. Die gesellschaftliche Akzeptanz ist hierfür von großer Bedeutung. Zunächst müssen sich die Bewohner: innen an die Idee der Autonomie gewöhnen. Demensprechend werden vorerst Piloten anwesend sein. Dennoch ist die autonome Steuerung sicherer als die Steuerung über einen Piloten, da

Flugunfälle hauptsächlich auf menschliches Versagen zurückzuführen sind (Möller, 2021). Seitdem jedoch der Drohnenmarkt gewachsen ist und im Alltag vieler Menschen zur Normalität wird, nimmt die Akzeptanz zu, eVTOLs als Alternative zu Straßen-, Schienen- und Schiffsverkehr einzusetzen. Neben Sicherheitsbedenken ist für viele Bewohner: innen noch unklar, inwieweit sich ein solches Verkehrsmittel in Hamburg integrieren lässt, und welche neuen Regeln und Infrastrukturen geschaffen werden müssen.

Zunächst wird in Abbildung 15 ein Blick über die Großstadt Hamburg geworfen. Insgesamt sind 104 Stadtteile auf 7 Bezirke aufgeteilt. Die gesamte Fläche besteht zu 8,1% aus Flüssen und Seen. Dies könnte ein potenzieller Ansatzpunkt sein, denn große Flüsse wie die Elbe stellen ein Hindernis dar. Mit eVTOLs können solche Hindernisse mit einem kurzen und direkten Luftweg überflogen werden. Berge, hohe Brücken oder Hochhäuser sind in Hamburg weniger vorhanden und stellen somit kein Hindernis dar. Das höchste Konstrukt ist der Fernsehturm (Heinrich-Hertz-Turm), mit einer Höhe von 278 m. Mit einer Landfläche von 91,9% bietet Hamburg viele Optionen für Start- und Landeplätze, die als Vertiport bezeichnet werden (Köhler, 2018). Es können Flugrouten zum Flughafen führen, beispielsweise von Harburg oder Bergedorf aus. Auch in Stadtrandgebieten oder ländlichen Bezirken wie Rahlstedt können eVTOLs zum Einsatz kommen. Insbesondere sind Flugrouten nach Hamburg-Mitte von großer Bedeutung. Eine Ausarbeitung der potenziellen Vertiports und Flugrouten wird in Kapitel 5.2 diskutiert.



Abbildung 15 Hamburg Stadtkarte (Hildebrandt, 2023)

Der Verkehrsstau kann mit eVTOLs natürlich nicht behoben werden, aber es soll als eine Alternative Mobilitätsmöglichkeit für die Bewohner: innen angeboten werden. Vor allem für

Geschäftsführer: innen kann diese Alternative von großem Vorteil sein, da die zeitliche Kapazität oft eine größere Rolle spielt. Auch das Hamburger Image wird unter dem Einsatz von eVTOLs positiv beeinflusst. Zum einen, da die Investition in Elektromobilität sehr befürwortet wird und zum anderen, weil der Automatisierungsgrad der Stadt erweitert wird und dies für viele ansprechend ist. Der Tourismus wird sich dadurch zudem auch stärker ausbreiten.

4 Konzeptentwicklung

In den vorherigen Abschnitten wurde die Vielfältigkeit von eVTOLs beschrieben und ein Überblick darüber gegeben, welche drei Prototypen bereits nächstes Jahr schon auf den Markt kommen können. Der Einsatz im Raum Hamburg wird derzeit noch diskutiert. Wie jedoch im letzten Abschnitt gezeigt wurde, hat die Großstadt viel Potenzial, um eVTOLs als alternatives Verkehrsmittel einzuführen. Das nächste Kapitel beschäftigt sich mit der Konzeptentwicklung, die nach den Richtlinien VDI 2221 konzipiert wird. Mithilfe einer Anforderungs- und Funktionsanalyse werden drei Konzepte entwickelt und mit einer Nutzwertanalyse bewertet.

4.1 Anforderungsanalyse

Die Analyse verschiedener Anforderungen ist essenziell, um zielorientierte und bedarfsgerechte Produkte auf den Markt zu bringen. Dabei ist die Analyse umfassend zu betrachten, was bedeutet, dass alle Stakeholder berücksichtigt werden müssen. In dieser Arbeit umfassen die Stakeholder die Bewohner: innen Hamburgs, die Behörden und die Hersteller. Die Anforderungen sind somit in drei Kategorien aufzuteilen: die Kundenanforderungen, die sicherheits- & gesetzlichen Anforderungen, und die technischen Anforderungen. Die Kundenanforderungen umfassen sämtliche Anforderungen der eVTOL-Nutzer in Hamburg. Daher sind insbesondere die Meinungen der Bewohner: innen Hamburgs von großer Bedeutung. Mithilfe einer Umfrage wurden wichtige Erkenntnisse und Sichtweisen zu dem Thema gewonnen. Teilgenommen haben 101 Personen im Alter von 17 bis 86 Jahren. Darunter sind hauptsächlich Studierende, Azubis und ArbeitnehmerInnen.

2 Bitte wählen Sie die Kategorie aus, in die Sie sich am ehesten einordnen würden

Mehrfachauswahl, geantwortet 101 x, unbeantwortet 0 x

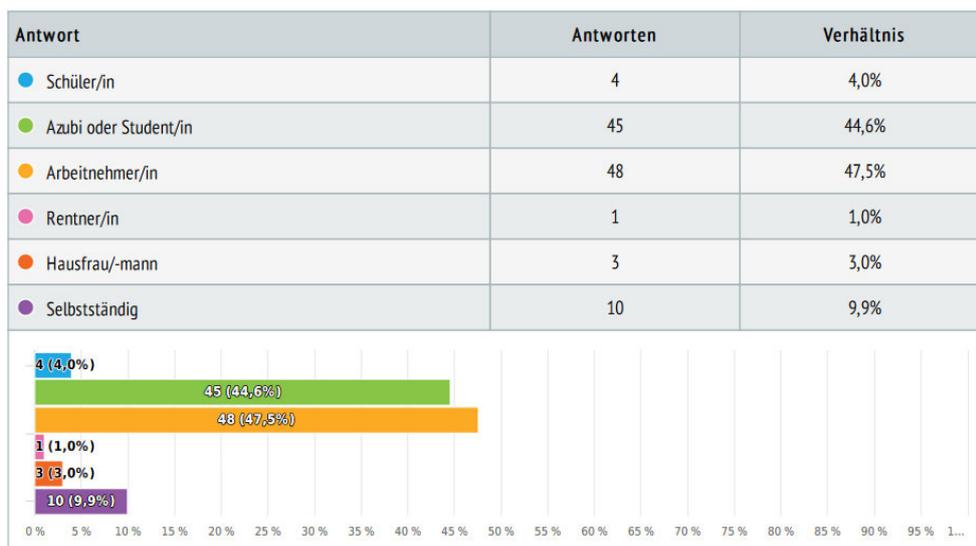


Abbildung 16 Personengruppen von 101 Befragten Hamburger: innen (Simlaghai-Asl, 2023)

Der Abbildung 17 kann entnommen werden, dass die Nutzung von Bus- und Bahnlinien am häufigsten erfolgt und anschließend das eigene PKW genutzt wird, wie bereits in der Marktanalyse beschrieben wurde.

3 Welches Verkehrsmittel nutzen Sie für kurze Strecken am häufigsten?

Mehrfachauswahl, geantwortet 101 x, unbeantwortet 0 x

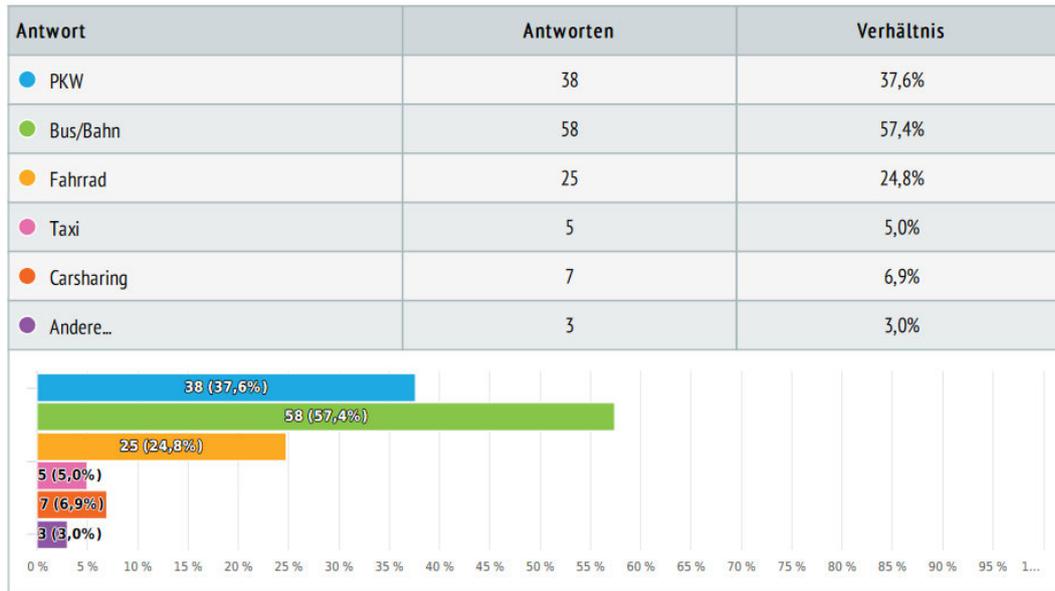


Abbildung 17 Mobilität der 101 befragten Hamburger: innen (Simlaghai-Asl, 2023)

Die nächste Frage liefert Erkenntnisse hinsichtlich der Sichtweise zu eVTOLs. So geben fast 70% der befragten an, dass sie ohne Zweifel mit eVTOLs fliegen würden, wenn es beispielsweise kostenlos wäre. Es lässt sich vermuten, dass die restlichen 30% Unsicherheiten empfinden und dementsprechend bei einem kostenlosen Flug nicht mitfliegen würden.

4 Würden Sie bei einem kostenlosen Flug mitfliegen wollen?

Mehrfachauswahl, geantwortet 101 x, unbeantwortet 0 x

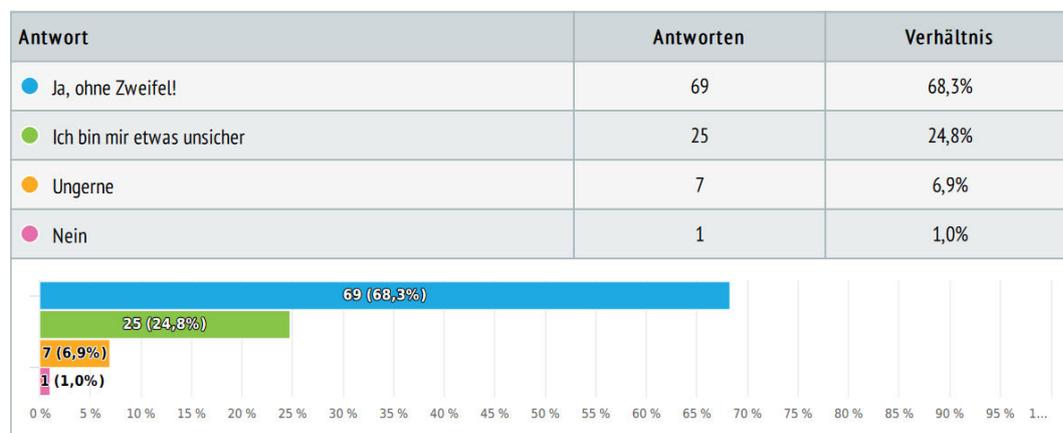


Abbildung 18 Kostenloser Flug (Simlaghai-Asl, 2023)

5 Bitte bewerten Sie die folgenden Aussagen!

Matrix von Einzelwahl, geantwortet 101 x, unbeantwortet 0 x

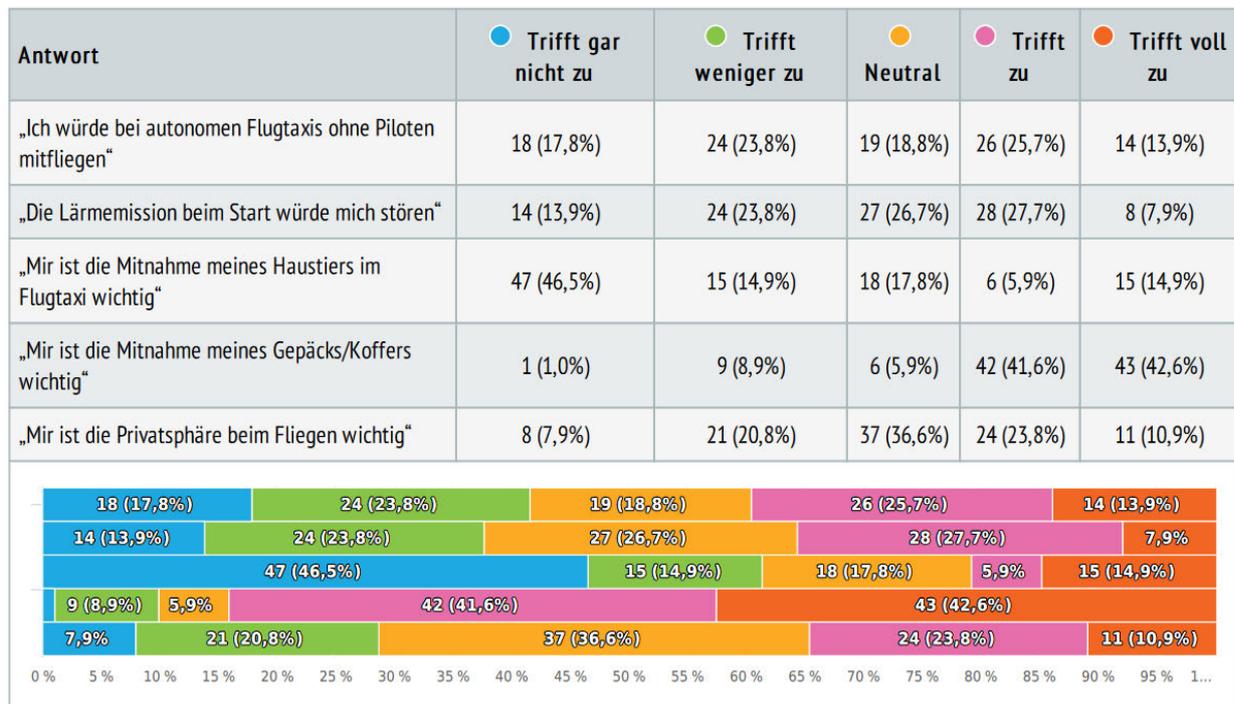


Abbildung 19 Bewertung von Aussagen (Simlaghai-Asl, 2023)

In Abbildung 19 sind fünf Aussagen abgebildet, die durch die Teilnehmenden zu bewerten waren. Aus dieser Auswertung können Anforderungen abgeleitet werden, die im folgenden näher beschrieben werden.

Die Ergebnisse der ersten Aussage zeigen, dass weniger als 40% der Befragten bereit wären, in einem eVTOL ohne Piloten zu fliegen, während etwa ca. 40% dies nicht tun würde. Fast 20% der Befragten haben eine neutrale Meinung dazu. Hier lässt sich ableiten, dass eventuell die Unsicherheit der Bewohner: innen bezüglich autonomer eVTOLs noch im Weg steht und dementsprechend zunächst die Berücksichtigung eines Piloten in den Konzepten erfolgen sollte. Die Lärmemission wird von den meisten Befragten als kein großes Problem gesehen, dennoch fühlen sich ca. 35% davon gestört. Infolgedessen sollte auf eine geräuscharme Betriebsweise der eVTOLs geachtet werden. Aus der dritten Aussage sticht hervor, dass die Berücksichtigung von Haustieren keine hohe Relevanz hat. Fast 85% geben jedoch an, dass ausreichend Platz vorhanden sein sollte, um die Mitnahme von Gepäck und Taschen zu ermöglichen. Bezüglich der Privatsphäre und der damit einhergehenden Passagieranzahl im eVTOL, ist die Meinung der Bewohner: innen eher neutral einzustufen. Hier lässt sich ableiten, dass keine Anforderung darin besteht, dass die Passagiere einzeln fliegen möchten.

6 Welche Punkte sind Ihnen bei der Entwicklung eines Flugtaxis am wichtigsten?

Bedeutungsreihenfolge, geantwortet 101 x, unbeantwortet 0 x

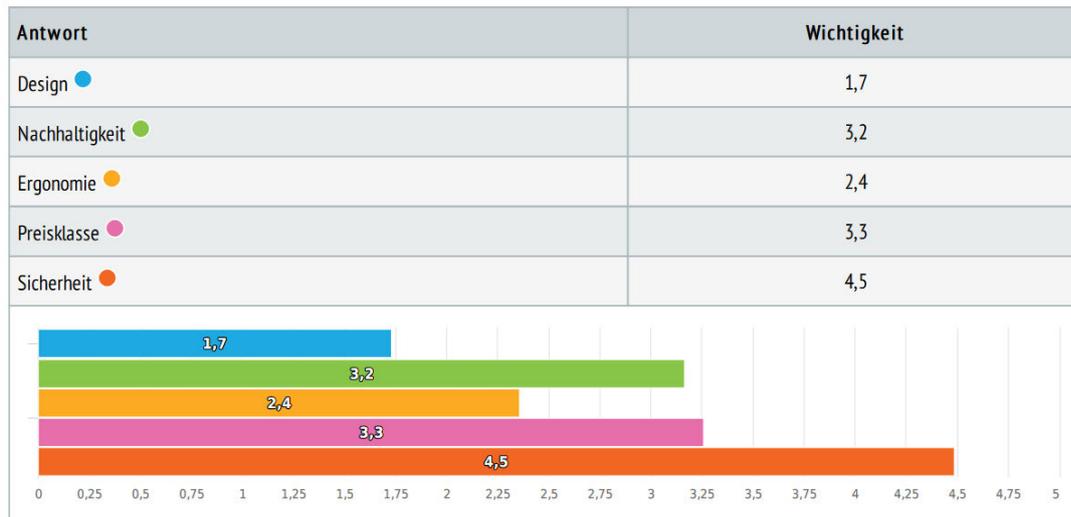


Abbildung 20 Entwicklungsaspekte (Simlaghai-Asl, 2023)

Es ist zu erkennen, dass nach der Sicherheit die Preisklasse und die Nachhaltigkeit eine wichtige Rolle spielen. Dementsprechend sollten die Fahrtkosten gering wie möglich sein. Auch der Einsatz von recyclebarem Material, sowie eine möglichst emissionsfreie Produktion und Inbetriebnahme sollte sichergestellt werden. Der Sicherheitsfaktor stellt in jeder Hinsicht die wichtigste Anforderung dar und wird unter den gesetzlichen Anforderungen der Behörde detailliert aufgegriffen. Eine ergonomische Einrichtung und ein modernes Design wirkt sehr ansprechend, ist jedoch für die Befragten keine Voraussetzung. Dies spiegelt sich auch in Frage 7 wider. Nur 8% der Befragten gaben an, eine ergonomische Einrichtung genießen zu wollen. Eine weitere Anforderung besteht darin, das Ziel schnell zu erreichen und, wie oben bereits erwähnt, die geringstmöglichen Kosten zu zahlen.

7 „Ich möchte beim Fliegen in erster Linie...“

Mehrfachauswahl, geantwortet 101 x, unbeantwortet 0 x

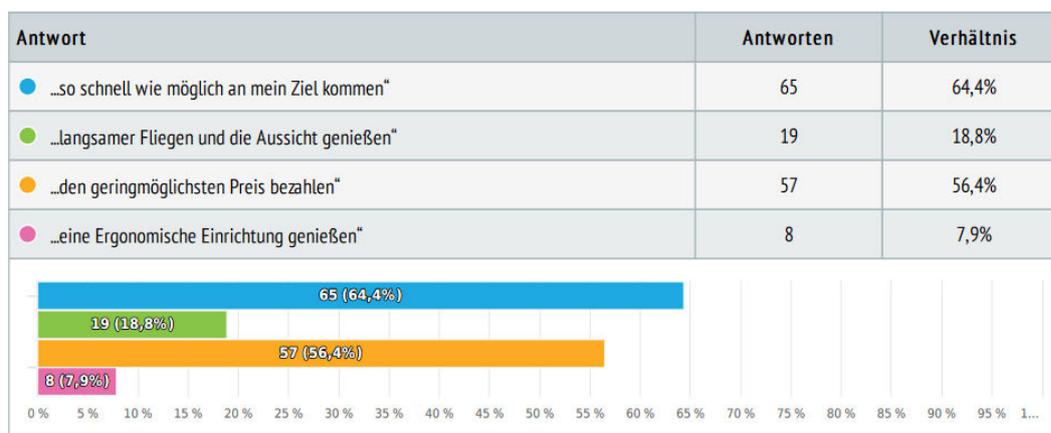


Abbildung 21 Funktion der eVTOL Nutzung (Simlaghai-Asl, 2023)

8 Welchen Betrag würden Sie höchstens pro Flug-Minute zahlen?

Mehrfachauswahl, geantwortet 101 x, unbeantwortet 0 x

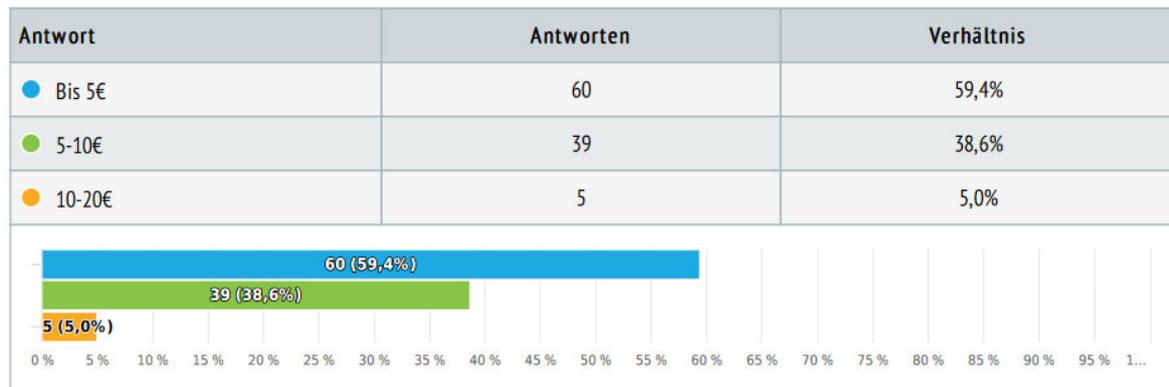


Abbildung 22 Kosten pro Flug-Minute (Simlaghai-Asl, 2023)

In Frage 8 sind drei Preisklassen angegeben, die die Kosten für Flugtickets pro Minute darstellen. Lediglich 5 % der Befragten wären bereit, Preise im Bereich zwischen 10-20 € zu bezahlen.

9 Welche Route/n würden Sie in Hamburg in Anspruch nehmen?

Mehrfachauswahl, geantwortet 101 x, unbeantwortet 0 x

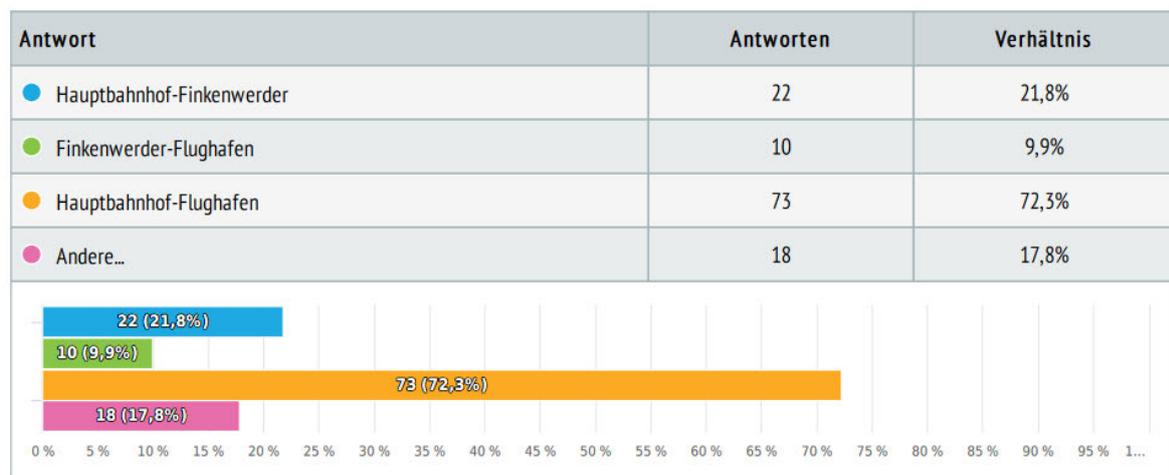


Abbildung 23 Flugrouten (Simlaghai-Asl, 2023)

Über 70% der Befragten geben an, eine Route zwischen dem Hamburger Hauptbahnhof und dem Flughafen in Anspruch nehmen zu wollen. Eine Route zwischen dem Hauptbahnhof und Finkenwerder ist ebenfalls mit 20% interessant.

11 Haben Sie noch weitere Bemerkungen/Wünsche/Ideen?

Text Frage , geantwortet 101 x, unbeantwortet 0 x

- (83x)
- Aus Frage 9 entnehme ich, dass es nur wenige Stationen geben wird!? Flughafen - HBF ist ja mit der S-Bahn in <25 Minuten machbar und daher wenig interessant. Müsste es nicht eher Randgebiete verbinden? Und ist das Wort Taxi überhaupt richtig, wenn es nur 2-3 Stationen gibt?
- Barrierefreie Nutzungsmöglichkeiten
- Bitte keine Flugtaxi, mega unnötig für die Umwelt
- Da die Elbe Hamburg in 2 Felder teilt, sollten man die Flugtaxi zwischen die Nord Elbe Feld und Süd Elbe, wie zum Beispiel Blankenese und Buxtehude. So vermeidet man Stau auf die Autobahn und viele die S-Bahn benutzen, aus Wedel bis Stade. Alles gute
- Ein lang ersehntes und gern gesehenes Konzept, welches eine Bereicherung für die Personenbeförderung wäre und ich sehr befürworte!
- Ein sehr zielführendes und interessantes Thema. Ich drücke Ihnen die Daumen!
- Ein transparenter Fußboden (den man aber auch via Knopfdruck abdecken kann) wäre super! Integration in Miles & More / sonstige Vielfliegerprogramme. Ggf. auch inkl. Angebote für Business class / First Class Flüge -> man wird zuhause / im Büro vom Flugtaxi eingesammelt-> Flughafen -> im Zielort das gleiche Spiel dann vom Flughafen zum Hotel / Büro.
- [REDACTED]
- [REDACTED]
- Hoffentlich kommt es schnell wie möglich auf den Markt
- Hoffentlich können Sie es auch bundesweit ermöglichen. [REDACTED]
- Hoffentlich wird schnell ins Leben gerufen
- [REDACTED]
- Keine
- Sehr starkes Thema! Viel Erfolg
- Wenn es eingeführt wird, dann soll es viele Linien geben und nicht nur eine Strecke.
- Werden die Preise an Passagiere angepasst. Beispiel: Bei Azubis oder Studenten, Azubi/Studenten Preise (Rabatte)?
- Zu Lärmemissionen: Bei der Belastung des direkten Umfeld der Start/Lande und Flugzonen sollte schon der EASA Standard als Minimum greifen. Im Objekt sollte ein angenehmer Geräuschpegel herrschen. Start & Landepunkte auf Hochhäusern sind m.E. ein Vorteil zum Thema Lärm & Emissionen
Schnelle Verbindungen zu Knotenpunkten in HH sehe ich al wichtig an. Zielzonen: Airport/HBF/City Startzonen: in jedem Bezirk & in der Metropolregion

Abbildung 24 Wünsche/Ideen/Anforderungen der Kunden (Simlaghai-Asl, 2023)

Weitere Anforderungen und Wünsche der Bewohner: innen sind in Abbildung 24 dargestellt. Unrelevante Informationen sind unkenntlich gemacht. Ein Wunsch besteht darin, die Randgebiete der Stadt und Stationen zwischen der Nord- und Südelbe, wie zum Beispiel Blankenese und Buxtehude zu berücksichtigen. Als Zielzonen werden der Flughafen und der Hauptbahnhof genannt, während die Startzonen in jedem Bezirk vorkommen können. Insbesondere sollen viele Linien angeboten werden und auch die Umsetzung bundesweit ist erwünscht. Um die Lärmemissionen gering zu halten, sollen Start- und Landeplätze auf Hochhäusern integriert werden. Die Preisgestaltung spielt eine entscheidende Rolle und sollte, wenn möglich, an Personengruppen angepasst werden, was die Einführung von Rabatten für Studenten, Schüler und Auszubildende einschließt. Die Barrierefreie Nutzung wurde als eine weitere Anforderung genannt. Ein weiterer Wunsch betrifft einen transparenten Fußboden, der bei Bedarf abgedeckt werden kann. Zudem kann die Integration in das Miles & More- Das Vielflieger- und Prämienprogramm der Lufthansa erfolgen. Das Angebot von Business oder First-Class wird ebenfalls aufgezählt. Auch die Abholung vom Büro oder dem eignen Zuhause bis zum Zielort wird als ein luxuriöses Zusatzangebot aufgezählt. Des Weiteren wird deutlich, dass die Zielgruppe überwiegend positiv zu der Umsetzung von eVTOLs in Hamburg eingestellt ist. „Ein lang

ersehtes und gern gesehenes Konzept, welches eine Bereicherung für die Personenbeförderung wäre und ich sehr befürworte!“ „Hoffentlich kommt es schnell wie möglich auf den Markt“. Natürlich gibt es auch Bedenken, insbesondere hinsichtlich der Nachhaltigkeit. „Bitte keine Flugtaxi, mega unnötig für die Umwelt“. Dies unterstreicht erneut die Notwendigkeit, das Konzept in jeder Hinsicht ökologisch zu gestalten und jegliche Emissionen zu verhindern.

Weitere Anforderungen ergeben sich hauptsächlich aus den Behördlichen Richtlinien. In diesem Fall hat die EASA (Agentur der Europäischen Union für Flugsicherheit) Anforderungen für VTOLs aufgestellt. Diese gelten für alle VTOLs bis zu einer Masse von 3.175 kg und einer Höchstgeschwindigkeit von 463 km/h. Im Folgenden werden die wichtigsten Anforderungen hinsichtlich der Sicherheit beschrieben. Die Sicherheit und Zuverlässigkeit des Fliegens haben die höchste Priorität in der Luftfahrt. Strenge Vorschriften zielen darauf ab, sicherzustellen, dass ein Höchstmaß an Sicherheit gewährleistet wird. Somit muss sichergestellt werden, dass das eVTOL unter jeder Bedingung flugfähig ist und die Wahrscheinlichkeit eines katastrophalen Fehlers geringer als 10^{-9} pro Flugstunde ist. Insbesondere darf der erste Ausfall keine katastrophalen Auswirkungen mit sich bringen. Als katastrophal wird in der Luftfahrt eine Situation eingestuft, wenn gefährliche und schwerwiegende Auswirkungen auf Passagiere und das Flugzeug auftreten und die sichere Landung nicht mehr gewährleistet werden kann. Katastrophale Eigenschaften werden vorwiegend durch Feuer ausgelöst. Die Anforderung, dass das Flugzeug aus feuerbeständigem Material gebaut werden muss, ist somit verpflichtend. Zudem muss das Material eine hohe Festigkeit haben und stabil gegen alle Wettereinflüsse sein. Gefährliche Ansammlung von Flüssigkeiten oder Dämpfen müssen von den Insassen und aus dem Flugzeug isoliert werden. Kommt es zu dem Fall, dass eine Notwasserung unvermeidlich wird, muss das eVTOL so konstruiert sein, dass es mindestens 15 Minuten lang den Belastungen des Wassers standhalten kann. Es wird vorausgesetzt, dass jeder Passagier nach einer Notlandung in der Lage sein muss, sich selbst befreien zu können. Dementsprechend muss die Betätigungskraft eines Systems zur Freigabe kleiner als 20 daN sein. Dies kann z.B. passive Sicherheitssysteme, wie den Sicherheitsgurt umfassen. VTOLs fliegen auf einer geringen sichtbaren Höhe und haben somit eine hohe Wahrscheinlichkeit, in allen Flugphasen mit Vögeln zusammenzustoßen. Die Flughöhe soll einen durchschnittlichen Wert von ca. 300 m erreichen. Die Konsequenzen eines Zusammenstoßes können katastrophal eingestuft werden, wie im Fall von 2009, bei dem ein Airbus A320 beim Start mit Kanadagänsen kollidierte und beide Triebwerke Ausfielen. Dem Piloten Sullenberger gelang es dennoch die Notlandung im Hudson River erfolgreich durchzuführen (Bartels, 2019). Um die Wahrscheinlichkeit gering wie möglich zu halten, müssen alle eVTOLs darauf ausgelegt sein, bei einem Vogelstoß mit einem Vogelgewicht von 1 kg trotzdem sicher weiterfliegen und landen zu können. Da nicht nur der Zusammenstoß mit Vögeln als Gefahrenquelle besteht, sondern auch die Kollision mit anderen Fluggeräten

erfolgen kann, muss in jedem eVTOL Positions- und Aktionslichter integriert werden. Diese Lichter müssen für andere Fluggeräte sofort erkennbar sein, um ein schnelles Ausweichmanöver sicherzustellen. Äußerliche Anforderungen der eVTOLs umfassen auch das Fahrwerk, diese müssen während des Bodenbetriebs eine stabile Unterstützung bieten. Das eVTOL muss zudem in allen Achsen eine sichere Stabilität aufweisen. Rotierende Komponente, insbesondere Schub und Auftriebssysteme, müssen genug Abstand zu anderen Flugzeugteilen haben. Diese Bauteile und alle weiteren Komponenten im eVTOL müssen gegen übermäßige Vibration ausgelegt sein. Weiterhin müssen vorhandene Türen oder jegliche Ausgänge gegen unbeabsichtigtes Öffnen während des Fluges geschützt werden. Dabei müssen die Ausgänge bzw. alle Fenster und Windschutzscheiben aus Materialien gebaut werden, die nicht in gefährliche Teile zerbrechen. Wenn Gepäckfächer vorhanden sind, müssen diese für die maximale Belastung ausgelegt sein. Außerdem müssen Sicherheitsmaßnahmen das Herunterfallen von Gepäcktaschen verhindern. Der Ausfall oder die Beschädigung von Bauteilen oder Systemen kann nicht vollständig verhindert werden, es müssen jedoch Inspektion und Wartungsmethoden vorhanden sein, um Schäden vor einem Versagen erkennen und beheben zu können.

Da die Konzepte auf elektrischem Antrieb basieren, ergeben sich weitere Anforderungen hinsichtlich des Antriebs. Vor allem für längere Flüge ist eine hohe Leistung erforderlich. Dementsprechend sollen verwendete Batterien eine hohe Energiedichte und eine hohe Kapazität bereitstellen. Das Gewicht des Energiesystems soll so leicht wie möglich sein, dementsprechend sollen effiziente, jedoch platzsparende Zellformen integriert werden. Weiterhin sollen die verwendeten Batterien eine lange Lebensdauer aufweisen und in kurzer Zeit aufgeladen werden. Der Wirkungsgrad des Elektromotors soll so hoch wie möglich sein. Im Gesamten müssen die Energiespeichersysteme redundant vorkommen und eine Unabhängigkeit gewährleisten. Das Gehäuse des Energiesystems muss gegen alle äußerlichen Geschehnisse standhalten können und das Eindringen von Fremdkörpern sicherstellen.

Wie bereits aus der Umfrage ersichtlich ist, wird die Steuerung sowohl autonom als auch manuell erfolgen. Daher ergeben sich weitere Anforderungen in Bezug auf die Autonomie. Es wurde bereits beschrieben, dass die Sicherheit stets die höchste Priorität hat. Daher sollen alle Computersysteme, die eine Sicherheitsrelevante Funktion haben, mehrfach redundant vorkommen. In sicherheitskritischen Situationen muss das autonome System in der Lage sein, richtige Entscheidungen zu treffen. Hierfür muss das System Daten empfangen, verarbeiten und weiterleiten können. Die Lernfähigkeit des autonomen Systems muss sichergestellt werden, damit es auch auf unprogrammierte Situationen sicher reagieren kann. Weiterhin sollten mehrere Kommunikationssysteme mit der Außenwelt zu Verfügung stehen, damit in jeder Situation eine Verbindung zu den Passagieren und einem zentralen Tower besteht.

Die vollständigen Anforderungen wurden in einer Tabelle zusammengefasst und sind dem Anhang beigelegt.

Nach einer ausführlichen Anforderungsanalyse wird nach den VDI2221 Richtlinien eine Funktionsanalyse durchgeführt. Die Funktionen sollen definieren, welche Aufgaben das Produkt erfüllen soll. Die Beschreibung der Funktionen erfolgt dabei in einer einfachen „Objekt-Verb-Form“ (z.B. „Antrieb kühlen“). Darüber hinaus werden die Funktionen in Haupt- und Nebenfunktionen unterteilt, um die Bedeutung einzelner Funktionen hervorzuheben (Verein Deutscher Ingenieure, 2019).

4.2 Funktionsanalyse

Im nächsten Schritt erfolgt die Analyse der Funktionen. Zunächst werden die Hauptfunktionen definiert und anschließend zugehörige Teilfunktionen ermittelt. Diese Teilfunktionen werden wiederum in Subfunktionen untergegliedert.

Das eVTOL soll drei Hauptfunktionen erfüllen. Es soll senkrecht starten und landen können, in der Lage sein, autonom zu fliegen, und Passagiere sicher von A nach B befördern. Diese drei Hauptfunktionen lassen sich in weitere Teilfunktionen aufteilen. Beginnend mit der letzten Funktion, der Beförderung von Reisenden, folgen elf weitere Unterfunktionen. Diese umfassen die Fähigkeit, Kräften standzuhalten, insbesondere im Zusammenhang beim Aufnehmen und Einlassen der Passagiere, das Verstauen ihrer Gepäcktaschen und das Aufnehmen ihrer Haustiere. Weitere Teilfunktionen sind das Anbieten von Sitzmöglichkeiten und Passagier-Sicherheits-Systemen. Das Erzeugen von Auf- und Vortrieb während des Reiseflugs ist von entscheidender Bedeutung, um die Reisenden zu befördern. Zudem sollen die Passagiere während des Fluges mit wichtigen Informationen benachrichtigt werden. Im Falle eines Notfalls, stehen den Reisenden Absturz-Notfallsysteme zur Verfügung.

Da sich die Entwicklung des Konzepts auf den technischen Anteil konzentriert, wird die erste Funktion nicht weiter ausgearbeitet und schließt sich mit den Teilfunktionen ab. In den nächsten Abschnitten werden die zwei weiteren Hauptfunktionen detaillierter ausgearbeitet und mit Teil- und Subfunktionen beschrieben.

EVTOLs haben die Besonderheit, senkrecht starten und landen zu können. Dafür muss zunächst elektrische Energie sicher bereitgestellt, Auftrieb erzeugt und der Stand auf dem Boden stabil gehalten werden. Für die Bereitstellung von Energie müssen weitere Subfunktionen durch das System erfüllt werden. Hierbei muss eine zuverlässige Energiequelle verfügbar sein, um das System mit Energie zu versorgen. Zudem muss der Antriebsstrang vor Fremdkörper geschützt

und eine hohe Leistungsdichte sichergestellt werden. Um eine lange Lebensdauer sicherstellen zu können muss die Alterung der Energiequelle reduziert werden. Es muss eine sichere Möglichkeit geben, die Energiequelle aufzuladen und es müssen Maßnahmen getroffen werden, um den vollständigen Verlust der Energiequelle zu verhindern. Die letzte Subfunktion besteht darin, den elektrischen Antrieb mit ausreichender Energie zu versorgen. Wenn alle Subfunktionen funktionsfähig sind, ist die sichere Bereitstellung von Energie für das senkrechte Starten und Landen gewährleistet. Für die Erzeugung des Auftriebs beim senkrechten Starten und Landen muss die vorhandene elektrische Energie in mechanische Energie umgewandelt werden. Die Gewichtskraft muss für den senkrechten Starten überwunden werden, dabei wird insbesondere auf die Reduzierung des Luftwiderstands geachtet. Bei der Erzeugung der Bewegungsenergie müssen weitere Subfunktionen erfüllt werden. Die Temperatur des Antriebs muss reguliert werden. Zudem müssen erzeugte Schwingungen, Vibrationen und Lärmbelastigungen gedämmt und reduziert werden. Zusätzlich muss verhindert werden, dass der Auftrieb verloren geht. Das eVTOL kann somit Energie aufnehmen, Auftrieb erzeugen, um senkrecht starten und landen zu können. Nun muss noch der Stand auf dem Boden berücksichtigt werden, dieser ist essenziell, um eine sichere Landung zu gewährleisten. Ein sanftes Aufsetzen und der Stillstand müssen ermöglicht werden. Außerdem muss das Kippen des eVTOLs verhindert werden. Mithilfe jener Subfunktionen ist das eVTOL in der Lage, senkrecht starten und landen zu können.

Eine abschließende Betrachtung erfolgt mit der Autonomie. Selbst wenn ein Pilot an Bord sein wird, sollen eVTOLs darauf ausgelegt sein, autonom zu fliegen. Die Teilfunktionen bestehen in der Datenverarbeitung. Signale werden empfangen, verarbeitet und Aktionen werden durchgeführt. Anschließend sollen die verarbeiteten Signale an die Außenwelt weitergeleitet werden. Um Signale zu empfangen, ist es notwendig, eine Verbindung herzustellen und Kommunikationssysteme bereitzustellen. Die Autonomie muss die Funktion erfüllen, dass Daten aufgenommen werden können. Insbesondere sollen Positionen und Kollisionswarnungen erfasst werden. Die Signale werden verarbeitet, indem sie gespeichert, analysiert und ausgewählt werden. Brauchbare Signale werden genutzt, um Warnungen auszugeben, das eVTOL zu steuern und Entertainmentsysteme bereitzustellen. Ausgeführte Aktionen verändern den Ist-Zustand und es ergeben sich neue Daten, die weitergeleitet werden sollen. Zudem muss die Datensicherheit gewährleistet werden.

Eine ausführliche Erläuterung der Funktionsweise des eVTOL wird in den Konzeptbeschreibungen behandelt. Die vollständige Funktionsanalyse ist in Abbildung 25 dargestellt.

Nach der Durchführung der Funktionsanalyse erfolgt gemäß den VDI2221 Richtlinien die Suche nach Lösungsprinzipien. Hierbei wird die Methode des „Morphologischen Kastens“

herangezogen. Für die einzelnen Subfunktionen werden mehrere Lösungsmöglichkeiten gefunden, die die Erfüllung der Funktionen sicherstellen (Verein Deutscher Ingenieure, 2019).

| Nr. | Hauptfunktion | Nr. | Teilfunktion | Nr. | Subfunktionen |
|--------|--|------|--|--------|--|
| F1 | Senkrecht starten und landen | F1.1 | Elektrische Energie sicher bereitstellen | F1.1.1 | Energiequelle zur Verfügung stellen |
| | | | | F1.1.2 | Elektrischen Antriebsstrang vor Fremdkörper schützen |
| | | | | F1.1.3 | Hohe Leistungsdichte der Energiequelle sicherstellen |
| | | | | F1.1.4 | Alterung der Energiequelle reduzieren |
| | | | | F1.1.5 | Energiequelle aufladen |
| | | | | F1.1.6 | Energieverlust verhindern |
| | | | | F1.1.7 | Elektrischen Antrieb mit Energie versorgen |
| | | F1.2 | Auftrieb sicher erzeugen | F1.2.1 | Elektrische Energie in mechanische Energie umwandeln |
| | | | | F1.2.2 | Antrieb kühlen |
| | | | | F1.2.3 | Temperatur der Energiequelle regulieren |
| | | | | F1.2.4 | Schwingungen und Vibrationen des Antriebs reduzieren |
| | | | | F1.2.5 | Schwingungen und Vibratioenn rotierender Komponente reduzieren |
| | | | | F1.2.6 | Gewichtskraft überwinden |
| | | | | F1.2.7 | Luftwiderstand reduzieren |
| | | | | F1.2.8 | Lärmbelästigung reduzieren |
| | | | | F1.2.9 | Auftriebsverlust verhindern |
| | | F1.3 | Bodenstand stabilisieren | F1.3.1 | Sanftes Aufsetzen sicherstellen |
| | | | | F1.3.2 | Stillstand ermöglichen |
| F1.3.3 | Kippen verhindern | | | | |
| F2 | Autonom fliegen | F2.1 | Signale empfangen | F2.1.1 | Verbindung herstellen |
| | | | | F2.1.2 | Kommunikationssysteme bereitstellen |
| | | | | F2.1.3 | Daten aufnehmen |
| | | | | F2.1.4 | Positionen erfassen |
| | | | | F2.1.5 | Kollisionsgefahr erkennen |
| | | F2.2 | Signale verarbeiten | F2.2.1 | Daten speichern |
| | | | | F2.2.2 | Daten analysieren |
| | | | | F2.2.3 | Daten ausselektieren |
| | | F2.3 | Aktionen durchführen | F2.3.1 | EVTOL steuern |
| | | | | F2.3.2 | Warnung ausgeben |
| | | | | F2.3.3 | Entertainment anbieten |
| | | F2.4 | Signale extern weiterleiten | F2.4.1 | Daten extern übertragen |
| | | | | F2.4.2 | Datensicherheit gewährleisten |
| | | F3 | Reisende befördern | F3.1 | Passagiere aufnehmen |
| F3.2 | Passagiere einlassen | | | | |
| F3.3 | Auftrieb im Reiseflug erzeugen | | | | |
| F3.4 | Vortrieb im Reiseflug erzeugen | | | | |
| F3.5 | Gepäck verstauen | | | | |
| F3.6 | Haustiere unterbringen | | | | |
| F3.7 | Plätze anbieten | | | | |
| F3.8 | Status und Informationen für Passagiere anzeigen | | | | |
| F3.9 | Passagier-Sicherheits-Systeme bereitstellen | | | | |
| F3.10 | Absturz-Notfallsysteme bereitstellen | | | | |
| F3.11 | Kräfte standhalten | | | | |

Abbildung 25 Funktionsanalyse

4.3 Morphologischer Kasten

Die Methode des Morphologischen Kastens ermöglicht es, durch die Kombination verschiedener Lösungsmöglichkeiten, mehrere Lösungskonzepte zu definieren. Auf der linken Spalte werden alle Subfunktionen aus der Funktionsanalyse untereinander aufgelistet. Zeilenweise werden für alle Subfunktionen Lösungsmöglichkeiten gefunden. Die Lösungsfindung sollte möglichst kreativ, aber auch zielführend sein. Manchmal können Lösungen komplex sein, daher hilft es auch einfache Ansätze festzuhalten, auch wenn sie nicht realitätsnah sind. Ein gutes Beispiel ist die Kühlung des Elektromotors. Dies kann auf verschiedene Arten erfolgen, z.B. werden oft mehrere Komponenten in ein komplexes Kühlsystem geschaltet. Eine Kühlmethode könnte jedoch auch aus Eis-Packs oder Eiswürfeln bestehen. Natürlich müssen dabei sicherheitsrelevante Aspekte berücksichtigt werden, wie z.B. die Vermeidung von Wassereintritt in die Elektronik. Mit diesem Ansatz können jedoch potenzielle Probleme aufgedeckt und ein besseres Verständnis dafür aufgebaut werden, welche Optionen ausgeschlossen werden können. Dies optimiert die Konzeptentwicklung und schließt unrealistische Lösungen aus. Außerdem sollten innovative Ideenfindungsansätze einbezogen werden. Dadurch können Lösungsmöglichkeiten eingeführt werden, die bisher nicht vorhanden sind. Ein Beispiel hierfür ist die Mimik-Steuerung, die unter der Subfunktion F2.3.1 zu finden ist. Eine Mimik-Steuerung gibt es derzeit nicht, könnte jedoch in Zukunft eine Möglichkeit sein, um beispielsweise Mobilgeräte zu steuern. Wie der Name bereits hergibt, soll durch die Veränderung der Gesichtsausdrücke eine Steuerung erfolgen. Ein einfaches Beispiel wäre, dass ein dreifaches Blinzeln beispielsweise die Tür des eVTOLs verriegelt.

Die vollständige Übersicht des Morphologischen Kastens ist dem Anhang zu entnehmen. Nachdem unterschiedlichste Lösungsmöglichkeiten erarbeitet wurden, kommt es zur Konzeptfindung. Zu jeder Subfunktion wird sich für eine oder eine Kombination mehrerer Lösungsmöglichkeiten entschieden. Es leiten sich daraus drei Konzeptideen her, die in den nächsten Abschnitten dargestellt werden. In Abbildung 26 wird kurz veranschaulicht, wie die einzelnen Lösungen zu einem Gesamtkonzept zusammengeführt werden. Die ausgesuchten Lösungen sind farblich markiert. Für jedes Konzept ist der Morphologische Kasten dargestellt. Eine bessere Veranschaulichung der ausgesuchten Lösungen wird in Tabelle 2 präsentiert.

Abbildung 26 Darstellung von drei Konzeptlösungen im Morphologischen Kasten

Tabelle 2 Darstellung der drei Konzeptlösungen im Vergleich

| | Konzept 1 | Konzept 2 | Konzept 3 |
|---|---|--|--|
| Energiequelle zur Verfügung stellen | Der elektrische Strom wird über Lithium-Ionen-Batterien zur Verfügung gestellt. Als Anodenmaterial wird Silizium verwendet. | Der elektrische Strom wird über Lithium-Ionen-Batterien zur Verfügung gestellt. Der Nickel Anteil ist mit Lithium und Mangan ersetzt | Der elektrische Strom wird über Lithium-Metall-Akkus zur Verfügung gestellt. |
| Elektrischen Antriebsstrang vor Fremdkörper schützen | Rohrförmiges Gehäuse | Topfförmiges Gehäuse | Rohrförmiges Gehäuse |
| Hohe Leistungsdichte der Energiequelle sicherstellen | Eine hohe Leistungsdichte wird mit Pouchzellen gewährleistet | Eine hohe Leistungsdichte wird mit Prismatischen Zellen gewährleistet | Eine hohe Leistungsdichte wird mit Pouchzellen gewährleistet |
| Alterung der Energiequelle reduzieren | Kühlungssysteme & Der Ladezustand wird überwacht und ausgeglichen durch das Batteriemanagementsystem | Kühlungssysteme & Der Ladezustand wird überwacht und ausgeglichen durch das Batteriemanagementsystem & Laden mit geringen Strömen | Kühlungssysteme & Der Ladezustand wird überwacht und ausgeglichen durch das Batteriemanagementsystem |

| | | | |
|---|--|--|---|
| Energiequelle aufladen | Batterie auswechseln | Der elektrische Strom wird über eine Zapfsäule aufgeladen | Der elektrische Strom wird über eine Zapfsäule aufgeladen |
| Energieverlust verhindern | Die Energiequelle wird redundant ausgelegt | Die Energiequelle wird redundant ausgelegt | Die Energiequelle wird redundant ausgelegt |
| Elektrischen Antrieb mit Energie versorgen | Leitung aus Kupfer | Leitung aus Kupfer | Leitung aus Kupfer |
| Elektrische Energie in mechanische Energie umwandeln | Elektromotor bürstenlos | Elektromotor bürstenlos | Elektromotor bürstenlos |
| Antrieb kühlen | Luftkühlung | Wasserkühlung | Luftkühlung |
| Temperatur der Energiequelle regulieren | Eine integrierte Kühlplatte die mit Wasser, Glykol und einer Brandschutzflüssigkeit durchströmt wird, sorgt für die Kühlung der Energiequelle & Das Kühlmittel wird durch einen Zuheizer erwärmt, dies ist im Kühlkreislauf integriert | Die Energiequelle ist mit einer thermischen Isolierung umgeben, um die Auswirkungen von Umgebungstemperaturen zu reduzieren & Luftkühlung | Eine integrierte Kühlplatte die mit Wasser, und einer Brandschutzflüssigkeit durchströmt wird, sorgt für die Kühlung der Energiequelle & Das Kühlmittel wird durch einen Zuheizer erwärmt, dies ist im Kühlkreislauf integriert |
| Schwingungen und Vibrationen des Antriebs reduzieren | Gummi- oder Gummimetalllager, um die Übertragung von Vibrationen auf andere Strukturen zu minimieren & Regelmäßige Wartung und Inspektion | Automatische Schwingungsregulierung über Sensorik & Regelmäßige Wartung und Inspektion | Steifigkeit des Motorgehäuses |
| Schwingungen und Vibrationen rotierender Komponente reduzieren | Auswuchtgerechte Konstruktion der Propeller | Ummanteln rotierender Komponente, um die Schwingung und Vibration einzufangen | Auswuchtgerechte Konstruktion der Propeller |
| Gewichtskraft überwinden | Horizontale Propeller | Horizontale Impeller | Horizontale Propeller & Tiltwing: Fähigkeit, die Tragflächen zu kippen und zwischen senkrechtem Start und horizontalem Flug umzuschalten |
| Luftwiderstand reduzieren | Aerodynamisches Design & Glatte Oberfläche | Aerodynamisches Design & Geringe Querschnittsfläche/Stirnfläche | Geringe Gesamtfläche |
| Lärmbelastigung reduzieren | Rotoren auswuchten | Akustikumkleidung absorbieren den Lärm & Aerodynamisches Design | Rotoren auswuchten |
| Auftriebsverlust verhindern | Alle Komponente, die für den Auftrieb verantwortlich sind, sind mehrfach redundant ausgelegt & Alle Antriebe sind unabhängig voneinander und beeinflussen sich gegenseitig nicht | Alle Komponente, die für den Auftrieb verantwortlich sind, sind mehrfach redundant ausgelegt & Alle Antriebe sind unabhängig voneinander und beeinflussen sich gegenseitig nicht | Alle Komponente, die für den Auftrieb verantwortlich sind, sind mehrfach redundant ausgelegt & Alle Antriebe sind unabhängig voneinander und beeinflussen sich gegenseitig nicht |
| Sanftes Aufsetzen sicherstellen | Kufen | Einziehbares Fahrwerk mit Reifen | Festes Fahrwerk mit Reifen |

| | | | |
|--|---|--|---|
| Stillstand ermöglichen | keine Lösung | Anti-Rutsch-Gummibelag am Fahrwerk | Elektromechanische Bremse |
| Kippen verhindern | Multicopter Bauweise | Tragwerk & Leitwerk | Multicopter Bauweise |
| Verbindung herstellen | WLAN | WLAN | WLAN |
| Kommunikationssysteme bereitstellen | Funkkommunikation | Funkkommunikation | Sprach- und Datennetze |
| Daten aufnehmen | Daten werden durch die Data Concentration Unit aufgenommen | Daten werden durch Sensoren aufgenommen | Daten werden durch Sensoren aufgenommen |
| Positionen erfassen | GPS-Global Positioning System | GPS-Global Positioning System | Sensoren |
| Kollisionsgefahr erkennen | ODESSA- Sensor für kleine Flugzeuge/Drohnen, der Kollisionen in Bodennähe, bei Start und Landung, erkennt | Traffic Alert and Collision Avoidance System | Untermehmensspezifisch |
| Daten speichern | Cloud | lokaler Boardcomputer, Festplatte | Flugdatenspeicher |
| Daten analysieren | alle | alle | alle |
| Daten ausselektieren | Zeitbasierte Bereinigung | Unbrauchbare Daten werden überschrieben | Daten werden an einem Ablageort zwischengespeichert |
| EVTOL steuern | Fly-by-Light. Die Steuerung erfolgt durch Lichtsignale & Die Steuerung erfolgt voll-autonom | Fly-by-wire. Die Steuerung erfolgt elektronisch & Die Steuerung erfolgt voll-autonom | Die Steuerung erfolgt voll-autonom |
| Warnung ausgeben | visuelle Warnung (blinkende Lichter) & Audiowarnung & Textnachricht | visuelle Warnung (blinkende Lichter) & Audiowarnung & Textnachricht | visuelle Warnung (blinkende Lichter) & Audiowarnung & Textnachricht |
| Entertainment anbieten | 360° Kamera Blick | keine | 360° Kamera Blick |
| Daten extern übertragen | Datenübertragung über das Internet | Datenübertragung über das Internet | Datenübertragung über Sprach- und Datennetze |
| Datensicherheit gewährleisten | Verschlüsselung | Sicherheitssoftware | Zugriffsbeschränkung |
| Passagiere aufnehmen | Pax = 4 | Pax = 4 | Pax = 2 |
| Passagiere einlassen | Der Einlass erfolgt über eine ausschwenkende Tür | Der Einlass erfolgt über eine Kuppeltür, indem die Passagiere auf dem Rumpf in die Kabine klettern | Der Einlass erfolgt über eine ausschwenkende Tür |
| Auftrieb im Reiseflug erzeugen | Propeller | Tragflächen & Impeller | Propeller |

| | | | |
|---|---|---|--|
| Vortrieb im Reiseflug erzeugen | Drehzahl regulieren | elektrische Turbine | Senkrechte Propeller & Tiltwing: Fähigkeit, die Tragflächen zu kippen und zwischen senkrechtem Start und horizontalem Flug umzuschalten |
| Gepäck verstauen | Verstaumöglichkeiten im Sitz | Verstaumöglichkeiten an der Seite (Fächer am Sitz) | Verstaumöglichkeiten hinter dem Sitz & Verstaumöglichkeiten unter dem Sitz |
| Haustiere unterbringen | keine Lösung | keine Lösung | Für Haustiere steht eine fest integrierte Box mit Belüftungsschlitzen zur Verfügung |
| Plätze anbieten | Einzel-Sitzplätze mit Gurtsystemen | Klappsitze mit Gurtsystemen | Einzel-Sitzplätze mit Gurtsystemen |
| Status und Informationen für Passagiere anzeigen | Die Informationen werden durch eine Audioausgabe aufgenommen z.B. Durchsagen, oder Headsets für jeden Passagier | Die Informationen werden durch eine Audioausgabe aufgenommen z.B. Durchsagen, oder Headsets für jeden Passagier | Die Informationen werden visuell aufgenommen z.B. über einen Boardcomputer, einen Smartscreen oder einer Datenbrille, die auch bei Bedarf die Gebärdensprache anzeigt. |
| Passagier-Sicherheits-Systeme bereitstellen | Dreipunktgurt & Jedem Passagier steht eine Schwimmweste zur Verfügung | Zweipunktgurt | Vierpunktgurt & Eine aktive Kopfstütze folgt nach einem Aufprall dem Kopf des Passagiers und reduziert den Druck auf die Halswirbelsäule & Jedem Passagier steht eine Schwimmweste zur Verfügung |
| Absturz-Notfallsysteme bereitstellen | Vor einem Absturz wird ein automatisch ein Fallschirm oberhalb des Rumpfes ausgelöst | Vor einer Notwasserlandung wird automatisch ein Wasserboot unterhalb des Rumpfes ausgelöst | Vor einem Absturz wird ein automatisch ein Fallschirm oberhalb des Rumpfes ausgelöst |
| Kräfte standhalten | Kohlenfaserverstärkter Kunststoff | Thermoplastisches Verbundwerkstoff | Thermoplastisches Verbundwerkstoff |

4.4 Konzeptbeschreibung

Nachdem unterschiedlichste Lösungsmöglichkeiten erarbeitet wurden, kommt es nun zur Konzeptfindung. Anhand des Morphologischen Kastens wird zur jeder Subfunktion eine oder eine Kombination mehrerer Lösungsmöglichkeiten gefunden. Es leiten sich drei Konzeptideen her, die nacheinander in den folgenden Abschnitten dargestellt und beschrieben werden.

4.4.1 Der eSIM-Hexacopter (eSIMHC)

Das erste Konzept ist in Abbildung 27 dargestellt. Eine personalisierte Bezeichnung ergänzt den vollständigen Namen des eVTOLs: Der eSIM-Hexacopter, welcher abgekürzt als "eSIMHC" bezeichnet wird. In dieser Bezeichnung symbolisiert der Buchstabe "e" den elektrischen Antrieb und das Kürzel "SIM" die Urheberin des Konzepts.



Abbildung 27 3D-Ansicht eSIMHC (Eigene Darstellung)

Wie in Abbildung 27 dargestellt, gehört der eSIMHC der Multicopter-Konfiguration an. Sechs Tragarme sind jeweils mit 12 Motoren und 12 Propeller ausgestattet. Jeder dieser Motoren betreibt einen eigenen Propeller an und steht in Unabhängigkeit zu den anderen Motoren. Durch die Anzahl an Motoren und Propeller ist der eSIMHC mehrfach redundant ausgelegt und gewährleistet somit höchste Sicherheitsstandards. Die Steuerung kann vollautonom erfolgen, zu Beginn wird jedoch ein Pilot an Bord sein. Der Auf- und Vortrieb erfolgt über dieselben Systeme, sodass mit der Regulierung der Drehzahl sowohl der Schwebeflug als auch der Reiseflug sichergestellt werden kann. Der Antrieb ist vollelektrisch und wird durch hoch leistungsfähige Lithium-Ionen-Batterien versorgt. Die Passagierkapazität ist auf vier Personen einschließlich des Piloten beschränkt. Verstaumöglichkeiten für Gepäcktaschen sind vorhanden.

Architektur

Der eSIMHC hat eine Gesamtlänge von 4m und eine Spannweite von 5m. Der Propeller Durchmesser liegt bei $d = 1m$. Insgesamt sind sechs Arme am Rumpf angebracht. Zwei dieser Arme sind oberhalb angeordnet und verlaufen senkrecht, während die unterhalb angebrachten Arme eine X-Form darstellen. Diese Anordnung soll den Abstand zu den anderen Armen vergrößern und die Aufnahme der verwirbelten Luft reduzieren. Jeder dieser Arme ist mit jeweils

2 Motoren und zwei zweiblättrigen Propellern ausgestattet. Die Batterien befinden sich aus Stabilitätsgründen hinten unter dem Rumpf und können ausgewechselt werden, indem sie einfach herausgezogen werden. Der eSIMHC wird durch zwei Kufen stabil auf dem Boden gehalten. Auf beiden Seiten verfügt das eVTOL eine ausschwenkende Tür, über die der Einlass der Passagiere erfolgt. Vielfältige Sensoren sind am Gehäuse verbaut und bilden die Basis der Flugsteuerung. Die gesamte Struktur ist aerodynamisch gestaltet und stellt aufgrund der glatten Oberfläche eine effiziente Luftströmung dar. Die folgenden Ansichten sind Grundskizzen des eSIMHC.

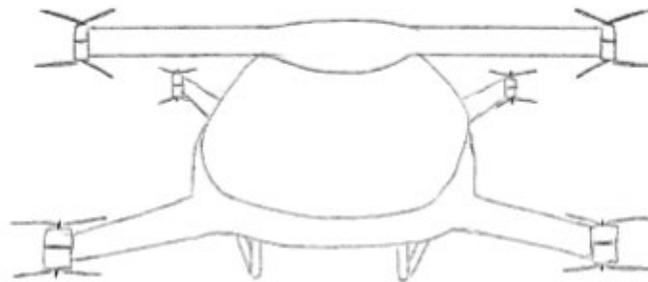


Abbildung 28 Vorderansicht eSIMHC (Eigene Darstellung)

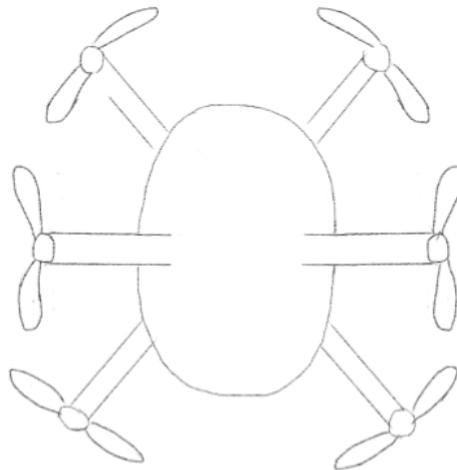


Abbildung 29 Draufansicht eSIMHC (Eigene Darstellung)

Kabine & Innenausstattung

Die Inneneinrichtung bietet insgesamt vier Einzelsitzplätze mit je 2 Sitzreihen an. Als passives Sicherheitssystem verfügt der eSIMHC Dreipunktgurte an jedem Sitz. Für Gepäck und Taschen sind Verstaumöglichkeiten im Sitz vorhanden. Die Passagiere öffnen die Klappe des Sitzes nach oben und können ihr Gepäck im Hohlraum verstauen. Vor der ersten Sitzreihe befinden sich alle Steuereinheiten mit einem zentralem Boardcomputer, der wichtige Informationen für den Piloten

bereitstellt. Darüber hinaus wird die Aussicht über eine integrierte 360°- Kamera übertragen, die jedoch hauptsächlich für das Kollisionswarnsystem genutzt wird. Die großen Fenster bieten den Passagieren eine gute Aussicht während des Flugs und sorgen für eine vergrößerte Wahrnehmung des Innenraums. Eine WLAN-Verbindung ist vorhanden und kann durch die Passagiere genutzt werden. Die Informationsübertragung an die Passagiere erfolgt über automatische Durchsagen. Abbildung 30 zeigt einen Querschnitt der Kabine.

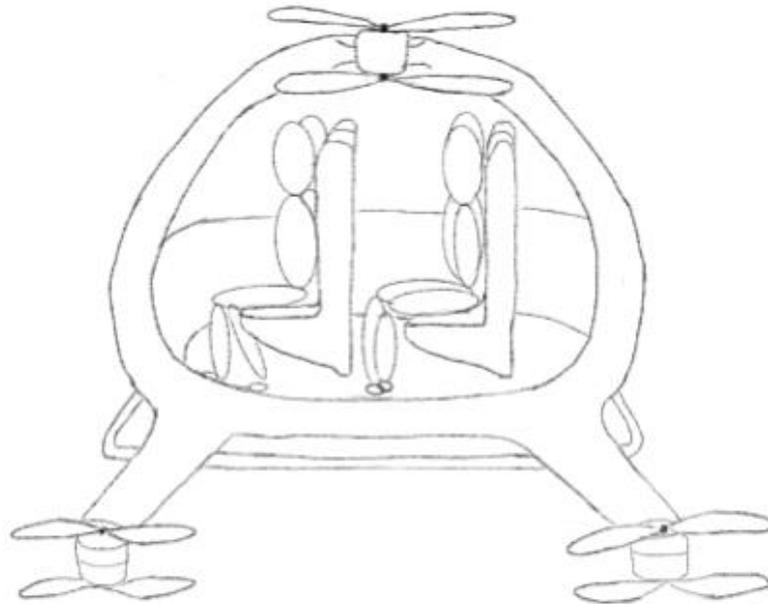


Abbildung 30 Querschnitt eSIMHC (Eigene Darstellung)

Antrieb

Angetrieben wird der eSIMHC über elektrische Motoren, welche über Lithium-Ionen-Batterien mit Energie versorgt werden. Als Anoden Material wird, statt üblich Graphit, Silizium verwendet, da Silizium bis zu zehn Mal mehr Lithium einlagern kann und somit die Energiedichte steigert. (Doppelbauer, 2020 S.156). Zur Ermittlung der erforderlichen Antriebsleistung wird im Folgenden eine kurze Berechnung durchgeführt. Hierbei wird nur die erste Flugphase, das senkrechte Starten berücksichtigt, da hierfür die höchste Energie erforderlich ist (Reinhold 2020).

Im Durchschnitt wiegen die Menschen in Hamburg 74,8 kg (Grieß, 2015). Für jeden Passagier wird ein Durchschnittswert von 80kg angenommen, einschließlich der Gepäck- und Handtaschen. So ergibt sich für vier Passagiere die maximale Gewichtszulassung wie folgt:

$$m_{max} = 320 \text{ kg}$$

Für das Leergewicht des eVTOLs wird eine Annahme getroffen. Hierfür wird der zweisitzige eHang 216 zum Vergleich berücksichtigt. Dieses eVTOL ist ein Multicopter und hat ein

Leergewicht von 360kg (TransportUp, 2023). Das Gewicht des eSIMHCs wird folgendermaßen abgeschätzt:

$$m_{eSIMHC} = 600 \text{ kg}$$

Die maximale Abflugmasse setzt sich aus den abgeschätzten Werten des Gewichts zusammen.

$$MTOW = m_{pax} + m_{eSIMHC} = 920 \text{ kg} \quad [1]$$

Zunächst lässt sich die Gewichtskraft ermitteln, daraus erschließt sich dann die mindestens erforderliche Auftriebskraft, mit der die Gewichtskraft kompensiert werden kann. Mit der Erdbeschleunigung $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$ ergibt sich die Gewichtskraft wie folgt:

$$G_{eSIMHC} = MTOW * g = 9025,2 \text{ N} \approx 9025 \text{ N} \quad [2]$$

Die erforderliche Auftriebskraft für das senkrechte Starten muss somit größer sein als die ermittelte Gewichtskraft

$$F_A > G_{eSIMHC}$$

Zur Berechnung der aerodynamischen Antriebsleistung, die für den Schwebeflug erforderlich ist, wird die Luftdichte ρ_{Luft} , die Rotationsfläche $A_{Propeller}$ und die Gewichtskraft G_{eSIMHC} benötigt. Der Durchmesser der Propellerblätter liegt bei $d = 1m$ und $x_p = 12$ stellt die Anzahl der Propeller dar.

$$\rho_{Luft} = 1,225 \frac{kg}{m^3}$$

$$A_{Propeller} = \pi * r^2 * x_p = 9,4m^2 \approx 9 \text{ m}^2 \quad [3]$$

$$P_{A,erf} = G_{eSIMHC} * \sqrt{\frac{G_{eSIMHC}}{2 * \rho * A_{Propeller}}} = 178423,56 \text{ W} \approx 179 \text{ kW} \quad [4]$$

Die aerodynamischen Gesamtleistung des Antriebs liegt bei 179 kW. Dies stellt die mindestens erforderliche Leistung dar und beinhaltet keine Verluste, die z.B. durch die Widerstände der elektronischen Leitungen oder auch durch mechanische Reibung im gesamten Antrieb auftreten. Das bedeutet, die zu erbringende Leistung der Elektromotoren muss höher sein, als die Rechnung hergibt. Um die tatsächliche Leistung des Elektromotors zu bestimmen, muss der Wirkungsgrad des Getriebes und des Propellers berücksichtigt werden. Der Wirkungsgrad des Propellers wird auf 90% geschätzt (Lage, 2022), und der des Getriebes wird auf 98 % geschätzt (A. Al-Mashhadani, persönliche Kommunikation, 06.Oktober 2023). Zusammen ergibt sich ein Wirkungsgrad von $\eta_{P,G} = 88,2\%$.

$$P_{M,erf,G} = P_{A,erf} * \eta_{P,G}^{-1} \approx 203 \text{ kW} \quad [5]$$

Mit der Anzahl der Motoren $x_M = 12$ wird diese Leistung aufgeteilt.

$$P_{M,erf} = \frac{P_{M,erf,G}}{x_M} \approx 17 \text{ kW} \quad [6]$$

Um die Batterieleistung zu ermitteln, müssen die Wirkungsgrade der Elektromotoren η_E und der Leistungselektronik η_L berücksichtigt werden. Hierfür wird der Wirkungsgrad der Elektromotoren auf 90% (Paschotta, 2023), und der Leistungselektronik ebenfalls auf 90% abgeschätzt (A. Al-Mashhadani, persönliche Kommunikation, 06.Oktober 2023).

$$\eta_M = 90\%$$

$$\eta_L = 90\%$$

Insgesamt ergibt sich einen Gesamtwirkungsgrad von $\eta_{M,L} = 81\%$. Somit kann die Batterieleistung mit der folgenden Formel berechnet werden:

$$P_{B,erf} = P_{M,erf,G} * \eta_{M,L}^{-1} \quad [7]$$

$$P_{B,erf} = 203 \text{ kW} * 0,81^{-1} = 250,61 \text{ kW} \approx 251 \text{ kW}$$

Die Batterie muss dementsprechend 251 kW leisten, um dem Antrieb die erforderliche Leistung zuführen zu können.

Aus Sicherheitsgründen wird die Leistung der Elektromotoren erhöht. Es ergeben sich folgende Abschätzungen für die Leistung der einzelnen Elektromotoren.

$$P_M = 25 \text{ kW}$$

Mit einer erforderlichen Gesamtleistung von 204 kW und einer abgeschätzten Gesamtleistung von 300 kW, können vier Elektromotoren nach einem Ausfall problemlos durch die anderen Elektromotoren kompensiert werden. Für die Berechnung der Batteriekapazität wird für die Schwebedauer eine Zeit von $t_s = 10 \text{ min}$ abgeschätzt.

$$B_{Kapazität,S} = P_{M,erf,G} * t_s = 203 \text{ kW} * \left(\frac{10}{60}\right) \text{ h} = 34 \text{ kWh} \quad [8]$$

Die Batterie muss somit eine Kapazität von 34 kWh leisten, um den eSIMHC zehn Minuten im Schwebeflug halten zu können. Die Energiedichte $B_{Energiedichte}$ von Lithium-Ionen mit Silizium als Anoden Material liegt bei 500 Wh/kg . Mit der Batteriekapazität, die für den Schwebeflug

ermittelt wurde und der Energiedichte, kann das Gewicht der Batterie für den Schwebeflug berechnet werden.

$$B_{Masse,S} = \frac{B_{Kapazität,S}}{B_{Energiedichte}} = 68 \text{ kg} \quad [9]$$

Das Gesamtgewicht der Batterien wird auf etwa 200 kg abgeschätzt.

Mithilfe der Rechnung kann die Auswahl der Elektromotoren erfolgen. Die zu erbringende Leistung wird mit den Elektromotoren des chinesischen Unternehmens Mad Components erreicht. Die Komponenten sind für eVTOLs spezialisiert und werden weltweit eingesetzt. Um den Wartungsaufwand gering zu halten, werden bürstenlose Elektromotoren des Unternehmens eingesetzt (Mad Components). Die Elektromotoren sind in einfachen rohrförmigen Gehäusen verbaut und werden luftgekühlt, um die Überhitzung der Elektromotoren zu reduzieren. Der elektrische Strom wird den Elektromotoren über Kupferleitungen durch die Batterien zur Verfügung gestellt. Bei der Umwandlung der elektrischen Energie in mechanische Energie entstehen Vibrationen. Um die Übertragung der Motorvibration auf andere Komponente zu verhindern, werden zusätzlich im Gehäuse Gummilager verwendet, die die Vibrationen eindämmen.

Batterie

Wie bereits erwähnt, werden als Stromquelle Lithium-Ionen-Batterien mit Silizium als Anodenmaterial verwendet, da diese eine höhere Energiedichte aufweisen als übliche Lithium-Ionen-Batterien. Das Unternehmen Amperius Technologies hat nach Angaben, mit solchen Batterien eine Energiedichte von ca. 500Wh/kg erreicht. Zudem sind diese Batterien fast 50 % leichter als übliche Lithium-Ionen-Batterien (Penner, 2023). Auch Liliium wird für seine eVTOL Batterien einen hohen Silizium Anteil verwenden und kooperiert in dieser Hinsicht mit dem Batteriehersteller Customcells (Manthey, 2023). Um eine hohe Leistungsdichte zu gewährleisten, werden die Lithium-Ionen-Batterien in der Pouchzellen Bauform eingesetzt. Dabei werden mehrere rechteckige Lagen von Elektroden, Ableitfolien und Separatoren übereinander gelagert. Der Vorteil dieser Bauart ist zum einen, dass die volumetrische Energiedichte hoch ist und zum anderen, die Pouchzellen gut gekühlt werden können. (Doppelbauer, 2020, S.168) Letzteres spielt eine wichtige Rolle, um die Lebensdauer der Batterie lange beizubehalten. Denn die Hauptursache für die Alterung einer Batterie ist die temperaturabhängige Zersetzung der Elektrolytkomponenten. (Doppelbauer, 2020, S. 139) Die Einsatztemperatur der Batterien liegt zwischen +20°C bis +60°C, dementsprechend muss nach Bedarf gekühlt und erwärmt werden. (Doppelbauer, 2020, S.149) Die Kühlung erfolgt durch eine Kühlplatte, die mit Wasser durchströmt wird und gleichzeitig kann das Wasser durch ein Heizelement erwärmt werden. Aufgrund der Brandgefahr von Lithium-Ionen-Batterien, wird dem Kühlkreislauf zusätzlich noch

eine Brandschutzflüssigkeit hinzugegeben (FutureFuels, 2022). Der Zustand der Batterie wird zudem über das integrierte Batteriemanagementsystem überwacht.

Auf- und Vortrieb

Um den Schwerpunkt des eVTOLs sind 12 zweiblättrige Propeller symmetrisch angeordnet, die gleichzeitig für den Auf- und Vortrieb verantwortlich sind. Mehrblättrige Propeller haben zwar viele Vorteile, jedoch ist aufgrund der hohen Redundanz die Wahl von zwei Blättern am effizientesten. Dies begründet sich auch mit der Entstehung der Luftverwirbelung. Ein Blatt verwirbelt die Luft, in die das nächste Blatt aufgrund der Drehung reinläuft, dieser ist höher, wenn mehrere Blätter vorhanden sind. (Rattat, 2015, S.83) Jeder Propeller wird von einem Leistungsstarken Motor angetrieben und setzt dessen Drehmoment in Schubleistung um. Dabei verlaufen die Drehachsen der Propeller alle Vertikal, sodass die erzeugte Kraft, der Gewichtskraft des eVTOLs entgegenwirkt und Auftrieb erzeugt wird (Schulte, 2007). Ein Blatt des Propellers kann mit einer Tragfläche eines Flugzeugs verglichen werden. Der Unterschied liegt jedoch bei der unregelmäßigen Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit. Dieser ist bei Flugzeugen an der Tragflächenvorderkante überall gleichmäßig. Bei Propellerblättern wächst die Strömungsgeschwindigkeit, und somit die Belastung der Blätter von innen nach außen. Dementsprechend ist die Profiländerung von innen nach außen essenziell, um eine effektive Nutzung des Luftstroms zu erreichen (Rattat, 2015, S.82). Der Druckunterschied zwischen der gewölbten Vorder- und der flachen Hinterseite der einzelnen Blätter erzeugt, die nach oben gerichtete Kraft, die Auftriebskraft. Wenn die Auftriebskraft größer ist als die Gewichtskraft des eVTOLs, steigt das Fluggerät senkrecht in die Luft. Für den Horizontalen Flug werden dieselben Propeller genutzt. Die starren Rotoren können durch einfache Rotationsgeschwindigkeiten reguliert werden. So wird die Drehzahl der Motoren bei einigen Propellern verändert, sodass der Horizontalflug gewährleistet werden kann. Dreht somit ein Propeller an einer Stelle schneller, hebt der eSIMHC an dieser Stelle höher an und leistet den Vortrieb. Um die Landung durchzuführen, wird die Drehzahl der gesamten Propeller reduziert (Hansen, 2022).

Flugsteuerung

Der eSIMHC ist ein vollständig autonomes eVTOL, das ohne jegliche Hilfe in allen Flugphasen automatisch gesteuert werden kann. Die Avionik des eVTOLs wird von dem Hersteller Diehl Aviation integriert. Zum Flugsteuerungsrechner wird ein Backup-Steuerungscomputer integriert, der sich im Notfall einschalten kann. Zusätzlich wird ein GPS- System für die Positionserfassung installiert. Das eVTOL ist mit dem Fly-by-light System ausgestattet. Das heißt die Datenübertragung bzw. die Übersendung der Steuerbefehle, erfolgt über Lichtsignale, indem elektrische Signale des Rechners in optische Signale umgewandelt werden. Da eine Internetverbindung im eSIMHC vorhanden ist, kann die Nutzung von Mobiltelefonen einen

Einfluss auf die Flugsteuerung haben. Da das Fly-by-Light Steuerungssystem jedoch eine hohe Störsicherheit gegenüber elektromagnetischen Einflüssen hat, werden keine Komplikationen entstehen. Zusätzlich wird eine DCU-Box integriert, die alle optischen Signale der 12 Rotoren sammelt und diese als Information für den Piloten bereitstellt (Van Geenen, 2022). Die gesammelten Daten werden in einer Cloud gespeichert und bilden die Basis für die Künstliche Intelligenz. Das autonome System muss selbstbestimmt, selbstorganisiert und handlungsfähig sein, wofür eine umfangreiche Anzahl an Daten notwendig ist. Datenquellen und Informationen müssen eigenständig analysiert und selektiert werden (Neugebauer, 2020). Hierfür wird das System so programmiert, dass Graphen, Texte, Bilder, Videos und Sprachen analysiert werden können. Darüber hinaus wird auch eine Anomalieerkennung integriert, um Fehleranalysen durchführen zu können. Das System ist somit in der Lage, zeitbasierte Bereinigungen von unbrauchbaren Daten vorzunehmen. Der aktuelle Zustand des eVTOLs wird über die Cloud übertragen und Personen am Tower haben Zugriff darauf. Um die Cybersicherheit zu gewährleisten, werden die Daten automatisch verschlüsselt. Bei Warnungen oder Fehlermeldungen werden automatische visuelle Warnungen, Audiowarnungen und Textbenachrichtigungen angezeigt. Darüber hinaus ist neben der Internetkommunikation noch die Funkkommunikation integriert, um den Kontakt extern sicherzustellen. Zusätzlich ist der eSIMHC mit dem ODESSA Sensor ausgestattet. Dieser kann Hindernisse bis zu 140 m Entfernung erkennen und soll vor Kollisionsgefahr warnen. Dafür arbeitet der Sensor mit einer integrierten Radartechnologie, die für die Zielerfassung zuständig ist und eine 360° Kamera sorgt für die Erkennungssicherheit (Europäische Kommission, 2020).

Material

Jedes zusätzliche Gewicht erfordert Energie, umso mehr muss auf leichte Konstruktionen gesetzt werden. Der eSIMHC ist hauptsächlich aus Kohlefaserverstärktem Kunststoff gebaut. Die Dichte liegt bei $1,5 \frac{g}{cm^3}$ und ist im Gegensatz zu Aluminium mit einer Dichte von $2,7 \frac{g}{cm^3}$ oder Glasfaserverstärktem Kunststoff mit der Dichte von $2,1 \frac{g}{cm^3}$ deutlich leichter. Eine sehr hohe Festigkeit und gute Korrosionseigenschaften machen den Einsatz des Werkstoffs umso attraktiver. Die Kosten sind teilweise hoch, dennoch bietet der Werkstoff die geringsten Gewichte und höchste Festigkeiten (Rattat, 2015, S.54-56). Auch die Propeller müssen möglichst leicht sein und hohe Belastungen standhalten können. Dementsprechend wird hier ebenfalls CFK eingesetzt. Da jedoch das Material geringe elektrische Leitfähigkeiten besitzt, werden Metallgitternetze aus Kupfer in den Werkstoff eingebracht, die wiederum als Blitzschutzleiter dienen (Schopferer, 2023). Als Fenstermaterial werden gereckte Polymethylmethacrylat (PMMA) Platten der Marke Plexiglas verwendet, da diese ein geringes Gewicht aufweisen und robust sind. Außerdem ist eine hohe Schlagzähigkeit, chemische- und Witterungsbeständigkeit vorhanden. Darüber hinaus ist das Material alterungsbeständig, denn Kratzer lassen sich gut schleifen und

polieren. Dieses Material schützt zudem die Passagiere vor UV-Strahlungen, da UV-Strahlungen als auch Infrarotstrahlungen absorbiert werden (Shen, 2023).

Wartung

Für eine hohe Zuverlässigkeit, muss regelmäßig gewartet werden. In dieser Hinsicht bietet der eSIMHC eine einfache Architektur, da z.B. die Position der Motoren und Propeller einfach zu erreichen ist. Der Einsatz von bürstenlosen Elektromotoren verringert zudem den Wartungsaufwand, weil die Bürsten nicht ausgewechselt werden müssen (Rattat, 2015, S.101). Es ist notwendig, z.B. die Wicklungen auf Schäden, Unwuchten des Motors und das Spiel der Lager zu kontrollieren. Die Wartung der Propeller ist auch von großer Bedeutung, da Fehler und Unstimmigkeiten im Zusammenbau, Vibrationen und Torsionskräfte erzeugen und zu einer ineffizienten Antriebsleistung führen. Auch hier wird insbesondere auf eine auswuchtgerechte Konstruktion geachtet, da somit auch die Lärmbelästigung reduziert werden kann. Die Wartung umfasst jegliche Teile, die die Funktionsfähigkeit des eVTOLs beeinflussen, dies betrifft insbesondere auch die Flugsteuerung und die gesamte Software (Rattat, 2015, S.88, 107).

Sicherheit

Das Konzept ist durch seine 12 unabhängigen Motoren und Propeller mehrfach redundant ausgelegt. Wenn ein Motor an einem Arm ausfällt, kann dieser Ausfall mithilfe des anderen Motors an demselben Arm kompensiert werden. Die verwendeten Materialien stellen eine sehr hohe Festigkeit dar und sind auf Blitzeinschläge, Witterungen und Brandgefahren ausgelegt. Die Passagiere sind durch passive Systeme während der gesamten Flugphase geschützt, und darüber hinaus befinden sich für jeden Passagier Schwimmwesten an Bord. Trotz der hohen Redundanzsysteme, verfügt das eSIMHC ein Fallschirm für das gesamte eVTOL, somit ist auch in einer Notsituation, das sichere Landen gewährleistet.

Kostenabschätzung

Die Kosten des eSIMHCs werden aufgrund weniger komplexer Systeme voraussichtlich nicht sehr hoch ausfallen. Darüber hinaus sind nur wenige Kosten hinsichtlich der Ergonomie berücksichtigt, denn Passagieren stehen kaum ergonomische Funktionen zur Verfügung. Die Wartungskosten dürften ebenfalls gering ausfallen, da nur wenige komplexe Komponente integriert sind und abgesehen von den Propellern nicht viele bewegliche Teile vorhanden sind. Ein Nachteil wird jedoch sein, dass für die Avionik viele zusätzlichen Funktionen integriert werden, was die Kosten in Bezug auf die Flugsteuerung erhöhen kann. Ebenfalls werden die Materialkosten aufgrund des Einsatzes von CFK hoch sein. Im gesamten ist der eSIMHC jedoch in der Kostenabschätzung als mittel einzustufen.

4.4.2 Der eSIM-Jet (eSIMJT)

Der eSIM-Jet zeichnet sich durch seine aerodynamische Bauweise aus. Bis zu vier Passagiere können in dem eSIMJT platznehmen und den schnellen Ortswechsel miterleben. Die Kabinenarchitektur kann in kürzester Zeit variiert werden, um eine barrierefreie Nutzung zu ermöglichen. Das eVTOL verfügt über zwei Flügel und ein Seitenleitwerk. Die Flügel sind jeweils mit drei integrierten Impeller ausgestattet, die für das senkrechte Starten sorgen. Am Seitenleitwerk sind an jeder Seite jeweils drei elektrische Jet-Turbinen angebracht, die im Reiseflug für den Vortrieb verantwortlich sind. Die Jet-Turbinen und Impeller werden durch Lithium-Ionen-Akkuzellen angetrieben. Eine Redundante Auslegung der Antriebe und der autonomen Technik, sorgt, gemäß den behördlichen Anforderungen für eine hohe Sicherheit.

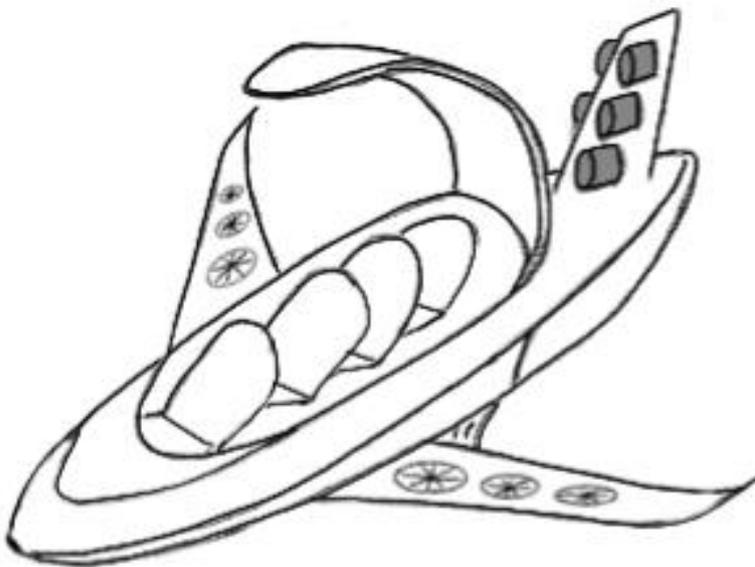


Abbildung 31 3D-Ansicht eSIMJT (Eigene Darstellung)

Architektur

Der eSIMJT weist eine fast identische Bauweise zu gewöhnlichen Flugzeugen auf. Der Rumpf ist Kreis- bis ovalförmig und weist eine Länge von 5 m auf, eine Höhe von 2 m und eine Spannweite von 11 m. Aufgrund der geringen Stirnfläche und der Form, bietet dieses Konzept hervorragende aerodynamische Eigenschaften. Am Rumpf sind Tragflächen vorhanden, die für die Stabilität des eSIMJTs sorgen und im Reiseflug hauptsächlich für den Auftrieb verantwortlich sind. Ein Seitenleitwerk dient ebenfalls der Stabilität und ist auf jeder Seite mit elektrischen Turbinen ausgestattet, die für den Schub verantwortlich sind. Die Tragflächen sind lang und bieten damit eine effiziente aerodynamische Form. Dies resultiert in einer besseren Erzeugung des Auftriebs. Oberhalb des Rumpfes ist eine Glaskuppel vorhanden, die geöffnet werden kann. Für den Piloten und für die Passagiere ist damit eine optimale Sicht über Hamburg gewährleistet. Die Besonderheit dieses eVTOL liegt in dem Zugang zu der Kabine, der auf zwei verschiedene Arten

erfolgen kann. Zwischen der Tragfläche und dem Rumpf ist ein Auftritt angebracht, der zum Einsteigen über die Lifttür genutzt werden kann. Ein weiterer Eingang wird über den hinteren Bereich möglich sein. Wenn dieser Bereich geöffnet wird, dient er als Rampe. Jedoch ist hauptsächlich die Nutzung des hinteren Bereichs für Menschen gedacht, die auf einen Rollstuhl angewiesen sind. So kann das einfahren in die Kabine, bei elektrischen Rollstühlen, sogar ohne Hilfe durchgeführt werden. Ein einziehbares Fahrwerk ist ebenfalls integriert und sorgt für das leichte Aufsetzen beim Landen. Die Fahrwerksräder sind mit Anti-Rutsch-Gummibelägen ausgestattet und sorgen für einen festen Bodenstand. Es besteht aus drei Gestellen mit Rädern. Zudem wird auch durch die Aufnahme des Schwerpunktes die Stabilität gewährleistet. Um jedoch im Reiseflug den Luftwiderstand nicht zu begünstigen, werden die Fahrwerke eingefahren. Die Batterien sind unter dem Rumpf platziert.

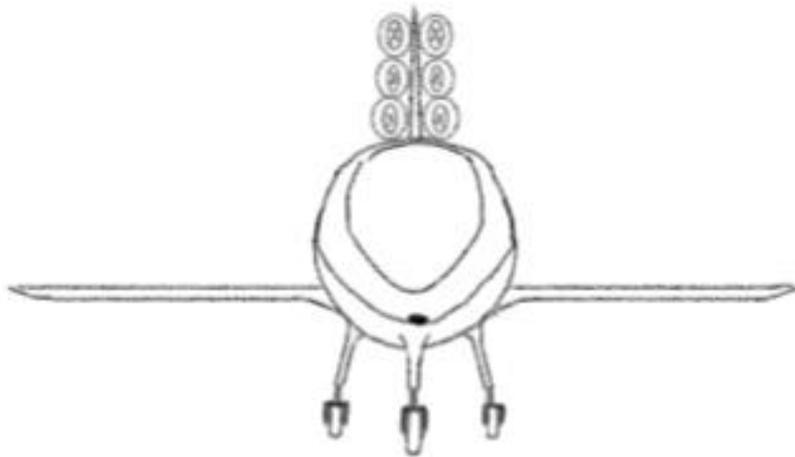


Abbildung 32 Vorderansicht des eSIMJTs (Eigene Darstellung)

Kabine und Inneneinrichtung

Die Kabinenkonfiguration ist auf vier Sitze beschränkt, die jeweils hintereinander angeordnet sind. Der erste Sitz wird vorläufig immer für den Piloten freigehalten. Dort befindet sich auch der Bordcomputer mit seinen Steuerungseinheiten, die sich rechts und links des ersten Sitzes befinden. Aufgrund des begrenzten Platzraumes bietet der Einsatz von Klappsitzen einen angenehmeren Einstieg für die Passagiere. Der dadurch eingesparte Platz zum vorderen Sitz kann durch die Passagiere genutzt werden, um ihre Taschen zu verstauen. Die Verstaumöglichkeit erfolgt über kleine Gepäckfächer, die sich auf der rechten Seite jedes Sitzplatzes befinden. Die Klappsitze sind durch ein einfaches Herunterdrücken nutzbar. Sobald kein Gewicht mehr auf den Klappsitzen ruht, klappen sie automatisch zusammen. Die Sitze sind auf dem Boden über eine Schiene befestigt. Diese Schiene hat mehrere Einraststufen, das heißt die Sitze können beliebig über einen Hebel verschoben werden. Über diesen Mechanismus ist

auch die barrierefreie Nutzung des eVTOLs möglich. Dabei wird der letzte Sitz so weit wie möglich nach vorne verschoben und so Platz für einen Rollstuhlfahrenden geschaffen. In Abbildung 33 und Abbildung 34 ist veranschaulicht, wie die Rollstuhlfahrende Person über die Rampe in das eVTOL einfährt und in der Kabine platziert ist. Zudem ist zu erkennen, dass der letzte Sitz nach vorne verschoben ist. Der eingefahrene Rollstuhl wird über einen Gurtmechanismus gesichert, der ähnlich zu dem in Autos verwendeten Systemen ist. Am Boden sind zwei Elektrogurte angebracht, die zunächst am hinteren Rahmen des eingefahrenen Rollstuhls befestigt werden müssen. Diese Gurte werden fest eingespannt, um sicherzustellen, dass der Rollstuhl sich weder nach vorne noch nach hinten bewegen kann. Zusätzlich zur Sicherung des Rollstuhlfahrers werden ausziehbare Gurte durch die Seitenwand verwendet (Autohaus Koch, 2019).

Der Vorteil ist hierbei, dass diese Menschen ihren Sitzplatz nicht wechseln müssen und auf ihren Rollstühlen sitzen bleiben können. Zudem erfolgt der Einstieg bei Elektrorollstühlen fast ohne Hilfe, dies ist ebenfalls ein sehr wichtiger Aspekt, um die Eigenständigkeit der Rollstuhlfahrenden nicht zu stören. Die Befestigung der Gurte muss jedoch durch einen Mitarbeitenden erfolgen. Die Passagiere werden über ein Zweipunktgurtsystem gesichert und erhalten wichtige Informationen über eine Audioausgabe.

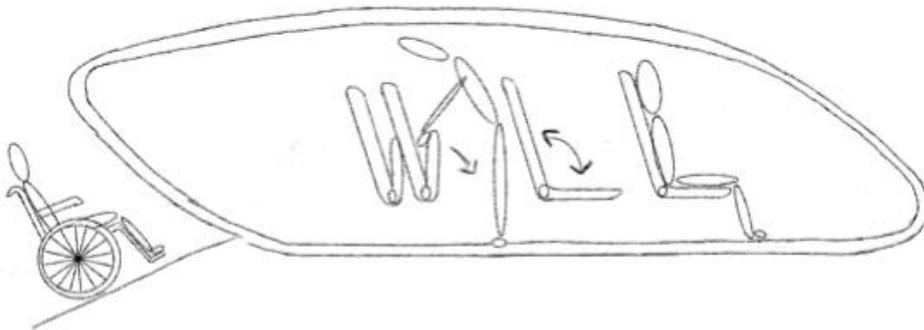


Abbildung 33 Einfahren einer Rollstuhlfahrenden Person in den eSIMJT (Eigene Darstellung)



Abbildung 34 Platzierung einer Rollstuhlfahrenden Person in der Kabine des eSIMJT (Eigene Darstellung)

Antrieb

Angetrieben wird der eSIMJT über elektrische Motoren, welche über Lithium-Ionen-Akkuzellen mit Energie versorgt werden. Zur Ermittlung der erforderlichen Antriebsleistung wird im Folgenden eine kurze Berechnung durchgeführt. Hierbei wird nur die erste Flugphase, das senkrechte Starten berücksichtigt, da hierfür die höchste Energie erforderlich ist (Reinhold, 2020).

Im Durchschnitt wiegen die Menschen in Hamburg 74,8 kg (Grieß, 2015). Für jeden Passagier wird ein Durchschnittswert von 80kg angenommen, einschließlich der Gepäck- und Handtaschen. So ergibt sich für vier Passagiere die maximale Gewichtszulassung wie folgt:

$$m_{Pax} = 320 \text{ kg}$$

Für das Leergewicht des eVTOLs wird eine Annahme getroffen. Das Gewicht des eSIMJTs wird folgendermaßen abgeschätzt:

$$m_{eSIMJT} = 800 \text{ kg}$$

Die maximale Abflugmasse setzt sich aus den abgeschätzten Werten des Gewichts zusammen

$$MTOW = m_{Pax} + m_{eSIMJT} = 1120 \text{ kg} \quad [1]$$

Zunächst lässt sich die Gewichtskraft ermitteln, daraus erschließt sich dann die mindestens erforderliche Auftriebskraft, mit der die Gewichtskraft kompensiert werden kann. Mit der Erdbeschleunigung $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$ ergibt sich die Gewichtskraft wie folgt:

$$G_{eSIMJT} = MTOW * g = 10987,2 \text{ N} \approx 10987 \text{ N} \quad [2]$$

Die erforderliche Auftriebskraft für das senkrechte Starten muss somit größer sein als die ermittelte Gewichtskraft

$$F_A > G_{eSIMJT}$$

Zur Berechnung der aerodynamischen Antriebsleistung, die für den Schwebeflug erforderlich ist, wird die Luftdichte ρ_{Luft} , die Rotationsfläche $A_{Propeller}$ und die Gewichtskraft G_{eSIMJT} benötigt. Der Durchmesser der Propellerblätter liegt bei $d = 0,8m$ und $x_p = 6$ stellt die Anzahl der Propeller dar.

$$\rho_{Luft} = 1,225 \frac{kg}{m^3}$$

$$A_{Propeller} = \pi * r^2 * x_p = 3,015m^2 \approx 3,02 m^2 \quad [3]$$

$$P_{A,erf} = G_{eSIMJT} * \sqrt{\frac{G_{eSIMJT}}{2 * \rho * A_{Propeller}}} = 423381,78W \approx 423 kW \quad [4]$$

Die aerodynamische Gesamtleistung des Antriebs liegt bei 423 kW. Dies stellt die mindestens erforderliche Leistung dar und beinhaltet keine Verluste, die z.B. durch die Widerstände der elektronischen Leitungen oder auch durch mechanische Reibung im gesamten Antrieb auftreten. Das bedeutet, die zu erbringende Leistung der Elektromotoren muss höher sein, als die Rechnung hergibt. Um die tatsächliche Leistung des Elektromotors zu bestimmen, muss der Wirkungsgrad des Getriebes und des Propellers berücksichtigt werden. Der Wirkungsgrad des Propellers wird auf 90% geschätzt (Lage, 2022), und der des Getriebes wird auf 98 % geschätzt (A. Al-Mashhadani, persönliche Kommunikation, 06.Oktober 2023). Zusammen ergibt sich ein Wirkungsgrad von $\eta = 88,2\%$.

$$P_{M,erf} = P_{A,erf} * \eta^{-1} \approx 480 kW \quad [5]$$

Mit der Anzahl der Motoren $x_M = 6$ wird diese Leistung aufgeteilt.

$$P_{M,erf} = \frac{P_{M,erf}}{x_M} = 80 kW \quad [6]$$

Um die Batterieleistung zu ermitteln, müssen die Wirkungsgrade der Elektromotoren η_E und der Leistungselektronik η_L berücksichtigt werden. Hierfür wird der Wirkungsgrad der Elektromotoren auf 90% (Paschotta, 2023), und der Leistungselektronik ebenfalls auf 90% abgeschätzt (A. Al-Mashhadani, persönliche Kommunikation, 06.Oktober 2023).

$$\eta_{M,P} = 90\%$$

$$\eta_L = 90\%$$

Insgesamt ergibt sich einen Gesamtwirkungsgrad von $\eta_G = 81\%$. Somit kann die Batterieleistung mit der folgenden Formel berechnet werden:

$$P_{B,erf} = P_{M,erf} * \eta_G^{-1} \quad [7]$$

$$P_{B,erf} = 470 kW * 0,81^{-1} = 592,59 kW \approx 593 kW$$

Die Batterie muss dementsprechend 593 kW leisten, um dem Antrieb die erforderliche Leistung zuführen zu können. Aus Sicherheitsgründen wird die Leistung der Elektromotoren erhöht. Es ergeben sich folgende Abschätzungen für die Leistung der einzelnen Elektromotoren.

$$P_M = 120kW$$

Mit einer erforderlichen Gesamtleistung von ca. 490 kW und einer abgeschätzten Gesamtleistung von ca. 720kW, können zwei Elektromotor nach einem Ausfall problemlos durch die anderen Elektromotoren kompensiert werden. Für die Berechnung der Batteriekapazität wird für die Schwebedauer eine Zeit von $t_s = 5min$ abgeschätzt.

$$B_{Kapazität,S} = P_{M,erf} * t_s = 480kW * \left(\frac{5}{60}\right)h = 40 kWh \quad [8]$$

Die Batterie muss somit eine Kapazität von 40kWh leisten, um den eSIMJT 5 min. im Schwebeflug halten zu können. Die Energiedichte $B_{Energiedichte}$ von Lithium-Ionen, mit hohem Mangan und Lithium Anteil liegt bei $700 Wh/kg$. Mit der Batteriekapazität, die für den Schwebeflug ermittelt wurde und der Energiedichte, kann das Gewicht der Batterie für den Schwebeflug berechnet werden.

$$B_{Masse,S} = \frac{B_{Kapazität,S}}{B_{Energiedichte}} = 57,71 kg \approx 58kg. \quad [9]$$

Das Gesamtgewicht der Batterien wird auf ca. 180 kg abgeschätzt.

Der eSIM-JT benötigt sehr leistungsfähige Elektromotoren. Hier wird auf die Erfahrung des Unternehmens Magicall gesetzt. Magicall stellt seit Jahren kundenspezifische Lösungen für die Luftfahrtindustrie her und konnte seine Elektromotoren erfolgreich in Elektroflugzeugen einsetzen (Müller, 2022). Die bürstenlosen Elektromotoren enthalten die neuste Generation der Magnetik- und Leistungselektronik und haben zudem ein geringes Gewicht. Mit einem robustem topfförmigem Gehäuse wird das Eindringen von Fremdkörpern ferngehalten. Das Gehäuse verfügt über Kühlkanäle, die mit Wasser durchströmt werden. Die erzeugten Vibrationen werden über die verbaute Sensorik geregelt. Die Versorgung der Elektromotoren mit Energie erfolgt über Kupferleitungen.

Batterie

Für die Versorgung der leistungsfähigen Elektromotoren sind ebenfalls Batterien mit einer sehr hohen Energiedichte nötig. Übliche Lithium-Ionen-Batterien erreichen eine Energiedichte von 200-240 Wh/kg (Bronner, 2023). In China wurden jedoch Akkuzellen mit einer Energiedichte von etwa 700 Wh/kg vorgestellt. Der Unterschied zu üblichen Lithium Batterien liegt in der Materialauswahl. Der Anteil von Nickel wurde hauptsächlich durch Lithium und Mangan ersetzt, dies bringt ein niedrigeres Gewicht mit. Die Zusammensetzung ist wie folgt: $Li_{1,2}Ni_{0,13}Mn_{0,45}Co_{0,13}O_2$. Um die Nutzung dieser Batterien in sicherheitskritischen Systemen zu ermöglichen, müssen noch weitere Sicherheitsuntersuchungen durchgeführt werden. Die hohe Energiedichte könnte jedoch das Gewichtsproblem der eVTOL lösen und die Effizienz steigern (Wunderlich-Pfeiffer, 2023).

Die Batterien werden in Form von prismatischen Zellen eingesetzt, so kann das Gehäuse aus festem Material die Beschädigung der Batterie verhindern (Doppelbauer, 2020, S.169). Die Regulierung der Batterietemperatur erfolgt dementsprechend auch durch das Gehäuse, auf Basis einer thermischen Isolierung. Zusätzlich wird ein Luftkühlungskreislauf integriert. Letzteres spielt nämlich eine wichtige Rolle, um die Lebensdauer der Batterie lange beizubehalten. Denn die Hauptursache für die Alterung einer Batterie ist die temperaturabhängige Zersetzung der Elektrolytkomponenten (Doppelbauer, 2020, S. 139). Die Batterien werden über eine Zapfsäule aufgeladen. Der Ladezustand wird über ein Batteriemanagementsystem überwacht und sorgt dafür, dass der Ladezustand weder zu niedrig noch zu hoch ist. Zudem werden beim Laden geringe Ströme verwendet, denn hohe Ströme können ebenfalls die Alterung beschleunigen. (Doppelbauer, 2020, S. 140). Um einen Ausfall der Batterie und somit den gesamten Energieverlust zu vermeiden, wird eine weitere Batterie eingebaut.

Auf- und Vortrieb

Für das senkrechte Starten sind die sechs integrierten Impeller in den beiden Flügeln verantwortlich. Diese stehen in Unabhängigkeit zu den Jet-Turbinen und tragen nur zur Erzeugung der Auftriebskraft bei. Die Impeller sind durch eine Akustikumkleidung in den Tragflächen ummantelt und erzeugen dadurch geringe Lärmemissionen. Zudem wird durch die Ummantelung ein Teil der erzeugten Vibration abgefangen. Durch die Bewegung der Impeller-Blätter wird die Luft eingezogen, beschleunigt und dabei nach unten gedrückt. Es bildet sich eine senkrecht wirkende Kraft, die Auftriebskraft. Wenn die Auftriebskraft groß genug ist, um die Gewichtskraft auszugleichen, steigt der eSIMJT senkrecht. Über jede Flugphase hinaus, erzeugen alle sechs Impeller Auftrieb. Hauptsächlich wird der Auftrieb im Reiseflug durch die Flügel erzeugt. Beim Sinken und Starten werden hauptsächlich die Impeller genutzt. Die elektrischen Turbinen sind fest am Seitenleitwerk verbaut und werden ebenfalls durch Elektromotoren und Batterien angetrieben. Für den Reiseflug sorgen die insgesamt sechs elektrischen Turbinen.

Flugsteuerung

Die Flugsteuerung des eSIM-Jets erfolgt über das Fly-by-wire-System von Honeywell. Das Fly-by-Wire-System ersetzt die manuelle Flugsteuerung mit einer elektronischen Schnittstelle und kontrolliert alle Systeme im eVTOL und ist somit in der Lage, jegliche Daten zu analysieren. Das System von Honeywell ist für eVTOLs gemacht und wurde bereits in einigen eVTOLs integriert. Zudem ist die Hardware leicht und kompakt und kann einfach integriert werden (Honeywell, 2021).



Abbildung 35 Das Fly-by-wire System von Honeywell (Honeywell, 2023)

Die Daten für das Fly-by-wire-System werden durch vielfältige Sensoren geliefert. Dafür wird zusätzlich eine Sicherheitssoftware installiert, um die Datensicherheit zu gewährleisten. Die Gesamtheit der Daten werden auf dem lokalen Bordcomputer gespeichert, dabei werden unbrauchbare Daten durch das System überschrieben, um die Überlastung der Software zu vermeiden. Zusätzlich wird das GPS- System und das Traffic Alert and Collision Avoidance System integriert. Dies soll vor Kollisionen warnen und dem Piloten Warnmeldungen in Form von Visueller Warnung, Audiowarnung und Textnachrichten ausgeben. Meldungen und Informationen können über eine Funkkommunikation oder über eine Internetverbindung extern weitergeleitet werden. Die Sensor-Daten werden verarbeitet und anschließend als Steuerbefehl für die Aktuatoren weitergeleitet. Dieser Prozess wird kontinuierlich durchgeführt. Eingesetzt wird hierfür die Sensorbox von der Robert Bosch GmbH. Inhalte der Box sind Beschleunigungssensoren für die Messung der Bewegung, Drehratensensoren für die Messung der Neigungswinkel, Magnetfeldsensoren für die Ausrichtung der Himmelsrichtungen und Drucksensoren für die Messung der Höhe und der Geschwindigkeit des eVTOLs. Die integrierten Sensoren kommen auch in der Automobilbranche zum Einsatz und bringen dadurch zuverlässige Erfahrungswerte mit. Zudem sind sie aufgrund der Serienproduktion deutlich günstiger als neue Sensoren für die Luftfahrttechnik. Diese liegen nämlich ca. zwischen zehn- bis hunderttausend Euro, die Box von

Bosch ist um ca. zehn Mal günstiger. Die integrierten Sensoren sind Mikroelektromechanische Systeme und bringen dementsprechend auch ein geringes Gewicht mit und sind ca. ein Handteller groß. (Focus, 2019) Die Integration der Box wird durch das einfache Plug&Play-Prinzip eingebaut, sodass die schnelle Nutzung möglich ist und kein großer Aufwand durch z.B. Installationen entstehen (Ebberg, 2019). Die Betriebstemperatur der Sensorbox liegt zwischen -40° und 125°C und ist somit auch bei extremen Temperaturen funktionsfähig (Roland-Bosch GmbH, 2023).



Abbildung 36 Beispiel einer Sensorbox der Roland-Bosch GmbH (Ebberg, 2019)

Material

Die gesamte Struktur des eSIM-Jets, der Rumpf, die Tragflächen, das Antriebssystem und auch der Innenraum bestehen aus hochwertigen thermoplastischen Verbundwerkstoffen, die ein halbkristallines, niedrignschmelzendes PAEK-Harz verwenden. Mit einer Dichte von 1,3 g/cm³ zeichnet dieser Faserverbund einen äußerst leichten Werkstoff mit einer sehr hohen Zugfestigkeit von 2410 Mpa aus. Zudem ist die Feuerbeständigkeit des Werkstoffes sehr gut. Der Werkstoff ist außerdem chemisch- und Korrosionsbeständig, hat eine sehr geringe Feuchtigkeitsaufnahme und ist gegen Blitzeinschläge geschützt. Die Verarbeitung ist aufgrund der geringen Schmelzviskosität und der niedrigen Verarbeitungstemperatur sehr leicht durchzuführen, so können auch komplexere Formen einfach hergestellt werden (Toray Advances Composites, 2023). Das Panoramafenster besteht vollständig aus Acrylglasplatten und zeichnet sich durch seine sehr guten Gewichtseigenschaften aus. Die Witterungsbeständigkeit, 100%ige

Recyclingfähigkeit, hohe Oberflächenhärte und die hohe Bruchsicherheit machen den Einsatz des Werkstoffes attraktiv (Shen, 2023).

Wartung

Aufgrund der Komplexität einiger Systeme, erfordert die Wartung des eSIMJTs einen hohen Aufwand. Das liegt daran, dass viele Systeme beweglich und nicht starr sind, was sie anfälliger für potenzielle Probleme macht. Einer der Hauptbereiche stellen die integrierten Impeller in den Flügeln dar. Eine regelmäßige Überprüfung der Struktur auf Beschädigungen durch z.B. Witterungen wie Hagel muss stattfinden. Auch die Funktionsfähigkeit der sechs elektrischen Jet-Turbine müssen sichergestellt werden, da diese im Reiseflug hauptsächlich für die Erzeugung des Schubs verantwortlich sind. Beide Türmechanismen erfordern ebenfalls einen hohen Wartungsaufwand. Zudem müssen die elektrischen Gurtsysteme regelmäßig überprüft werden, um die Sicherheit von rollstuhlfahrenden Personen zu gewährleisten. Auch das einziehbare Fahrwerk muss genaustens gewartet werden, da sonst bei einer holprigen Landung schwerwiegende Schäden am Rumpf entstehen können und die Wahrscheinlichkeit der Passagierverletzungen steigen kann.

Sicherheit

Der eSIMJT ist mit ausreichender Redundanz in Technik und Antrieb ausgestattet, um einen Ausfall einer Baugruppe problemlos zu kompensieren. Die Wahrscheinlichkeit, dass alle sechs elektrischen Jet-Turbinen versagen, ist äußerst gering. In diesem Fall ist der eSIMJT aufgrund seiner Konstruktion in der Lage, in den Segelflug überzugehen und mithilfe der integrierten Impeller eine sichere Landung zu gewährleisten. Im Falle einer Notwasserung, befindet sich unter dem Rumpf ein Sicherheitssystem, das sich aufbläst und den eSIMJT über dem Wasser tragen kann.

Kostenabschätzung

Die Kosten des eSIMJTs sind als hoch einzustufen, diese Einschätzung basiert auf mehreren Faktoren. Die hohe Komplexität des eVTOL erfordert einen erheblichen Wartungsaufwand, was zu hohen Kosten führt. Zusätzlich spielt die barrierefreie Bauweise eine entscheidende Rolle bei der Kostensteigerung. Die Implementierung der beweglichen Tür im hinteren Bereich des Rumpfes verursacht ebenfalls hohe Ausgaben. Darüber hinaus erfordert die Integration der Propeller, in das Triebwerk eine anspruchsvolle Struktur, was die Kosten weiter erhöht. Weiterhin benötigt das eVTOL sehr leistungsstarke Batterien und Elektromotoren, die einen hohen Anteil der Kosten ausmachen. Insgesamt kann festgestellt werden, dass die hohe Komplexität des eSIMJTs zu hohen Kosten führen wird.

4.4.3 eSIM-Prop (eSIMPP)



Abbildung 37 3D-Ansicht eSIMProp (Eigene Darstellung)

Der vollelektrische eSIM-Prop ist ein Batteriebetriebenes eVTOL, das über acht Propeller verfügt, die von acht Motoren angetrieben werden. Die Konstruktion beruht auf der Kategorie vectored Thrust. So sind alle integrierten Propeller sowohl für den Auftrieb als auch für den Vortrieb verantwortlich. Die zweisitzige Kabine bietet nicht nur Platz für Passagiere, sondern ermöglicht auch die Aufnahme eines Haustiers. Fliegen kann der eSIM-Prop aufgrund seiner Ausstattung vollkommen autonom. Aus Sicherheitsgründen wird jedoch zunächst ein Pilot an Bord sein. Sicherheitsvorkehrungen, darunter redundante Systeme, Warnsysteme sowie Schwimmwesten und ein Fallschirm sind integriert.

Architektur

Die Konstruktion des eVTOL basiert auf einer Multicopter-ähnlichen Bauweise. Der eSIMPP hat eine Höhe von 2m, eine Länge von 3m und eine Spannweite von 6,5m. Der Rumpf ist ovalförmig und wird durch zwei Fahrwerke gestützt. Durch die elektromechanische Bremse kann das Rollen des eVTOL verhindert werden. Auf dem Rumpf ist ein Rahmen verbaut, der insgesamt acht Motoren und Propeller beinhaltet. Die vierblättrigen Propeller haben einen Durchmesser von $d = 1m$. Der Rahmen, der auch als "Tiltwing" bezeichnet wird, verfügt die Fähigkeit sich über eine Gelenkverbindung zu drehen. Diese Neigung ermöglicht auch die Drehung der Propeller, denn diese sind fest an dem Rahmen verbaut. Der Einlass erfolgt über eine ausschwenkende Tür, die sich sowohl auf der rechten als auch auf der linken Seite befindet. Die Batterien befinden sich im hinteren Bereich des Rumpfs und können über eine Zapfsäule aufgeladen werden. Die folgenden Abbildungen stellen Skizzen des eSIMPPs dar.

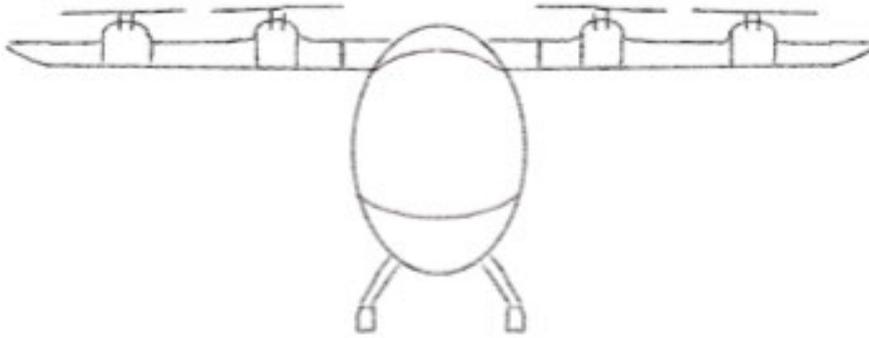


Abbildung 38 Vorderansicht eSIMPP mit einer Neigung von 0° (Eigene Darstellung)

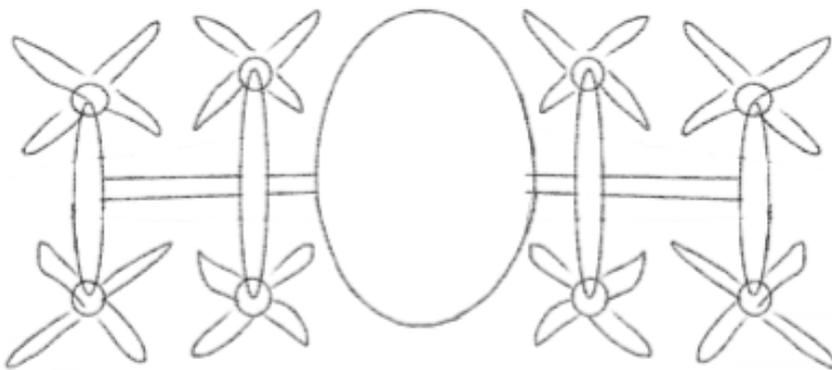


Abbildung 39 Draufsicht eSIMPP mit einer Neigung von 0° (Eigene Darstellung)

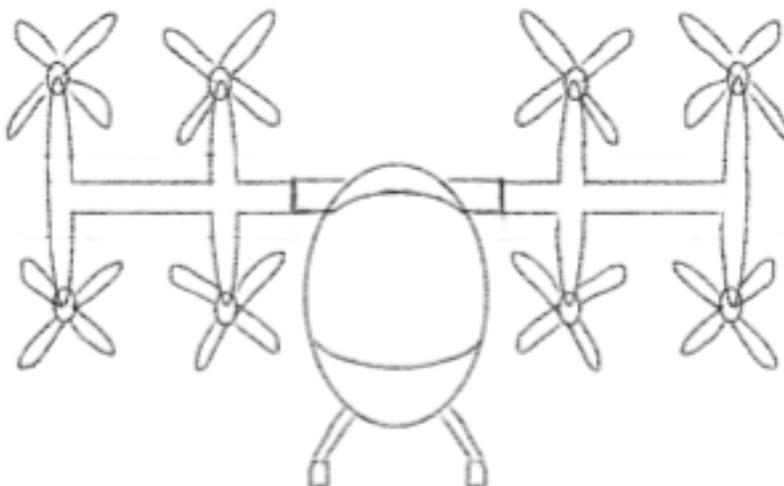


Abbildung 40 Vorderansicht des eSIMPP mit einer Neigung von 90° (Eigene Darstellung)

Kabine & Inneneinrichtung

Im Inneren des eSIMPPs finden zwei Passagiere Platz, wobei zunächst ein Platz für einen Piloten zur Verfügung stehen wird. Die Sitzplätze verfügen jeweils Vierpunktgurtsysteme und eine aktive Kopfstütze, die nach einem Aufprall dem Kopf des Passagiers folgt und dabei den Druck auf die Halswirbelsäule reduziert (Knauf Industries, 2022). Hinter dem Sitz befindet sich eine Gepäckablage mit einer Gitterstruktur, die durch einfaches Lösen einer Klemme geöffnet und geschlossen werden kann. Die Gitterstruktur ermöglicht auch den sicheren Transport von kleinen Haustieren, da für eine gute Belüftung und Sichtbarkeit gesorgt ist. Im Falle, dass ein Haustier mitgenommen wird, dürfen weitere Gepäcktaschen nicht im selben Gepäckfach verstaut werden. Diese müssen dann unter dem Sitz gelagert werden. Hier befinden sich außerdem zwei Schwimmwesten, die sich fest unter der Sitzklappe befinden und im Notfall mit leichter Kraft abgezogen werden können. Ein Unterhaltungssystem ist nicht vorhanden, jedoch wird über eine 360° Kamera eine Live-Übertragung auf dem Bordcomputer angezeigt und eine WLAN-Verbindung ist ebenfalls möglich. Zusätzliche Informationen werden ebenfalls auf dem Boardcomputer dargestellt.

Antrieb

Angetrieben wird der eSIMPP über elektrische Motoren, welche über Lithium-Metall-Akkus mit Energie versorgt werden. Zur Ermittlung der erforderlichen Antriebsleistung wird im Folgenden eine kurze Berechnung durchgeführt. Hierbei wird nur die erste Flugphase, das senkrechte Starten berücksichtigt, da hierfür die höchste Energie erforderlich ist (Reinhold, 2020).

Im Durchschnitt wiegen die Menschen in Hamburg 74,8 kg (Grieß, 2015). Für die Berechnung der Antriebs- und der Batterieleistung wird für jeden Passagier ein Durchschnittswert von 80 kg angenommen, einschließlich der Gepäck- und Handtaschen. So ergibt sich für zwei Passagiere die maximale Gewichtszulassung wie folgt:

$$m_{Pax} = 160 \text{ kg}$$

Das Gewicht des eSIMPPs wird folgendermaßen abgeschätzt:

$$m_{eSIMPP} = 500 \text{ kg}$$

Die maximale Abflugmasse setzt sich aus den abgeschätzten Werten des Gewichts zusammen.

$$MTOW = m_{Pax} + m_{eSIMPP} = 660 \text{ kg} \quad [1]$$

Zunächst lässt sich die Gewichtskraft ermitteln, daraus erschließt sich dann die mindestens erforderliche Auftriebskraft, um die Gewichtskraft zu kompensieren. Mit der Erdbeschleunigung $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$ ergibt sich die Gewichtskraft wie folgt:

$$G_{eSIMPP} = MTOW * g = 6474,6 N \approx 6475 N \quad [2]$$

Die erforderliche Auftriebskraft für das senkrechte Starten muss somit größer sein als die ermittelte Gewichtskraft

$$F_A > G_{eSIMPP}$$

Zur Berechnung der aerodynamischen Antriebsleistung, die für den Schwebeflug erforderlich ist, wird die Luftdichte ρ_{Luft} , die Rotationsfläche $A_{Propeller}$ und die Gewichtskraft G_{eSIMPP} benötigt. Der Durchmesser der Propellerblätter liegt bei $d = 1m$ und $x_p = 8$ stellt die Anzahl der Propeller dar.

$$\rho_{Luft} = 1,225 \frac{kg}{m^3}$$

$$A_{Propeller} = \pi * r^2 * x_p = 6,283m^2 \approx 6,3 m^2 \quad [3]$$

$$P_{A,erf} = G_{eSIMPP} * \sqrt{\frac{G_{eSIMPP}}{2 * \rho * A_{Propeller}}} = 132606,89 W \approx 133 kW \quad [4]$$

Die aerodynamischen Gesamtleistung des Antriebs liegt bei 133 kW. Dies stellt die mindestens erforderliche Leistung dar und beinhaltet keine Verluste, die z.B. durch die Widerstände der elektronischen Leitungen oder auch durch mechanische Reibung im gesamten Antrieb auftreten. Das bedeutet, die zu erbringende Leistung der Elektromotoren muss höher sein, als die Rechnung hergibt. Um die tatsächliche Leistung des Elektromotors zu bestimmen, muss der Wirkungsgrad des Getriebes und des Propellers berücksichtigt werden. Der Wirkungsgrad des Propellers wird auf 90% geschätzt (Lage, 2022), und der des Getriebes wird auf 98 % geschätzt (A. Al-Mashhadani, persönliche Kommunikation, 06.Oktober 2023). Zusammen ergibt sich ein Wirkungsgrad von $\eta = 88,2\%$.

$$P_{M,erf,G} = P_{A,erf} * \eta^{-1} = 150,79 kW \approx 151 kW \quad [5]$$

Mit der Anzahl der Motoren $x_M = 8$ wird diese Leistung aufgeteilt.

$$P_{M,erf} = \frac{P_{M,erf,G}}{x_M} = 18,8 kW \quad [6]$$

Um die Batterieleistung zu ermitteln, müssen die Wirkungsgrade der Elektromotoren η_E und der Leistungselektronik η_L berücksichtigt werden. Hierfür wird der Wirkungsgrad der Elektromotoren auf 90% (Paschotta, 2023), und der Leistungselektronik ebenfalls auf 90% abgeschätzt (A. Al-Mashhadani, persönliche Kommunikation, 06.Oktober 2023).

$$\eta_{M,P} = 90\%$$

$$\eta_L = 90\%$$

Insgesamt ergibt sich einen Gesamtwirkungsgrad von $\eta_G = 81\%$. Somit kann die Batterieleistung mit der folgenden Formel berechnet werden:

$$P_{B,erf} = P_{M,erf,G} * \eta_G^{-1} \quad [7]$$

$$P_{B,erf} = 148 \text{ kW} * 0,81^{-1} = 186,4 \text{ kW} \approx 187 \text{ kW}$$

Die Batterie muss dementsprechend 187kW leisten, um dem Antrieb die erforderliche Leistung zuführen zu können. Zudem wird aus Sicherheitsgründen die Leistung der Elektromotoren erhöht. Es ergeben sich folgende Abschätzungen für die Leistung der einzelnen Elektromotoren.

$$P_M = 25 \text{ kW}$$

Mit einer erforderlichen Gesamtleistung von ca. 151 kW und einer abgeschätzten Gesamtleistung von 200 kW, können zwei Elektromotoren nach einem Ausfall problemlos durch die anderen Elektromotoren kompensiert werden. Für die Berechnung der Batteriekapazität wird für die Schwebedauer eine Zeit von $t_s = 10 \text{ min}$ abgeschätzt.

$$B_{Kapazität,S} = P_{M,erf,G} * t_s = 151 \text{ kW} * \left(\frac{10}{60}\right) \text{ h} = 25 \text{ kWh} \quad [8]$$

Die Batterie muss somit eine Kapazität von 25kWh leisten, um den eSIMPP zehn Minuten im Schwebeflug halten zu können. Die Energiedichte $B_{Energiedichte}$ von Lithium-Metall-Akku liegt bei 380 Wh/kg . Mit der Batteriekapazität, die für den Schwebeflug ermittelt wurde und der Energiedichte, kann das Gewicht der Batterie für den Schwebeflug berechnet werden.

$$B_{Masse,S} = \frac{B_{Kapazität,S}}{B_{Energiedichte}} = 65,78 \text{ kg} \approx 66 \text{ kg} \quad [9]$$

Das Gesamtgewicht der Batterie wird auf ca. 170k g abgeschätzt.

T-MOTOR ist ein Unternehmen, welches Lösungen für Antriebe entwickelt und auf Motoren und Propeller spezialisiert ist. Aufgrund der ermittelten Rechnungen werden Elektromotoren mit einer

maximalen Leistung von 28 KW eingesetzt, die einen Gewicht von ca. 5 kg aufbringen (T-MOTOR). Die Bürstenlosen Elektromotoren werden in rohrförmigen Gehäusen verbaut und werden luftgekühlt, um die Überhitzung zu vermeiden. Die Übertragung der Motorvibration wird hauptsächlich durch das Gehäuse gedämmt. Die verteilten Antriebe sind alle über Kupferleitungen mit dem Batteriesystem verbunden und werden mit elektrischem Strom versorgt.

Batterie

Als Batterien werden Lithium-Metall-Akkus des Unternehmens Cuberg verwendet. Diese haben bei gleicher Größe eine fast doppelt so hohe Kapazität als übliche Akkus. Das Unternehmen nutzt eine Schicht Lithium, welches um die Anode und Kathode geformt wird, dadurch wird die Schicht des Materials eingespart, was wiederum mehr Platz bedeutet, um Energie sparen zu können. Problematisch sind Lithium-Metall-Akkus aufgrund der Reaktivität, denn dadurch kann dieser mit Chemikalien im Elektrolyt reagieren. Die Lösung hierfür hat das Unternehmen durch einen selbstentwickelten Elektrolyten gefunden. Als Elektrolyt wird ein ionisches, flüssiges Salz mit zugesetzten Chemikalien verwendet. Obwohl Lithium-Metall immer noch damit reagieren kann, bildet sich eine gleichmäßige Oberfläche, die die Elektroden schützt. Mit diesen Batterien können Energiedichten von 380 Wh/kg erreicht werden (Aigner, 2022). Die Batterien von Cuberg werden als Pouchzellenform integriert. Dabei werden mehrere rechteckige Lagen von Elektroden, Ableitfolien und Separatoren übereinander gelagert. Der Vorteil dieser Bauart ist zum einen, dass die volumetrische Energiedichte hoch ist und zum anderen die Pouchzellen gut gekühlt werden können. (Doppelbauer, 2020, S.168) Die Kühlung erfolgt durch einen Kühlkreislauf, die zum einen mit kaltem und zum anderen mit warmen Wasser durchströmt wird. Aufgrund der Brandgefahr der Batterien, wird dem Kühlkreislauf zusätzlich noch eine Brandschutzflüssigkeit hinzugegeben (FutureFuels, 2022). Der Ladezustand wird über ein Batteriemanagementsystem kontrolliert.

Auf- und Vortrieb

Der eSIMPP nutzt für das senkrechte Starten und Landen, dieselben Systeme, wie für den Reiseflug. Die Funktionsweise ist identisch zu einem Helikopter. Beim senkrechten Start werden alle acht Propeller angetrieben und der Luftstrom wird von oben nach unten gedrückt. Die Belastung, die durch die Umströmung der Luft erzeugt wird, wird auf alle vier Blätter aufgeteilt, wodurch jedes einzelne Blatt weniger Belastung erfährt (Schulte, 2007). Die Beschleunigung der Luftmasse erfolgt immer in entgegengesetzte Richtungen. Daraus resultiert die senkrecht wirkende Auftriebskraft und der eSIMPP startet senkrecht in die Luft. Um in den Vorwärtsflug zu kommen, wird zusätzlich zum Auftrieb, Vortrieb erzeugt. Dies wird durch die Neigung des Rahmens in Flugrichtung sichergestellt. Der bewegliche Rahmen wird um einen geringen Winkel gedreht, sodass automatisch alle fest verbauten Propeller mitgedreht werden. Dadurch wird ein Teil des Schubs zur Vortriebserzeugung verwendet (Van der Wall, 2020, S.99-100) Durch die

geringe Gesamtfläche des Rumpfes und der aerodynamischen Form wird eine effiziente Umströmung der Luft sichergestellt.

Flugsteuerung

Das vollautonome Fliegen erfordert, dass alle möglichen Szenarien ohne menschlichen Eingriff, durch die Technik bewältigt werden können. Dies umfasst die Entwicklung neuer Systeme und Sensoren, die Simulation von Millionen Betriebsszenarien und die Durchführung von Test und Fehleranalysen. Zusammengefasst, werden Daten von Sensoren aufgenommen, weitergeleitet und verarbeitet. Diese Daten werden dann in Steuerbefehle umgewandelt, die automatisch durchgeführt werden. Dieser Verlauf wird zyklisch wiederholt (Dion, 2019). Für einen vollautonomen Flug müssen alle Flugphasen einschließlich Rollen, Starten und Landen berücksichtigt werden. Mit so einer umfassenden Technik, die alle Flugphasen berücksichtigt, setzt sich das US-Start-up Reliable Robotics auseinander. Die Steuerung wird von redundanter Hard- und Software übernommen. Bei Notfällen ist es jedoch möglich, dass das eVTOL extern von der Ferne gesteuert werden kann. Das gesamte System beinhaltet die gesamte Avionik, die Kommunikationssysteme, die Fernsteuerung und Backup-Systeme (Bünthe, 2022). Für die externe Kommunikation werden redundante Sprach- und Datennetze eingesetzt. Zusätzlich wird die Integration der elektromechanischen Bremsen des Fahrwerkes erfolgen, sodass der Stillstand nach einer Landung sichergestellt werden kann. Außerdem kann die Kontaktaufnahme zu anderen eVTOLs aufgenommen werden, hierfür muss jedoch die Integration derselben Sprach- und Datenverbindung erfolgen. Die Kollisionsgefahr wird ebenfalls durch Systeme berücksichtigt, zudem wird auch unbefugtes Gelände signalisiert. Für die Orientierung im Luftraum werden Sensortechniken eingesetzt (Reliable Robotics, 2023). Das Start-up verfügt über eigene Systeme und Netzwerke, um die Flugsteuerung zu implementieren. Zusätzlich wird jedoch die vorhandene 360° Kamera zum Kollisionswarnsystem ergänzt, um eine hohe Sicherheit zu gewährleisten. Darüber hinaus werden die Daten in einem Flugdatenspeicher überführt, sodass aufgenommene Daten redundant abgelegt, gespeichert und eigenständig gelöscht werden, wenn es sich um unbrauchbare Daten handelt. Die im Flugdatenspeicher gespeicherten Daten sind durch Zugriffsbeschränkungen geschützt. Im Falle von Notfällen erfolgen Warnungen sowohl visuell als auch akustisch. Zudem wird auf dem Lokalen Rechner die Warnung textlich verdeutlicht.

Material

Die Auswahl der Materialien muss allen behördlichen Anforderungen entsprechen, da die Sicherheit oberste Priorität hat. Es ist entscheidend, einen Kompromiss zwischen mechanischen Eigenschaften und dem Gewicht zu finden. Die gesamte Struktur des eSIMPPs, einschließlich des Rumpfes, der Tragflächen, des Antriebssystems und des Innenraums, besteht aus einem hochwertigen thermoplastischen Verbundwerkstoff. Dieser Werkstoff verwendet ein

halbkristallines, niedrighschmelzendes PAEK-Harz mit einer Dichte von $1,3 \text{ g/cm}^3$. Gleichzeitig ist eine sehr hohe Zugfestigkeit von 2410 Mpa vorhanden. Darüber hinaus verfügt der Werkstoff eine sehr gute Feuerbeständigkeit, ist chemisch- und korrosionsbeständig und weist eine geringe Feuchtigkeitsaufnahme auf. Zudem bietet das Material Schutz vor Blitzeinschlägen. Aufgrund der niedrigen Schmelzviskosität und der niedrigen Verarbeitungstemperatur ist die Verarbeitung äußerst einfach, was sogar die Herstellung komplexer Formen ermöglicht (Toray Advances Composites, 2023). Das Panoramafenster besteht vollständig aus Acrylglasplatten und zeichnet sich durch seine ausgezeichneten Gewichtseigenschaften aus. Es ist äußerst witterungsbeständig, zu 100 % recycelbar, weist eine hohe Oberflächenhärte auf und ist äußerst bruchstark (Shen, 2023).

Wartung

Der Wartungsaufwand ist aufgrund der identischen Systeme gering, da alle Propeller sowohl für den Vortrieb als auch für den Auftrieb verantwortlich sind. Die Wartung der Propeller und Motoren erfolgt daher immer nach dem gleichen Verfahren. Insbesondere ist hierbei darauf zu achten, dass die Komponenten ausgewuchtet werden müssen, um übermäßige Schwingungen und Vibrationen zu verhindern. Von besonderer Wichtigkeit ist die Dreh-Funktion des Rahmens, denn dieser ermöglicht im Schwebeflug, aufgrund der Neigung, die Erzeugung des Vortriebs. Neben den Propellern und Motoren muss der Rumpf auf Beschädigungen geprüft werden. In der Kabine müssen alle Steuerungssysteme regelmäßig kontrolliert und auf volle Funktionalität getestet werden. Zudem müssen alle Sicherheitskomponente, wie die Schwimmwesten, geprüft und bei Bedarf ausgetauscht werden.

Sicherheit

Der eSIMPP ist durch seine acht Propeller mehrfach redundant ausgelegt und kann bei einem Ausfall der Motoren durch die anderen Motoren ausgeglichen werden. Die eingesetzten Materialien stellen eine sehr hohe Festigkeit dar und sind auf Blitzeinschläge, Witterungen und Brandgefahren ausgelegt. Am Bord befinden sich alternative Flugsteuerungssysteme, die bei Ausfällen der primären Systeme zum Einsatz kommen. Die Passagiere sind durch passive Systeme während der gesamten Flugphase geschützt, zusätzlich befindet sich für jeden Passagier eine Schwimmweste an Bord. Der Schutz der Haustiere wird ebenfalls durch das fest integrierte Gitterfach gewährleistet. Trotz der hohen redundanten Systeme verfügt der eSIMPP einen Fallschirm. Somit ist auch in einer Notsituation, das sichere Landen gewährleistet.

Kostenabschätzung

Die Kosten des eSIMPPs werden voraussichtlich niedrig ausfallen. Das liegt zum einen daran, dass der eSIMPP nur Platz für zwei Passagiere bietet, wodurch weniger Materialkosten zustande kommen. Zudem verfügt der eSIMPP über eine vollständige Flugsteuerung eines Herstellers, was

zusätzliche Integrationskosten für die Avionik vermeidet. Aufgrund seines geringen Gewichts sind keine großen und schweren Batterien und Motoren erforderlich. Es ist jedoch zu beachten, dass die Wartung des drehbaren Rahmens einen hohen Aufwand erfordert und dies die Gesamtkosten erhöht.

4.5 Vergleich der Konzepte

Im vorherigen Abschnitt wurden die verschiedenen Konzepte detailliert aufgegriffen und beschrieben. Eine Gesamtübersicht kann jedoch die Unterschiede und Gemeinsamkeiten deutlich hervorheben und bietet zudem dem Leser eine bessere Strukturierung. In Tabelle 3 sind die zentralen Merkmale der Konzepte aufgeführt. Im folgenden Abschnitt werden diese Punkte kurz beschrieben.

Tabelle 3 Merkmale der Konzepte

| | eSIM-Hexacopter | eSIM-JET | eSIM-Prop |
|--------------------------------|---|--|--------------------------|
| Kategorie | Multicopter | Independent Thrust | Multicopter |
| Spannweite, Länge, Höhe | 4,5m x 4m x 1,8m | 10m x 5m x 2m | 6,5m x 3m x 2m |
| Energiequelle | Lithium-Ion Batterie mit Silizium als Anoden Material | Lithium-Ion Batterie mit hohem Lithium und Mangan Anteil | Lithium-Metall-Akkuzelle |
| Anzahl PAX | 4 | 4 | 2 |
| Max. Payload | 320 kg | 320 kg | 160 kg |
| Leergewicht | 600 kg | 800 kg | 500 kg |
| MTOW | 920 kg | 1120 kg | 660 kg |
| Anzahl Motoren | 12 | 12 | 8 |
| Motorleistung | 300 kW | 720 kW | 200 kW |
| Kosten | mittel | hoch | gering |

| | | | |
|---------------------------|--------------|--|--|
| Material | CFK | thermoplastisches Verbundwerkstoff (PEAK-HARZ) | thermoplastisches Verbundwerkstoff (PEAK-HARZ) |
| Steuerungssystem | Fly-by-Light | Fly-by-Wire | - |
| Sicherheitssysteme | Fallschirm | Aufblasbares Boot | Fallschirm |
| Barrierefreiheit | - | ja | - |
| Haustiere | - | - | ja |

Zu Beginn dieser Arbeit wurden eVTOLs in mehrere Kategorien aufgeteilt. In der aktuellen Konzeptphase sind zwei dieser Kategorien erkennbar: die Multicopter-Bauweise und der Independent Thrust. Dabei stellt die Multicopter-Bauweise beim eSIMHC eine runde Form auf, während beim eSIM-PP eine eckige Form vorliegt. Der eSIMHC verwendet alle Propeller für den Auf- und Vortrieb, indem die Drehzahl reguliert wird. Beim eSIMPP werden ebenfalls alle Propeller für den Auf- und Vortrieb verwendet, allerdings werden diese zwischen den Flugphasen geneigt. Im Gegensatz dazu verwendet der eSIMJT unterschiedliche Systeme. Beim senkrechten Starten erzeugen die integrierten Fans den Auftrieb, während beim Reiseflug der Auftrieb hauptsächlich durch die Flügel entsteht. Der Vortrieb wird durch die integrierten elektrischen Jet-Turbinen am Seitenleitwerk erzeugt. Aufgrund der Tragflächen und der länglichen Bauweise ist der eSIMJT am größten. Der eSIMHC ist aufgrund der runden Bauweise deutlich kleiner, obwohl dieselbe Passagierkapazität besteht. Eine Gemeinsamkeit besteht in der Energiequelle, denn alle Konzepte werden von Batterien betrieben. Es gibt jedoch Unterschiede in den verwendeten Batteriematerialien. Der eSIMHC setzt auf Silizium, während der eSIMJT den Lithium- und Mangangehalt erhöht. Der eSIMPP ist mit dem Einsatz von Lithium-Metall-Akkuzellen am unterschiedlichsten zu den anderen Konzepten. Die Anzahl der Passagiere unterscheidet sich nur beim eSIMPP, bei dem Platz für 2 Personen ist, während die anderen eVTOLs Platz für 4 Passagiere bieten. Der eSIMJT nimmt durch seine Bauweise die höchsten Gewichte auf und kompensiert diese mit 12 Elektromotoren, ebenso wie der eSIMHC. Im Gegensatz dazu ist der eSIMPP mit weniger Motoren ausgestattet. Ein wesentlicher Unterschied besteht in der erforderlichen Leistung der Elektromotoren. Während der eSIMHC eine Leistung von etwa 300 kW liefert, wird beim eSIMJT eine Leistung von ca. 720 kW erwartet. Dementsprechend werden auch die Kosten als hoch eingestuft. Der eSIMPP weist eine geringe Leistung von 200 kW auf. Eine Gemeinsamkeit ist die Verwendung der Materialien, hierbei werden Faserverbundwerkstoffe eingesetzt, vor allem Kohlefaserverstärkte Kunststoffe. Das Steuerungssystem funktioniert bei allen Konzepten autonom. Der eSIMHC nutzt das Fly-by-Light

System, während der eSIMJT über das übliche Fly-by-Wire System gesteuert wird. Als Sicherheitssystem werden Fallschirme eingesetzt. Nur der eSIMJT verfügt keinen Fallschirm, sondern einen aufblasbaren Notwasserungsboot. Ein weiterer Unterschied, der den eSIMJT hervorhebt, ist die barrierefreie Nutzung des eVTOL. Auf der anderen Seite bietet der eSIMPP die Möglichkeit, Haustiere sicher zu transportieren, was bei den anderen Konzepten nicht vorgesehen ist.

Vergleich der Konzepte mit den Prototypen aus Kapitel 2

Es werden die zuvor beschriebenen Konzepte aus dem zweiten Kapitel herangezogen, die als Inspiration dienten. Der eSIMJT weist optisch eine sehr hohe Ähnlichkeit zum Lilium-Jet dar und profitiert aus der aerodynamischen Form. Des Weiteren verbindet beide Konzepte die Verwendung von elektrischen Turbinen, wobei der eSIMJT noch die integrierten Impeller aufweist. Allerdings wurde der Lilium-Jet für regionale Flüge konzipiert und kann dementsprechend längere Reichweiten zurücklegen, während der eSIMJT für innerstädtische Flüge konzipiert ist und somit nicht dieselben Reichweiten erreichen wird. Beim eSIMHC wurde eine neue Umsetzung der Multicopter-Bauweise vorgenommen. Im Gegensatz zum Volocity verfügt der eSIMHC Arme sowohl oberhalb und unterhalb des Rumpfs. Darüber hinaus bietet dieses Konzept Platz für bis zu vier Passagiere. In dieser Hinsicht weist der eSIMPP Gemeinsamkeiten mit dem Volocity auf. Jedoch ähneln die Rahmen eher den dünnen Tragflächen des CityAirbus NextGen. Die Platzierung der Propeller beim CityAirbus NextGen sind beim Konzept des eSIMPPs ebenfalls vorhanden, wobei der eSIMPP mehr Propeller integriert hat. Eine weitere Gemeinsamkeit besteht darin, dass alle genannten Konzepte batteriebetrieben sind. Eine Besonderheit der entwickelten Konzepte liegt darin, dass sie die Berücksichtigung von behindertengerechter Nutzung und die Möglichkeit, Tiere zu transportieren, vorsehen, was bei den anderen drei Konzepten nicht der Fall ist. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sowohl die konzipierten als auch bereits vorhandenen Konzepte viele Ähnlichkeiten, aber im Detail auch viele Unterschiede aufweisen. Dies stellt das hohe Innovationspotenzial der eVTOLs dar.

4.6 Nutzwertanalyse

Im kommenden Abschnitt ist nach den VDI2221-Richtlinien die Bewertung der drei Konzepte durchzuführen. Hierfür wird die Methode der Nutzwertanalyse herangezogen. Bei dieser Analyse werden zunächst zehn Bewertungskriterien definiert. Diese werden mithilfe eines Punkteschemas in Abhängigkeit zueinander bewertet, sodass eine Gewichtung der Kriterien entsteht. Die Konzepte werden anschließend anhand der gewichteten Kriterien bewertet.

Die Auswahl der Bewertungskriterien basiert auf den im Abschnitt 4.1 analysierten Anforderungen. Die Anforderungsanalyse bildet daher die Basis der Bewertung. Insbesondere werden "soll" und "kann" Anforderungen berücksichtigt. Denn Anforderungen, die als "muss" eingeordnet sind, können nicht vernachlässigt werden, es ist zwingend notwendig diese zu erfüllen. Hingegen sind Anforderungen bezüglich der Ergonomie optional und können von Herstellern auf vielfältige Weise umgesetzt werden. Insgesamt wurden zehn Kriterien durch die Anforderungsliste abgeleitet, mit Ausnahme der Marktreife. Aufgrund der Aktualität des Themas stellt die Marktreife ein wichtiges Bewertungskriterium dar. Denn die Möglichkeit und Realisierung der Konzepte kann aufgrund des Stands der Technik noch einige Jahre dauern. Dementsprechend wurde dieses Kriterium zusätzlich ergänzt und wird, sowie die anderen Kriterien, im folgenden Abschnitt näher erläutert.

Ökologisch: Die Ökologie umfasst alle Wechselbeziehungen zwischen der Umwelt und den Menschen. Diese Wechselbeziehungen tragen in den meisten Fällen zur Störung des natürlichen Wachstums der Natur bei. Maßnahmen können den natürlichen Erhalt der Umwelt sicherstellen. Zu berücksichtigen sind umweltfreundliche Herstellung- und Fertigungsmethoden, der Einsatz von energieeffizienten Energiequellen, der emissionsfreie Betrieb und eine recyclefähige Entsorgung von Materialien.

Komfort: Unter Komfort wird das Wohlergehen und die Zufriedenstellung der Nutzer berücksichtigt, denn ergonomische Einrichtungen tragen zur Unterstützung der körperlichen Gesundheit bei. Die Nutzer-Funktionalitäten sollten auf höchstmögliche Bequemlichkeit ausgerichtet sein, sodass die Nutzerzufriedenheit im besten Fall maximal steigt.

Kosten: Die Kosten sind in jeder Hinsicht von großer Bedeutung. Hierbei wird die Gesamtheit aller Kosten betrachtet, die in das Produkt einfließen und noch einfließen werden. Insbesondere werden die Material-, Hersteller- und Betriebskosten betrachtet. Mit einem Kompromiss zwischen diesen Kosten kann ein maximaler Gewinn erzielt werden.

Wartbarkeit: Unter Wartung werden alle Maßnahmen verstanden, die die Zuverlässigkeit eines Systems sicherstellen. Dazu gehören Analysen von Fehlermängeln, die einfache Zugänglichkeit zum Produkt, das Beheben von Problemen und die fachgerechte Dokumentation der durchgeführten Inspektionen. Zu bewerten sind hierbei der inhaltliche-, zeitliche-, Personale- und Kostenaufwand.

Qualität: Die Qualität eines Produktes hängt nicht nur durch den Einsatz hochwertiger Materialien, sondern auch von der Art der Fertigung ab. Gute Qualität kennzeichnet sich durch Eigenschaften wieder, die z.B. die Zuverlässigkeit des Systems erhöhen und den Einsatz von Nachbehandlungsmethoden reduzieren.

Funktionalität: Unter Funktionalität wird im Allgemeinen die korrekte Erfüllung von Funktionen verstanden. Dies betrifft die Gesamtheit eines Produkts, sodass die Funktionalität und die damit verbundenen Eigenschaften, des gesamten Konstrukts betrachtet wird. Insbesondere wird auch der Aufwand berücksichtigt, der zur Durchführung einer Funktion nötig ist. Sind alle angeforderten Funktionen erfüllt, so liegt die Funktionalität eines Systems bei 100%

Zuverlässigkeit: Die Zuverlässigkeit eines Systems stellt den Sicherheitsgrad der Funktionsweise dar. Zuverlässige Systeme funktionieren mit geringsten Komplikationen und haben eine sehr niedrige Ausfallwahrscheinlichkeit. Die Bedeutung umfasst somit die fehlerfreie Funktionsweise, die Auswirkungen auf andere Systeme oder Personen, die Ausfallwahrscheinlichkeit und die damit einhergehende Lebensdauer.

Gewicht: Das Gewicht ist ein entscheidender Faktor, da viele Parameter davon beeinflusst werden. Schwere Massen erfordern mehr Leistung. Somit sind geringere Massen oft energieeffizienter. Es ist auf eine Leichtbau Konstruktion zu achten, die dennoch allen Anforderungen gerecht ist.

Leistung: Ein System wird als leistungsfähig betrachtet, wenn alle Funktionen in einem kurzen Zeitabschnitt realisiert werden können. Dabei wird insbesondere auf den Erfüllungsgrad der Funktion geachtet. Ein System, welches in kürzester Zeit eine hohe Leistung mit einer großen Genauigkeit der Arbeit erreicht, sorgt für mehr Kundenzufriedenheit.

Marktreife: Unter der Marktreife eines Produkts werden alle erforderlichen Technologien, Dienstleistungen und Prozesse verstanden, die für die Entwicklung und Realisierung des Produktes auf dem Markt zuständig sind. Das heißt, dass geprüft werden muss, ob der Stand der Technik so weit fortgeschritten ist, dass die Nutzung des Produkts von Verbrauchern bedenkenlos ist.

Die Verteilung der Punkte und die resultierende Gewichtung der Kriterien sind in Abbildung 41 zu dargestellt.

| | Ökologisch | Komfort | Kosten | Wartbarkeit | Qualität | Funktionalität | Zuverlässigkeit | Gewicht | Leistung | Marktreife | Summe | % |
|-----------------|------------|---------|--------|-------------|----------|----------------|-----------------|---------|----------|------------|---------|---|
| Ökologisch | 2 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 9 | 10.00% | |
| Komfort | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 2.22% | |
| Kosten | 1 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 10 | 11.11% | |
| Wartbarkeit | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 2.22% | |
| Qualität | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 0 | 2 | 1 | 2 | 13 | 14.44% | |
| Funktionalität | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 0 | 2 | 2 | 2 | 15 | 16.67% | |
| Zuverlässigkeit | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 | 2 | 2 | 18 | 20.00% | |
| Gewicht | 1 | 2 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 10 | 11.11% | |
| Leistung | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 9 | 10.00% | |
| Marktreife | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2.22% | |
| | | | | | | | | | | 90 | 100.00% | |

Abbildung 41 Gewichtung der Bewertungskriterien

Die Bewertung erfolgt durch das 0-1-2-Punkteschema, wobei die Vergabe von 2 Punkten auf eine bessere Bewertung hinweist, 0 auf eine schlechtere und 1 auf eine neutrale Bewertung (Schnurr, 2023). Die Gewichtung dieser Bewertung ist in der letzten Spalte zu sehen. Zu erkennen ist, dass die Zuverlässigkeit die höchste Punktzahl erhält und somit in Bezug zu allen anderen Bewertungskriterien, die wichtigste darstellt. Eine hohe Zuverlässigkeit der Systeme gewährleistet einen hohen Sicherheitsstandard, der insbesondere in der Luftfahrt eine große Bedeutung hat. Unzuverlässige Systeme könnten im schlimmsten Fall katastrophale Folgen haben. Die Funktionalität und die Qualität stellen ebenfalls sehr wichtige Kriterien dar, da sie einen großen Einfluss auf den Betrieb haben. Wenn die angeforderten Funktionen nicht erfüllt sind oder unzureichend umgesetzt werden, kann dies die Nachfrage stark beeinträchtigen. Andererseits ist eine hohe Qualität erforderlich, um eine langfristige Nutzung zu gewährleisten. Die Ergonomie kann ebenfalls die Nachfrage beeinflussen und auch die Wartbarkeit stellt hinsichtlich der Kosten ein wichtiges Kriterium dar. Zudem ist die Berücksichtigung der Marktreife aufgrund der noch nicht ausgereiften Technik relevant. Allerdings stellen die anderen Kriterien in diesem Anwendungsfall eine höhere Wichtigkeit dar und erhalten dementsprechend eine höhere Gewichtung.

In der nachfolgenden Abbildung 42 sind die drei Konzepte in Abhängigkeit der Bewertungskriterien dargestellt. Nun folgt die Bewertung der einzelnen Konzepte in einem Punkteschema von 1 bis 5. Die Bewertungszahl 5 stellt die vollständige Erfüllung des Kriteriums dar, während die Bewertungszahl 0 definiert, dass das Kriterium nicht erfüllt wurde.

| Bewertungskriterien | Gewichtung | eSIMHC | | eSIMJT | | eSIMPP | |
|---------------------|------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| | | Punkte (1-5) | Wert | Punkte (1-5) | Wert | Punkte (1-5) | Wert |
| Ökologisch | 10.00% | 4 | 0.40 | 4 | 0.40 | 4 | 0.40 |
| Komfort | 2.22% | 3 | 0.07 | 2 | 0.04 | 4 | 0.09 |
| Kosten | 11.11% | 4 | 0.44 | 2 | 0.22 | 4 | 0.44 |
| Wartbarkeit | 2.22% | 4 | 0.09 | 2 | 0.04 | 3 | 0.07 |
| Qualität | 14.44% | 5 | 0.72 | 5 | 0.72 | 5 | 0.72 |
| Funktionalität | 16.67% | 3 | 0.50 | 4 | 0.67 | 3 | 0.50 |
| Zuverlässigkeit | 20.00% | 5 | 1.00 | 5 | 1.00 | 5 | 1.00 |
| Gewicht | 11.11% | 4 | 0.44 | 2 | 0.22 | 3 | 0.33 |
| Leistung | 10.00% | 4 | 0.40 | 2 | 0.20 | 4 | 0.40 |
| Marktreife | 2.22% | 3 | 0.07 | 2 | 0.04 | 3 | 0.07 |
| Summe | | | 4.13 | | 3.57 | | 4.02 |

Abbildung 42 Bewertung der drei Konzepte

Anhand der Abbildung ist zu erkennen, dass der eSIMHC die höchste Bewertung erhält, gefolgt von dem eSIMPP. Die nachfolgende Erklärung wird dies näher ausführen.

Nachhaltigkeit

Das erste Kriterium betrifft die Nachhaltigkeit des Konzepts. Hierbei werden alle drei Konzepte mit 4 Punkten bewertet. Alle Konzepte setzen auf einen elektrischen Antrieb und erzeugen somit während des Betriebs keine Schadstoffe, wie es bei einem Verbrennungsmotor der Fall wäre. Dies bedeutet, dass die Umweltauswirkungen während des Betriebs gering sind. Darüber hinaus ist die Materialauswahl der Konzepte, sowohl in der Innenausstattung als auch in der Außenhaut aus nachhaltigem Verbundwerkstoff. Zudem ist der Werkstoff von dem eSIMJT und dem eSIMPP einfach in der Verarbeitung, da die Schmelzviskosität und die Verarbeitungstemperatur gering sind. Zusätzlich sind die ausgewählten Fenster bei allen Konzepten zu 100 % recyclebar. Das Herstellungsverfahren der Faserverbundwerkstoffe ist jedoch aufwendig, da mehrere Schritte und Maschinen notwendig sind. Dies wiederum erfordert viel Energie. Dementsprechend werden die Konzepte mit einer Punktzahl von 4 bewertet.

Komfort

Die ergonomische Einrichtung der Konzepte steht weniger im Vordergrund, da es sich um eine innerstädtische Mobilität handelt, bei der Passagiere innerhalb von etwa 10 Minuten ihren Zielort erreichen. Daher wurde die Integration moderner Entertainment Systeme weniger berücksichtigt. Der Einlass der Passagiere erfolgt bei dem eSIMJT über eine Kuppeltür, die für ältere

Passagiergruppen weniger vorteilhaft ist. Denn beim Einsteigen müssen die Passagiere über den Tritt auf den Tragflächen, in den eSIMJT einsteigen. Hierbei können viele Problematiken entstehen, beispielsweise wenn der Fuß abrutscht oder die zu einsteigende Person das Gleichgewicht verliert. Aufgrund der Klappsitze haben die Passagiere mehr Platz, sich beim Einsteigen einzurichten, dennoch kann aufgrund der Bauweise ein beengtes Gefühl entstehen. Dementsprechend wird der eSIMJT hinsichtlich Komforts und Ergonomie mit 2 Punkten bewertet. Der eSIMHC bietet aufgrund seiner runden Bauweise und der Bestuhlung einen angenehmeren Sitzkomfort für die Passagiere. Das Einsteigen über die Tür kann einfach erfolgen, wobei darauf geachtet werden muss, dass die Passagiere beim Ein- und Aussteigen nicht gegen die Arme oder die Propeller stoßen. Der eSIMPP hat hinsichtlich der Komfoteigenschaften die höchste Punktzahl, da aufgrund der geringen Sitzmöglichkeiten, der großen Fenster und der störungsfreien Aussicht, für Passagiere ein Wohl ergehendes Gefühl erweckt wird. Im Gegensatz zu den anderen Konzepten gibt es beim eSIMPP keine Komponenten vor dem Fenster, sodass eine sehr gute Aussicht gewährleistet wird.

Kosten

Die Kosten stellen ein sehr wichtiges Bewertungskriterium dar, denn durch diesen ist abzuleiten, ob der Einsatz der Konzepte wettbewerbsfähig auf dem Markt sein wird. Die Materialkosten sind aufgrund des Einsatzes von CFK sehr hoch. Auch der Aufwand der Herstellung dieser Materialien ist hoch, vor allem deswegen, weil eVTOL Materialien noch nicht seriengefertigt werden. In Zukunft könnten diese Kosten deutlich sinken. Hierbei hat der eSIMJT jedoch den Vorteil, dass die Sensoren der Avionik von der Automobilbranche zum Einsatz kommen. Daher sind die Kosten diesbezüglich geringer als bei den anderen Konzepten. Dennoch sind die Gesamtkosten des eSIMJT als hoch einzustufen. Dies liegt hauptsächlich an der Komplexität des eVTOLs. Die zusätzliche Tür unter dem Rumpf und die zusätzlichen Sicherungssysteme für eine barrierefreie Nutzung stellen hohe Kosten dar. Aufgrund der verschiedenen Systeme für den Auf- und Vortrieb sind auch hohe Wartungskosten zu erwarten. Zudem fordert die Integration der Impeller eine komplexe Architektur mit hohen verbundenen Produktionskosten. Darüber hinaus benötigt der eSIMJT sehr leistungsfähige Elektromotoren, die ebenfalls kostspielig sind. Hierbei werden jedoch alle Konzepten mit Kupferleitungen ausgestattet, obwohl Silberleitungen eine bessere Leitfähigkeit aufweisen, jedoch aufgrund ihrer Kosten nicht eingesetzt werden. Insgesamt wird der eSIMJT trotz der niedrigen Avionik Kosten mit einer Punktzahl von 2 bewertet. Die Avionik Kosten des eSIMPPs werden ebenfalls nicht sehr hoch sein, da sie fast vollständig von einem Unternehmen integriert werden. Im Falle des eSIMHCs hingegen erfordert die Installation vieler Zusatzsysteme zusätzliche Kosten.

Wartbarkeit

Um eine hohe Zuverlässigkeit zu gewährleisten, ist eine regelmäßige Wartung unerlässlich. Der eSIMHC bietet in dieser Hinsicht den Vorteil einer einfachen Architektur, da beispielsweise der Zugang zu den Motoren und Propellern unkompliziert ist. Zudem hat das Konzept insgesamt weniger bewegliche Teile. Beim eSIMPP wird aufgrund der identischen Systeme, die gleichzeitig für den Vortrieb als auch für den Auftrieb verantwortlich sind, ein geringer Wartungsaufwand vermutet, da ein einheitliches Wartungsschema durchgeführt werden kann. Allerdings könnten der bewegliche Rahmen und die mehr Blättrigen Propeller sowie die aktive Kopfstütze zusätzliche Wartungsanforderungen mit sich bringen. Die Wartung des eSIMJTs erfordert aufgrund der Komplexität einiger Systeme einen erheblichen Aufwand. Dies liegt daran, dass viele Systeme beweglich sind, was ihre Fehleranfälligkeit erhöht. Ein Beispiel dafür sind die integrierten Impeller in den Flügeln, die ein komplexes System darstellen. Auch die Türmechanismen erfordern einen hohen Wartungsaufwand und sind zeitaufwendig. Die einziehbaren Fahrwerkskomponenten stellen ebenfalls einen hohen Wartungsaufwand dar. Die Bewertung wird beim eSIMHC mit 4, beim eSIMJT mit 2 und beim eSIMPP mit 3 Punkten vorgenommen.

Qualität

Die Qualität hat eine entscheidende Bedeutung und beeinflusst die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Systeme. Die Bewertung erfolgt bei allen Konzepten mit der Höchstpunktzahl, da qualitativ hochwertige Produkte im Einsatz sind. Beispielsweise sind die Acrylglasplatten sehr hochwertig und haben eine 11-mal höhere Bruchsisicherheit als Glas. Die Außenmaterialien sind ebenfalls sehr hochwertig und bieten maximalen Schutz. Zudem sind die Avionik-Systeme mit sehr leistungsfähigen und qualitativen Komponenten zusammengebaut. Auch die Gehäuse der Motoren bieten Schutz und sind in einfacher Bauform integriert, da bei einer großen Anzahl von Motoren keine komplexen Gehäusebauformen nötig sind. Die einfachste Bauweise wird von dem eSIMPP und dem eSIMHC verwendet, diese sind praktisch und anpassbar.

Funktionalität

Das nächste Bewertungskriterium stellt die Funktionalität dar. Alle Konzepte erfüllen die drei Hauptfunktionen, das senkrechte Starten und Landen, das autonome Fliegen und die Beförderung von Personen. Die Art und Weise unterscheidet sich in den Konzepten, dies ist jedoch nicht auf bestimmte Lösungen fixiert. Ein wesentlicher Vorteil ist jedoch von dem eSIMJT zu berücksichtigen. Dieser bietet einen barrierefreien Zugang und ermöglicht auch Menschen mit Rollstühlen, die alternative Mobilität zu nutzen. Diese Funktion wird bei der Bewertung besonders berücksichtigt. Weiterhin wird berücksichtigt, dass der eSIMPP die Möglichkeit bietet, Haustiere mitzunehmen, dies wird in den anderen Konzepten nicht geschaffen. Trotz dieser zusätzlichen

Funktion erhalten sowohl der eSIMPP als auch der eSIMHC eine Bewertung von 3 Punkten. Dies lässt sich damit begründen, dass der eSIMPP nur zwei Sitzplätze bietet und somit gegenüber den anderen beiden Konzepten einen großen Nachteil aufweist. So können die Funktionalitäten des eVTOL jederzeit nur von zwei Passagieren bzw. durch einen Passagier und einem Piloten genutzt werden. Ein Aspekt des eSIMHCs ist die Energiezufuhr. Aufgrund der auswechselbaren Batterien müssen bei diesem eVTOL keine langen Ladezeiten während des Betriebs berücksichtigt werden. Ein Nachteil des Konzepts besteht jedoch in seiner Bodenbeweglichkeit. Die eingesetzten Kufen besitzen keine Räder, somit ist die Bewegung auf dem Boden erschwert.

Zuverlässigkeit

Hinsichtlich der Zuverlässigkeit sind alle Konzepte mit der höchsten Punktzahl bewertet, da die Zuverlässigkeit einen direkten Einfluss auf die Sicherheit der Passagiere hat. Es ist zwingend erforderlich, zuverlässige Systeme und Komponente zu integrieren. Dementsprechend werden die Erfahrungen und die Expertise großer Unternehmen eingeholt. Der eSIMHC ist durch seine Bauweise mehrfach redundant ausgelegt und kann beim Ausfall von einigen Elektromotoren den Schub durch die anderen Elektromotoren kompensieren. Bei einem Totalausfall sorgt ein Fallschirm für eine sichere Landung. Die Wahrscheinlichkeit, dass jedoch alle Systeme zur selben Zeit ausfallen, ist sehr gering. Der eSIMJT verfügt ebenfalls über redundante Elektromotoren, wobei die Hälfte für den Vortrieb und die andere Hälfte für den Auftrieb verantwortlich ist. In dieser Hinsicht könnte die Bauweise des eSIMHC bevorzugt werden, jedoch weist der eSIMJT aufgrund seiner Tragflächen ein Gleitverhalten auf, welches durch die anderen Konzepte nicht möglich ist. Dies ermöglicht dem eSIMJT im Falle eines Totalausfalls zu gleiten und eine geeignete Landemöglichkeit zu finden. Für eine Notwasserlandung verfügt der eSIMJT zusätzlich noch ein aufblasbares Boot. Der eSIMPP ist mit seinen 8 Elektromotoren auch mehrfach redundant ausgelegt, da dieser im Gegensatz zu den ersten beiden Konzepten nur zwei Passagiere befördert und dementsprechend deutlich weniger Energie benötigen wird. Kommt es dennoch zu einem Ausfall der Systeme, wird ein Fallschirm die sichere Landung gewährleisten. Somit ist eine hohe Zuverlässigkeit aufgrund von hoher Redundanz und von Notsystemen gewährleistet. Die Gurtsysteme in allen Konzepten tragen ebenfalls zur Sicherheit bei, insbesondere im Fall des eSIMPP, der einen Vierpunkt-Gurt und eine aktive Kopfstütze verwendet, um die Auswirkungen eines Aufpralls auf den Kopf zu reduzieren.

Gewicht

Das Gewicht hat eine äußerst wichtige Rolle und beeinflusst die erforderliche Flugleistung. Umso mehr müssen Gewichtsreduzierende Maßnahmen getroffen werden. Der eSIMPP ist hinsichtlich des Gewichts am leichtesten, da es für zwei Passagiere ausgelegt ist. Vergleichsweise ist der eSIMHC aber deutlich leichter. Dieselbe Platzkapazität wird auch vom eSIMJT angeboten, jedoch

ist das Gewicht schwerer. Dies wird durch die komplexen Systeme und den großen Tragflügeln erreicht, die beim eSIMHC nicht vorhanden sind. Insbesondere beeinflussen die Batterien das Gewicht. Hierbei werden vor allem die Pouchzellenform eingesetzt, da diese eine höhere Energiedichte erlauben als z.B. Rundzellen. Der eSIMJT nutzt jedoch prismatische Zellen, die aufgrund des Gehäuses mehr Gewicht einbringen, jedoch fast ähnlich zu Pouchzellen, ebenfalls eine hohe Energiedichte ermöglichen. Alle drei Konzepte planen, Batterien mit einer hohen Energiedichte zu nutzen, die derzeit noch nicht vollständig auf dem Markt vorhanden sind. Dieser Fortschritt wird jedoch den Vorteil bieten, dass größere Reichweiten erzielt werden können dies wird die eVTOL Konzepte im Vergleich zu anderen Lösungen wettbewerbsfähiger machen.

Leistung

Ein weiteres Kriterium ist die Leistung. Die Berechnung der einzelnen Konzepte stellt die erforderliche Leistung der eVTOLs dar, die während des Schwebeflugs nötig ist. Basierend darauf, wird der eSIMJT mit zwei Punkten bewertet. Die erforderliche Leistung ist fast doppelt so hoch, wie bei dem eSIMHC, der ebenfalls für vier Passagiere ausgelegt ist. Die hohe Leistung wird zum einen aufgrund der geringen Fläche der Impeller und zum anderen durch die geringe Anzahl der Motoren zustande kommen. Denn dieses Konzept beansprucht für den Schwebeflug 6 Motoren. Diese müssen eine sehr hohe Leistung erbringen, um die kleinen Impeller schnell anzutreiben. Der eSIMHC hat mehr Motoren und zusätzlich größerer Rotationsflächen. Es ist im Allgemeinen immer effizienter, eine große Menge Luft langsam anzutreiben, in dem große Propellerdurchmesser verwendet werden, als kleine Propellerdurchmesser zu nutzen und dafür die Leistung der Motoren zu erhöhen. Der eSIMPP ist in dieser Hinsicht auch mit mehreren Propellerblättern ausgestattet und kann mit derselben Leistung, mehr Schub erzeugen als der eSIMHC mit zwei Propellerblättern. Für eine hohe Leistungsfähigkeit setzt der eSIMJT auf eine Wasserkühlung der Elektromotoren. Im Gegensatz dazu nutzen die anderen Konzepte eine Luftkühlung. Aufgrund der sehr leistungsfähigen Elektromotoren des eSIMJT wird eine Wasserkühlung von Vorteil sein, da dies eine bessere Kühlung aufweist als die Luft. Andererseits ist für den eSIMPP und dem eSIMHC eine Luftkühlung sehr gut geeignet, da die Kühlung einfacher erfolgt und keine komplexen Komponenten vorhanden sein müssen.

Marktreife

Zu guter Letzt wird ein Blick auf die Marktreife der Konzepte geworfen. Die Aktualität des Themas ist beeinflusst die Marktreife enorm, denn viele Systeme sind in der Erprobung. Dennoch sind zurzeit sehr viele Konzepte auf dem Markt, die auf eine Zertifizierung warten. Diese kann und wird durch Sicherheitsvorkehrungen auch dauern. In Bezug zu den Konzepten, sind insbesondere die Batterien und die Autonomie zu berücksichtigen. Denn die Bauform, die Kabineneinrichtungen und die Antriebssysteme sind mehr oder weniger bereits bekannt. Die

eingesetzten Batterien sind zurzeit nicht vollständig und serienreif auf dem Markt vorhanden. Es sollen Batterien mit einer Energiedichte von bis zu 700Wh/kg verwendet werden. Dies wird bis zum Einsatz für eVTOLs sicher noch einige Jahre dauern. Diese Batterietechnologie soll vom eSIMJT verwendet werden, die zusätzliche Komplexität des eVTOL und der Integration von Rollstuhlgerechten Systemen muss zunächst auch ausreichend getestet werden. Die geringste Punktzahl der Marktreife wird zwischen den drei Konzepten daher an den eSIMJT vergeben. Die Batterietechnologie des eSIMHCs wird bereits produziert, da der Anbieter Lillium ebenfalls die Batterien in seinem eVTOL integrieren möchte. Dementsprechend ist der Multicopter hinsichtlich der Marktreife den anderen Konzepten voraus. Die Bewertung wird dennoch mit 3 Punkten vergeben. Das lässt sich eben mit der Begründung festhalten, dass eVTOL im Allgemeinen noch viele Tests durchlaufen müssen. Der eSIMPP wird ebenfalls aus derselben Begründung mit 3 Punkten bewertet.

Die Ergebnisse der Bewertung ergeben, dass der eSIM-JET eine Punktzahl von 3.57 erreicht, der eSIM-Prop eine Punktzahl von 4.02 und der eSIM-Hexacopter einen Wert von 4.13. Anhand der Bewertung erschließt sich, dass im Vergleich der Konzepte, der eSIM-Hexacopter im gesamten bessere Merkmale und Eigenschaften aufweist. Mit diesem Abschnitt wird die gesamte Konzeptphase abgeschlossen.

Im nächsten Kapitel wird ein Geschäftsmodell erarbeitet, der die Integration von eVTOLs im Hamburger Raum darstellt. Hierbei werden die Ergebnisse aus der Umfrage und der Konzeptphase einfließen. Da sich der eSIM-Hexacopter gegenüber den anderen Konzepten durchgesetzt hat, wird das Geschäftsmodell am Beispiel dieses eVTOLs ausgearbeitet.

5 Geschäftsmodell

5.1 Einführung

Die Integration von alternativen Mobilitäts-Möglichkeiten bringen viele logistische, wirtschaftliche und soziale Barrieren mit. Daher bedarf es einer strukturierten Vorgehensweise, um die Einbindung der eVTOLs im Hamburger Raum, in allen Hinsichten, effizient und nachhaltig zu gestalten. In diesem Kapitel wird ein Geschäftsmodell ausgearbeitet, der einen Überblick über die Möglichkeiten der Implementierung von eVTOLs verschaffen soll. Dabei wird insbesondere die Infrastruktur und Wirtschaftlichkeit betrachtet.

5.2 Infrastruktur

Eine gut organisierte Infrastruktur ist entscheidend für den Betrieb der eVTOLs und beeinflusst den Erfolg der Unternehmen erheblich. Dieser Abschnitt wird sich mit den Start- und Landeplätzen, den Vertiports, auseinandersetzen.

5.2.1 Definition Vertiport

Zunächst wird die Bedeutung des Begriffs erläutert. Die EASA beschreibt die Definition des Vertiports wie folgt: 'Vertiport' means an area of land, water, or structure that is used or intended to be used for the landing, take-off, and movement of VTOL-capable aircraft. Vertiports sind somit Orte, die Land- oder Wasserflächen und Konstruktionen, die als Start- und Landefläche für eVTOLs verwendet werden können (Ky, 2022, S.18).

Die Gestaltung der Vertiports sind mit den möglichen Flächenkapazitäten und den Kundenanforderungen verbunden. Standorte in nahegelegenen Bahnhöfen oder Bahn- und Bushaltestellen sind ideal. Die EASA hat bezüglich der Vertiports umfangreiche Anforderungen aufgestellt. Dieses Kapitel wird jedoch lediglich eine kurze Übersicht über die wichtigsten Informationen darstellen, um einen Überblick zu verschaffen.

5.2.1.1 Anforderungen der Vertiports

Die EASA fordert aus Sicherheitsgründen eine Betrachtung des gesamten Flugweges. Dies ist darauf zurückzuführen, dass beim senkrechten Starten viel Energie aufgewendet werden muss, um das eVTOL zum steigen zu bringen. Dabei verfügen nicht alle eVTOLs eine ausreichende Leistung, um alle Hindernisse auf dem Weg überfliegen zu können. Beispielsweise können leistungstärkere eVTOLs Hindernisse problemlos überfliegen als eVTOLs mit einer geringeren

Leistung (Tauszig, 2022). Veranschaulicht wird dies in Abbildung 43. Ein Vertiport, der sich auf einer bestimmten Höhe befindet, wo keine hohen Hindernisse vorhanden sind, können optimal genutzt werden. Im Gegensatz dazu kann ein Vertiport auf Bodenhöhe durch Hindernisse gestört werden, sodass ein eVTOL mit einer geringen Leistung eventuell keinen sicheren Start gewährleisten kann.

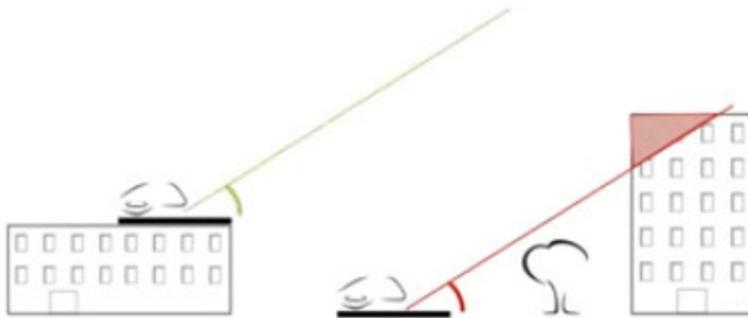


Abbildung 43 Flugweg eVTOL beim starten (Tauszig, 2022)

Zusätzlich dazu definiert die EASA zwei Kategorien, in die sich die eVTOLs zuordnen lassen. Diese Kategorien unterscheiden sich in einigen Sicherheitsvorgaben. 'Category Basic' und 'Category Enhanced'. Als Kategorie Enhanced werden eVTOLs eingeordnet, die für die Beförderung von Passagieren verantwortlich sind oder in dicht besiedelten Umgebungen eingesetzt werden. Diese Kategorie wird mit mehr Sicherheitsvorgaben belastet. Zum Beispiel müssen diese eVTOLs, da sie in Städten eingesetzt werden, nach einer Katastrophe einen sicheren Weiterflug gewährleisten und anschließend sicher landen können.



Abbildung 44 Kategorie Enhanced: Sicheres fliegen und landen nach einer Katastrophe (Tauszig, 2022)

Die Kategorie Basic steht für die nicht gewerbliche Beförderung von Passagieren, beispielsweise auf dem Land. Diese Kategorie muss weniger Sicherheitsvorgaben berücksichtigen. Weiterhin hat die EASA ein Konzept erarbeitet, mit dem ein sicheres Starten und Landen gewährleistet werden kann. Das Konzept ist in Abbildung 45 zu erkennen. Die Definition eines Volumens soll dabei helfen, den Schutz über einem Vertiport zu gewährleisten, damit kein Hindernis das Starten beeinträchtigt. Die Größe des Volumens ist dem Unternehmen überlassen, jedoch gibt die EASA

bestimmte Werte und Abmessungen an, die der technischen Spezifikation zu entnehmen sind (Tauszig, 2022).

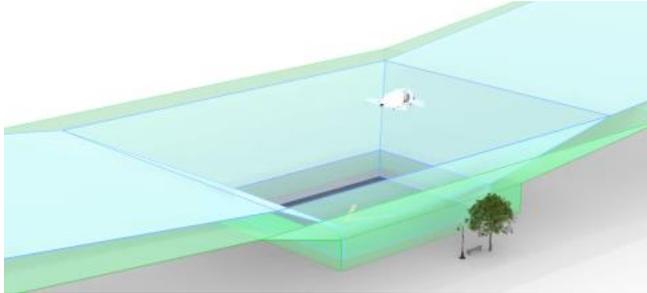


Abbildung 45 EASA-Konzept: Sicher Landen und Starten (Tauszig, 2022)

5.2.1.2 Vertiports im Hamburger Raum

Vertiports müssen nachhaltig entwickelt werden und dürfen bei der Integration in die Verkehrsinfrastruktur keine Komplikationen mit sich bringen. Dafür müssen neben Rahmenbedingungen auch behördliche Ansprechpartner und Genehmigungen festgelegt werden (Schwerin, 2023). In diesem Abschnitt werden Vorschläge und Ideen für die Integration von Vertiports im Hamburger Raum dargestellt.

Für die Erarbeitung werden zunächst die Anforderungen der Kunden berücksichtigt, dafür werden die in Abschnitt 4.1 ermittelten Anforderungen bezüglich der Routen herangezogen:

1. „Routen zwischen der Nord Elbe und Süd Elbe wie z.B. Blankenese und Buxtehude“
2. „Viele Linien“
3. „Start- & Landepunkte auch Hochhäusern aufgrund des Lärms “
4. „Zielzonen Airport/HBF/ Startzonen: in jedem Bezirk “

Wie bereits in Kapitel 3 dargestellt, setzt sich Hamburg aus 7 Bezirken zusammen: Wandsbek, Hamburg-Nord, Eimsbüttel, Altona, Hamburg-Mitte, Harburg und Bergedorf. Die gesamte Fläche besteht zu 8,1% aus Flüssen und Seen und die restlichen 91,9% aus Landflächen (Köhler, 2018). Im Folgenden werden alle sieben Bezirke auf mögliche Vertiport-Standorte untersucht und dargestellt. Dabei werden insbesondere hohe Gebäuden berücksichtigt.

Bezirk Wandsbek

Wandsbek ist der zweitgrößte Bezirk in Hamburg mit einer Fläche von 147 km² und der höchsten Einwohnerzahl von 441.000 (Hildebrandt, 2023). In unmittelbarer Nähe des Bahnhofs liegt das Quaree-Einkaufszentrum, das über mehrere Parkhäuser verfügt und sich ideal als Standort für einen Vertiport eignen könnte. Eine weitere Option in der Nähe ist das Asklepios Krankenhaus, welches über einen Hubschrauberlandeplatz auf dem Dach verfügt. Es ergeben sich jedoch einige Probleme, zum einen in Bezug auf die Koordination zwischen eVTOL und Hubschraubern, da Hubschrauber in Notfällen ohne Verzögerung landen müssen. Zum anderen könnte die ständige Präsenz von Reisenden in den Korridoren des Krankenhauses soziale Akzeptanzprobleme mit sich bringen. Insgesamt stehen drei Parkhäuser in der Nähe des Bahnhofs zur Verfügung. Eines davon befindet sich über dem Decathlon-Geschäft. Dies wäre möglicherweise ein geeigneter Standort für einen Vertiport, da er eine hervorragende Anbindung an die S-Bahn, die U-Bahn und verschiedene Buslinien bietet. Darüber hinaus befindet sich dieser Bereich in der Einkaufsstraße des Bezirks (Scheck et al., 2023).



Abbildung 46 Bezirk Wandsbek: Decathlon Dach (Scheck et al., 2023)

Bezirk Bergedorf

Bergedorf weist eine Fläche von 155 Quadratkilometern auf und wird durch 130.000 Einwohnern bewohnt (Hildebrandt, 2023). Trotz seiner Größe hat Bergedorf die geringste Bevölkerungszahl aller Hamburger Bezirke. Als möglicher Standort für einen Vertiport könnte das City-Center-Bergedorf in Erwägung gezogen werden. Dieser besteht aus zwei Einkaufszentren und befindet sich in unmittelbarer Nähe des Bahnhofs. Auf dem Dach des Einkaufszentrums befinden sich Parkplätze, die zusätzlich für eVTOLs genutzt werden könnten. Ein potenzielles Hindernis könnte

jedoch der 50 Meter hohe Wohnturm darstellen, der in das Einkaufszentrum integriert ist (Ludowig A).

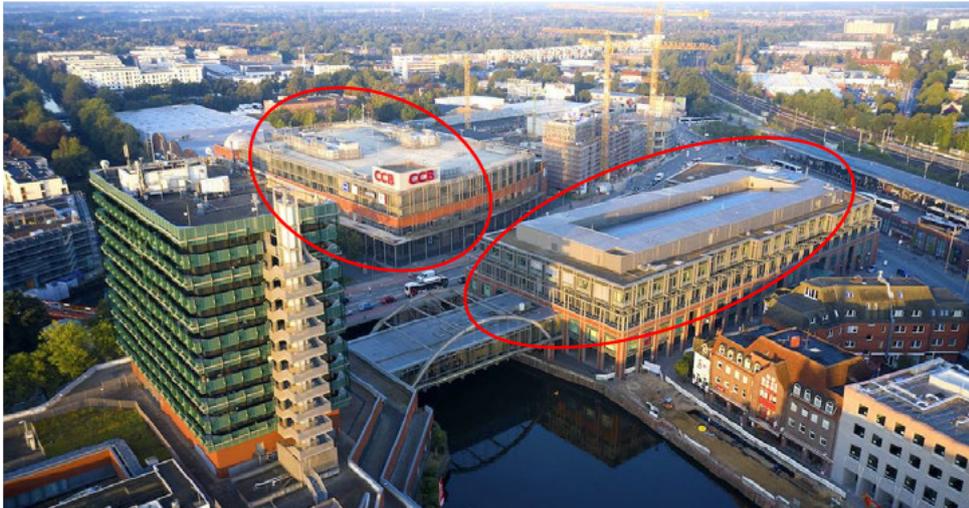


Abbildung 47 Bezirk Bergedorf: City-Center-Bergedorf (Goldschmidt, 2023)

Bezirk Harburg

In Harburg leben etwa 169.000 Menschen (Hildebrandt, 2023). Der Harburger Bahnhof bietet keine großen Flächen in der Nähe des Bahnhofs, sodass ebenfalls das Einkaufszentrum in Frage kommen kann. Der Phönix-Center liegt gegenüber des Bahnhofs und bietet in drei Ebenen Einkaufsmöglichkeiten dar. Das Parkhaus verfügt über 1400 Stellplätze für PKWs und ist aufgrund der großen Fläche ideal für eVTOLs (Banit et al., 2023 A). Zudem sind in der Nähe keine großen Gebäude oder weitere Hindernisse vorhanden.



Abbildung 48 Bezirk Harburg: Phönix-Center (Küster, 2023)

Bezirk Altona

Altona hat eine Einwohnerzahl von 275000 (Hildebrandt, 2023). In der Nähe des Bahnhofs gibt es vielfältige Einkaufsmöglichkeiten und auch Einkaufszentren. Zudem ist eine IKEA-Filiale vorhanden, die zu Fuß ca. 10 min vom Bahnhof entfernt ist. Als Vertiport-Standort kann das offene Parkdeck dienen. Dort stehen 750 Stellplätze zur Verfügung und zusätzlich besteht die Möglichkeit, Elektroautos aufzuladen. Diese Lademöglichkeit könnte ausgeweitet werden, um die Batterien der eVTOLs ebenfalls aufzuladen (Banit et al., 2023 B).



Abbildung 49 Bezirk Altona: IKEA (Tchoban et al., 2014)

Eine weitere Standortwahl für einen Vertiport kann in der Nähe der Barclays Arena erfolgen. Die Barclays-Arena wird aufgrund ihrer Veranstaltungen im Jahr von über einer Million Menschen besucht. Die Grundfläche liegt bei 40.000 m² und das Dach kann eine Belastung bis zu 135 Tonnen tragen (Frommhold, 2023). Aufgrund der weniger zentralen Anbindung könnte hier das volle Potenzial von eVTOL ausgeschöpft werden.



Abbildung 50 Bezirk Altona: Barclays Arena (Frommhold, 2023)

Ein weiterer Standort in Altona, der in Betracht gezogen wird, ist Blankenese. Blankenese hat nach Nienstedten das höchste durchschnittliche Jahreseinkommen und verfügt daher die finanziellen Mittel, um sich diese alternative Mobilität leisten zu können (Binde, 2017). Eine mögliche Integration eines Vertiports könnte am Falkensteiner Ufer erfolgen, da dieser Ort aufgrund seiner Aussicht auf die Elbe oft bevorzugt wird. Hierfür könnte ein Steg am Ufer der Elbe ausgebaut werden.



Abbildung 51 Bezirk Altona: Blankenese, Falkensteiner Ufer (Ludowig B)

Bezirk Eimsbüttel

Eimsbüttel hat etwa 267000 Einwohner (Hildebrandt, 2023). Im Stadtteil Stellingen befindet sich das Hagenbecks Tierpark mit einer 19 Hektar großen Parkanlage. Der Tierpark ist sehr gut besucht und bietet zusätzlich im Tierpark Veranstaltungen an. Die Anreise kann mit mehreren Bussen und der U2 Linie erfolgen (Albrecht, 2023). Eine Alternative Möglichkeit der Mobilität kann für viele Besucher: innen vorteilhaft sein. Die Integration kann auf den Parkplätzen des Tierparks erfolgen.



Abbildung 52 Bezirk Eimsbüttel: Hagenbecks Tierpark (Google Maps, 2023 A)

Bezirk Hamburg Mitte

Mit einer Einwohnerzahl von 301000 Menschen, gehört der Bezirk zu der dritt bewohntesten Gegend (Hildebrandt, 2023). Zudem befinden sich aufgrund der zentralen Lage viele Unternehmen und Sehenswürdigkeiten in diesem Bezirk. Auch für Touristen ist dieser Bezirk die erste Anlaufstelle. Daher sind Vertiport-Haltestellen in diesem Bezirk von entscheidender Bedeutung. Ein besonderer Blick wird auf die Stadtteile Hafencity, Hamburg Neustadt, und Finkenwerder geworfen. Die HafenCity bietet für Touristen zahlreiche Attraktionen an. Insbesondere ist die Elbphilharmonie ein zentraler Ort, der sowohl von Touristen als auch bei Einwohnern von Hamburg sehr beliebt ist. Zudem bietet der Ausbau der HafenCity durch den Masterplan eine gute Grundlage, um Veränderungen durchzuführen. Im Masterplan wird betont, dass der öffentliche Personennahverkehr eine Grundvoraussetzung für die Attraktivität des Hafencitys ist. Unterdessen wurden bereits viele vorhandene Systeme, sowie automatisch betriebene und straßenunabhängig geführte Betriebe getestet (Runde, 2006). In der Nähe der Elbphilharmonie könnte eine sehr hohe Nachfrage nach einem Vertiport sein. Aufgrund der vorhandenen hohen Gebäude, die als Hindernisse dienen können und der Gefahr der Überschwemmung, wird eine erhöhte Position bevorzugt. Als alternative Option könnte jedoch der Ausbau eines Vertiports am Steg in Betracht gezogen werden.



Abbildung 53 Bezirk Hamburg-Mitte: Hafencity (Astoc)

Ein weiterer geeigneter Standort kann am Jungfernstieg integriert werden, da aufgrund der Aussicht, den Einkaufsmöglichkeiten und der historischen Gebäude eine hohe Nachfrage zu erwarten ist. Eine Möglichkeit kann das Dach des Alex sein, welches ein sehr zentrales und beliebtes Restaurant am Jungfernstieg ist. In Abbildung 54 ist das Dach des Restaurants dargestellt.



Abbildung 54 Bezirk Hamburg Mitte: Restaurant Alex am Jungfernstieg (RestaurantGuru, 2023)

Andererseits besteht auch die Möglichkeit, die linke Seite des Alex auszubauen und für einen Vertiport zu nutzen. Denn sowohl aus der rechten als auch auf der linken Seite befinden sich Plätze, die von den Hamburger:Innen genutzt werden, um die Aussicht auf die Innenalster zu genießen, dabei ist die linke Seite oft, weniger befüllt. Diese Fläche könnte ausgebaut werden, indem der Steg in Richtung der Alster vergrößert wird. Die Anbindung zu weiteren Mobilitätsmöglichkeiten ist nur wenige Schritte entfernt. Es sind mehrere Bushaltestellen vorhanden. Auch U- und S-Bahnstationen sind in wenigen Minuten über das Einkaufszentrum der Europapassage zu erreichen. Die nächste Abbildung 55 stellt eine Ansicht der linken Seite dar, bei dem gut zu erkennen ist, dass sich der Aufenthalt dort begrenzt darstellt.



Abbildung 55 Bezirk Hamburg Mitte: Restaurant ALEX Seitenansicht (Schulz, 2020)

Die Hauptzentrale Lage befindet sich am Hauptbahnhof. Hier ist der Knotenpunkt für alle Bahnstrecken und Reisende. Allerdings ist die Lage dort sehr begrenzt. In der Nähe anliegende freie Flächen sind weniger vorhanden. Ursprünglich gab es die Idee, südlich vom Bahnhof, über den offenen Gleisen einen grünen Park zu bauen, um diesen Platz auszunutzen (Iken, 2018). Die Idee wurde jedoch aufgrund von Kosten und vermutlicher Einschränkungen des Bahnbetriebes verworfen (Neuburger, 2021). Daher ist umso wichtiger, sich auf verfügbare freie Flächen zu konzentrieren, die keine großen Einschränkungen zur Folge haben. Eine Möglichkeit kann das Saturn-Gebäude sein, der sich in Abbildung 56 auf der linken Seite befindet. Die großzügige freie Fläche auf dem Dach könnte für die Integration eines Vertiports ausgenutzt werden.

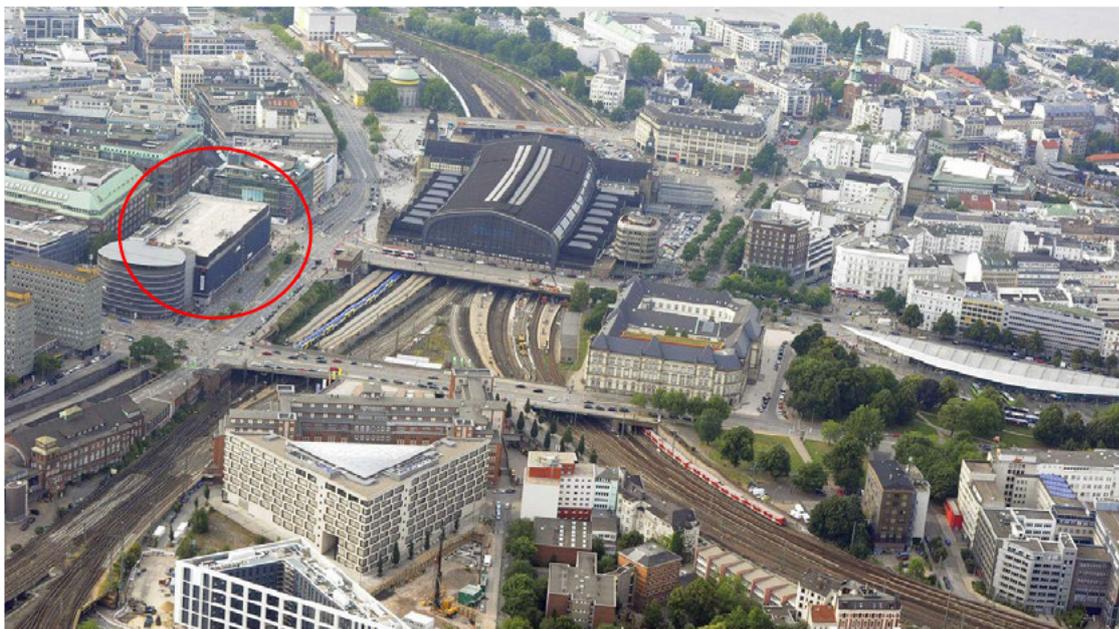


Abbildung 56 Bezirk Hamburg Mitte: Hauptbahnhof (Baum et al., 2019)

Ein weiterer Vertiport kann im Finkenwerder andocken. Dort befinden sich zahlreiche Unternehmen und das Airbus-Werksgelände. Mit 16676 Mitarbeitenden ist Airbus in Hamburg das 7 größte Unternehmen (Hildebrandt, 2023). Die Verkehrsanbindung ist dort nicht sehr weit ausgearbeitet. Das Gelände wird über die Fähre, den Elbtunnel oder mit dem Bus erreicht. Wobei alle Möglichkeiten sehr zeitintensiv sind. Eine mögliche Platzierung auf dem Werksgelände selbst könnte aufgrund der vorhandenen Flächen vorteilhaft sein. Dies könnte jedoch viele Komplikationen mit sich bringen, da der Zugang zum Werksgelände streng über eine Anmeldung geregelt ist, die bei der Anmeldezentrale kontrolliert wird. Eine Möglichkeit ist die Platzierung vor dem Osttor, da sich hier auch die Anmeldezentrale befindet. Andererseits kann ein nahegelegener Steg ausgebaut werden.



Abbildung 57 Bezirk Hamburg-Mitte: Finkenwerder (Google Maps, 2023 B)

Bezirk Hamburg Nord

Im Bezirk Hamburg Nord leben mit 314000 die zweit meisten Einwohner Hamburgs (Hildebrandt, 2023). Eine Platzierung eines Vertiports sollte in der Nähe des Flughafens vorhanden sein. Da vor allem für Geschäftsreisende die Zeit oft eine große Rolle spielt. Am Flughafen befinden sich zahlreiche Möglichkeiten zum Parken. Dementsprechend kommen Parkdecks infrage, die für die Vertiports eingerichtet werden können. Hier sind ebenfalls Möglichkeiten vorhanden, E-Autos aufzuladen. Dies könnte weiter ausgearbeitet werden für eVTOLs (Ravenhorst, 2020).



Abbildung 58 Bezirk Hamburg Nord: Flughafen (Rosenburg, 2022)

Hamburg bietet aufgrund seiner vorhandenen Flächen viele Möglichkeiten zur Einrichtung von Vertiports. Dabei ist es nicht unbedingt erforderlich, Vertiports komplett neu zu bauen. Wie bereits vorgeschlagen wurde, können beispielsweise die Dächer hoher Gebäude mit ihren Parkflächen genutzt werden. Die Integration im Bezirk Hamburg-Mitte könnte eine zentrale Lage der Vertiports darstellen, aber aufgrund begrenzter Flächen wird dies eine Herausforderung darstellen. Dieser Standort muss nämlich über Ladeeinrichtungen verfügen, um die Batterien der eVTOLs aufladen zu können. Darüber hinaus muss ausreichend Platz vorhanden sein, um Wartungsarbeiten an den eVTOLs durchzuführen. Für jeden Bezirk wurde mindestens ein Standort ermittelt und wird in Abbildung 59 veranschaulicht.



Abbildung 59 Vertiports pro Bezirk in Hamburg

5.3 Kostenanalyse

Die Integration von eVTOLs stellt aufgrund der begrenzten Serienfertigung und der noch nicht ausgereiften Technologien kostspielige Herausforderungen dar. Gleichzeitig ist es von entscheidender Bedeutung, die Ticketpreise so niedrig wie möglich zu gestalten, um eine hohe Nachfrage zu erzielen. In diesem Abschnitt wird eine Kostenanalyse durchgeführt, die auf den Ergebnissen der Umfrage und der Konzeptphase basiert. Ziel dieser Analyse ist es, anhand des Flugbetriebs zu ermitteln, welche Höhe der Anschaffungskosten eines eVTOLs akzeptabel ist, um einen wettbewerbsfähigen Betrieb sicherzustellen.

Zur Durchführung der Analyse werden zunächst einige Informationen aus den Ergebnissen der Umfrage und der Konzeptphase herangezogen. Die in Abschnitt 4.1, dargestellten Ergebnisse der Umfrage zeigen, dass die Bewohner: innen möglichst geringe Preise bevorzugen. In Abbildung 22 wird deutlich, dass 60% der Befragten Preise bis 5€ zahlen würden und etwa 40 % Preise bis zu 10€. Daher wird eine Annahme von 10€ pro Flugminute getroffen, da dieser Preis als realistischer betrachtet wird. In Zukunft könnten die Preise aufgrund der Serienfertigung deutlich gesenkt werden. Weiterhin kann der Abbildung 23 entnommen werden, dass mehr als 70% eine Route zwischen dem Hamburger Hauptbahnhof und dem Flughafen in Anspruch nehmen würden. Die folgende Darstellung zeigt ein Schema, wie die Flugrouten in Hamburg gestaltet werden können. Hierbei werden zunächst die Querverbindungen zwischen den Bezirken vernachlässigt. Für jeden Bezirk sind jeweils zur gleichen Zeit Abflüge vom Hauptbahnhof und Ankünfte am Hauptbahnhof vorgesehen. Dabei befinden sich pro Bezirk jeweils 2 eVTOLs. Am Hauptbahnhof stehen sechs eVTOLs zum Abflug zur Verfügung und zusätzlich noch drei weitere, die aufgrund der Veranschaulichung nicht dargestellt sind. Diese Visualisierung dient dem besseren Verständnis des Geschäftsmodells und wird im weiteren Verlauf näher erläutert.

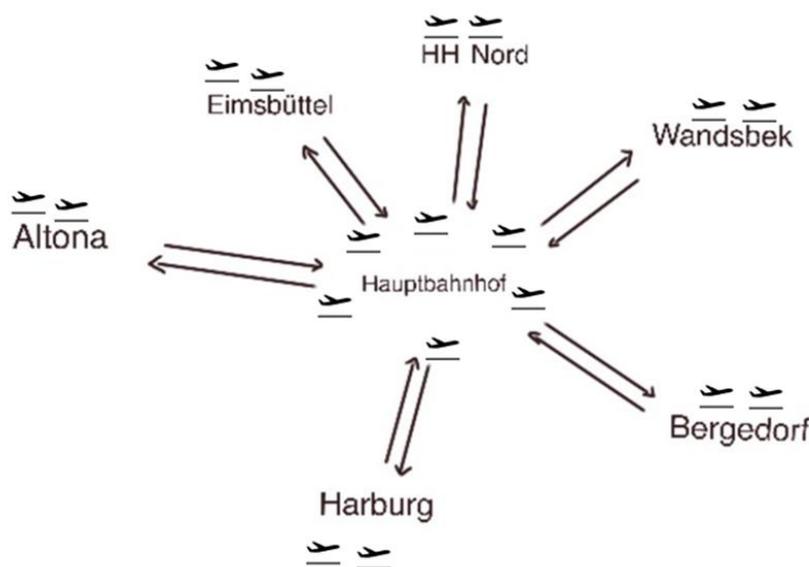


Abbildung 60 Flugrouten-Schema zwischen dem Hauptbahnhof und den Bezirken (Eigene Darstellung)

Die Strecke zwischen dem Hauptbahnhof und dem Flughafen ist in Abbildung 61 dargestellt und beträgt etwa 11km. Es wird angenommen, dass der Luftweg ohne Umwege erfolgen kann, weshalb die Strecke mit 11 km festgelegt wird. Anhand dieser Strecke kann der tägliche Umsatz berechnet werden.

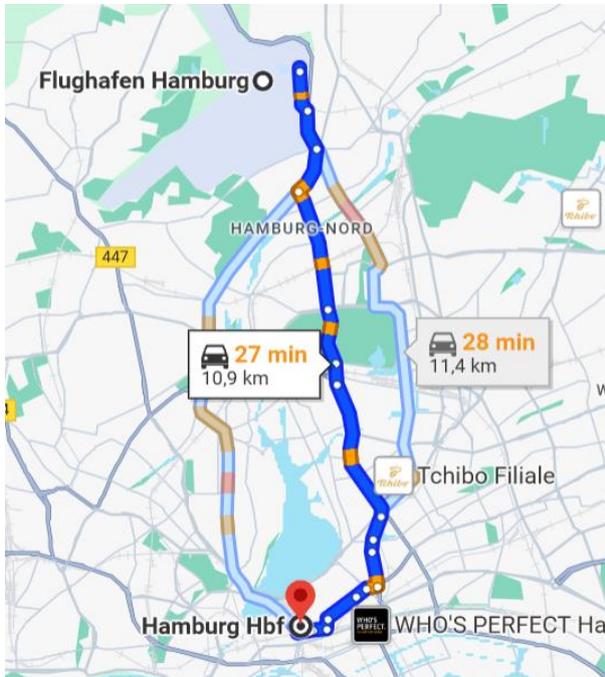


Abbildung 61 Route Hauptbahnhof-Flughafen (Google Maps, 2023 C)

Aus den Ergebnissen der Nutzwertanalyse im Abschnitt 4.6, wird als bevorzugtes eVTOL der eSIM-Hexacopter betrachtet. Die Reisegeschwindigkeit mit vier Passagieren wird mit 100 km/h angenommen. Als Referenz dient der in Abschnitt 2.4 dargestellte Volocity, dieser weist eine Reisegeschwindigkeit von 110 km/h auf und hat eine Platzkapazität für zwei Personen. Aus den gesammelten Informationen ergibt sich die Flugdauer der Route zwischen dem Hauptbahnhof und dem Flughafen.

$$t_{Route} = \frac{S}{\frac{v_{eSIMHC}}{60 \text{ min}}} = \frac{11 \text{ km}}{\frac{110 \text{ km}}{\text{h}}} = 6,6 \text{ min} \approx 7 \text{ min} \quad [10]$$

Innerhalb von etwa 7 Minuten kann der eSIMHC vier Passagiere vom Hauptbahnhof zum Flughafen befördern. Allerdings werden hierbei drei Passagiere betrachtet, da zunächst ein Pilot vorhanden sein wird, dabei wird jedoch zu jeder Zeit von einer vollen Kapazität ausgegangen, sodass alle Plätze belegt sind. Der Umsatz pro einem Flug ergibt sich dann wie folgt.

$$U_{Flug} = t_{Route} * X_{Pax} * K_{Ticket} = 7 \text{ min} * 3 * 10 \text{ €} = 210 \text{ €} \quad [11]$$

Der Flugbetrieb am Flughafen erfolgt zwischen 06:00-23:00 Uhr. Für den Flugbetrieb des eVTOLs wird im Allgemeinen jedoch für alle Vertiports ein Zeitraum zwischen 06:00-20:00 Uhr angenommen, da zu späteren Stunden tendenziell weniger Passagiere zu erwarten sind. Realistisch ist jedoch eine ortsabhängige Festlegung der Uhrzeiten. Beispielsweise würde der Flugbetrieb in der Nähe der Barclays-Arena spätere Zeiten berücksichtigen, da die Veranstaltungen in der Regel abends stattfinden. Für eine allgemeine Gültigkeit wird jedoch die Betriebszeit zwischen 06:00 und 20:00 Uhr angenommen. Die Regelung der Flughäufigkeit und weitere Informationen sind in Tabelle 5 zusammengefasst. In der Zeit zwischen 06:00 bis 7:00 Uhr und 19:00-20:00 Uhr wird innerhalb einer Stunde die Route insgesamt vier-mal durchflogen. Beispielsweise startet der eSIMHC um 06:00 Uhr am Hauptbahnhof und landet etwa 7 Minuten später am Flughafen. Zur selben Zeit, wie in dem Schema in Abbildung 61 dargestellt, fliegt ein weiterer eSIMHC vom Flughafen in Richtung des Hauptbahnhofs. Der nächste Flug zwischen dieser Route wird dann um 06:30 Uhr realisiert. Innerhalb einer Stunde werden somit vier Flüge erfolgen. Zwischen 07:00-19:00 Uhr werden innerhalb einer Stunde sechs Flüge im Abstand von 20 Minuten realisiert. Der Umsatz für eine Stunde innerhalb dieser Betriebszeiten ergibt sich wie folgt:

$$U1_{t=1std.} = U_{Flug} * X1_{Fluganzahl1} = 210 \text{ €} * 4 = 840\text{€} \quad [12]$$

$$U2_{t=1std.} = U_{Flug} * X2_{Fluganzahl2} = 210 \text{ €} * 6 = 1260\text{€} \quad [13]$$

Dadurch lässt sich der gesamte Umsatz innerhalb dieser Betriebszeiten berechnen, indem die Anzahl der gesamten Stunden berücksichtigt werden.

$$U1_{Gesamt} = U1_{t=1std.} * 2 = 1680\text{€} \quad [14]$$

$$U2_{Gesamt} = U2_{t=1std.} * 12 = 15.120\text{€} \quad [15]$$

Die gesamten Kosten pro Tag ergeben sich zu:

$$U_{Gesamt,Tag} = U1_{Gesamt} + U2_{Gesamt} = 1680\text{€} + 15.120\text{€} = 16.800\text{€} \quad [16]$$

An einem Tag wird somit ein Umsatz von 16800 € erreicht. Da sich diese Rechnung nur auf die Route zwischen dem Hauptbahnhof und dem Flughafen bezieht, wird im nächsten Schritt eine ganzheitliche Betrachtung durchgeführt. Pro Bezirk ist ein Vertiport vorhanden. Es werden nur die Routen zwischen dem Hauptbahnhof und den Vertiports in den Bezirken betrachtet, Querverbindungen zwischen den Bezirken werden vernachlässigt. Einige Bezirke erfordern eine längere Strecke und andere Bezirke liegen näher am Hauptbahnhof. Mit Google Maps ergeben sich die Strecken zwischen dem Hauptbahnhof und den Stadtteilen wie folgt:

Tabelle 4 Kilometeranzahl der Routen

| Route | Strecke [km] |
|----------------|--------------|
| Wandsbek-HBF | 6 |
| Bergedorf-HBF | 17 |
| Harburg-HBF | 12 |
| Blankenese-HBF | 15 |
| Stellingen-HBF | 7 |
| Durchschnitt | 11,4 |

Angesichts der gerundeten Streckendaten wird die Annahme getroffen, dass eine durchschnittliche Strecke von 11 km zu jedem Vertiport zurückgelegt wird. Dementsprechend ergibt sich ein Gesamtumsatz pro Tag wie folgt:

$$U_{Gesamt,Vertiport} = U_{Gesamt,Tag} * 6 = 100.800\text{€} \quad [17]$$

Für den monatlichen Umsatz werden 25 Tage berücksichtigt. Da aufgrund von Sonn- und Feiertagen weniger Reisende zu erwarten sind und diese Tage somit vernachlässigt werden.

$$U_{Gesamt,Vertiport,Monat} = U_{Gesamt,Vertiport} * 25 = 2.520.000\text{€} \quad [18]$$

$$U_{Gesamt,Vertiport,Jahr} = U_{Gesamt,Vertiport,Monat} * 12 = 30.240.000\text{€} \quad [19]$$

In diesem Szenario ergibt sich pro Jahr ein Umsatz von 30.240.000 €. Mithilfe des errechneten Umsatzes können nun die Herstellungskosten berechnet werden. Dafür werden Annahmen bezüglich des Umsatzes getroffen. Jeweils 20% des Gesamtumsatzes werden für Wartungskosten, Energiekosten und für Personalkosten genutzt. Nach Absprache mit dem Betreuer der Arbeit werden die Anschaffungskosten mit 40 % des Umsatzes gedeckt (A. Frenkel, Persönliche Kommunikation, 04.10.2023). Dabei werden insgesamt 21 eVTOLs berücksichtigt.

$$K_{Herstellun} = \frac{\left(\frac{U_{Gesamt,Vertiport,Jahr}}{100}\right)}{X_{eVTOL}} * 40\% = \frac{\left(\frac{25.200.000\text{€}}{100}\right)}{21} * 40 = 576.000\text{€} \quad [20]$$

Mit diesen berechneten Kosten kann ein eVTOL hergestellt werden. Bei höheren Kosten sind auch die Flugtickets zu erhöhen, dies wird wiederum infrage setzen, ob die Bereitschaft der

Passagiere da ist, höhere Preise zu zahlen. Daher ist von großer Bedeutung, die Kosten in einem wettbewerbsfähigen Bereich zu halten, um den Geschäftsbetrieb erfolgreich zu sichern.

Die Anschaffungskosten im Vergleich zu anderen eVTOL-Modellen erscheinen als sinnvoll. Bei eVTOLs werden sehr unterschiedliche Kosten erwartet. Dies hängt von unterschiedlichen Faktoren wie beispielsweise der Größe und der Funktionen ab. Es wird erwartet, dass eVTOLs mit einer Kapazität von zwei Passagieren unter 1,5 Millionen US-Dollar kosten können. Größere eVTOLs mit Kapazitäten für bis zu 5 Personen können Kosten über 4 US-Dollar verursachen (Santha et al., 2021). Ein Beispiel ist der zweisitzige Ehang, der Stückkosten in Höhe von 300.000 € aufweist (Diewald, 2019). Aufgrund der Viersitzer-Konfiguration des eSIMHCs ist der berechnete Preis realisierbar. Ein weiteres Beispiel stellt das H1 eVTOL von Droni dar, welches auch eine Sitzkapazität von zwei Passagieren hat, aber Stückkosten in Höhe von 195.000 Dollar aufweist (Werner, 2022). Noch kostengünstiger soll der viersitzige eVTOL von AutoFlight sein. Das Unternehmen gibt an, seine eVTOLs in China für 150.000 Dollar pro Stück herstellen zu wollen (Alcock, 2023 B). Wie bereits erwähnt, ist zu erwarten, dass die Kosten sich in den Jahren nach der Integration reduzieren werden. In Tabelle 5 sind alle relevanten Informationen zusammengefasst. Das gesamte Geschäftsmodell kann dem Anhang entnommen werden.

Tabelle 5 Informationen zum Geschäftsmodell

| Info | Wert | Anmerkung |
|---|-----------------|---|
| Reisegeschwindigkeit | 100 km/h | Realisierung durch den eSIM-Hexacopter |
| Durchschnittliche Strecke | 11 km | Alle Route zwischen den Stadtteilen und dem HBF |
| Anzahl Vertiport | 7 | 1 Vertiport pro Bezirk |
| Anzahl eVTOL | 21 | HBF=9 eVTOLs, pro Bezirk=2 eVTOLs |
| Preis pro Pax | 10 € | Preis pro Flugminute |
| Anzahl Pax | 3 | Platzkapazität ausschließlich Pilot |
| Flugbetrieb | 06:00-20:00 Uhr | |
| Anzahl Flüge je Std. 07:00-19:00 Uhr | 6 | Zwischen 07:00-19:00 Uhr werden pro Stunde und pro Strecke insgesamt 6 Flüge realisiert |

| | | |
|---|-------------|---|
| Anzahl Flüge je Std. 06:00-07:00 Uhr & 19:00-20:00 Uhr | 4 | Zwischen 06:00-07:00 Uhr & 19:00-20:00 Uhr werden pro Stunde und pro Strecke insgesamt 4 Flüge realisiert |
| Betriebstage pro Monat | 25 | Abzüglich Sonn- und Feiertage |
| Gesamtumsatz | 30.240.000€ | Pro Jahr |
| Herstellungskosten | 576.000€ | Pro eVTOL |

6 Zusammenfassung, Fazit und Ausblick

Zusammenfassung

Aus der Bearbeitung dieser Arbeit resultieren zahlreiche Erkenntnisse und Ergebnisse zu den eVTOLs, die im Folgendem zusammengefasst werden. Die eVTOLs unterscheiden sich aufgrund ihrer Fähigkeit, senkrecht starten und landen zu können, gegenüber anderen Fluggeräten. Das macht sie äußerst attraktiv für den innerstädtischen Einsatz, um autonom Personen zu befördern. Dennoch stehen Herausforderungen bevor, darunter gesetzliche Vorschriften und Rahmenbedingungen, die Gewinnung der sozialen Akzeptanz und die Überwindung der technischen Hürden. Insbesondere stellen die Batterien eine Herausforderung dar, weil sie aufgrund der geringen Energiedichte viel Gewicht mit sich bringen. Dies führt aufgrund des hohen Energiebedarfs beim senkrechten Start, zu noch höheren Gewichten. Darüber hinaus ist für die die Umsetzung der Autonomie, eine umfangreiche Datenerfassung sowie Programmierung und die Simulation von Szenarien nötig, die wiederum unzählige Tests durchlaufen müssen. Diese Herausforderungen werden durch unterschiedlichste Unternehmen weltweit aufgegriffen, dadurch sind derzeit bis zu 800 Ideen für eVTOL-Konzepte veröffentlicht. Davon sind jedoch nicht alle für die Passagierbeförderung gedacht. Aufgrund der hohen Investitionen in den eVTOL-Markt konnten einige Unternehmen besonders fortschrittliche Prototypen konstruieren. Diese können möglicherweise nächstes Jahr bereits zertifiziert werden. Unter anderem werden die Prototypen Lilium, Volocity und der CityAirbus NextGen betrachtet. Diese Prototypen weisen vielfältige Unterschiede hinsichtlich ihres Aufbaus, der Leistung und der ihrer Funktionsweise auf. Während der Volocity einen Multicopter darstellt, gehört der Lilium Jet zur Kategorie des Vectored Thrust, bei dem die Systeme durch Neigung sowohl für den Auftrieb als auch für den Vortrieb verantwortlich sind. Dies ist ebenfalls bei dem CityAirbus NextGen der Fall, zusätzlich verfügt das System jedoch noch Antriebe, die ausschließlich für den Auftrieb verantwortlich sind und somit in die Kategorie "Combined Thrust" fällt. Hervorzuheben ist noch, dass der Lilium-Jet für regionale Flüge eingesetzt werden soll und daher auch höhere Leistungen erbringt, sowie eine größere Reichweite im Vergleich zu den anderen Prototypen aufweist.

Die Integration solcher alternativer Mobilität im Hamburger Raum werden bereits von den Bewohner: innen in Hamburg vermutet, das gibt eine Studie her. Von den Befragten glauben 76% an Robo-Shuttles und 45% an eine Umsetzung von fliegenden Taxis. Hamburg bietet aufgrund seiner Fläche Potenzial für die Einführung von Flugtaxis, insbesondere um Hindernisse wie die Elbe schnell zu überwinden. Bisher gibt es innerhalb der Stadt nur Möglichkeiten zur Mobilität über Straßen und Wasserwege, wobei es viele Varianten dazu gibt. Aufgrund der fast 1,8 Millionen Einwohner auf einer Fläche von 755 Quadratkilometer kommt es jedoch oft zu anhaltenden Verkehrsstau.

Im Jahr 2021 soll nach dem Navigationsunternehmen TomTom das Stauniveau bei 31% gelegen haben, was bedeutet, dass durchschnittlich alle Autofahrer: innen insgesamt 71 Stunden im Stau verloren haben. Aufgrund dieser Problematik wurden einer Konzeptphase gemäß den VDI 2221 Richtlinien Konzepte für den Hamburger Raum erarbeitet. Die Grundlage dieser Konzeptarbeit bildete eine Umfrage mit 101 Teilnehmenden im Alter zwischen 17 und 86 Jahren in Hamburg. Mit gezielten Fragen wurden verschiedene Erkenntnisse über die Sichtweise der Bewohner: innen gewonnen. Die Umfrage ergab im Allgemeinen, dass die Bewohner: innen die Integration von eVTOLs befürworten, jedoch trotzdem Bedenken hinsichtlich der Autonomie solcher Systeme haben. Des Weiteren wurde deutlich, dass die Bewohner: innen preislich günstige Tickets fordern. Basierend auf diesen Ergebnissen wurden die Anforderungen der Bewohner: innen ermittelt. Darüber hinaus wurden Anforderungen der Sicherheitsbehörden aufgelistet und ergänzt. Eine nachfolgende Funktionsanalyse ergab, dass die drei Hauptfunktionen - senkrecht starten und landen, autonomes Fliegen und Beförderung von Passagieren - gewährleistet sein müssen. Anhand der Methode des Morphologischen-Kastens wurden dann drei Konzepte definiert, die in der folgenden Abbildung dargestellt sind.

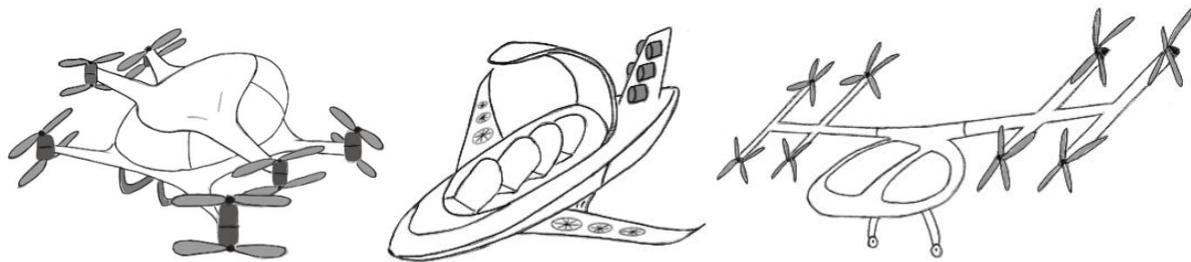


Abbildung 62 Der eSIM-Hexacopter, der eSIM-JET und der eSIM-Prop (Eigene Darstellung)

Die Konzepte sind alle mit elektrischem Antrieb ausgestattet und werden von Lithium-Ionen-Batterien mit Energie versorgt. Es gibt jedoch Unterschiede in den Materialien der Lithium-Ionen-Batterien. Alle Konzepte verfügen über ausreichend Leistung, um den Ausfall von Motoren zu kompensieren. Es werden jeweils 12 Elektromotoren eingesetzt, mit Ausnahme des eSIM-Prop, der 8 Elektromotoren besitzt. Zu Beginn wird bei allen Konzepten ein Pilot an Bord sein, um im Notfall in das Steuerungssystem eingreifen zu können. Die Sitzkapazität wird nur bei dem letzten Konzept, dem eSIM-Prop, mit 2 Sitzen angegeben, während die anderen über vier Plätze verfügen. Im ersten Konzept wird die Drehzahlregulierung verwendet, um Auf- und Vortrieb durch die Propeller zu erzeugen. Das zweite Konzept verfügt integrierte Impeller in den Tragflächen, die das senkrechte Starten ermöglichen. Die sechs elektrischen Turbinen an dem Seitenleitwerk sorgen für den Vorwärtsschub. Beim dritten Konzept werden die Propeller durch einen drehbaren Rahmen geneigt, um sowohl Auftrieb als auch Vortrieb zu erzeugen. Eine Besonderheit des zweiten Konzepts, des eSIM-Jets, ist die barrierefreie Nutzung, die durch eine Rampe am hinteren Bereich ermöglicht wird. Darüber hinaus ist die Mitnahme eines Haustiers aufgrund der

geringen Kapazität im eSIM-Prop möglich. Weitere Merkmale und technische Eigenschaften der Konzepte sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 6 Zusammenfassung der Konzept-Eigenschaften

| | eSIM-Hexacopter | eSIM-JET | eSIM-Prop |
|--------------------------------|---|--|--|
| Kategorie | Multicopter | Independent Thrust | Multicopter |
| Spannweite, Länge, Höhe | 4,5m x 4m x 1,8m | 10m x 5m x 2m | 6,5m x 3m x 2m |
| Energiequelle | Lithium-Ion Batterie mit Silizium als Anoden Material | Lithium-Ion Batterie mit hohem Lithium und Mangan Anteil | Lithium-Metall-Akkuzelle |
| Anzahl PAX | 4 | 4 | 2 |
| Max. Payload | 320 kg | 320 kg | 160 kg |
| Leergewicht | 600 kg | 800 kg | 500 kg |
| MTOW | 920 kg | 1120 kg | 660 kg |
| Anzahl Motoren | 12 | 12 | 8 |
| Motorleistung (Gesamt) | 300 kW | 720 kW | 200 kW |
| Kosten | mittel | hoch | gering |
| Material | CFK | thermoplastisches Verbundwerkstoff (PEAK-HARZ) | thermoplastisches Verbundwerkstoff (PEAK-HARZ) |
| Steuerungssystem | Fly-by-Light | Fly-by-Wire | - |
| Sicherheitssysteme | Fallschirm | Aufblasbares Boot | Fallschirm |
| Besonderheiten | - | Barrierefrei | Aufnahme von Haustieren möglich |

Nach einer Nutzwertanalyse wurde festgestellt, dass das erste Konzept insgesamt über bessere Eigenschaften verfügt. Die Bewertung stellt dar, dass der eSIM-JET aufgrund der komplexen Bauweise hohe Kosten und einen hohen Wartungsaufwand verursacht. Die barrierefreie Nutzung wird zwar als sehr positiv bewertet, aber ist auch mit hohen Kosten und technischem Aufwand verbunden. Der eSIM-Prop hingegen bietet aufgrund seiner kompakten Bauweise Kostenvorteile und Gewichtsvorteile gegenüber den anderen Konzepten an. Allerdings ist die Sitzkapazität pro Flug aufgrund der Anwesenheit eines Piloten vorerst auf eine Person beschränkt.

Zudem erfordert der eSIM-Prop aufgrund des beweglichen Rahmens einen höheren Wartungsaufwand. Die Bewertung der Konzepte ergibt folgende Punktzahlen:

eSIM-Hexacopter = 4.13, eSIM-JET = 3.57, eSIM-Prop = 4.02.

Basierend auf diesen Ergebnissen sowie den aus den Umfragen ermittelten Anforderungen, wurde ein Geschäftsmodell für die Integration von eVTOLs im Großraum Hamburg entwickelt. Das Geschäftsmodell umfasst die standortabhängige Bestimmung der Vertiports und die Festlegung der Anschaffungskosten pro eVTOL. Die nachfolgende Abbildung stellt die Platzierung der Vertiports in den Stadtteilen dar. Pro Bezirk wurde ein Vertiport in einem Stadtteil integriert. Diese Stadtteile sind: Wandsbek, Bergedorf, Harburg, Hamburg-Mitte, Blankenese, Stellingen und Fuhlsbüttel. Dabei werden als Flugrouten die Verbindungen zwischen den Stadtteilen und dem Hauptbahnhof betrachtet. Querverbindungen sind zunächst vernachlässigt. Weitere Vorschläge können dem Abschnitt 5.2.1.2 entnommen werden.



Abbildung 63 Darstellung der Vertiports in Hamburg

Die Informationen und wichtige Daten im Geschäftsmodell wurden auf der Grundlage von Annahmen abgeleitet, die aus den Ergebnissen der Konzeptphase und der Umfrage stammen. Mit einem Flugbetrieb zwischen 06:00-20:00 Uhr, bei dem etwa 4 bis 6-mal pro Stunde geflogen wird und pro Minute 10€ angesetzt werden, ergeben sich Herstellungskosten in Höhe von 576.000€ pro eVTOL. Die Kosten werden durch den Gesamtumsatz pro Jahr gedeckt, wobei 40 % für die Herstellungskosten und jeweils 20% für Personal-, Wartungs- und Energiekosten verwendet werden. Weitere Details des Geschäftsmodells sind in Abschnitt 5.3 erläutert oder können der folgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 7 Zusammenfassung des Geschäftsmodells

| Info | Wert | Anmerkung |
|--|--------------------|---|
| Reisegeschwindigkeit | 100 km/h | Realisierung durch den eSIM-Hexacopter |
| Durchschnittliche Strecke | 11 km | Alle Route zwischen den Stadtteilen und dem HBF |
| Anzahl Vertiport | 7 | 1 Vertiport pro Bezirk |
| Anzahl eVTOL | 21 | HBF=9 eVTOLs, pro Bezirk=2 eVTOLs |
| Preis pro Pax | 10 € | Preis pro Flugminute |
| Anzahl Pax | 3 | Platzkapazität ausschließlich Pilot |
| Flugbetrieb | 06:00-20:00 Uhr | |
| Anzahl Flüge je Std. 07:00-19:00 Uhr | 6 | Zwischen 07:00-19:00 Uhr werden pro Stunde und pro Strecke insgesamt 6 Flüge realisiert |
| Anzahl Flüge je Std. 06:00-07:00 Uhr & 19:00-20:00 Uhr | 4 | Zwischen 06:00-07:00 Uhr & 19:00-20:00 Uhr werden pro Stunde und pro Strecke insgesamt 4 Flüge realisiert |
| Betriebstage pro Monat | 25 | Abzüglich Sonn- und Feiertage |
| Gesamtumsatz | 30.240.000€ | Pro Jahr |
| Herstellungskosten | 576.000€ | Pro eVTOL |

Fazit

Im Folgenden wird eine umfassende Betrachtung des Themas dargestellt. Dabei werden die resultierenden Ergebnisse der Arbeit strukturiert und kritisch betrachtet. Das Fazit wird insbesondere die realistische Anwendbarkeit im Hamburger Raum betrachten.

Es ist besonders beeindruckend, wie sich der Stand der Technik im Laufe der Jahre entwickelt hat und dazu beiträgt, dass futuristische Vorstellungen von vor 100 Jahren nun zur Realität werden. Die bestehenden Herausforderungen in Bezug auf die Speicherkapazität von Batterien und der damit einhergehenden Gewichtszunahme könnten in den kommenden Jahren bereits gelöst werden und zu einer umweltfreundlichen Alternative beitragen. Zudem könnte die Autonomie soweit fortgeschritten sein, dass es als Standard im Alltag integriert wird und soziale Barrieren beseitigt werden. Bis zu diesem Stand der Technik müssen jedoch noch einige Jahre vergehen. Infolgedessen erfolgt zunächst die Betrachtung der bereits bestehenden Möglichkeiten. Es ist vorab zu betonen, dass die Ergebnisse der Umfrage deutlich positiver ausfallen, als ursprünglich erwartet wurde. Dies bezieht sich auf die positive Sichtweise der Bewohner: innen Hamburgs auf die Integration von eVTOLs. Auch anhand der gestellten Anforderungen wird deutlich, dass sich viele Bewohner: innen tatsächlich mit dem Gedanken auseinandersetzen und die Integration von eVTOLs befürworten. Um jedoch eine realistischere Auswertung zu erzielen, ist es notwendig, die Teilnehmerzahl in der Umfrage zu erhöhen. Mit 101 Teilnehmenden ist die Sichtweise der gesamten Hamburger: innen nicht ausreichend abgedeckt. Wenn die soziale Akzeptanz jedoch von der Mehrheit vorhanden ist, dann stellt sich die Frage, inwieweit sich die Umsetzung der einzelnen Konzepte in Bezug auf den Gesamtaufwand als vorteilhaft betrachtet werden kann.

Die Konzepte bieten jeweils mehr oder weniger effiziente Lösungen für die Implementierung von eVTOLs in Hamburg. Insbesondere sind die ersten beiden Konzepte aufgrund einer Kapazität von 4 Personen zu bevorzugen, da sie in Anbetracht der 1,8 Millionen Einwohner eine höhere Auslastung der Mobilität ermöglichen würde. Dies ist von entscheidender Bedeutung, da Verkehrsstau oft sehr zeitaufwendig ist. Außerdem erfordert das senkrechte Starten hohe Energiemengen. Daher erscheint es weniger effizient, einen derartigen Energieaufwand für die Beförderung einer einzelnen Person zu betreiben, zumal der Umsatz in diesem Fall auch gering ausfallen würde. In Zukunft kann die Platzkapazität auch ohne Piloten voll ausgelastet sein, dennoch würde sich dies bei zwei Passagieren nicht als vorteilhaft erweisen, denn wie bereits oben beschrieben, zeigt sich deutlich, dass die Nachfrage nach so einer alternativen Mobilität vorhanden sein wird. Das Konzept ist jedoch im Allgemeinen kompakt und erfüllt alle wesentlichen Funktionen.

Zudem handelt es sich um ein weniger komplexes System und ist aufgrund der Propeller effizient. Im direkten Vergleich kann jedoch auch festgestellt werden, dass der eSIMJT trotz seiner Platzkapazität von vier Passagieren einen erheblichen Aufwand in der Konstruktion erfordert, da viele bewegliche Teile vorhanden sind. Außerdem ist die Wahl der integrierten Impeller weniger effizient, denn aufgrund der geringen Rotationsfläche das Erzeugen von Auftrieb, für den senkrechten Start schwieriger ist. Dies erfordert sehr leistungsfähige Motoren. In dieser Hinsicht bietet die Konfiguration eines Multicopters ohnehin bessere Effizienzeigenschaften aufgrund der variierbaren großen Propeller, die ebenfalls für eine hohe Stabilität sorgen.

Die einzelnen Konzepte haben ihre jeweiligen Vor- und Nachteile. Der eSIM-JT weist im Vergleich zu den anderen Konzepten beispielsweise aufgrund seiner Bauweise die besten aerodynamischen Eigenschaften auf und ermöglicht sogar eine barrierefreie Nutzung. Dennoch ist zu beachten, dass der innerstädtische Flug kurze Strecken erfordert, weshalb effiziente Modelle wie den Multicopter bevorzugt werden sollten. Diese weisen zwar eine geringere Geschwindigkeit auf, sind jedoch für kurze Strecken besser geeignet als eVTOLs mit Tragflächen. Außerdem weist der eSIMHC aufgrund der runden Bauweise bessere ergonomische Eigenschaften auf, wobei die ergonomischen Aspekte aufgrund der kurzen Flugdauer von etwa 10 Minuten keine große Rolle spielen. Dadurch können Kosten für die Ausstattung, wie beispielsweise Entertainment-Optionen, eingespart werden. Der Lilium-Jet, der in Kapitel 2.5 beschrieben wurde, verfügt über eine moderne Kabinenkonfiguration, was aufgrund seiner Ausrichtung für regionale Flüge durchaus sinnvoll ist. Zudem wurde in der Umfrage festgestellt, dass das Hauptziel darin besteht, schnell und kostengünstig an das Ziel zu gelangen. Um die Passagiere zu befördern, ist es erforderlich, alle Maßnahmen zur Gewährleistung der Sicherheit zu treffen. Mit mehrfacher Redundanz ergibt sich der eSIM-Hexacopter als ein sicheres und effizientes Konzept für die Integration als alternative Mobilität.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Aufwand für die Integration des eSIM-Prop nicht gerechtfertigt ist, und die Einführung des eSIMJT zu hohe Kosten führen würde, die von den Bewohner: innen, aufgrund der teuren Flugtickets, eventuell nicht akzeptiert würden. Aufgrund der Verfügbarkeit kostengünstigerer Alternativen, die zwar nicht langsamer, aber preislich attraktiver sind, sollte besonders auf eine kostengünstige Integration geachtet werden. Die Implementierung des eSIMHC hingegen könnte sich als vorteilhaft für diese alternative Mobilität erweisen.

Das entwickelte Geschäftsmodell zeigt im Vergleich zu Referenzwerten eine realistische Einschätzung und Annahme der Situation. Insbesondere stellt das Flugschema eine einfache, mögliche Implementierung von Flugrouten dar. Denn auch wenn Querverbindungen zunächst nachgefragt werden, ist in erster Linie wichtig, die Erprobung von wenigen Fluglinien in Betracht zu ziehen. Die sich aus dem Geschäftsmodell ergebenden Herstellungskosten sollten im besten Fall nicht überschritten werden, um die Kosten pro Flugminute gering wie möglich zu halten. Die vorgeschlagenen Vertiports können in den meisten Fällen ohne erheblichen Aufwand umgesetzt werden. Allerdings sollten auch die Stadtteile in den Randgebieten mehr berücksichtigt werden. Für einen ersten Vorschlag sind jedoch die zentralen Stadtteile von größerer Bedeutung.

Vertiports, die jedoch ausgebaut werden müssen, erfordern einen hohen Aufwand. Dieser ist jedoch nicht vermeidbar, da die Einrichtung beispielsweise von zentralen Wartungslagern notwendig ist. Andererseits ist die Platzierungen der eVTOLs am Hamburger Bahnhof eine anspruchsvolle Aufgabe, da die bestehende Infrastruktur sehr ausgelastet ist. Der vorgeschlagene Vertiport am Gebäude des Saturns wird nicht ausreichen, um die Anforderungen für das gleichzeitige Landen und Starten mehrerer eVTOLs zu erfüllen. Dies ergibt sich aus der begrenzten Platzkapazität, den erforderlichen Sicherheitsabständen, dem Ein- und Ausstieg der Passagiere sowie dem Ausbau einer Ladestruktur.

Im Allgemeinen lässt sich feststellen, dass eVTOLs in größeren Städten aufgrund ihrer schnellen Mobilität Vorteile bieten können. Wenn die soziale Akzeptanz positiv ausfällt, liegt es nun an den regulatorischen Verfahren und den technischen Umsetzungen, alle Herausforderungen erfolgreich zu bewältigen. Dies wird sicherlich noch viele Jahre dauern. Es besteht jedoch die feste Überzeugung, dass irgendwann die Integration von eVTOLs im Großraum Hamburg erfolgen wird.

Ausblick

Angesichts der Tatsache, dass dieses Zukunftsthema in den kommenden Jahren stark an Bedeutung gewinnen wird, ergeben sich viele weitere Untersuchungsbereiche, die ein umfassendes Verständnis liefern können. Die Erarbeitung der Konzepte hat viele Aspekte aufgezeigt, die im Detail weiterbearbeitet werden können. Die berechneten Leistungen der Elektromotoren und der Batterien beziehen sich auf die erste Flugphase. In einer weiteren Ausarbeitung kann die Betrachtung der gesamten Flugphase erfolgen, um einen gesamten Überblick über die erforderliche Leistung des eVTOLs zu bekommen. Weiterhin könnte eine vertiefte Analyse der Autonomie erfolgen, in dem die Simulation der Algorithmen und ihre Funktionsweise genauer betrachtet werden, da autonome Prozesse in Zukunft standardisiert werden. Andererseits wurden nicht alle Anforderungen der Kunden berücksichtigt, da aufgrund von Zeitbeschränkungen einige Schwerpunkte gesetzt werden mussten. Diese beinhaltet z.B. die

Ausarbeitung eines Business-Class- oder First-Class-Angebots. Eine weitere, nicht berücksichtigte Anforderung ist die Integration von transparenten Fußbodenpaneelen. Aufgrund der Bewertung der Nutzwertanalyse können Optimierungen an den Konzepten vorgenommen werden. Darüber hinaus besteht das Potenzial für eine Ausarbeitung der barrierefreien Nutzung. Eine weitere Ausarbeitung kann sich auf die Ausstattung der vorgeschlagenen Vertiports konzentrieren. Insbesondere könnten die vorgeschlagenen Vertiports für eine Optimierung in Betracht gezogen werden. Hierfür steht eine Plattform zur Verfügung, die auf Basis von Wetterbedingungen, die Effizienz der Vertiports und Routen darstellt (Milani, 2023). Die Get Weather Conditions (GWC) Technologie wurde von dem Start-up DM-AirTech entwickelt. Die Plattform simuliert anhand von Daten, die bis zu 10 Jahre zurückreichen, das Windmuster in der Umgebung. Dadurch liefert die Plattform detaillierte Informationen über Windgeschwindigkeiten, Turbulenzen und die Luftströmung zwischen Gebäuden. Auf Basis dieser Daten kann die Planung der Vertiports und der Flugrouten entwickelt und optimiert werden. Darüber hinaus wird der Einsatz von eVTOL Flugmodellen berücksichtigt. Das heißt, die Plattform gibt an, welche Flugmodelle (z.B. Vectored Thrust) aufgrund ihrer Konstruktion für bestimmte Routen besser geeignet sind. Mithilfe der GWC-Technologie können somit Szenarien der Vertiports und der Flugrouten simuliert und getestet werden (D. Milani, persönliche Kommunikation, 22. September 2023). Zusätzlich kann dann eine Kostenbetrachtung realistisch durchgeführt werden, in dem die Querverbindungen zwischen den ermittelten Vertiports in Betracht gezogen werden.

Literaturverzeichnis

Aigner et al. 2022

Aigner, F; Amir F: Durchbruch bei Akkutechnologie: Die Lithium-Metall-Akkus kommen; FutureZone; 2022. URL: <https://futurezone.at/science/durchbruch-akku-technologie-lithium-metall-ionen-vtol/402085870> Zugriffsdatum: 23.09.2022

Albrecht 2023

Albrecht, D.: Daten & Fakten; Hagenbeck; 2023. URL: https://hagenbeck.de/de/tierpark/tierpark/daten_fakten.php Zugriffsdatum: 27.09.2023

Alcock 2023 A

Alcock, Ch.: Assembly Close for first CityAirbus NextGen eVTOL Prototype; AIN Online; 2023. URL: <https://www.ainonline.com/aviation-news/business-aviation/2023-03-07/assembly-close-first-cityairbus-nextgen-evtol-prototype> Zugriffsdatum: 23.07.2023

Alcock 2023 B

Alcock, Ch.: Autoflight claims eVTOL flight distance record with latest prosperity prototype; FutureFlight; 2023. URL: <https://www.futureflight.aero/news-article/2023-03-01/autoflight-claims-evtol-flight-distance-record-latest-prosperity-i> Zugriffsdatum: 06.10.2023

Astoc

Astoc: Masterplan Hafencity Hamburg; Astoc Architects and Planners. URL: <https://astoc.de/de/projekte/architektur/masterplan-hafencity-hamburg> Zugriffsdatum: 03.10.2023

Autohaus Koch 2019

Autohaus Koch: So befestigen Sie ihren Rollstuhl im Fahrzeug; Youtube; 2019. URL: https://www.youtube.com/watch?v=wC6vvC4_N5A Zugriffsdatum: 02.10.2023

Baldanza 2022

Baldanza, B.: eVTOLs Face Significant Challenges In Passenger Applications; Forbes; 2022. URL: <https://www.forbes.com/sites/benbaldanza/2022/08/26/evtols-facing-significant-challenges-in-passenger-applications/?sh=781859ba393b> Zugriffsdatum: 29.09.2023

Banit et al. 2023 A

Banit, F.; Weber, A.: Parkhaus Phönix Center – Hamburg; ParkingList; 2023. URL: <https://www.parkinglist.de/parkplatz/Hamburg/Parkhaus-Ph%C3%B6nix-Center-Hamburg-731> Zugriffsdatum: 27.09.2023

Banit et al. 2023 B

Banit, F.; Weber, A.: Parkhaus IKEA Altona – Hamburg; ParkingList; 2023. URL: <https://www.parkinglist.de/parkplatz/Hamburg/parkhaus-ikea-altona-hamburg-9583>
Zugriffsdatum: 27.09.2023

Bartels 2019

Bartels, T.: Spektakuläre Notlandung: Das Wunder vom Hudson durch Captain “Sullys“; Stern; 2019. URL: <https://www.stern.de/reise/follow-me/10-jahre-notwasserung--we-re-gonna-be-in-the-hudson--6820742.html> Zugriffsdatum: 25.08.2023

Baum et al. 2019

Baum, D.; Büchse, N.; Gerwien, T.; Kaiser, T.; Maus, S.; Schlenz, K.; Schmitz, S.; Streck, M.; Wüllenweber, W.: Hauptbahnhof expandiert – Verlängerung der Bahnhofshalle geplant; Stern; 2019. URL: <https://www.stern.de/lokal/hamburg/deutsche-bahn-plant--jahrhundertaufgabe--am-hamburger-hauptbahnhof-8538056.html> Zugriffsdatum: 26.09.2023

Binde 2017

Binde, N.: Neue Statistik: Wo Hamburgs Spitzenverdiener leben; Hamburger Abendblatt; 2017. URL: <https://www.abendblatt.de/hamburg/article212211685/Wer-verdient-wie-viel-in-Hamburg.html> Zugriffsdatum: 03.10.2023

Bocksch 2022

Bocksch, R.: Der Millionen-Hype um Flugtaxi; Statista; 2022
URL: <https://de.statista.com/infografik/26588/investitionen-in-flugtaxi-startups-weltweit/>
Zugriffsdatum: 20.05.2023

Bronner 2023

Bronner, O.: Lithium-Luft-Akku verdreifacht Energiedichte konventioneller Lithium-Batterien; DerStandard; 2023. URL: <https://www.derstandard.de/story/2000143540371/lithium-luft-akku-verdreifacht-energiedichte-konventioneller-lithium-batterien> Zugriffsdatum: 23.09.2023

Bünthe 2022

Bünthe O.: Autonomes Fliegen: Reliable Robotics erhält 100 Millionen Dollar Risikokapital; heise online; 2022. URL: <https://www.heise.de/news/Roboter-statt-Pilot-Start-up-faehrt-100-Millionen-US-Dollar-Risikokapital-ein-6474805.html> Zugriffsdatum: 20.09.2023

Diewald 2019

Diewald, F.: Ready for takeoff: wir testen die Autonomie Taxi-Drohne von EHANG; The Red Bulletin Innovator; 2019. URL: <https://www.redbull.com/at-de/theredbulletin/autonome-drohne-test> Zugriffsdatum: 05.10.2023

Dion et al. 2019

Dion, B.; Dalmasso, N.: Was autonomes Fliegen wirklich ist und wie es gelingen kann; keNEXT; 2019. URL: <https://www.ke-next.de/kollegroboter/anwendungen/was-autonomes-fliegen-wirklich-ist-und-wie-es-gelingen-kann-221.html> Zugriffsdatum: 20.09.2023

Doppelbauer 2020

Doppelbauer, M: Grundlagen der Elektromobilität; Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; Karlsruhe; 2020.

EASA 2019

EASA: Special Condition for small-category VTOL aircraft: 2019. URL: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/SC-VTOL-01.pdf> Zugriffsdatum: 02.08.2023

EASA 2022

EASA: Second Publication of Means of Compliance with the Special Condition VTOL; 2022. URL: <https://www.easa.europa.eu/en/downloads/137443/en> Zugriffsdatum: 02.08.2023

EASA 2023

EASA: Certification Specifications, Acceptable Means of Compliance and Guidance Material for small Rotorcraft (CS-27); 2023. URL: <https://www.easa.europa.eu/en/downloads/137584/en> Zugriffsdatum: 02.08.2023

Ebberg 2019

Ebberg, J.: Mit Bosch-Technik lernt das Auto fliegen; Robert-Bosch GmbH; 2019. URL: <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/de/mit-bosch-technik-lernt-das-auto-fliegen-190528.html> Zugriffsdatum: 08.09.2023

Etherington 2019

Etherington, D.: Volocopter reveals its first commercial aircraft, the VoloCity air taxi; TechCrunch; 2019. URL: <https://techcrunch.com/> Zugriffsdatum: 23.07.2023

Europäische Kommission 2020

Europäische Kommission 2020: Neuartiger Sensor für Flugzeuge hilft bei der Vermeidung von Kollisionen; Europäische Kommission; 2020. URL: <https://cordis.europa.eu/article/id/429961-novel-sensor-boosts-collision-avoiding-capabilities-of-aircraft/de> Zugriffsdatum: 20.09.2023

EVTOL.News 2023 A

EVTOL.News: eVTOL Aircraft Directory; EVTOL.News; 2023. URL: <https://evtol.news/aircraft> Zugriffsdatum: 17.07.2023

EVTOL.News 2023 B

EVTOL.News: CityJumper; EVTOL.News; 2023. URL: <https://evtol.news/cityjumper>
Zugriffsdatum: 23.07.2023

EVTOL.News 2022

EVTOL.News: Alwinart (Sagstuen) Tesla eVTOL Concept; EVTOL.News; 2022. URL: <https://evtol.news/alwinart-tesla-evtol-concept> Zugriffsdatum: 23.07.2023

EVTOL.News 2020

EVTOL.News: Aeroxo LV ERA Aviabike; EVTOL.News ; 2020. URL: <https://evtol.news/aeroxo-lv-era-aviabike/> Zugriffsdatum: 23.07.2023

EVTOL.News 2019

EVTOL.News: Aergility Atlis Gen 1 (prototype); EVTOL.News; 2019. URL: <https://evtol.news/aergility-atlis/> Zugriffsdatum: 23.07.2023

Focus online 2019

Focus online: Bosch-Sensorbox für Flugtaxis, Von der Straße in die Luft; Focus Online; 2019. URL: https://www.focus.de/auto/news/bosch-sensorbox-fuer-flugtaxis-von-der-strasse-in-die-luft_id_10739200.html Zugriffsdatum: 08.09.2023

Frommhold 2023

Frommhold, U.: Über uns, Infos zur Barclays Arena; BarclaysArena; 2023. URL: <https://www.barclays-arena.de/arena/ueber-uns> Zugriffsdatum: 27.09.2023

FutureFuels 2022

FutureFuels: Thermomanagement von E-Autos; FutureFuels; 2022. URL: <https://futurefuels.blog/im-labor/thermomanagement-von-e-autos/> Zugriffsdatum: 06.09.2023

Grieß 2015

Grieß A.: Hamburger sind die Größten und Leichtesten; Welt; 2015. URL: <https://www.welt.de/regionales/hamburg/article146143851/Hamburger-sind-die-Groessten-und-Leichtesten.html> Zugriffsdatum: 17.09.2023

Google Maps 2023 A

Google Maps: Tierpark Hagenbeck; Google Maps. URL: <https://www.google.com/maps/place/Tierpark+Hagenbeck/@53.5964193,9.877859,11.71z/data=!4m6!3m5!1s0x47b18605462ec785:0xc7120d191597ced!8m2!3d53.5969735!4d9.9395105!16s%2Fm%2F02wbt2d?entry=ttu> Zugriffsdatum: 03.10.2023

Google Maps 2023 B

Google Maps: Hamburg-Finkenwerder Airbus Osttor/Einfahrt; Google Maps; 2023. URL:

<https://www.google.com/maps/place/Hamburg-Finkenwerder+Airbus+Osttor%2FEinfahrt/@53.538052,9.8219045,13.9z/data=!4m6!3m5!1s0x47b184f29d865203:0xc259608ab1d32cec!8m2!3d53.537597!4d9.846876!16s%2Fg%2F11b7795smd?entry=ttu> Zugriffsdatum: 04.10.2023

Google Maps 2023 C

Google Maps: Flughafen Hamburg und Hamburg Hauptbahnhof; Google Maps; 2023. URL:

<https://www.google.com/maps/dir/Flughafen+Hamburg/Hauptbahnhof+Hamburg,+Hachmannplatz,+Hamburg,+Deutschland/@53.6003826,9.9330727,11.71z/data=!4m15!4m14!1m5!1m1!1s0x47b188641ccfa657:0x734626331c275824!2m2!1d9.997405!2d53.6336949!1m5!1m1!1s0x47b18ee1440cd7f3:0x495c80b97a016024!2m2!1d10.0066369!2d53.552993!3e0!5i1?entry=ttu>
Zugriffsdatum: 03.10.2023

Goldschmidt 2023

Goldschmidt, S.: Willkommen im City-Center Bergedorf; ViWiQ GmbH; 2023. URL:

<https://www.viwiq.com/schaufenster/934823c9-d57c-43ad-8448-b6daf7dd0292> Zugriffsdatum: 27.09.2023

Hader et al. 2022

Hader M.; Baur S.; Sachdeva N.; Schunck K.: Regional air mobility. Roland Berger GmbH, 2022. URL:

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwidqLLQt-GBAxUCywIHHbL5Bt0QFnoECAkQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.rolandberger.com%2Fpublications%2Fpublication_pdf%2Froland_berger_regional_air_mobility.pdf&usq=AOvVaw18MBpDvs0wvKABewGE8aPj&opi=89978449 Zugriffsdatum: 03.08.2023

Hamburg 2023

Hamburg: Die aktuelle Verkehrslage in Hamburg; Hamburg; 2023. URL:

<https://www.hamburg.de/verkehrslage/> Zugriffsdatum: 29.09.2023

Hansen 2022

Hansen M.: Propeller; Segelfliegen Grundausbildung; 2022. URL:

<https://www.segelfliegengrundausbildung.de/index.php/theoretische-spl-ausbildung/5-grundlagen/5-8-propeller> Zugriffsdatum: 03.08.2023

Head 2021

Head, E.: Airbus explains design philosophy behind ist CityAirbus NextGen; Vertical; 2021.

URL: <https://verticalmag.com/features/airbus-explains-design-philosophy-behind-cityairbus-nextgen/> Zugriffsdatum: 29.09.2023

Hildebrandt 2023

Hildebrandt, P.: Bezirke und Stadtteile; HamburgPortal; 2023. URL: <https://www.hamburgportal.de/die-stadt-hamburg/stadtteile/> Zugriffsdatum: 25.09.2023

Honeywell 2021

Honeywell: Vertical Aerospace Partners with Honeywell to Transform Transportation; Honeywell Aerospace; 2021. URL:

[https://aerospace.honeywell.com/content/dam/aerobt/en/documents/learn/products/navigation-and-radios/case-studies/N61-2399-000-000 To Transform Transportation Vertical Aerospace Partners With Honeywell.pdf](https://aerospace.honeywell.com/content/dam/aerobt/en/documents/learn/products/navigation-and-radios/case-studies/N61-2399-000-000%20To%20Transform%20Transportation%20Vertical%20Aerospace%20Partners%20With%20Honeywell.pdf)

Zugriffsdatum: 02.10.2023

Honeywell 2023

Honeywell: Compact Fly-by-wire Flight Control System; Honeywell Aerospace; 2023. URL:

<https://aerospace.honeywell.com/us/en/products-and-services/product/hardware-and-systems/cockpit-systems-and-displays/compact-fly-by-wire> Zugriffsdatum: 02.10.2023

Horch 2023

Horch, W.: Airbus startet mit dem Bau seines Lufttaxis; Hamburger Abendblatt; 2023. URL:

<https://www.abendblatt.de/wirtschaft/article237994963/Airbus-lufttaxi-entwicklung-start-cityairbus.html> Zugriffsdatum: 17.07.2023

Iken 2018

Iken, M.: Stadtplanung: Strand und Dünen für ein grünes Hamburg; Hamburger Abendblatt;

2018. URL: <https://www.abendblatt.de/hamburg/article215680661/Stadtplanung-Strand-und-Duenen-fuer-ein-gruenes-Hamburg.html> Zugriffsdatum: 26.09.2023

Keller 2023

Keller S.: Ranking der Großstädte mit der größten Fläche in Deutschland am 31. Dezember 2021; Statista; 2023. URL:

<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1233769/umfrage/flaeche-der-grossstaedte-deutschlands/> Zugriffsdatum: 29.07.2023

Klauer 2023

Klauer M.: So fährt Deutschland; Bild; 2023. URL:

<https://www.bild.de/regional/hamburg/hamburg-aktuell/auto-oepnv-e-scooter-rad-oder-zu-fuss-so-faehrt-deutschland-84687670.bild.html> Zugriffsdatum: 29.07.2023

Knauf Industries 2022

Knauf Industries: Aktive Kopfstütze im Auto – was genau sind sie und wie funktionieren sie?; Knauf Industries; 2022. URL: <https://knaufautomotive.com/de/aktive-kopfstuetzen-im-auto-was-genau-sind-sie-und-wie-funktionieren-sie/> Zugriffsdatum: 02.10.2023

Knoll et al. 2020

Knoll, A.; Weber, A.; Kreuzer, M.: Autonomie in der Großluftfahrt; Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress; 2020. URL: <https://www.dglr.de/publikationen/2020/530314.pdf> Zugriffsdatum: 06.08.2023

Köhler 2018

Köhler M.: Hamburg in Zahlen; Ahoi Hamburg; 2018. URL: <https://ahoihamburg.de/zahlen-und-fakten/#toggle-id-1-closed> Zugriffsdatum: 31.07.2023

Köllner 2021

Köllner, Chr.: Flugtaxis im Realitätscheck; Springer Professional; 2021
URL: <https://www.springerprofessional.de/mobilitaetskonzepte/multimodale-mobilitaet/flugtaxis-im-realitaetscheck/17569344> Zugriffsdatum: 17.07.23

Küster 2023

Küster, F.: Phoenix-Center Harburg in Hamburg; Wogibtswas; 2023; URL: <https://wogibtswas.de/Hamburg/Kaufh%C3%A4user/Phoenix-Center-Harburg-124509> Zugriffsdatum: 26.09.2023

Ky 2022

Ky, P.: Vertiports. Prototype Technical Specifications for the Design of VFR Vertiports for Operation with Manned VTOL-Capable Aircraft Certified in the Enhanced Category; EASA; 2022. URL: <https://www.easa.europa.eu/en/downloads/136259/en>

Lage 2022

Lage, H.: Wie funktioniert ein Flugzeug-Propeller?; Flieger Magazin; 2022. URL: <https://www.fliegermagazin.de/wissen/wie-funktioniert-ein-flugzeug-propeller/> Zugriffsdatum: 06.10.2023

Ludwig A

Ludwig, C.: Shopping am Bergedorfer Hafen; Hamburg. URL: <https://www.hamburg.de/einkaufszentrum-hamburg/10993446/ccb-bergedorf/> Zugriffsdatum: 25.09.2023

Ludowig B

Ludowig, C.: Wandern am Falkensteiner Ufer; Hamburg. URL:

<https://www.hamburg.de/wandern-ausflug-hamburg/295010/wandern-falkensteiner-ufer/>

Zugriffsdatum: 03.10.2023

MAD Components

MAD Components: Motors > Multirotor > Manned; MAD Components. URL: <https://www.mad-motor.com/manned-delivery.html>

Zugriffsdatum: 01.10.2023

Manthey 2023

Manthey N.: Liliium & Custom cells start battery production; electrive; 2023. URL:

<https://www.electrive.com/2023/03/29/liliium-customcells-start-battery-production/> Zugriffsdatum:

17.09.2023

Marti 2021

Marti, C.: Dezibel-Skala: Gefühlte Lautstärke messbar machen; Akustikform; 2021. URL:

<https://www.akustikform.ch/raumakustik/dezibel-skala> Zugriffsdatum: 08.10.2023

McIntosh 2021

McIntosh, A.: Technology Blog; Liliium; 2021. URL: [https://liliium.com/newsroom-](https://liliium.com/newsroom-detail/technology-behind-the-liliium-jet)

[detail/technology-behind-the-liliium-jet](https://liliium.com/newsroom-detail/technology-behind-the-liliium-jet) Zugriffsdatum: 23.07.2023

Memon 2023

Memon, O.: The pros & cons of the CityAirbus NextGen eVTOL Prototype; Simple Flying, 2023.

URL: https://simpleflying.com/cityairbus-nextgen-evtol-prototype-guide/?newsletter_popup=1

Zugriffsdatum: 23.07.2023

Menn 2023

Menn, A.: Volocopter eröffnet Produktion in Bruchsal; Wirtschaftswoche; 2023

URL: [https://www.wiwo.de/technologie/forschung/flugtaxi-start-up-volocopter-eroeffnet-](https://www.wiwo.de/technologie/forschung/flugtaxi-start-up-volocopter-eroeffnet-produktion-in-bruchsal/28995186.html)

[produktion-in-bruchsal/28995186.html](https://www.wiwo.de/technologie/forschung/flugtaxi-start-up-volocopter-eroeffnet-produktion-in-bruchsal/28995186.html) Zugriffsdatum: 23.07.2023

Meyer-Wellmann 2022

Meyer-Wellmann J.: Hamburg ist deutscher „Stau-Meister“ – woran das liegt; Abendblatt; 2022.

URL: [https://www.abendblatt.de/hamburg/article234522441/verkehr-hamburg-stau-meister-so-](https://www.abendblatt.de/hamburg/article234522441/verkehr-hamburg-stau-meister-so-viele-stunden-pro-jahr-zeitverlust-statistik-pkw-auto.html)

[viele-stunden-pro-jahr-zeitverlust-statistik-pkw-auto.html](https://www.abendblatt.de/hamburg/article234522441/verkehr-hamburg-stau-meister-so-viele-stunden-pro-jahr-zeitverlust-statistik-pkw-auto.html) Zugriffsdatum: 29.07.2023

Milani 2023

Milani, D.: Fly your drone and eVTOL business with the leading weather intelligence platform;

DM-Airtech; 2023. URL: <https://www.dm-airtech.com/> Zugriffsdatum: 04.10.2023

Möller 2021

Möller B.: Flugtaxis über Hamburg?; Fink.Hamburg; 2021. URL:

<https://fink.hamburg/2021/02/flugtaxis-ueber-hamburg/> Zugriffsdatum: 29.07.2023

Müller 2022

Müller, K.: Neuer Elektromotor für den Cityairbus Nextgen; Industr; 2022. URL:

<https://www.industr.com/de/neuer-elektromotor-fuer-den-cityairbus-nextgen-2653118>

Zugriffsdatum: 23.09.2023

Neuburger 2021

Neuburger, M.: Hauptbahnhof-Erweiterung: Warum es doch keinen Park über den Gleisen

geben soll; MorgenPost; 2021. URL: <https://www.mopo.de/hamburg/hauptbahnhof-erweiterung-warum-es-doch-keinen-park-ueber-den-gleisen-geben-soll-38319046/> Zugriffsdatum:

26.09.2023

Neugebauer 2020

Neugebauer, P.: Autonome Mobilität; Das Steinbeis-Magazin; 2020. URL:

https://www.feri.ch/media/4ksjqodx/fcfi_urbanairmobility-202105.pdf Zugriffsdatum: 01.10.2023

NTV 2023

NTV: Klaus Roewe baut am Elektro-Jet der Zukunft; NTV; 2023. URL: <https://www.ntv.de/wirtschaft/Klaus-Roewe-baut-am-Elektro-Jet-der-Zukunft-article24109927.html>

Zugriffsdatum: 23.07.2023

Oelmann 2023

Oelmann, M.: Standortprofil Hamburg: Wirtschaft und die größten Unternehmen; Die Deutsche

Wirtschaft; 2023. URL: <https://die-deutsche-wirtschaft.de/standort/hamburg/> Zugriffsdatum:

25.09.2023

Paschotta 2023

Paschotta, R.: Wirkungsgrad; RP-Energie-Lexikon; 2023. URL: <https://www.energielexikon.info/wirkungsgrad.html>

Zugriffsdatum: 06.10.2023

Penner 2023

Penner, H.: Wie Lithium-Zellen mit Silizium die Luftfahrt beflügeln; Electric flight; 2023. URL:

<https://www.electric-flight.eu/energie.htm> Zugriffsdatum: 20.09.2023

Rattat 2015

Rattat Chr.: Multicopter selber bauen; dpunkt.Verlag GmbH; Heidelberg; 2015.

Ravenhorst 2020

Ravenhorst, N.: Elektroauto laden am Flughafen Hamburg; ParkplatzVergleich; 2020. URL: <https://www.parkplatzvergleich.de/blog/elektroauto-laden-am-flughafen-hamburg-2500.html>
Zugriffsdatum: 27.09.2023

Reinhold 2020

Reinhold, L.: Die Flugeistung des Liliu-„Jets“ und eVTOL´s im Allgemeinen – eine Konzeptberechnung; Aerokurier; 2020. URL: <https://www.aerokurier.de/elektroflug/lilium-jet-dossier/> Zugriffsdatum: 25.09.2023

Reliable Robotics 2023

Reliable Robotics: At Reliable Robotics, we are making ait transportation safer, more efficient and universally accessible for everyone; Reliable Robotics; 2023. URL: <https://reliable.co/>
Zugriffsdatum: 23.09.2023

RestaurantGuru

RestaurantGuru: ALEX Hamburg; RestaurantGuru. URL: <https://de.restaurantguru.com/ALEX-Hamburg#gallery> Zugriffsdatum: 26.09.2023

Roland-Bosch GmbH 2023

Roland-Bosch GmbH: Inertial Sensor with ASIL B (D) for semi-autonomous driving; Roland-Bosch GmbH; 2023. URL: <https://www.bosch-semiconductors.com/mems-sensors/highly-automated-driving/smi270/> Zugriffsdatum: 08.09.2023

Rosenburg 2022

Rosenburg, J.: Hamburger Flughafen: Fünftgrößter Airport in Deutschland; 24hamburg; 2022. URL: <https://www.24hamburg.de/hamburg/flughafen-airport-hamburg-coronavirus-ankunft-abflug-parken-jobs-autovermietung-informationen-90000104.html> Zugriffsdatum: 26.09.2023

Runde 2006

Runde, O.: HafenCity Hamburg. Der Masterplan; HafenCity Hamburg GmbH; 2006. URL: https://www.hafencity.com/Resources/Persistent/c/7/1/d/c71db692487a55836aa17c935cb54d973e403384/z_de_broschueren_24_Masterplan_end.pdf Zugriffsdatum: 26.09.2023

Santha et al. 2021

Santha, N.; Woods, G.; Streeting, M.: Advanced Air Mobility – Cost Economics and Potential; L.E.K. Consulting; 2021. URL: <https://www.lek.com/sites/default/files/PDFs/2306-Advanced-Air-Mobility.pdf> Zugriffsdatum: 05.10.2023

Scheck et al. 2023

Scheck, D.; Ortner, H; Radünz, O.; Schaube, H; Fortmann, O: W1-Wandsbek Hamburg; HBB; 2023. URL: <https://www.hbb.de/projekte/geschaefthaus-w1-hamburg/> Zugriffsdatum: 27.09.2023

Schnurr 2023

Schnurr R.: Paarweiser Vergleich Nutzwertanalyse incl. Excel Vorlage; SixsigmaBlackbelt; 2023 URL: <https://www.sixsigmablackbelt.de/paarweiser-vergleich/> Zugriffsdatum: 03.09.2023

Schopferer 2023

Schopferer, S.: Blitzschlag auf CFK-Strukturen; Fraunhofer; 2023. URL: <https://www.emi.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/luffahrt/forschung/blitzschlag-auf-cfk-strukturen.html> Zugriffsdatum: 02.09.2023

Schulte 2007

Schulte K. L.: Der Propeller – das unverstandene Wesen; K.L.S. Publishing; 2007. URL: <http://klspublishing.de/ejournals/e-Journ%20AI-05%20Der%20Propeller%20das%20unverstandene%20Wesen.pdf> Zugriffsdatum: 20.09.2023

Schulz 2020

Schulz, G.: Wie Hamburgs Alsterpavillon immer wieder umgebaut wurde; Hamburger Abendblatt; 2020. URL: <https://www.abendblatt.de/hamburg/article229266438/Hamburg-jungfernstieg-Alsterpavillon-umbau-Gastronomie-Architektur-Alex-Restaurant-gestern-heute-Historie-Geschichte.html> Zugriffsdatum: 26.09.2023

Schwerin 2023

Schwerin, S.: AAM-Roadmap-Aus Deutschland für Deutschland; BDLI; 2023. URL: https://www.bdli.de/sites/default/files/2023-07/230721_AAM_Roadmap_final.pdf Zugriffsdatum: 26.09.2023

Shen 2023

Shen Y.: Röhm präsentiert auf der Paris Air Show leistungsfähiges Portfolio an Plexiglas Fliegerwerkstoffen; Röhm GmbH; 2023. URL: https://www.plexiglas.de/files/plexiglas-content/presse/download/2023_06_19_Paris_Air_Show_DE.pdf Zugriffsdatum: 20.09.2023

Simlaghai-Asl 2023

Simlaghai-Asl S.: Flugtaxi; Survio-Umfrage-Report; 2023. PDF anfügen

Talke et al. 2021

Talke, M.; Brieger, N.: Umlaut White Paper, Certification and Time-to-Market: The eVTOL

Battery Balancing Act. Umlaut SE. 2021. URL:

https://www.umlaut.com/uploads/documents/umlaut_Whitepaper_eVTOL.pdf Zugriffsdatum: 07.08.2023

Tauszig 2022

Tauszig, L.: Technical presentations- Rotorcraft & VTOL Symposium 2021; EASA; 2023. URL:

https://www.youtube.com/watch?v=e_fsxqWIENI&list=PLTfS24aKkJn63dwU2mF0nX4kjUtr9QFeU&index=5 Zugriffsdatum: 25.09.2023

Tchoban et al., 2014

Tchoban, S.; Voss, E: IKEA Citystore Hamburg-Altona; Tchoban Voss Architekten; 2014. URL:

<https://tchobanvoss.de/project/show/DE/1e4a88bf-a68c-d161-7875-d91ec018e0f8>

Zugriffsdatum: 26.09.2023

T-MOTOR

T-MOTOR: Datenblatt U15XXL; T-MOTOR. URL: [https://uav-](https://uav-en.tmotor.com/html/2019/Manned_Aircraft_0618/272.html)

[en.tmotor.com/html/2019/Manned_Aircraft_0618/272.html](https://uav-en.tmotor.com/html/2019/Manned_Aircraft_0618/272.html) Zugriffsdatum: 23.09.2023

Toray Advances Composites, 2023

Toray Advances Composites: Toray Cetec TC1225 Product Data Sheet; Toray Advances

Composites; 2023. URL: https://www.toraytac.com/media/3bd72fac-0406-48e4-bfc4-2ffd2398ac0c/fxj5OQ/TAC/Documents/Data_sheets/Thermoplastic/UD%20tapes,%20prepregs%20and%20laminates/Toray-Cetex-TC1225_PAEK_PDS.pdf Zugriffsdatum: 08.09.2023

TransportUp 2023

TransportUp: EHang 216; TransportUP; 2023. URL: <https://transportup.com/ehang-216/>

Zugriffsdatum: 01.10.2023

Turulski 2023

Turulski A.: Statistiken zu Hamburg; Statista; 2023. URL:

https://de.statista.com/themen/1440/hamburg/?kw=&crmtag=adwords&qclid=CjwKCAjw8ZKmBhArEiwAspcJ7g5vQEo00MIS2YI0iamfUC0VZY5IDIbZQ8GbMIXcY2uWQB_xovXr2hoCx7MQAvD_BwE#topicOverview Zugriffsdatum: 29.07.2023

Ugwueze et al. 2023

Ugwueze, O.; Statheros, T.; Horri, N.; Bromfield, M.; Simo, J.: An efficient and robust sizing method for eVTOL aircraft configurations in conceptual design; Aerospace; 2023

URL: <https://www.mdpi.com/2226-4310/10/3/311> Zugriffsdatum: 17.07.2023

Van der Wall 2020

Van der Wall, B. G.: Grundlagen der Hubschrauber-Aerodynamik; Springer-Verlag GmbH Deutschland; Berlin; 2020.

Van Geenen 2022

Van Geenen, G.: Diehl Aviation baut Zusammenarbeit mit Volocopter für das vollelektrische Flugtaxi Volocity weiter aus; Diehl Aviation; 2023. URL:

<https://www.diehl.com/aviation/de/presse-und-medien/presse/diehl-aviation-baut-zusammenarbeit-mit-volocopter-fuer-das-vollelektrische-flugtaxi-volocity-weiter-aus/>

Zugriffsdatum: 20.09.2023

Verein Deutscher Ingenieure 2019

Verein Deutscher Ingenieure: Entwicklung technischer Produkte und Systeme; Verein Deutscher Ingenieure e.V.; Düsseldorf; 2019.

Volocopter 2023

Volocopter: The technology behind; Volocopter GmbH; 2023. URL:

<https://www.volocopter.com/solutions/> Zugriffsdatum: 23.07.2023

Volocopter 2019

Volocity: Design specifications; Volocopter GmbH; 2019. URL: https://www.volocopter.com/wp-content/uploads/2019_VoloCity_Specs_n.pdf Zugriffsdatum: 23.07.2023

Weber

Weber, A.: Parkhaus Phönix Center – Hamburg; ParkingList. URL:

<https://www.parkinglist.de/parkplatz/Hamburg/Parkhaus-Ph%C3%B6nix-Center-Hamburg-731>

Zugriffsdatum: 26.09.2023

Werner 2022

Werner, S.: H1 eVTOL: Dieser elektrische Senkrechtstarter ist vorbestellbar – und kostet nicht mehr als eine Segelyacht; NoteBookCheck; 2022. URL: <https://www.notebookcheck.com/H1-eVTOL-Dieser-elektrische-Senkrechtstarter-ist-vorbestellbar-und-kostet-nicht-mehr-als-eine-Segelyacht.651132.0.html>

Zugriffsdatum: 05.10.2023

Wolf 2019

Wolf, D.: Drohnen Einsatzgebiete- Beispiele/Erklärungen/Ideen; Dein Drohnenpilot; 2021.

URL: <https://www.dein-drohnenpilot.de/drohnen-einsatzgebiete-beispiele-erklaerungen-ideen/>

Zugriffsdatum: 17.07.23

Wunderlich-Pfeiffer 2023

Wunderlich-Pfeiffer, F.: Wie ein Akku über 700Wh/kg erreicht hat; Golem; 2023. URL:

<https://www.golem.de/news/energiedichte-wie-ein-akku-ueber-700-wh-kg-erreicht-hat-2305-174255.html> Zugriffsdatum: 23.09.2023

Anhangsverzeichnis

[1] Anforderungsliste

[2] Geschäftsmodell

[3] Morphologischer Kasten

[4] Umfrage eVTOL