



DIE ZUKUNFT DER STÄDTISCHEN LUFTMOBILITÄT

Die Integration von Lufttaxis in den städtischen Luftraum:
Erkenntnisse aus HorizonUAM, einem Forschungsprojekt
des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR)

INHALT



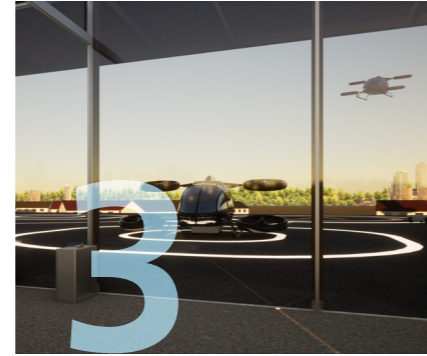
Gesamtsystemanalyse

In Kapitel 1 wird die urbane Luftmobilität als ein System von Systemen vorgestellt und ihre Anwendungsfälle und Marktszenarien analysiert.



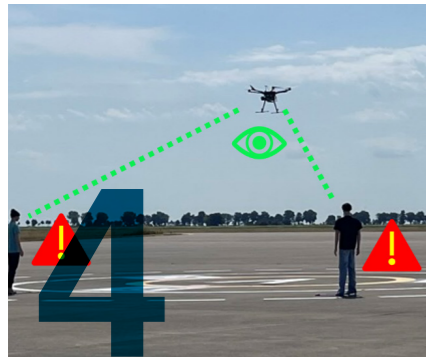
Fluggeräte

In Kapitel 2 werden die Konstruktion von Lufttaxis untersucht und Konzepte für den Innenraum und das Rotorsystem erörtert.



Vertidrom

In Kapitel 3 wird das Thema Vertidrom mit dem Schwerpunkt der Integration in den Luftraum und bestehende städtische Infrastruktur untersucht.



Schutz und Sicherheit

Kapitel 4 befasst sich mit der Sicherheit der Fluggeräte sowie mit der Sicherheit der am System beteiligten Technologien.



Gesellschaftliche Akzeptanz

In Kapitel 5 wird die gesellschaftliche Akzeptanz von Lufttaxis erörtert, wobei der Schwerpunkt auf folgenden Punkten liegt: Nachhaltigkeit, Erreichbarkeit und Bezahlbarkeit.



Demonstration

Kapitel 6 befasst sich mit der Demonstration und Bewertung der Forschungsergebnisse.



Zukunftsaussichten

In Kapitel 7 wird ein Ausblick auf die Zukunft des Forschungsgebiets gegeben sowie das Potenzial der Branche erörtert.



© Foto Kapitel 1: iStock.com/3000ad

© Foto Kapitel 7: iStock.com/guvendemir



Einleitung

Die urbane Luftmobilität (Urban Air Mobility, UAM) als Teil der innovativen Luftmobilität (Innovative Air Mobility, IAM) ist ein neues Lufttransportsystem für Passagiere und Fracht in städtischen Umgebungen. Es wird durch neue Technologien in den Bereichen Luftfahrzeugtechnik, elektrische Antriebe und Flugverkehrsmanagement ermöglicht. Eine Kernidee ist die Integration von UAM in bestehende multimodale Transportsysteme. Die Vision von UAM ist es, einen sicheren, zuverlässigen und nachhaltigen Luftverkehr in städtischen und vorstädtischen Umgebungen zu schaffen, der bestehende Transportsysteme ergänzt und zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors beiträgt.

Ziel ist es, dass UAM den Nutzern zugutekommt und positive Auswirkungen auf die Wirtschaft hat, indem neue Märkte entstehen. Zusätzlich werden Beschäftigungsmöglichkeiten für die Herstellung

und den Betrieb von Fluggeräten sowie für den Bau der zugehörigen Bodeninfrastruktur geschaffen. Es gibt jedoch auch Bedenken hinsichtlich Lärm, Sicherheit, Privatsphäre und Umweltverträglichkeit. Daher muss das UAM-System sorgfältig gestaltet werden, um sicher, bezahlbar, zugänglich, umweltfreundlich, wirtschaftlich tragfähig und somit nachhaltig zu sein.

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) hat seine Kompetenzen in den Bereichen UAM-Fluggeräte, zugehörige Infrastruktur, Betrieb von UAM-Diensten und gesellschaftliche Akzeptanz des zukünftigen städtischen Luftverkehrs in einem einzigen Projekt zusammengeführt: „HorizonUAM – Urban Air Mobility Research at the German Aerospace Center (DLR)“. Dieses Dokument fasst die zentralen Forschungsthemen zusammen.

Das DLR als Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland für Luft- und Raumfahrt verfügt über die einzigartige Fähigkeit, UAM ganzheitlich zu untersuchen – von der Idee und Konzeption bis hin zur Simulation und Flugerprobung. Das HorizonUAM-Projekt lief

von Juli 2020 bis August 2023 mit einer finanziellen Investition von 9,1 Millionen Euro. Zehn DLR-Institute in ganz Deutschland arbeiteten zusammen mit den Kooperationspartnern NASA und Bauhaus Luftfahrt.

Gesamtsystemanalyse

Kann die urbane Luftmobilität Realität werden? Gibt es eine Nachfrage nach dieser neuen Art von Transportdienstleistung? Wie sollte ein UAM-System gestaltet sein, um wirtschaftlich erfolgversprechend zu sein? Die Beantwortung dieser Schlüsselfragen erfordert ein tiefes Verständnis der komplexen Wechselwirkungen zwischen UAM-Systemkomponenten und ihrer Auswirkungen auf das Systemverhalten. Der Erfolg von UAM wird an seinen Auswirkungen auf relevante Interessengruppen wie Nutzer, Betreiber und die Gesellschaft gemessen, sowie an den Auswirkungen auf die Umwelt. Da Lufttaxis derzeit noch nicht kommerziell in Betrieb sind, mussten Modelle und Simulationen entwickelt werden, um Informationen über die potenzielle Preisgestaltung von UAM-Diensten zu sammeln, die globale Nachfrage zu bewerten und zu analysieren, wie UAM-Systeme optimiert werden können.

ANWENDUNGSFÄLLE

UAM umfasst verschiedene potenzielle Anwendungsfälle im Passagier- und Frachttransport. Als einer der Ausgangspunkte der Forschung wurden die vielversprechendsten Anwendungsfälle in Bezug auf Erfolgsaussichten und Bewältigung von technologischen Herausforderungen ausgewählt. Das Team analysierte die Eigenschaften dieser Anwendungsfälle im Detail: Die Anforderungen der Nutzer wurden zusammengestellt, die daraus resultierenden Konsequenzen für das UAM-Transportsystem abgeleitet und Szenarien der Technologieentwicklung bis zum Jahr 2050 erarbeitet. Die Ergebnisse flossen in das Fluggeräte- und Kabinendesign sowie in die Entwicklung einer System-of-Systems-Simulation ein.



FLUGHAFEN-SHUTTLE

Reichweite: bis zu 30 km
Geschwindigkeit: bis zu 150 km/h
Sitzplätze: bis zu 6

- » Linienflüge zwischen Flughäfen und ausgewählten Orten innerhalb von Stadtgebieten
- » Fluggerät mit höherer Nutzlast und Platz für Gepäck
- » Flugmission zwischen zwei Vertidromen mit Lademöglichkeit nach jedem Flug



VORORT-PENDLER

Reichweite: bis zu 70 km
Geschwindigkeit: bis zu 150 km/h
Sitzplätze: bis zu 4

- » Linienflüge zwischen Vororten oder umliegenden Satellitenstädten und dem Stadtzentrum
- » Wirtschaftliche Herausforderung durch hohe Nachfrage zu Hauptverkehrszeiten und geringe Nachfrage zu Nebenzeiten
- » Flugmission zwischen zwei Vertidromen mit Lademöglichkeit nach jedem Flug



INTER-CITY

Reichweite: über 70 km
Geschwindigkeit: über 100 km/h
Sitzplätze: bis zu 10

- » Linienflüge zwischen zwei Städten
- » Fluggerät für längere Strecken mit hohem Komfort für Passagiere
- » Flugmission zwischen zwei Vertidromen mit Lademöglichkeit nach jedem Flug

TECHNOLOGIE-SZENARIEN

| | 2025 | 2050 |
|------------------------------|---|--|
| Antriebstechnologie | Vollständig elektrisch oder hybrid-elektrisch auf Basis konventioneller Kraftstoffe | Vollständig elektrisch oder hybrid-elektrisch, auch wasserstoffbasiert |
| Autonomiegrad | Pilot an Bord / Fernpilot* | Hoch automatisiert / autonom |
| U-Space Service Level | U-Space Service Level U1 (erste U-Space-Dienste) | U-Space Service Level U2 – U3 (fortgeschrittene U-Space-Dienste) |
| Kommunikation | Multilink-Kommunikation, die auf bestehender Kommunikationsinfrastruktur basiert | Multilink-Kommunikation mit spezifischem Datenlink |
| Navigation | Global Navigation Satellite System (GNSS) und unterstützende Multisensor-Navigation | Zertifizierte Multisensor-Navigation einschließlich GNSS |

* Für die Anwendungsfälle „Intra-City“ und „Mega-City“ wird ein Pilot an Bord angenommen und für die Anwendungsfälle „Flughafen-Shuttle“, „Vorort-Pendler“ und „Inter-City“ ein Fernpilot.

Globale Nachfrage

Eine vorläufige Schätzung der potenziellen globalen Nachfrage nach UAM, der damit verbundenen Flugbewegungen und der benötigten Fluggeräte ist für die langfristige Planung der UAM-Branche unerlässlich. Auch für weitere Interessengruppen wie Regierungen und Verkehrsplaner ist dies relevant, um geeignete Strategien und

Maßnahmen zur Implementierung von UAM zu entwickeln. Derzeit fehlen empirische Daten zur Nachfrage nach UAM. Darüber hinaus unterscheiden sich Städte weltweit in vielerlei Hinsicht, einschließlich Größe, Wirtschaftskraft, Bevölkerungszahl, Geografie usw.



INTRA-CITY

Reichweite: bis zu 50 km
Geschwindigkeit: bis zu 100 km/h
Sitzplätze: bis zu 4

- » Flüge auf Abruf innerhalb von zentralen Stadtgebieten in Deutschland
- » Hohe Verkehrsdichte und Flüge in städtischen Umgebungen über kurze Entfernungen
- » Flugmission mit bis zu zwei Zwischenstopps ohne Nachladen

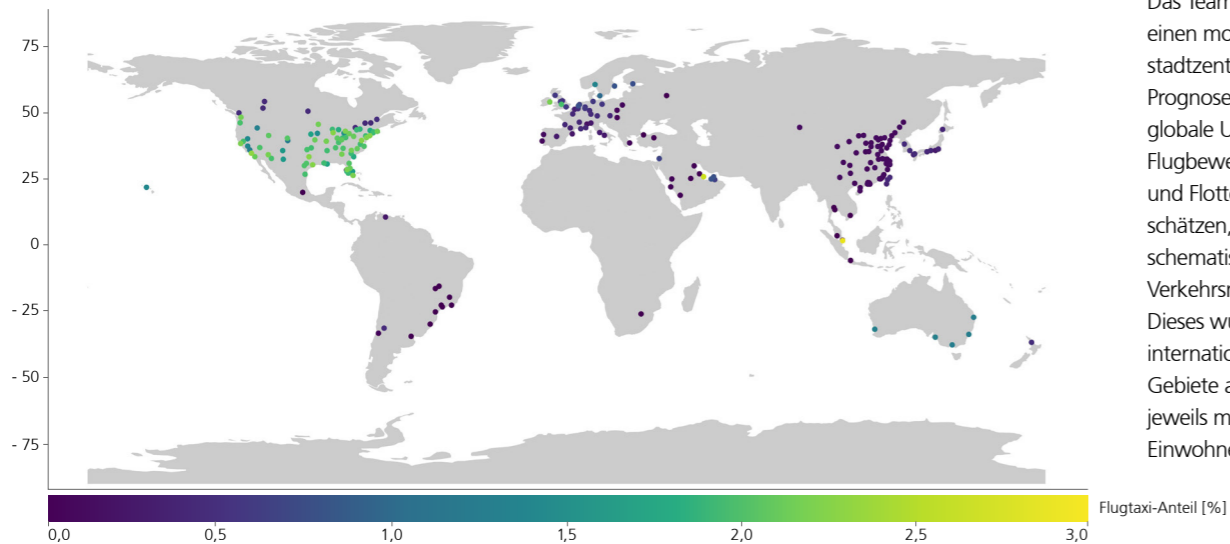


MEGA-CITY

Reichweite: bis zu 100 km
Geschwindigkeit: bis zu 150 km/h
Sitzplätze: bis zu 6

- » Flüge auf Abruf innerhalb von zentralen Stadtgebieten globaler Megastädte
- » Hohe Verkehrsdichte und Flüge in städtischen Umgebungen über große Entfernungen
- » Flugmission ohne oder mit einer Zwischenlandung ohne Nachladen

Städte mit möglichen UAM-Diensten in 2050



Das Team verfolgte einen modellbasierten, stadtzentrierten Prognoseansatz, um die globale UAM-Nachfrage, Flugbewegungen und Flottengrößen zu schätzen, und erstellte ein schematisches städtisches Verkehrsmodell. Dieses wurde auf 990 internationale städtische Gebiete angewendet, die jeweils mehr als 500.000 Einwohner umfassen.

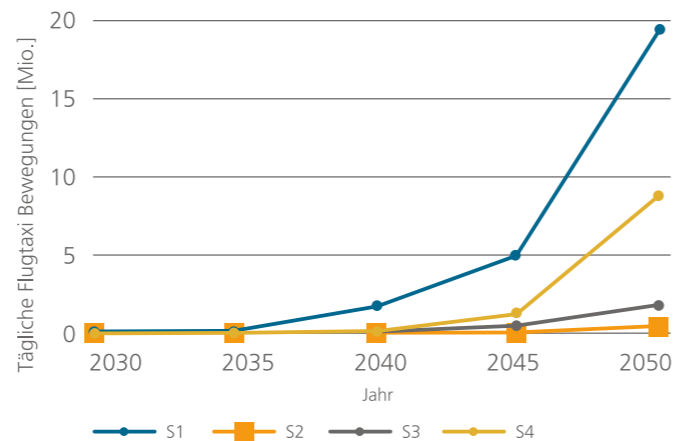
Unter Berücksichtigung verschiedener Entwicklungsmöglichkeiten für Lufttaxi-Ticketpreise und Vertiport-Dichten wurden vier potenzielle Marktentwicklungsszenarien (S1-S4) skizziert. Eine geringe Vertiport-Dichte in einem Szenario spiegelt wider, dass aus politischen, ökologischen oder gesellschaftlichen Gründen nur wenige Vertiports platziert werden können. Niedrigere Ticketpreise könnten das Ergebnis technologischer Fortschritte in der Fluggeräte- und Infrastrukturautomatisierung sein. Die Ergebnisse zeigen, dass bedeutende UAM-Märkte bis 2040 nicht zu erwarten sind, unabhängig von den Ticketpreisen. Die

| | Vertiport-Dichte | Lufttaxi-Preise |
|-------------------|------------------|-----------------|
| Szenario 1 | Hoch | Optimistisch |
| Szenario 2 | Niedrig | Konservativ |
| Szenario 3 | Hoch | Konservativ |
| Szenario 4 | Niedrig | Optimistisch |

BETRIEBSKOSTEN UND TICKETPREISE

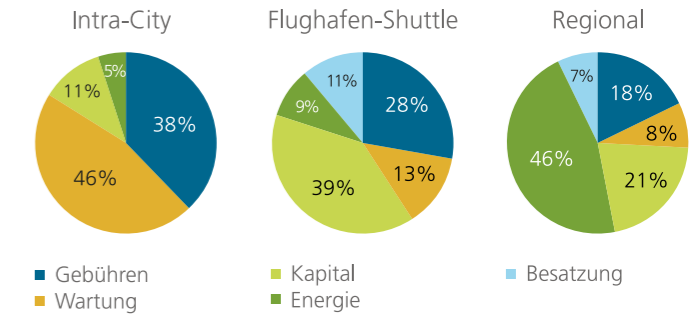
Der Ticketpreis bleibt eine der entscheidendsten Kennzahlen für den Erfolg von UAM. Da der Ticketpreis direkt mit den Betriebskosten von UAM verknüpft ist, wird ein Modell zur Schätzung und Vorhersage der direkten Betriebskosten zu einem der Schlüsselmodelle, die ein UAM-Betreiber entwickeln muss. Viele Komponenten des UAM-Systems, die zu den direkten Betriebskosten beitragen, sind jedoch noch nicht bekannt. Daher erstellte das Team ein Modell der direkten Betriebskosten (Direct Operation Cost, DOC). Dieses Modell berücksichtigt die Kosten für Landung, Terminalnutzung, Flugsicherung, Wartung und Instandhaltung, Kapitalkosten und Abschreibungen, Energie, Besatzung und Flugzyklen (Flight Cycles, FC). Die Parameter für die DOC-Schätzung basierten auf vorhandener Literatur, bekannten Preisen der allgemeinen Luftfahrt und Schlussfolgerungen durch Analogien. Die Ticketpreise wurden durch Festlegung des Anteils der indirekten Betriebskosten (Indirect Operating Cost, IOC) und der Gewinnmarge ermittelt.

Ergebnisse deuten darauf hin, dass ein niedriger Ticketpreis für eine höhere Nachfrage wichtiger ist als eine hohe Vertiport-Dichte. Im bestmöglichen Szenario könnten bis 2050 ein niedriger Ticketpreis und eine hohe Vertiport-Dichte zu einem Marktpotenzial für UAM von 19 Millionen täglichen Flügen in über 200 Städten weltweit führen. Die UAM-Nachfrage variiert regional, mit hohen Marktanteilen in größeren Städten, insbesondere in Nordamerika, Ozeanien, Europa und Asien, beeinflusst durch lokale Marktbedingungen.



| Anwendungsfall | Intra-City | Flughafen-Shuttle | Regional |
|--|------------|-------------------|------------|
| Typ | Ehang 216 | Archer Midnight | Lilium Jet |
| Sitzplätze (Passagiere + Pilot) | 2 (2+0) | 6 (5+1) | 8 (7+1) |
| Reichweite [km] | 12,13 | 15,11 | 186,35 |
| DOC pro FC [€/km] | 62,07 | 231,30 | 700,83 |
| Optimistischer Tarif [€/km] | 4,1 | 6,1 | 1,0 |
| Konservativer Tarif [€/km] | 5,7 | 8,5 | 1,4 |

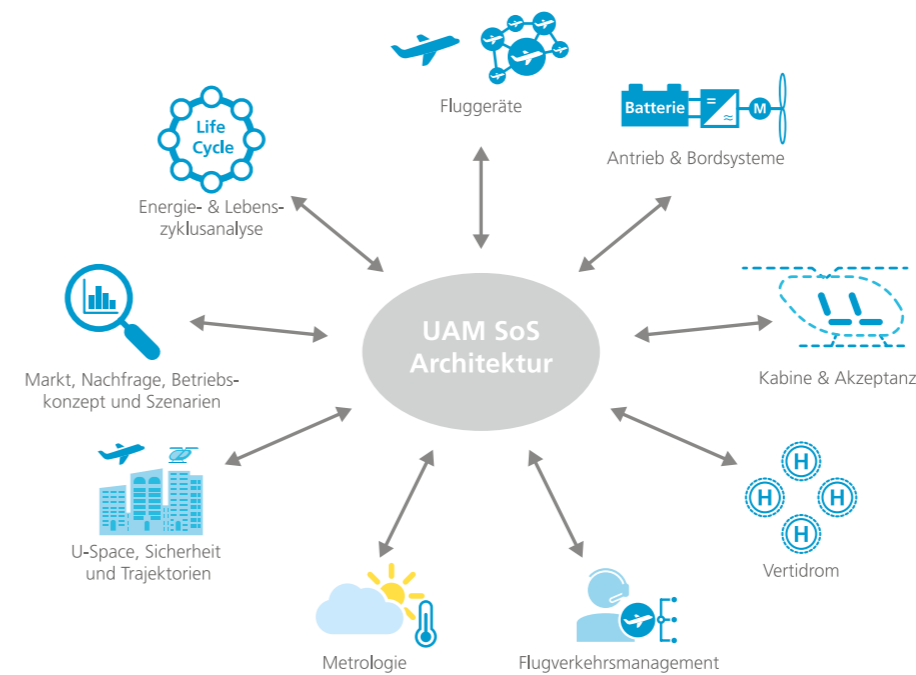
Bei der Berechnung dieser Preisschätzungen wurden drei Anwendungen berücksichtigt: Intra-City-Flüge, Flughafen-Shuttle und regionale Flüge. Für jede Art von Flug wurden ein optimistischer und ein konservativer Preis pro Kilometer berechnet. Für innerstädtische Flüge liegt der optimistische Wert bei 4,10 €/km und der konservative Wert bei 5,70 €/km. Für Flughafen-Shuttle-Flüge wurde ein optimistischer Wert von 6,10 €/km und ein konservativer Wert von 8,50 €/km berechnet. Für regionale Flüge liegt der optimistische Wert bei 1,00 €/km und der konservative Wert bei 1,40 €/km.



Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl die Planung der Flüge als auch die Gestaltung der Fluggeräte einen großen Einfluss auf die Betriebskosten pro Flug haben. UAM-Betreiber müssen daher sorgfältig überlegen, welche Fluggerätekfigurationen sie einsetzen, besonders dann, wenn die Nachfrage gering ist und größere Fluggeräte nicht voll ausgelastet sind. Es ist wichtig, die Betriebskosten zu senken, um die Ticketpreise niedrig zu halten und so genügend Nachfrage zu erzeugen, damit das Geschäft profitabel wird.

MODELLIERUNG DES GESAMTSYSTEMS: SIMULATION DES SYSTEMS DER SYSTEME

Da es sich bei UAM um ein komplexes System von Systemen (SoS) handelt, bei dem verschiedene technische, betriebliche, rechtliche und gesellschaftliche Komponenten miteinander interagieren, ist ein ganzheitlicher Ansatz unerlässlich. Die Komplexität ergibt sich aus der notwendigen Integration der einzelnen Systeme wie Fluggeräte, Infrastruktur, Luftverkehrsmanagement und Flugbetrieb in das städtische Verkehrssystem. Um ein tragfähiges Verkehrssystem zu schaffen, ist es notwendig, die einzelnen Systemkomponenten aufeinander abzustimmen.



Um die Einzelsysteme des UAM-Gesamtsystems und ihre gegenseitigen Abhängigkeiten verstehen und bewerten zu können, wurde eine kollaborative agentenbasierte Simulation des städtischen Luftverkehrs entwickelt. Die Integration der einzelnen Module (oder Teilsysteme) in die agentenbasierte Simulation wurde durch den Einsatz der Software Remote Component Environment (RCE) erreicht. RCE hat die entscheidende Funktion, die über mehrere Institute verteilten Modelle nahtlos miteinander zu verbinden.

Die entwickelte kollaborative Simulation ermöglicht es, Studien in jedem der beteiligten Bereiche durchzuführen und dabei bereichsübergreifende Effekte zu erfassen, ohne die Modellierungstreu der anderen Bereiche zu beeinträchtigen. Darüber hinaus kann ein solcher Ansatz auch die kombinierte Optimierung der einzelnen Teilsysteme und des Gesamtsystems der Systeme ermöglichen.

UAM ist ein hochkomplexes System von Systemen, die auf komplexe Weise miteinander interagieren. Einige dieser möglichen Systeminteraktionen sind noch unbekannt. Es besteht also ein erhebliches Potenzial für künftige Forschung. Um ein tragfähiges städtisches Luftverkehrssystem zu schaffen, müssen die einzelnen Systemkomponenten wie Fluggeräte, Infrastruktur und betriebliche Rahmenbedingungen, einschließlich der verschiedenen Flugverkehrsmanagementsysteme, aufeinander abgestimmt werden. Die Senkung der Betriebskosten und damit der Flugpreise sowie der Aufbau eines ausreichend dichten Vertiportnetzes sind entscheidend, um eine ausreichende Nachfrage zu erzeugen, damit UAM rentabel wird.

Fluggeräte

Das Fluggerätedesign wurde kollaborativ entwickelt und orientiert sich an dem zuvor eingeführten Ansatz des Systems von Systemen. Je nach Anwendungsfall ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an das Design. Komfortanforderungen der Nutzer wurden identifiziert und bei der Erstellung verschiedener Fluggeräte- und Kabinenkonzepte berücksichtigt. Die Kabine und das Innendesign bilden die Schnittstelle zwischen Flugtaxi und Passagier. Als solche spielen sie eine entscheidende Rolle bei der Gestaltung der Wahrnehmung durch den Passagier. Es wird angenommen, dass diese Aspekte einen wesentlichen Einfluss auf die Akzeptanz zukünftiger Lufttaxis haben werden.

KONZEPTIONELLE AUSGESTALTUNGEN

Die Forscher untersuchten verschiedene Rotor- und Flügelkonfigurationen und bewerteten deren Eigenschaften wie Flugleistung und Flugstabilität unter verschiedenen Wetterbedingungen. Wo immer es möglich war, wurde der Entwurfsprozess nach den Grundsätzen des geräuscharmen Designs durchgeführt. Auf der Grundlage dieser Untersuchungen wurden zwei Hauptkonzepte für verschiedene Anwendungsfälle definiert: eine Multirotor-Konfiguration mit integrierten Schubpropellern und eine Kipprotor-Konfiguration. Das erste Konzept ist besonders für kürzere Entfernungen geeignet, während das zweite Konzept mit sechs Kipprotoren gezielt

Schub in Flugrichtung erzeugen kann, wodurch höhere Geschwindigkeiten erreicht und größere Distanzen zurückgelegt werden können. Zusätzlich zum konzeptionellen Vorentwurf wurde für das Multirotorkonzept auch ein detaillierterer Entwurfs- und Analyseprozess durchgeführt. Hierbei wurde ein flugmechanisches Modell erstellt, mit dem die aeromechanische Rotoranalyse und -optimierung unter Verwendung von Blattelementen durchgeführt werden konnte. Eine Untersuchung der grundlegenden Konstruktionsgrenzen wurde ebenfalls durchgeführt.

Das Quadrotor-Modell eignet sich besonders für innerstädtische Flüge oder Flughafen-Shuttles und bietet Platz für vier Passagiere einschließlich Gepäck. Der geplante Einsatz soll eine Strecke von 50 km mit einer Geschwindigkeit von bis zu 120 km/h und zwei Zwischenstopps umfassen.

Das Kipprotor-Modell ist für Vorort-Pendler oder für Flüge in Mega-Cities geeignet und bietet Platz für vier Passagiere einschließlich Handgepäck. Die durchschnittliche Flugstrecke beträgt 100 km bei einer Geschwindigkeit von 200 km/h und einem Zwischenstopp. Die maximale Abflugmasse hängt von den Anforderungen an Nutzlast, Reichweite und Geschwindigkeit sowie von der

Entwicklung der Batterietechnologie ab und entspricht den EASA-Sonderbedingungen für Senkrechtstarter kleiner Kategorie (SCVTOL) mit einer nach Zertifizierung maximalen Abflugmasse von 3.175 kg (7.000 lbs) oder weniger.

INNENDESIGN-KONZEPTE

Untersuchungen an veröffentlichten UAM-Prototypen zeigen, dass diese Designs von Innovationen im Automobilsektor inspiriert wurden.

Die Innenausstattung basiert auf starken Farbkontrasten und minimalistischem Design und vermittelt ein Gefühl der Nähe zum gewohnten Automobilsektor. Die Kabinen werden durch große Fenster hell und offen gestaltet, um das Flugerlebnis zu verbessern. Die Sitze sind meist nach dem Automobilstandard angeordnet, was dazu beiträgt, dass die Passagiere ein vertrautes Gefühl haben.

KABINENLAYOUT UND ALLGEMEINE PARAMETER

Bei der Definition möglicher Designs für eine Kabine spielen neben Sicherheit und Privatsphäre auch ergonomische Überlegungen eine wichtige Rolle. Es wurden zentrale Anforderungen definiert:

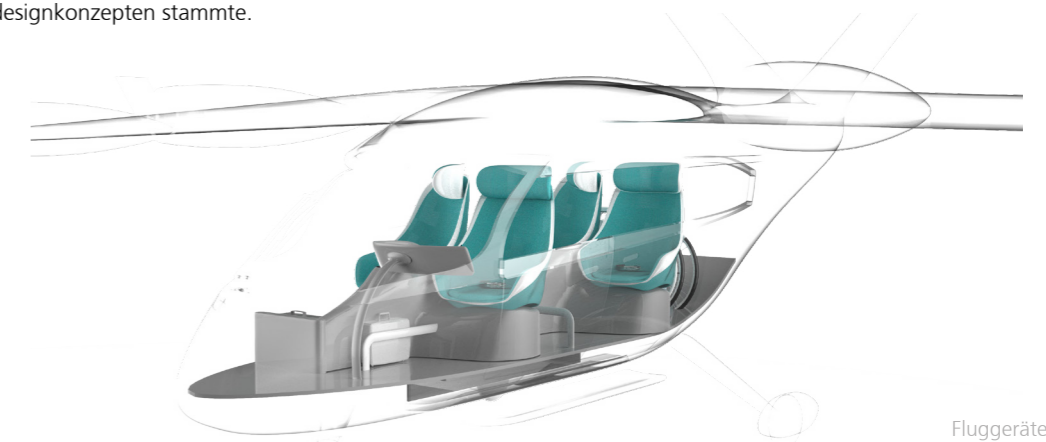
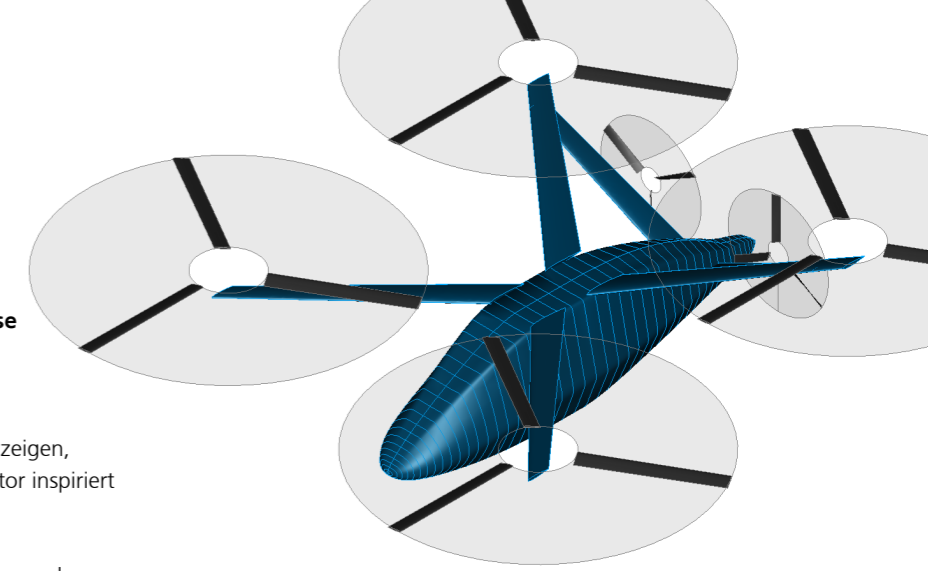
- » Zuladungsgewicht: 90 kg (+20 kg optionales zusätzliches Gepäckgewicht)
- » Pilotiertes Fluggerät mit autonomer Flugoption
- » Vier Sitze
- » Nutzbarkeit für Personen mit eingeschränkter Mobilität (Abstellen eines Rollstuhls)

Die Komfortparameter in Bezug auf den Sitzabstand und die Sitzbreite wurden von den Abmessungen in den Business-Class-Kabinen der kommerziellen Luftfahrt abgeleitet. Der erforderliche Stauraum wurde auf Grundlage der durchschnittlichen Abmessungen von Handgepäck und Standardrollstühlen definiert. Es wurde ein Kabinenlayout entworfen, das den Anforderungen verschiedener Passagiere mit den kleinst- und größtmöglichen physischen Abmessungen gerecht wird. Aufgrund des Anwendungsfalles eines Flughafen-Shuttles wurde festgelegt, dass mindestens vier Gepäckstücke in der Kabine befördert werden können sollten. Es wurde ein Sitzlayout mit zwei Reihen und zwei Sitzen pro Reihe festgelegt.

SITZE

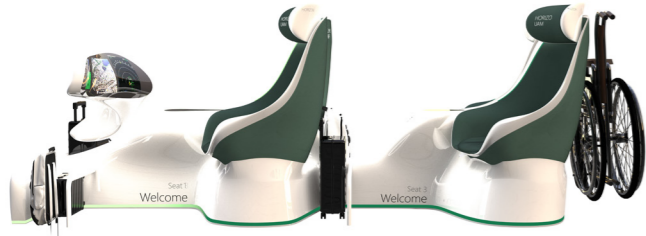
Im Rahmen einer Online-Befragung in Deutschland im Jahr 2021 wurden verschiedene Sitzkonzepte bewertet. In der Umfrage wurden die Nähe zu den Mitreisenden, der Blickkontakt sowie das Empfinden von Sicherheit und Privatsphäre untersucht. In der Umfrage wurden auch verschiedene Sitzdesigns bewertet, wobei die Inspiration für die Sitzdesigns aus der Luftfahrtindustrie (Business- und First-Class-Sitze) und der Automobilindustrie sowie aus neuartigen Sitzdesignkonzepten stammte.

Das Design der Sitze, das sich an den Sitzen der höheren Klassen von Fluggesellschaften orientiert, kam bei den Umfrageteilnehmern besonders gut an. Zu den Gründen gehörten der erwartete Sitzkomfort, das Vorhandensein von Armlehnen und insbesondere die gedrehte Sitzposition mit U-förmigen Kopfstützen für mehr Privatsphäre. Weniger bekannte Sitzmodelle mit neuartigen Formen und ohne Armlehnen wurden eher negativ bewertet.



GEPÄCK UND AUFBEWAHRUNG

Den Umfrageteilnehmern wurden verschiedene Bilder von Gepäckaufbewahrungskonzepten vorgelegt. Zu den Schlüsselfaktoren, die von den Umfrageteilnehmern positiv bewertet wurden, gehörten ausreichender Stauraum, leichte Erreichbarkeit des Gepäcks während der Reise, individuelle Aufbewahrungsmöglichkeiten und eine sichere Befestigung des Gepäcks.



Um eine ausreichende Kopffreiheit bei einer Kabinenhöhe von 1,60 m zu gewährleisten, sind über den Sitzbereichen keine Ablagefächer oder Displays vorgesehen.

Um eine barrierefreie Gestaltung der Kabine zu erreichen, wurde auch an die Unterbringung von Rollstühlen gedacht. Der Stauraum im hinteren Bereich ist dafür vorgesehen und kann bei der Landung über eine Seitenklappe von außen erreicht werden.



Außerdem wurden verschiedene Methoden zur Sicherung des Gepäcks in der Kabine untersucht. Es musste sichergestellt werden, dass das Gepäck während des Fluges nicht verrutscht und gleichzeitig eine einfache Lagerung und die Entnahme des Gepäcks

beim Ein- und Aussteigen der Passagiere möglich ist. Die Sicherung von Koffern und Taschen vor den Passagieren wurde bevorzugt, damit die Reisenden während des Fluges Zugriff auf ihr Gepäck haben. Das folgende Bild zeigt ein 3D-Modell der Gesamtansicht des Konzepts

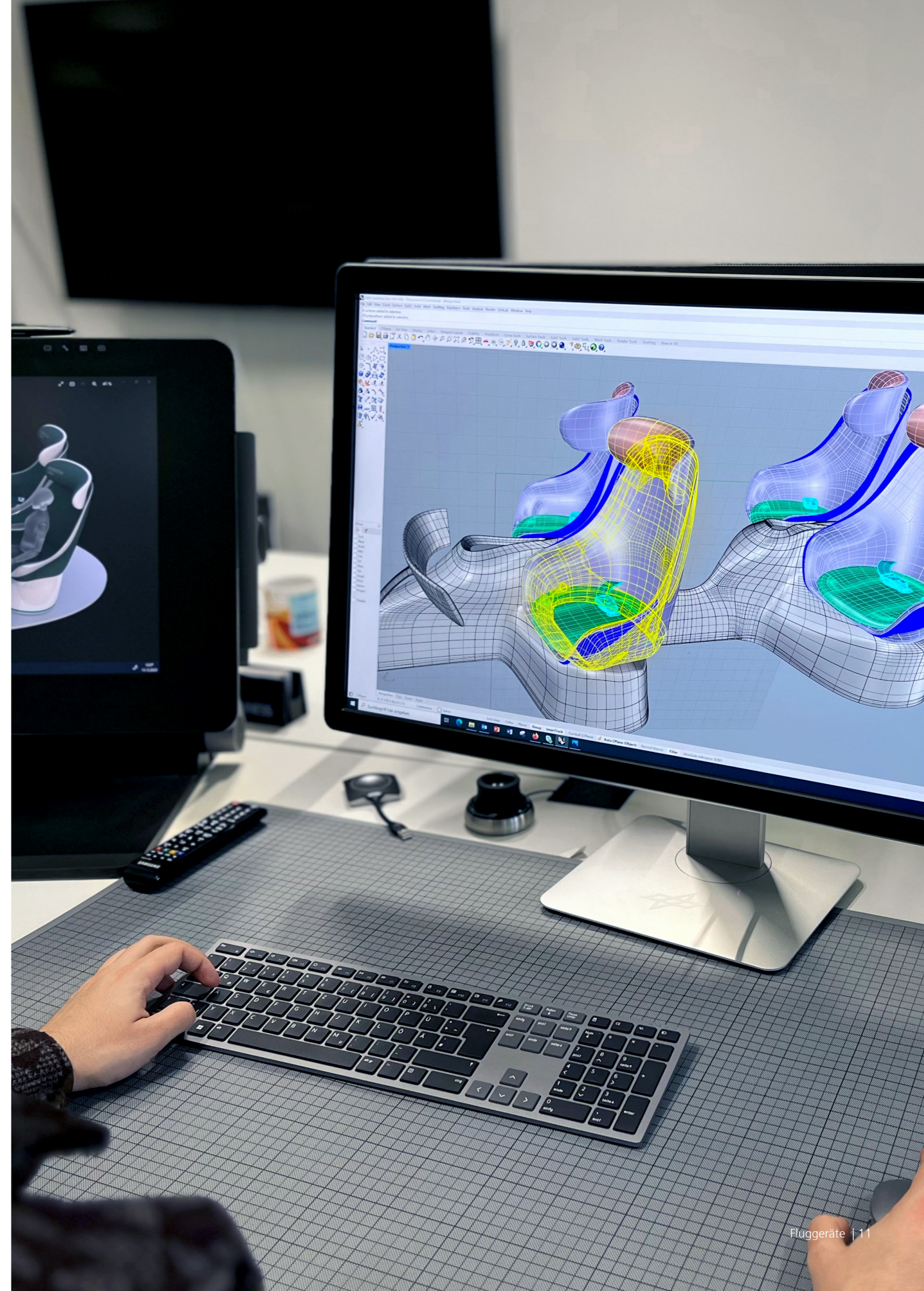


In diesem Konzept wurden drei Sitze in Richtung der Fenster gedreht, um den Passagieren den freien Blick nach außen zu ermöglichen, während die Position des Sitzes vorne rechts unverändert blieb. In diesem Szenario ist ein Pilot vorgesehen, jedoch sollte dieses Konzept grundsätzlich auch für Kabinenkonzepte im autonomen Betrieb geeignet sein.

Neben dem Sitzkomfort, den optimierten Staufächern, dem minimalistischen Design und den individuell anpassbaren Sichtschutzfunktionen umfasst das Kabinendesign verschiedene Komfortparameter, die auf dem Feedback potenzieller Nutzergruppen basieren. Die bewusste Kombination von minimalistischen und leicht verständlichen Funktionen mit futuristischen und komplexen Designelementen steigert den Gesamtkomfort und das Nutzererlebnis.

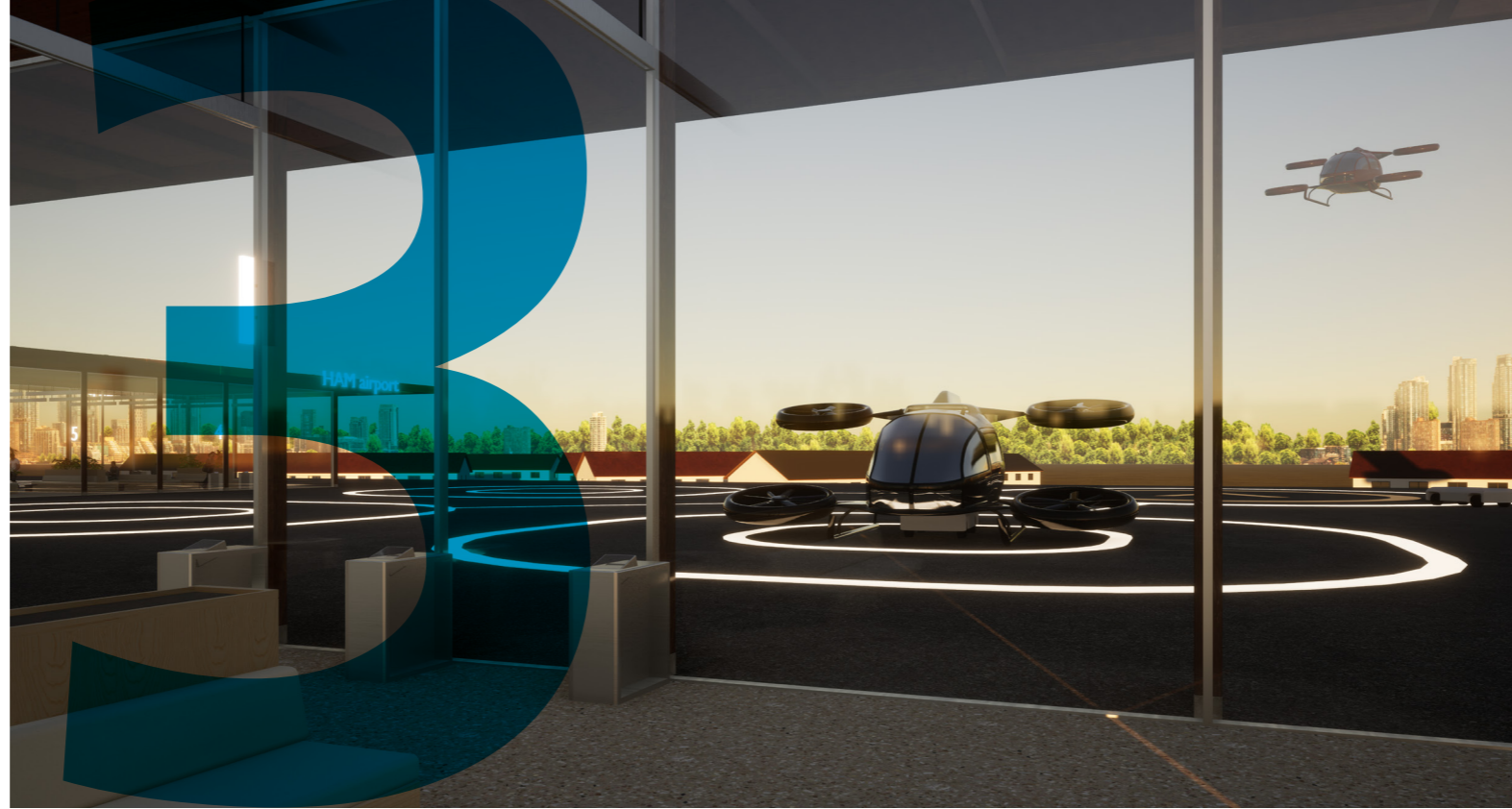
Der Einfluss der Passagiere auf das Design kann sich positiv auf die Akzeptanz und das Sicherheitsempfinden auswirken, was zu einer höheren Bereitschaft in der Gesellschaft führen kann, Lufttaxis zu nutzen. Darüber hinaus kann die direkte Auseinandersetzung mit Ängsten, Wünschen und

Bedenken und deren Einbeziehung in das Designkonzept in Zusammenarbeit mit Nutzergruppen dazu führen, dass der Entwicklungsprozess autonom betriebener Lufttaxis zu einer erhöhten Akzeptanz in der Gesellschaft führt.



Vertidrom

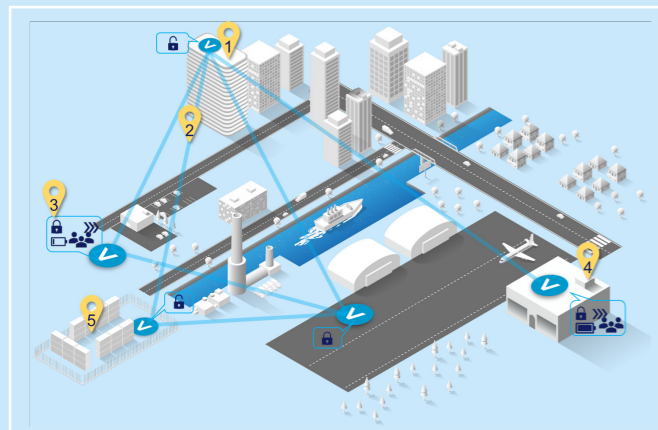
Das funktionale Design und die technische Ausstattung von Vertidromen und Vertidrom-Netzwerken stellen sowohl eine Herausforderung als auch einen entscheidenden Faktor für die kommerzielle Einführung von Lufttaxis und die Bereitstellung von UAM-Diensten dar. Im HorizonUAM-Projekt wurde der allgemeine Begriff „Vertidrom“ eingeführt, um die Bodeninfrastruktur für die urbane Luftmobilität zu beschreiben, die von Senkrechtstartern (VTOL) genutzt wird. Vertidromkategorien können weiter unterschieden werden in einerseits Vertiports, die vollständig ausgestattet sind mit Parkpositionen und Ladestationen und andererseits Vertistops, die lediglich sichere Start- und Landemöglichkeiten bieten. Ein Vertiport könnte zusätzlich Wartungs- und Instandsetzungsdienste anbieten. Er kann auch als zentraler Knoten in einem Hub-and-Spoke-Netzwerk fungieren, bei dem kleinere Vertistops sternförmig um einen zentralen Vertiport platziert sind.



mit Leistungseigenschaften, die sich stark von denen herkömmlicher Flugzeuge mit starren Flügeln unterscheiden. Daher sollte das Ziel sein, ihnen vom Landebahnsystem unabhängige Start- und Landeplätze sowie separate, unabhängige An- und Abflugrouten bereitzustellen.

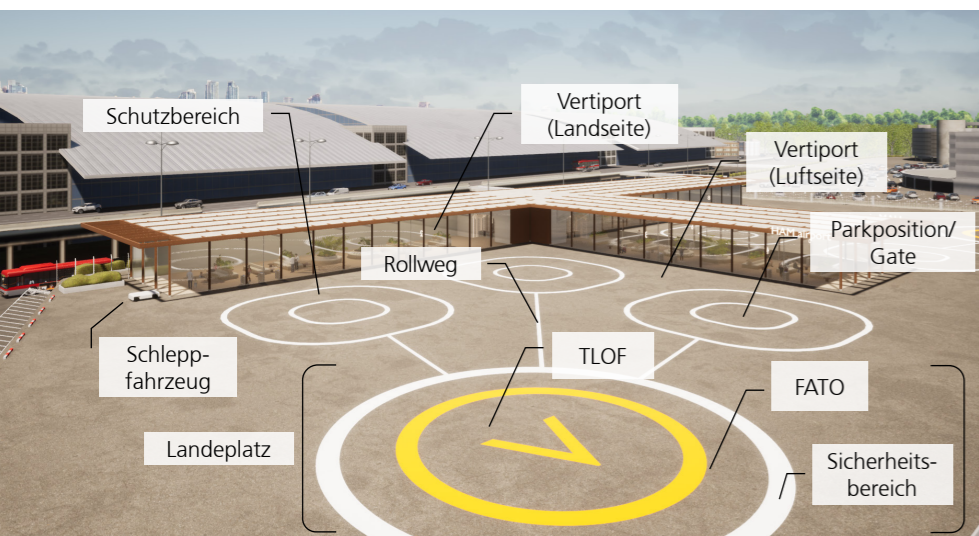
Die Kontrollaufgabe selbst sollte so gestaltet sein, dass die verantwortlichen Fluglotsen ihr Situationsbewusstsein aufrechterhalten können und die potenzielle Arbeitsbelastung vertretbar bleibt.

Der taktische Teil der definierten Prozesse für die Integration von Lufttaxis wurde in Echtzeit-Simulationen (human-in-the-loop) im Vorfeld- und Towersimulator des DLR mit zehn Fluglotsen für den Referenzfall Flughafen Hamburg auf Machbarkeit getestet. Zusätzlich zum konventionellen Flugverkehr mit 44 Bewegungen pro Stunde, wurden fünfzehn Lufttaxis in eine einstündige Simulationslaufzeit eingebunden. Lufttaxirouten wurden visualisiert und aktive Routen auf dem Radarschirm hervorgehoben, um die Fluglotsen bei ihren Aufgaben zu unterstützen. Da Lufttaxis aufgrund ihrer Flug- und Leistungseigenschaften stark dem Risiko von Wildschlägen ausgesetzt sind, wurden Informationen über kritische Vogelbewegungen in der Umgebung auf den Bildschirmen angezeigt.



Die Forschung zu Vertidromen umfasste das Design und den Betrieb einzelner Vertidrome auf Mikroebene (1), erstreckte sich aber auch auf die Makroebene, indem das Management des Vertidrom-Lufttraumnetzwerks (2) und die Netzwerkoptimierung (3) behandelt wurden. Darüber hinaus wurden die Chancen und Herausforderungen der Integration von Lufttaxidiensten und der Vertidrom-Betrieb in Flughafennähe, also in kontrolliertem Luftraum, untersucht (4). Dazu wurde eine UAM-Modellstadt (5) konzipiert, um die Validierung in skalierten Flugversuchen zu ermöglichen.

Diese Abbildung zeigt ein Beispiel für den Aufbau eines Vertidroms und erläutert seine Oberflächenmerkmale.



TLOF – Aufsetz- und Abhebefläche

FATO – Endanflug- und Startfläche

Die Anzahl und Anordnung von Landeplattformen, Parkpositionen und Rollwegen kann variieren. Um die Leistung eines bestimmten Vertidrom-Layouts auf der Luftseite zu bewerten, wurde ein Bewertungsschema namens Vertidrome Airside Level of Service (VALoS) entwickelt. VALoS berücksichtigt verschiedene Perspektiven der Interessengruppen (z. B. Lufttaxi-Betreiber, Passagiere und Vertidrom-Betreiber) und bietet die Möglichkeit, ein qualitatives Vertidrom-Design in strategischen Planungsphasen zu quantifizieren. Die VALoS-Bewertung kann verwendet werden, um die Leistung einer spezifischen Vertidrom-Konfiguration für ein bestimmtes Leistungsziel und eine bestimmte Nachfrageverteilung zu bewerten.

Potenzielle Managementkonzepte und Verfahren für konfliktfreie Luftraumoperationen wurden ebenfalls untersucht. Eines der Konzepte basierte auf direkten Routen zwischen Vertidromen, die als vierdimensionale Trajektorien dargestellt wurden. Ein zweites Konzept nutzte eine starre Routenstruktur und ein Zeitfenstermanagement. Beispielhaft wurden 20 Vertidrome innerhalb der Stadt Hamburg in diese beiden Netzwerke einbezogen. Es konnten durchschnittliche Reisezeitersparnisse von bis zu 43 % im Vergleich zu bodengebundenem Transport erreicht werden.

Neben der Kapazität des städtischen Luftraums ist auch die Kapazität des Vertidromnetzwerks eine kritische Ressource des UAM-Systems. Durch Optimierung kann die erforderliche Vertidrominfrastruktur und die Flottengröße auf ein Minimum reduziert werden.

Für das beispielhafte Hamburger Netzwerk wurde ein Pendler-Szenario mit 2.800 Missionen pro Tag aufgesetzt. Für ein effizientes Flottenmanagement wurde die Anzahl der zurückgelegten Passagierkilometer als Optimierungsparameter für die Generierung von Staffeln verwendet, wodurch effektiv die gesamte von Passagieren pro Tag zurückgelegte Strecke maximiert und implizit Lösungen mit weniger leeren Sitzkilometern belohnt wurden.

Simulationsergebnisse zeigten, dass eine Flotte von 275 Fahrzeugen erforderlich ist, um alle 2.800 Missionen zu realisieren. Bei der Annahme, dass Batterien ausgetauscht statt aufgeladen werden, könnte die erforderliche Flottengröße auf 225 Fahrzeuge (-19 %) reduziert werden, was auch zu 24 % weniger benötigten Parkpositionen führt.

Die Integration eines Vertidroms in einen bestehenden Flughafen stellt eine Herausforderung für die Flugverkehrskontrolle (ATC) dar. Am Flughafen gehören die Kontrolle und Koordination von Landungen und Starts sowie die Überwachung des Flugverkehrs in der Kontrollzone zu den Aufgaben der Fluglotsen. Die Einbindung von Lufttaxis in den Verkehrsfluss führt zu zusätzlichen Luftraumnutzern



Im Rahmen der Simulationsversuche erwies es sich als machbar, Lufttaxis und Wildtierinformationen in den derzeitigen Flughafenbetrieb zu integrieren. Obwohl die Einführung des UAM-Verkehrs zu einem Anstieg der gemeldeten Arbeitsbelastung um 44 % und zu einer Verringerung des Situationsbewusstseins um 18 % führte, gaben alle Fluglotsen an, dass sich die Veränderungen in einem erträglichen Rahmen bewegten. Darüber hinaus wurde mit zunehmender Anzahl von Szenarien ein Trainingseffekt beobachtet, was darauf hindeutet, dass etwaige negative Auswirkungen auf die Fluglotsen mit zusätzlichem Training abnehmen werden. Alle Fluglotsen waren sich einig, dass ein separater Arbeitsplatz für die Bewältigung des UAM-Verkehrs eingeführt werden sollte, falls der UAM-Verkehr zunimmt. Dies dürfte die Durchführbarkeit auch bei höheren Verkehrsdichten erleichtern.

Sicherheit

Sicherheit hat höchste Priorität in der Luftfahrt. Insbesondere im Hinblick auf die gesellschaftliche Akzeptanz ist ein Vertrauen in das Fluggerät und die Autonomie zwingend notwendig. Daher ist die behördliche Zulassung neuer Fluggeräte und insbesondere der Autonomiefunktionen hohen Anforderungen unterworfen. Andere Luftraumteilnehmer und auch Personen am Boden müssen auf das hohe Sicherheitsniveau vertrauen können, das bereits etabliert ist. Dies ist eine Herausforderung für künftige UAM-Systeme. UAM muss sich in das bestehende Luftfahrtsystem einfügen, das durch eine Vielzahl von Vorschriften und Normen gestützt wird. Die Integration von UAM in dieses System wird daher auch noch in kommenden Jahren eine große Herausforderung darstellen.

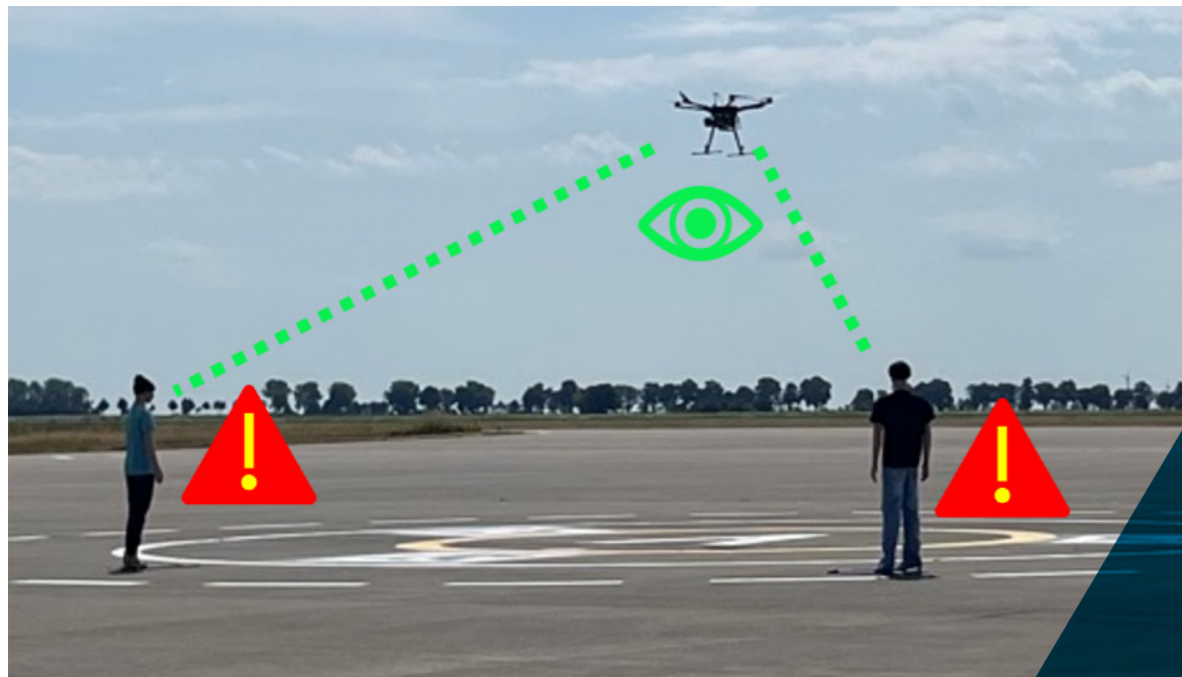
SICHERE AUTONOMIE

Mit der wachsenden Zahl von Lufttaxis wird der Bedarf an Automatisierung und Autonomie zunehmen. Die Technologie des maschinellen Lernens (ML) hat in den letzten Jahren enorm an Bedeutung gewonnen, auch in sicherheitskritischen Bereichen. Ein Beispiel dafür ist die Erkennung von Personen an einem Vertidrom während des Landeanflugs. Im Rahmen des HorizonUAM-Projekts wurde diese ML-Technologie entwickelt und in Flugversuchen

demonstriert. Die Erkennung erfolgt während des Fluges, direkt an Bord der Drohne. Solche Technologien werden einen Beitrag leisten sicherzustellen, dass keine Person am Boden während der Landevorgänge gefährdet wird und dadurch zukünftige Operationen sicherer machen.

Das vorgenannte ML-Modell wurde dabei als ein repräsentativer Anwendungsfall entwickelt, um das eigentliche Forschungsthema zu adressieren: Die sichere Integration von Autonomie- und insbesondere von ML-Technologie in die sicherheitskritische Domäne Luftfahrt.

Die Herausforderung besteht darin, dass ML-Technologie oft als Black-Box-System betrachtet wird. Dieser Technologie fehlt es an Transparenz, der Information wie sie im Detail funktioniert und wie Ergebnisse konkret berechnet werden. Konventionelle Software wird auf der Grundlage von Regeln und der Abfolge von Befehlen entwickelt. ML-Algorithmen hingegen werden mit vorgegebenen Daten trainiert, ganz ohne explizite Regeln. Dies steht im starken Gegensatz zur konventionellen Software. Daher



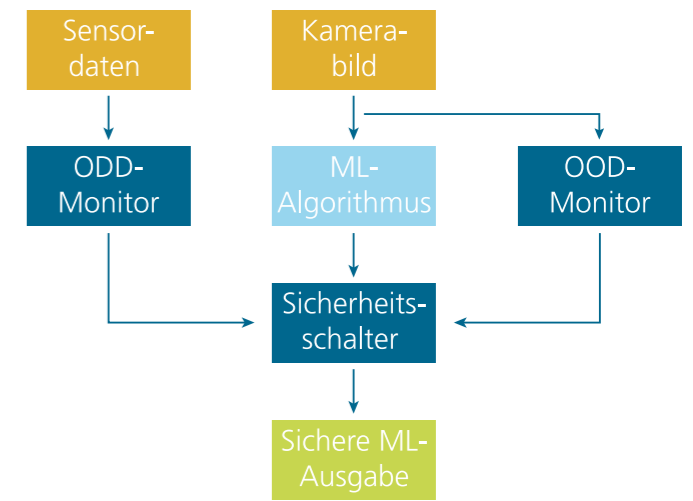
Das Bild zeigt den Landeanflug eines simulierten Lufttaxis auf einem Vertidrom. Zwei Personen werden von der bordseitigen Autonomie erkannt und der Landeanflug wird abgebrochen.

ist es schwierig, die bestehenden Standards für sicherheitskritische Software einzuhalten, die in der Luftfahrt etabliert sind. Standardisierungsorganisationen und Behörden entwickeln derzeit neue Richtlinien für die sichere Nutzung von ML-Technologie bzw. künstlicher Intelligenz (KI) für den Luftfahrtbereich. Die Europäische Agentur für Flugsicherheit (EASA) hat eine KI-Roadmap eingeführt, die erste Leitlinien zur Zertifizierung von ML-Systemen umfasst. Im Rahmen des Projekts wurde dieser Prozess der Regulierung und Standardisierung von ML begleitet. Das DLR begleitete dabei mehrere Standardisierungsaktivitäten und war Mitglied in relevanten Arbeitsgruppen zum Thema ML-Technologien.

ÜBERWACHUNG DES SICHEREN BETRIEBS

Eine wichtige Erkenntnis aus dieser Untersuchung ist die Bedeutung der kontinuierlichen Überwachung des Fluggeräts, und der Autonomiefunktionen durch einen unabhängigen Sicherheitsmonitor. Insbesondere wenn eine ML-Technologie ausgeführt wird, ist es wichtig zu überprüfen, ob die Eingänge, sowie die Ergebnisse in dem Zusammenhang des Fluges Sinn machen. Die gleiche Aufgabe übernimmt ein menschlicher Pilot, der die Situation ständig überwacht und auf anomales Verhalten prüft. Mit dem Safe Operation Monitoring hat das DLR eine automatisierte Version dieser wichtigen Überwachungsaufgabe entwickelt. Ein wichtiger Aspekt für die Nutzung von ML ist seine Operational Design Domain (ODD). Dieses Konzept beschreibt die Betriebsbedingungen und Umgebungseinschränkungen, unter denen die ML-Komponente sicher arbeiten soll. Durch die Überwachung der ODD während des Fluges kann die Vertrauenswürdigkeit der ML-Komponente beurteilt werden.

Architektur des sicheren ML-Betriebs



FLUGVERSUCHE

Im Rahmen des Projekts wurden mehrere Flugversuche durchgeführt. Ziel war es, Bilder zu erzeugen, die innerhalb und außerhalb der ODD liegen, und die Auswirkungen der ODD-Überwachung zu untersuchen.

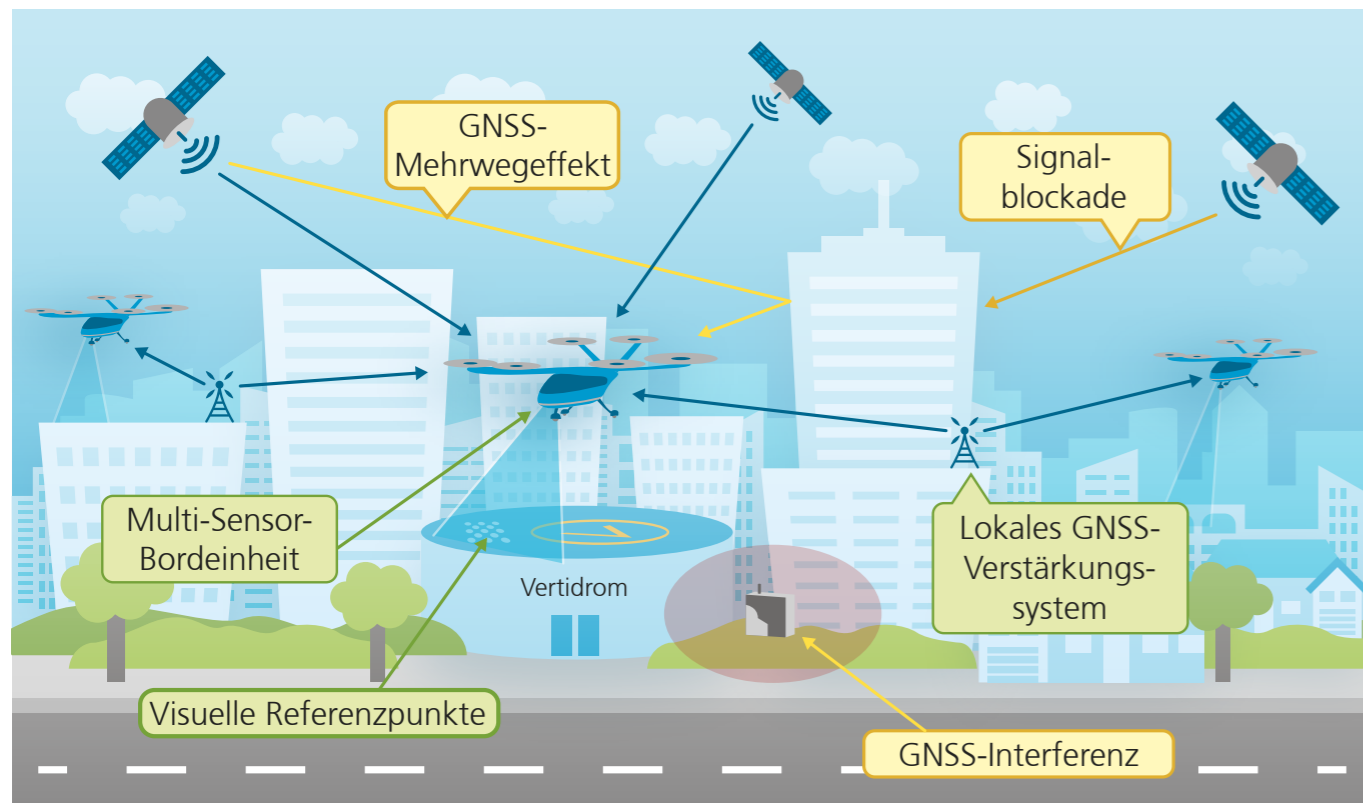
Das Testgebiet besteht aus zwei Vertidromen und einem Container-Aufbau mit sechs Einheiten, die eine verkleinerte Modellstadt darstellen. Die zu erkennenden Menschen wurden durch Schaufensterpuppen dargestellt, die auf Luftbildern echten Menschen sehr ähnlich sehen. Insgesamt wurden während der Kampagne zwölf Flüge zu verschiedenen Tageszeiten durchgeführt.

Die Flughöhe, die Fluggeschwindigkeit, der Kamerawinkel und die Positionierung der Schaufensterpuppen wurden zwischen den Flügen geändert. Bei allen Flügen wurden 6993 Bilder mit der Onboard-Kamera aufgenommen.



Visualisierung des Safe Operation Monitor (SOM)

Dieses Bild zeigt einen Videostream des SOM. Es gibt dem Fernpiloten oder Sicherheitspiloten alle notwendigen Informationen, um die Situation zu beurteilen und den Status der bordseitigen Autonomie zu bewerten. In diesem Fall erkennt die Autonomie zwei Personen auf dem Vertidrom.



KOMMUNIKATION

Für die Verwirklichung des künftigen UAM-Systems wird ein zuverlässiger Informationsaustausch auf der Grundlage einer robusten und effizienten Kommunikation zwischen allen Luftraumteilnehmern einer der Schlüsselfaktoren für einen sicheren Betrieb sein. Aufgrund der hohen Dichte an pilotierten und neuen ferngesteuerten und autonomen Luftfahrzeugen wird sich das Flugverkehrsmanagement im städtischen Luftraum grundlegend von dem heutigen unterscheiden.

Das Flugverkehrsmanagement für unbemannte Luftfahrzeuge (UTM) stützt sich auf im Voraus geplante und konfliktfreie Flugbahnen, kontinuierliche Überwachung und die bestehende Kommunikationsinfrastruktur, um Drohnen in den Luftraum zu integrieren. Um Kollisionen zu vermeiden und die Gesamtzuverlässigkeit zu erhöhen, fehlt den unbemannten Fluggeräten jedoch noch ein redundantes, übergeordnetes Sicherheitsnetz zur Koordinierung und Überwachung des Flugverkehrs, wie es in der heutigen zivilen Luftfahrt üblich ist. Zudem ist ein direkter und schneller Informationsaustausch auf Basis von Ad-hoc-Kommunikation notwendig, um die sehr kurzen Reaktionszeiten zur Vermeidung von Kollisionen und die hohe Verkehrsdichte zu bewältigen. Daher hat das DLR ein Drohnen-zu-Drohnen (D2D)-Kommunikations- und Überwachungssystem namens DroneCAST (Drone Communication and Surveillance Technology) entwickelt, das speziell auf die Anforderungen eines zukünftigen urbanen Luftraums zugeschnitten ist und Teil eines Multi-Link-Ansatzes sein wird.

In einem ersten Umsetzungsschritt hat das DLR zwei Drohnen mit Hardware-Prototypen des experimentellen Kommunikationssystems ausgerüstet. Anschließend wurden mehrere Flüge um die Modellstadt durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit der Hardware

zu bewerten und verschiedene Anwendungen zu demonstrieren, die auf eine robuste und effiziente Kommunikation angewiesen sind. Darüber hinaus präsentierte das DLR einen Multi-Link-Ansatz mit dem Schwerpunkt auf einem Ad-hoc-Kommunikationskonzept, das dazu beitragen soll, die Wahrscheinlichkeit von Kollisionen in der Luft zu verringern und damit die gesellschaftliche Akzeptanz der urbanen Luftmobilität zu erhöhen.

MULTI-SENSOR-NAVIGATION

Zuverlässige Navigationssysteme spielen eine wesentliche Rolle für den sicheren Betrieb von UAM. Da es sich um eine sicherheitskritische Anwendung handelt, erwarten die Fluggäste von den Fluggeräten nicht nur, dass diese ihre eigene Position kennen, um betriebliche Entscheidungen zu treffen, sondern auch, dass die Genauigkeit und Zuverlässigkeit dieser Positionsinformationen gewährleistet ist. Folglich muss das Navigationssystem sowohl eine hohe Genauigkeit als auch eine hohe Integrität bieten. In städtischen Umgebungen ist eine Navigation mit mehreren Sensoren erforderlich, da globale Satellitennavigationssysteme (GNSS) mit Herausforderungen wie einer geringen Anzahl von Satelliten in Sichtweite, Mehrwegeausbreitung aufgrund von umliegenden Gebäuden sowie Funkstörungen konfrontiert sind. Allerdings gibt es technische und normative Lücken bei der Zertifizierung für die Multisensornavigation, da es noch keine standardisierten Anforderungen an die Navigationsleistung für den UAM-Betrieb gibt und die Quantifizierung der Integrität für einige Sensoren eine technische Herausforderung bleibt. Deshalb hat das DLR eine Multisensor-Navigationsarchitektur für einen zuverlässigen Vertiport-Betrieb entwickelt. Die Architektur umfasst eine bordseitige Multisensor-Navigationseinheit mit GNSS-Empfänger, Trägheitssensoren, Kameras und Barometern sowie lokalen Referenzinfrastrukturen für die Sensoren. Darüber hinaus wurden Fortschritte bei der Anforderungsanalyse, der

Entwicklung und der ersten Validierung der Integritätsbeschreibung für das Multisensorsystem im Hinblick auf künftige Normen und zertifizierbare Navigationssysteme für den sicheren UAM-Betrieb erzielt.

CYBER-SICHERHEIT

UAM-Fluggeräte sind in hohem Maße auf vernetzte Systeme angewiesen, was die Anfälligkeit für Cyber-Bedrohungen erhöht. Die Fluggeräte benötigen daher robuste Cyber-Sicherheitsfunktionen, um Fluggäste, Infrastruktur und Datenintegrität zu schützen.

Darüber hinaus schafft das vernetzte UAM-System zahlreiche Schwachstellen, da jeder Verbindungspunkt ein potenzielles Einfallstor für Cyber-Angriffe darstellt. Die Sicherung der Kommunikationskanäle durch Verschlüsselung, sichere Protokolle und regelmäßige Audits ist unerlässlich, um das Risiko von Datenverletzungen und Systemkompromittierungen zu verringern.

Außerdem wirft die Erfassung und Übermittlung sensibler Daten durch UAM-Fluggeräte Fragen zum Datenschutz auf. Der Schutz von Fluggastdaten und die Einhaltung von Datenschutzbestimmungen sind von entscheidender Bedeutung. Der Einsatz von Datenverschlüsselung, Zugangskontrollen und Minimierungstechniken kann die Risiken für den Datenschutz mindern und das Vertrauen der Fahrgäste stärken.

Die Integration von UAM in die städtische Infrastruktur schafft auch neue Angriffsflächen und erfordert die Absicherung von Ladestationen und Flugverkehrsmanagementsystemen. Dies erfordert die Anwendung von Sicherheitsprinzipien und die Zusammenarbeit zwischen UAM-Entwicklern, Regulierungsbehörden und Cyber-Sicherheitsexperten, um branchenweite Standards und bewährte

Verfahren festzulegen. HorizonUAM befasste sich mit den ersten Entwicklungsschritten eines Sicherheitsperimeters für UAM, um die Sicherheit bereits in der Entwurfsphase und darüber hinaus ganzheitlich und systemweit zu berücksichtigen.



FAZIT

Das Ziel ist es, das hohe Sicherheitsniveau in der Luftfahrt beizubehalten und gleichzeitig neue Arten von UAM-Operationen zu ermöglichen. Dies ist eine Herausforderung, da UAM neue Anforderungen an Autonomie, Kommunikation, Navigation und Sicherheit stellt. Die vom DLR durchgeführte Forschung erleichtert die Nutzung neuer Konzepte und Technologien, um sichere und geschützte UAM-Operationen zu etablieren.

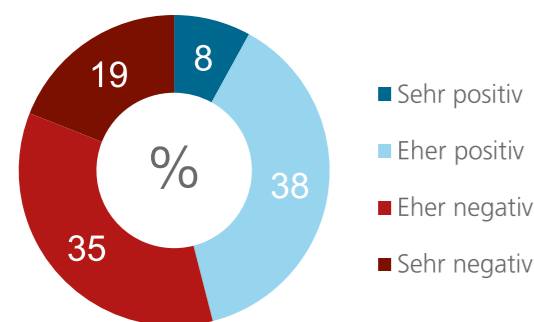


Gesellschaftliche Akzeptanz

Die gesellschaftliche Akzeptanz wird als Schlüssel für eine erfolgreiche Umsetzung von UAM angesehen. Um das derzeitige Akzeptanzniveau zu ermitteln und den Menschen zu ermöglichen, sich eine Zukunft vorzustellen, in der die urbane Luftmobilität zum Alltag gehört, wurden eine großangelegte Telefonumfrage und Experimente mit immersiven Lufttaxisimulatoren durchgeführt.

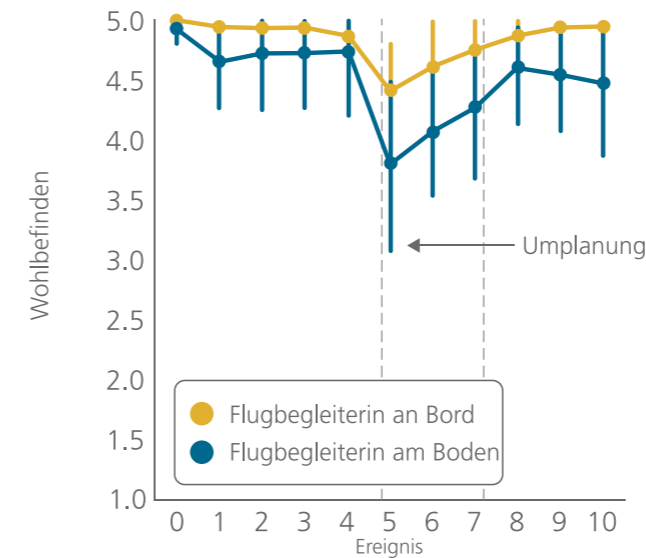
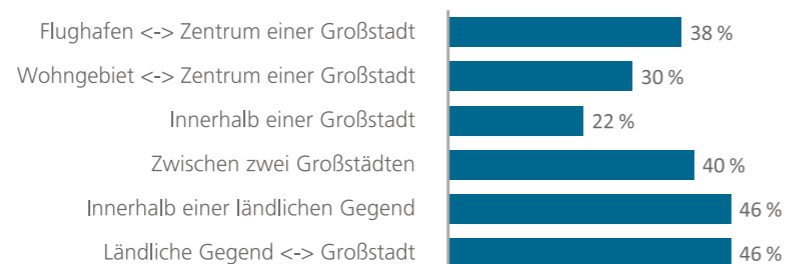
Ende 2022 wurden computergestützte Telefoninterviews in der deutschen Bevölkerung durchgeführt. Insgesamt 1001 Interviews fanden statt, die im Durchschnitt 21 Minuten dauerten (durchgeführt von BIK Aschpurwis+Behrens GmbH). Die Umfrageteilnehmenden wurden nach ihrer Einstellung zu zivilen Drohnen im Allgemeinen und zu Lufttaxis im Besonderen befragt. Insgesamt wurden zivile Drohnen eher positiv bewertet, während sich für Lufttaxis in der Umfrage kein solcher Trend abzeichnete. Die Antworten bezüglich der Einstellung zu Lufttaxis reichten von sehr negativ bis sehr positiv. **46 % der Teilnehmenden hatten eine positive Einstellung zu Lufttaxis, 46 % wären bereit, ein Lufttaxi in einem ländlichen Gebiet zu benutzen, und 46 % wären bereit, damit zwischen einem ländlichen Gebiet und einer Großstadt zu reisen.**

Einstellung gegenüber Lufttaxis



Zusätzlich wurde eine Virtual-Reality-Studie zum Wohlbefinden von Passagieren und Passagierinnen in einem autonomen Lufttaxi durchgeführt. 30 Teilnehmende erlebten einen Flughafen-Shuttle-Flug in der Stadt Hamburg in einem Mixed-Reality-Lufttaxi-Simulator. Untersucht wurden die Einflüsse einer Flugbegleiterin an Bord und einer Umleitung des Fluges auf das Wohlbefinden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Anwesenheit einer Flugbegleiterin keinen statistisch signifikanten Einfluss auf das Wohlbefinden der Teilnehmenden hatte. 16 von 30 Teilnehmenden gaben an, dass eine Flugbegleiterin an Bord nicht notwendig sei. Dennoch hielten acht Teilnehmende die Anwesenheit einer Flugbegleiterin in der Einführungsphase für sinnvoll und neun Teilnehmende berichteten eine Erhöhung der wahrgenommenen Sicherheit durch die Flugbegleiterin. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass das Szenario mit Umplanung mit einer Begleitperson an Bord im Vergleich zum Szenario ohne ein zusätzliches Besatzungsmitglied an Bord besser bewertet wurde. In Bezug auf den Informationsbedarf waren die drei wichtigsten Informationen die Reisezeit, Änderungen der Flugroute aufgrund von Hindernissen oder anderem Verkehr und die Flugroute.

Bereitschaft zur Lufttaxinutzung



Eine zweite Virtual-Reality-Studie befasste sich mit dem Wohlbefinden von Passanten und Passantinnen, wenn Lufttaxis im Luftraum simuliert wurden. 47 Teilnehmende erlebten zivile Drohnen, die über Braunschweig flogen, sowie die Landung eines Lufttaxis aus der Perspektive von Fußgängern, die durch die Stadt gehen. **Die Studie zeigte, dass das Wohlbefinden höher war, wenn weniger Drohnen zu sehen waren und wenn sie in größerer Höhe flogen. Das Wohlbefinden war leicht reduziert, wenn Drohnen oder ein Lufttaxi zu sehen waren, im Vergleich zu ausschließlich konventionellem Verkehr. Weitere wichtige Faktoren für die gesellschaftliche Akzeptanz werden wahrscheinlich die Sicherheit, die Bezahlbarkeit, die Erreichbarkeit, die Umweltfreundlichkeit und die Lärmbelastung sein, die durch UAM entstehen könnte.**

SICHERHEIT

Bedenken hinsichtlich der Sicherheit können ein erstes Hindernis für die Einführung von UAM sein. Es besteht die Sorge, dass UAM-Nutzende, andere Luftraumnutzende und Personen am Boden gefährdet werden könnten. Vorschriften und Normen müssen auf die sichere Anwendung von UAM zugeschnitten werden.

BEZAHLBARKEIT

Es gibt Bedenken, dass UAM für Haushalte mit niedrigem und mittlerem Einkommen nicht erschwinglich sein könnte. Im Bemühen um eine größere soziale Akzeptanz sollten die Dienste von UAM nicht auf die „wenigen Wohlhabenden“ beschränkt werden. Da Betriebskosten und Ticketpreise eng miteinander verbunden sind, besteht die Herausforderung darin, die Betriebskosten zu senken. Gelingt es nicht, die Betriebskosten im Vergleich zu Hubschraubern deutlich zu senken, wird die Bezahlbarkeit erschwert und damit die Marktakzeptanz gefährdet.

FAZIT

In der deutschen Bevölkerung ist die Wahrnehmung von Lufttaxis zwischen positiven und negativen Bewertungen ausgeglichen. Entscheidend für die Zukunft des potentiellen UAM-Marktes sind daher durchdachte Ansätze bei der Gestaltung der Fluggeräte und Vertidrome, der Konfiguration des Luftverkehrssystems und der Integration in bestehende Systeme. Um eine positive Resonanz zu erzielen, müssen die weitreichenden Auswirkungen eines neuen Verkehrssystems auf die Bürger und Bürgerinnen berücksichtigt werden.

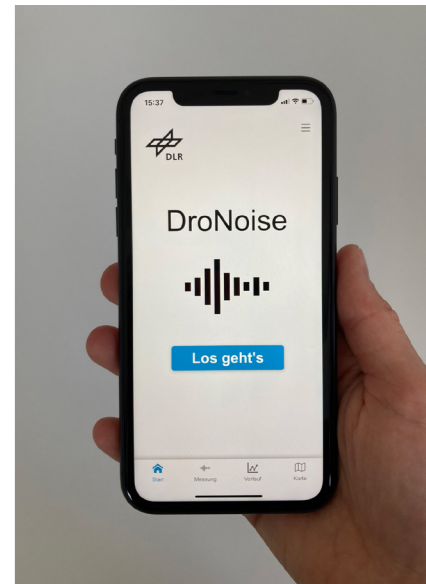
ERREICHBARKEIT

Dies bezieht sich auf die Möglichkeit, vom Ausgangspunkt einer Reise den Abflug-Vertidrom und vom Ankunfts-Vertidrom das eigentliche Reiseziel schnell zu erreichen. Analysen haben gezeigt, dass die An- und Abfahrtszeiten zu und von den Vertidromen (sowie die Zeiten für den Wechsel des Verkehrsträgers) die Attraktivität und damit die Nachfrage nach UAM stark beeinflussen. Die Zugänglichkeit kann verbessert werden, indem die Vertidrome näher an Zentren mit hoher Nachfrage platziert werden oder indem die Reisezeit zu den Vertidromen reduziert wird. Die Platzierung von Vertidromen ist eine Optimierungsaufgabe: Es muss ein Gleichgewicht zwischen den Standortanforderungen, den Kosten und anderen Aspekten wie Lärmbelastung und visueller Beeinträchtigung der Nachbarn gefunden werden, um die gesellschaftliche Akzeptanz nicht zu gefährden.

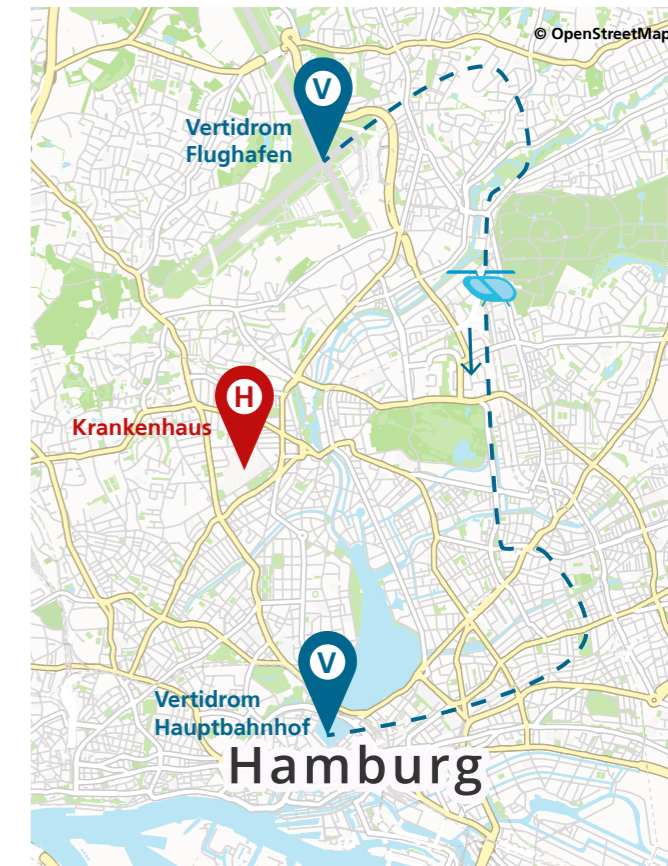
UMWELTFREUNDLICHKEIT

Ziel einer umweltfreundlichen Mobilität ist es, die Mobilität von Menschen und Gütern aufrechtzuerhalten und zu gewährleisten, ohne Mensch und Umwelt in Bezug auf Treibhausgasemissionen, Luftschadstoffe, Lärm, Landnutzung, Wildtiere und Ressourcenverbrauch übermäßig zu belasten. Lärm wird als ein Risiko von UAM wahrgenommen. Dazu gehört der Lärm, den die Fluggeräte bei Start, Landung und Flug erzeugen.

Es wurde eine Smartphone-App namens DroNoise entwickelt und erprobt. Diese App ermöglicht es, den Lärm und die subjektive Belästigung durch unbemannte Fluggeräte zu messen und zu bewerten. Diese App wurde bei Live-Drohnenflügen in Cochstedt im Jahr 2023 getestet. Sie könnte als Grundlage für die Erstellung von Lärmbelastungskarten dienen. Anhand solcher Karten könnten Flugrouten und -profile so angepasst werden, dass die negativen Lärmauswirkungen auf die Anwohner und Anwohnerinnen minimiert werden.



Die Flugversuche haben gezeigt, dass die Smartphone-App eine Möglichkeit sein kann, die Öffentlichkeit in die Planungsprozesse für den zivilen Drohnenverkehr einzubeziehen.



Demonstration

WAS IST U-SPACE?

U-Space, wie von der Europäischen Kommission definiert, ist eine Reihe neuer Dienste, die auf einem hohen Grad an Digitalisierung und Automatisierung von Funktionen und spezifischen Verfahren beruhen, um eine sichere und effiziente Nutzung des Luftraums für eine große Anzahl unbemannter Luftfahrzeuge zu ermöglichen, die automatisch und außerhalb der Sichtweite betrieben werden.

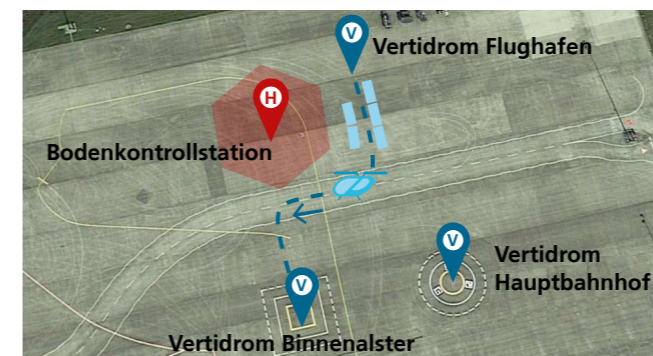
U-Space, auch UTM (Unmanned Aircraft System Traffic Management) genannt, ist somit die Zukunft der Luftraumintegration für Drohnen und Lufttaxis in Europa. U-Space-Dienste befinden sich in der Entwicklung, sind jedoch noch nicht kommerziell verfügbar. Im Rahmen des HorizonUAM-Projekts wurde ein zentraler U-Space-Cloud-Dienst durch einen lokalen Nachrichten-Server simuliert.

VERTIDROM-MANAGEMENT

Es wurde ein prototypisches Vertidrom-Management-Tool entwickelt, um die Flugplanung und Stafflung von Lufttaxiflügen zu demonstrieren. Der Vertidrom-Manager ist vollständig in U-Space integriert und empfängt Echtzeit-Informationen über Flugpläne, einschließlich Start- und Landeanfragen sowie Notfallmeldungen. Zusätzliche Informationen, die von anderen U-Space-Diensten stammen (z. B. Wetterinformationen), können auf Anfrage abgerufen werden. Die U-Space Cloud-Dienste wurden über einen lokalen Nachrichten-Server mit dem Protokoll MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) simuliert. Die Integration wurde in einer skalierten Flugversuchsumgebung mit Multikoptern (< 15 kg), die Passagiertaxis darstellen, demonstriert.

DIE ZUKUNFT DER AUTOMATISIERUNG

Das vorgestellte Vertidrom-Management-Tool stützt sich auf einen menschlichen Operator, der die eingehenden Anfragen bearbeitet. Zukünftige Entwicklungen sehen einen höheren Automatisierungsgrad auf der Fluggeräteseite, aber auch auf der Seite des Fluglotsen vor. In der zukünftigen Forschung wird die Integration an bestehenden Flughäfen und die Schnittstelle zum konventionellen Flugverkehrsmanagement ebenfalls untersucht werden.



SKALIERUNG DES HAMBURGER REFERENZSZENARIOS

Der Vertidrom-Manager und seine Integration in eine prototypische U-Space-Umgebung wurden erfolgreich in Live-Demonstrationen getestet, die zwischen Mai und Juli 2023 am Nationalen Erprobungszentrum für unbemannte Luftfahrtsysteme in Cochstedt, durchgeführt wurden. Eine Modellstadt im Maßstab 1:4 wurde aus Schiffscontainern errichtet und Vertidrom-Landeflächen wurden auf dem Boden vorgesehen. Der Anwendungsfall Flughafen-Shuttle wurde für die Demonstration ausgewählt, ähnlich einem Szenario, das zuvor in einer Virtual-Reality-Passagierstudie bewertet worden war.

Die Demonstration umfasste auch ein Szenario, bei dem ein Flug zu einem alternativen Landeplatz umgeleitet wurde, da die Landefläche am Ziel-Vertidrom blockiert war. Ein anderes Luftfahrzeug erkannte einen Passagier auf der Landefläche, unterstützt durch einen zur Laufzeit überwachten maschinellen Lernalgorithmus zur Erkennung von Personen in Bilddaten. Multi-Sensor-Navigationsalgorithmen wurden zur Navigation in städtischen Schluchten eingesetzt. Die Demonstrationen bewiesen erfolgreich die Funktionsfähigkeit des prototypischen Vertidrom-Managers.

FAZIT

Eine begrenzte Anzahl von Lufttaxis könnte von konventionellen Fluglotsen kontrolliert werden. Der Einsatz von U-Space für das Management von Vertidromen, wie oben gezeigt, hat jedoch den Vorteil, dass das System für Lufttaxioperationen in hoher Luftraumdichte skalierbar ist. Der Vorteil von U-Space liegt im hohen Grad der Digitalisierung, der dem System zu Grunde liegt.

Zukunftsaussichten

Das DLR-Projekt HorizonUAM hat zu zwei Aspekten der UAM-Forschung beigetragen: der Entwicklung von Einzelkomponenten sowie deren Harmonisierung für den Einsatz in einem optimierten Gesamtsystem. Es wurde Fachwissen über UAM-Fluggeräte, die zugehörige Infrastruktur, den Betrieb von UAM-Diensten und die gesellschaftliche Akzeptanz des künftigen städtischen Luftverkehrs zusammengetragen. Insbesondere die Komplexität der urbanen Luftmobilität mit ihren Systemabhängigkeiten wurde im Rahmen des Projekts berücksichtigt.

Die Ergebnisse von HorizonUAM zeigen, dass UAM in naher Zukunft technisch machbar sein könnte. Bevor UAM jedoch auf breiter Basis eingeführt werden kann, müssen die folgenden zentralen Herausforderungen bewältigt werden:

Rentabilität: Für eine erfolgreiche Einführung durch Hersteller und Investoren, rege Nutzung durch Kunden und breite Akzeptanz ist es entscheidend, dass Lufttaxidienste auch bei niedrigen Ticketpreisen wirtschaftlich tragfähig sind. Daher besteht die Herausforderung darin, die direkten und indirekten Betriebskosten des UAM-Transportsystems zu minimieren. Es müssen geeignete Geschäftsmodelle entwickelt werden, um UAM über den Nischenmarkt hinaus attraktiv zu machen. Der sich

entwickelnde regulatorische Rahmen für UAM muss international weiterentwickelt und harmonisiert werden, um Sicherheit und ökologische Nachhaltigkeit zu gewährleisten, aber auch Skalierbarkeit zu ermöglichen, damit UAM finanziell umsetzbar ist.

Die Komplexität des UAM-Systems: Um ein hocheffizientes UAM-System aufzubauen, müssen die Komplexität bewältigt und bestehende Wissenslücken geschlossen werden, um Unsicherheiten zu beseitigen. Die Komplexität führt zu einer komplizierten Verteilung der Zuständigkeiten zwischen den UAM-Akteuren, einschließlich der Nutzer, der Industrie, der Regierung, der öffentlichen Einrichtungen, der Regulierungsbehörden und der Gemeinden. All diese Akteure müssen zusammenarbeiten, um das Verkehrssystem der Zukunft zu gestalten. Insbesondere die Wechselwirkungen der einzelnen UAM-Systemkomponenten, ihre Abhängigkeiten untereinander und die Auswirkungen auf die Realisierbarkeit des Gesamtsystems müssen weiter untersucht werden, um ein wirtschaftlich tragfähiges und skalierbares UAM-System zu entwickeln, das nicht nur für die Nutzer, sondern auch für die Gesellschaft im Allgemeinen einen maximalen Nutzen bringt.

Gesellschaftliche Akzeptanz: Die Akzeptanz durch die Öffentlichkeit kann einer der kritischen Faktoren bei der Einführung von UAM sein. Es müssen geeignete Maßnahmen ergriffen werden, um Herausforderungen wie Lärm, tatsächliche und wahrgenommene Sicherheit, hoher Energieverbrauch, visuelle Beeinträchtigung und Flächenverbrauch zu bewältigen. Um einen nahtlosen Transport zu ermöglichen, ist die Integration von UAM in bestehende Verkehrsnetze unerlässlich und kann die Effizienz des gesamten Verkehrssystems verbessern, was für die Nutzer und die Gesellschaft von Vorteil ist. Es ist von größter Bedeutung, die Öffentlichkeit über die Chancen der städtischen Luftmobilität und ihre Auswirkungen zu informieren. Die Städte und Gemeinden müssen aktiv in die Gestaltung eines potenziellen künftigen Verkehrssystems einbezogen werden. Daher sollte die UAM-Branche auch Informationen bereitstellen, die auf wissenschaftlichen Analysen beruhen, aber auf ein nicht-wissenschaftliches Publikum zugeschnitten sind. Um die breite Öffentlichkeit mit UAM vertraut zu machen, bieten sich Praxis-Demonstrationen an.



Das Projekt HorizonUAM hat abschließend gezeigt, dass UAM die bestehenden Verkehrssysteme in Zukunft ergänzen kann. Letztlich kommt es darauf an, dass die einzelnen Systemkomponenten so zusammenarbeiten, dass das Gesamtsystem sowohl wirtschaftlich machbar als auch gesellschaftlich akzeptabel ist.

Das DLR wird weiter an der Idee der urbanen Luftmobilität forschen. Die zukünftige Forschung wird durch die Berücksichtigung neuer multimodaler und regionaler Anwendungsfälle erweitert. So wird der ursprüngliche urbane Anwendungsbereich von urbaner Luftmobilität zu fortschrittlicher Luftmobilität (Advanced Air Mobility, AAM) und darüber hinaus zu innovativer Luftmobilität (Innovative Air Mobility, IAM) erweitert, mit dem Gesamtziel der Integration von Drohnen- und Lufttaxidiensten in bestehende Verkehrssysteme.

DIESES PROJEKT IST DAS ERGEBNIS DER ZUSAMMENARBEIT DER 10 DLR-INSTITUTE UND EINRICHTUNGEN:

DLR-Institut für Flugführung (Kordinator)
DLR-Institut für Antriebstechnik
DLR-Institut für Flugsystemtechnik
DLR-Institut für Luftverkehr
DLR-Institut für Kommunikation und Navigation
DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin
DLR-Institut für Physik der Atmosphäre
DLR-Institut für Systemarchitekturen in der Luftfahrt
DLR-Institut für Instandhaltung und Modifikation
Nationales Erprobungszentrum für unbemannte Luftfahrtsysteme

Mehr über das Projekt HorizonUAM und weitere wissenschaftliche Veröffentlichungen finden Sie auf

[HORIZONUAM.DLR.DE](https://horizonuam.dlr.de)





DLR

**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**
German Aerospace Center

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

HERAUSGEBER:

**Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
German Aerospace Center (DLR)**

ADRESSE:

Linder Höhe, 51147 Köln
Telefon: +49 2203 601-0
E-Mail: contact-dlr@DLR.de

www.dlr.de

Alle Bilder sind Eigentum des DLR (CC-BY 3.0), sofern nicht anders angegeben.
Titelbild: DLR

Version: 09/2024