



Ministerium für Verkehr
Baden-Württemberg

d-fine



Potenzialanalyse für den Einsatz von Lufttaxis in Baden-Württemberg

Abschlussbericht

Impressum

Auftraggeber

Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg

Referat 55 Luftverkehr

Dorotheenstraße 8

70173 Stuttgart

<https://vm.baden-wuerttemberg.de/de/mobilitaet-verkehr>

Auftragnehmer

d-fine GmbH

An der Hauptwache 7

60313 Frankfurt am Main

www.d-fine.de

Stand: 12/2023

MANAGEMENT SUMMARY

Advanced Air Mobility (AAM), oder umgangssprachlich der Personen-transport durch „Lufttaxi“, befindet sich kurz davor, als innovative Mobilitätsform Teil unseres Alltags werden zu können. Beispielsweise sollen im Sommer 2024 bei den Olympischen Spielen in Paris, ab Ende 2024 in Rom sowie 2026 bei den Olympischen Winterspielen in Mailand erste Lufttaxi-Services angeboten werden. Baden-Württemberg als starke Wirtschaftsregion, inklusive AAM-Industrie, sowie als beliebtes Tourismusziel mit existierender Luftfahrtinfrastruktur, besitzt interessante Voraussetzungen für die Integration von AAM.

Dies ist die Motivation dafür, mit dem vorliegenden Bericht eine Potenzialanalyse für den Einsatz von AAM in Baden-Württemberg zu präsentieren. Die Analyse erstreckt sich über mehrere Dimensionen, darunter Marktanalyse, Einsatzmöglichkeiten, Standortfaktoren, Emissionsauswirkungen, Netzwerkvorschläge sowie Hochlauf-Szenarien mit Preisentwicklungen bis 2037. Basierend auf diesen modell- und datengetriebenen Analysen ergeben sich folgende Hauptaussagen zum Potenzial von AAM in Baden-Württemberg.

Anwendungsfälle für AAM mit Mehrwert für den Nutzer existieren

Aktuelle Umfragen in der Bevölkerung zeigen Interesse und Nutzungsbereit-

schaft für AAM-Services. Als potenzielle Nutzergruppen werden Premiurlauber, Erlebnistouristen, Geschäftsreisende, Berufspendler sowie die öffentliche Hand identifiziert. Wichtigste Erwartungen sind je nach Nutzergruppe vor allem Reisezeitverkürzung, Komfort, sowie die lokale Emissionsfreiheit. Die touristische Nutzung hat insbesondere während der Markteingangsphase ein hohes Potenzial, da sie für Early Adopter interessant ist und auch unter starker Reichweitenlimitierung und höheren Preisen bereits Rundflüge angeboten werden können.

Netzwerkaufbau in Baden-Württemberg herausfordernd

Basierend auf den Standortanalysen und den ermittelten Use Cases sollte ein integriertes AAM-Netzwerk fokussiert werden. Dieses Netzwerk verbindet identifizierte Schlüsselstandorte, die eine effiziente Abdeckung des Bundeslandes für alle Nutzergruppen ermöglichen – die Standortanalyse auf Landkreisebene berücksichtigt dabei relevante Faktoren wie Bevölkerungsdichte, touristische Schwerpunkte, Infrastruktur und Wirtschaftsstärke. Durch die Integration vieler Stakeholder und die Notwendigkeit von hohen Investitionsausgaben wird sich der Aufbau eines solchen Netzwerks als herausfordernd darstellen.

Um den Erfolg zu erhöhen, kann mit einer ersten Pilotstrecke auf der Kurzstrecke begonnen werden, um Erfahrungen zu sammeln, und das Netzwerk anschließend mit der steigenden Verfügbarkeit von eVTOLs mit höherer Reichweite und der Nutzung existierender Infrastruktur ausgebaut werden.

Erzielbare Preise in einem Netzwerk adressieren vor allem Premiumkunden

Ein erfolgreicher Aufbau eines AAM-Netzwerks mit Fokus auf regionalen Flügen, hat die Chance kompetitive Preise für Flugtaxi-Services zu etablieren. Maßgeblich ist dabei die Erhöhung der Kapazität von elektrisch betriebenen senkrecht startenden und landenden Flugzeugen (eVTOLs), eine hohe Auslastung auf Flügen und die Minimierung von Leerflügen. Vor allem auf Langstrecken > 50km können bei hoher Kapazität und Auslastung der eVTOLs kompetitive Preise im Vergleich zu Taxis erzielt werden. Diese

liegen im Zeitraum 2027-2037 schätzungsweise im einstelligen €-Bereich pro Personenkilometer, zuzüglich einer Grundgebühr von durchschnittlich 35-55€.

Kein relevanter Beitrag zur Verkehrswende in Sicht

Eine eingehende Emissionsanalyse zeigt, dass der Einsatz von AAM nur unter bestimmten Bedingungen positive Auswirkungen auf die Umwelt haben kann. Durch den Umstieg auf elektrisch betriebene Luftfahrzeuge können Treibhausgasemissionen im Vergleich zu PKWs mit Verbrennungsmotoren nur dann reduziert werden, wenn möglichst große Strecken in hoher Sitzauslastung zurückgelegt werden. Im Vergleich zu elektrischen PKWs können keine Energie- und Emissionseinsparungen erzielt werden. Auf kurzen Strecken oder mit nur 1-2 Passagieren je Flug sind die Emissionen des Flugtaxis jedoch trotzdem gegenüber dem Helikopter konkurrenzfähig.

INHALTSVERZEICHNIS

01.	Einleitung.....	5
02.	Grundlagen der Advanced Air Mobility.....	6
02.01	Marktanalyse.....	6
02.01.01	Zertifizierung.....	6
02.01.02	Markt- und Reichweitenanalyse	8
02.02	Notwendige Bodeninfrastruktur.....	11
02.02.01	Vertiports	11
02.02.02	Erwartete Regulatorik für Vertiports	12
02.02.03	Weitere Vertiport-Konzepte	13
02.03	Nutzergruppen.....	14
02.03.01	Studien zur Nutzerakzeptanz und -anforderungen	14
02.03.02	Relevante Nutzergruppen	16
02.03.02.01	Touristische Nutzung	16
02.03.02.02	Wirtschaftsstandort Baden-Württemberg.....	19
02.03.02.03	Öffentliche Hand.....	20
02.04	Identifizierte Use Cases in der Region.....	21
02.04.01	Use Case: Flughafen-/ICE-Shuttle	21
02.04.02	Use Case: Touristischer Rundflug.....	22
02.04.03	Use Case: Geschäftsreisen Stuttgart und Rhein-Neckar	22
02.04.04	Use Case: Berufspendler.....	23
02.04.05	Use Case: Öffentliche Hand.....	23
03.	Bewertung des Potenzials von AAM in Baden-Württemberg	25
03.01	Standortanalyse	25
03.01.01	Landkreis-Scoring-System.....	25
03.01.02	Identifizierte Urbane und Regionale Cluster	29
03.01.03	Weitere Einflussfaktoren.....	29
03.01.03.01	Touristische „Pull“-Faktoren	29
03.01.03.02	Vorhandene Infrastruktur	30
03.01.03.03	Anbindung Ländlicher Regionen wie Nord-Ost-Baden:	30
03.02	Emissionsanalyse	32
03.02.01	Energieerzeugung und -nutzung.....	33
03.02.02	Emissionen aus Herstellung und Wartung	37
03.02.03	Entlastungspotenzial.....	38

03.03	Wirtschaftlichkeits- und Szenarioanalyse	40
03.03.01	Allgemeine Geschäftsmodelle im AAM-Kontext.....	40
03.03.02	Annahmen der Wirtschaftlichkeitsanalyse für ein Netzwerk in Baden- Württemberg	41
03.03.03	Infrastruktur	42
03.03.03.01	Multimodale Vernetzung	45
03.03.04	Vorschlag eines möglichen Netzwerks	48
03.03.05	Szenarioanalyse	50
03.03.06	Deep Dive Metropolregion Stuttgart	57
03.03.07	Deep Dive UAM-Case Friedrichshafen-Konstanz	60
03.03.08	Deep Dive RAM-Case Friedrichshafen-Stuttgart	62
04.	Gesamtbewertung und Handlungsempfehlungen	66
04.01	Handlungsempfehlungen	67
04.02	Ausblick für weitere Forschungsmöglichkeiten	68
05.	Bibliografie	71

01. EINLEITUNG

Die Entwicklung der Innovationen im Luftverkehr nimmt weiter Fahrt auf und die Marktreife wichtiger Produkte steht kurz bevor. Advanced Air Mobility (AAM) ist dabei ein allgemeines Konzept, welches neben innovativen Fluggeräten wie Flugtaxis auch die Integration dieser in den bestehenden Luftverkehr umfasst. Ziel ist die Effizienz beim Transport von Menschen und Gütern zu steigern. [1] Dabei steht die praktische und erfolgreiche Einführung von elektrisch angetriebenen, senkrecht startenden und landenden Flugzeugen („electric Vertical Take-Off and Landing aircraft“, eVTOLs) vor einer Vielzahl von Herausforderungen, die durch vier entscheidende Schlüsselfaktoren geprägt sind. Technologische Grundlagen, regulatorische Rahmenbedingungen, soziale Akzeptanz und Infrastruktur spielen dabei eine maßgebliche Rolle.

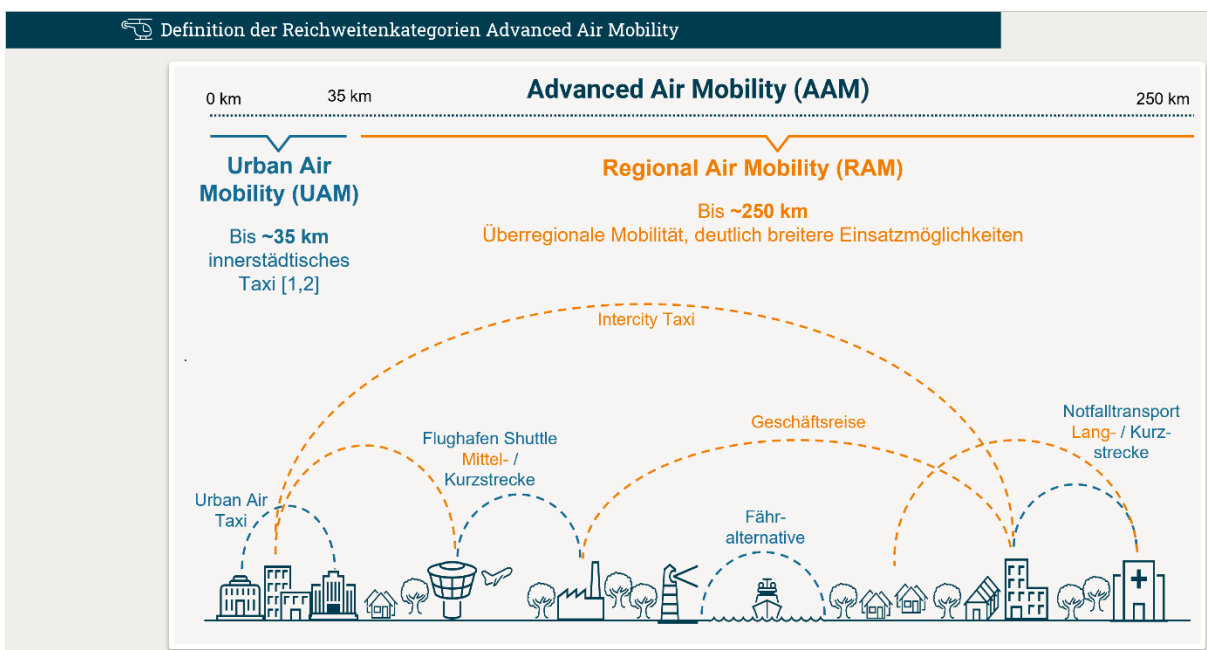


Abbildung 1: Einsatzgebiete von Advanced Air Mobility, unterteilt in Urban (blau) und Regional Air Mobility (orange) [2], [3]

Als starke Wirtschaftsregion, inklusive ansässigen Unternehmen in der AAM-Industrie, sowie als beliebtes Tourismusziel mit existierender Luftfahrtinfrastruktur, besitzt Baden-Württemberg interessante Grundvoraussetzungen für die Integration von AAM. Die vorliegende Analyse bewertet das Potenzial von AAM über mehrere Dimensionen: von einer allgemeinen Marktanalyse, konkreten Einsatzmöglichkeiten, Standortfaktoren bis hin zu Emissionsauswirkungen und dem möglichen Beitrag zur Verkehrswende. Abschließend werden noch Vorschläge für den Aufbau von AAM-Netzwerken sowie Hochlauf-Szenarien mit Preisentwicklungen bis 2037 betrachtet. Die auf diesen daten- und modellgetriebenen Analysen basierenden Erkenntnisse werden im Zuge einer Gesamtbewertung zusammengefasst und Handlungsempfehlungen für die Region Baden-Württemberg abgeleitet.

02. GRUNDLAGEN DER ADVANCED AIR MOBILITY

Dieses Kapitel beleuchtet die Schlüsselfaktoren für AAM, darunter technologische Grundlagen, regulatorische Rahmenbedingungen, soziale Akzeptanz und Infrastruktur, eingehend, um ein umfassendes Verständnis für die Dynamik der eVTOL-Markteinführung zu schaffen, sowohl für den Einsatz innerhalb der Urban Air Mobility (UAM)¹ als auch der Regional Air Mobility (RAM). Es hebt die Vielfalt der globalen Herstellerlandschaft hervor, mit besonderem Fokus auf Hersteller mit geplantem Markteingang zwischen 2024-2026, sowie auf die für eVTOLs notwendige Zertifizierung. Zuerst wird die Notwendigkeit von Vertiports als Start- und Landeplätze sowie die Nutzung bestehender Infrastrukturen betrachtet. Schließlich werden verschiedene Einflussfaktoren für eine breite Nutzerakzeptanz sowie mögliche Nutzergruppen und Use Cases mit dem Fokus auf Baden-Württemberg herausgearbeitet.

02.01 MARKTANALYSE

Die Marktlage für elektrisch betriebene senkrecht startende und landende Flugzeuge, kurz eVTOLs, hat sich in den letzten Jahren rasant entwickelt mit mehreren hundert Startups und Projekten weltweit. Besonders in Europa hat sich ein vielversprechendes Umfeld für diese innovative Technologie herausgebildet. Die europäischen Länder haben die Bedeutung von eVTOLs als innovative Mobilitätsform erkannt und investieren verstärkt in Forschung, Entwicklung und Regulierung, um diese neuen Fluggeräte sicher und effizient in den Luftverkehr zu integrieren. Zahlreiche Unternehmen in Europa haben sich auf die Entwicklung und Produktion von eVTOLs spezialisiert und arbeiten an Prototypen und Konzepten für Luftverkehre und Lufttaxidienste. Der Fokus auf die eVTOL-Technologie hat das Interesse von Investoren und Start-ups in der Region geweckt und könnte Europa zu einem bedeutenden Akteur auf dem globalen eVTOL-Markt machen. Bis Lufttaxis in Europa im regulären Betrieb fliegen können sind neben technischen Hürden auch regulatorische Vorgaben zu erfüllen, um die notwendige Zulassung in Form einer Zertifizierung zu erhalten. Im Folgenden wird zunächst der in Europa notwendige Zertifizierungsprozess und anschließend die aktuellen und vielversprechendsten Entwicklungen im eVTOL-Markt erläutert.

02.01.01 ZERTIFIZIERUNG

Die Zertifizierung von eVTOLs ist ein entscheidender Schritt, um diese neuen Fluggeräte sicher und legal in den kommerziellen Luftverkehr zu integrieren. In Europa sind die European Union Aviation Safety Agency (EASA) und nationale Luftfahrtbehörden

¹ Entgegen der direkten Wortbedeutung von „urban“ wird UAM in der Literatur und darüber hinaus auch als allgemeine Bezeichnung des Kurzstreckeneinsatzes von AAM auch außerhalb des urbanen Kontexts verwendet – so auch in diesem Bericht.

maßgeblich für die Zertifizierung von eVTOLs zuständig. Weitere wichtige Zertifizierungsbehörden sind die Federal Aviation Administration (FAA) für Luftfahrt in den USA, die Civil Aviation Authority (CAA) in UK, das Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) für japanische eVTOLs und die Civil Aviation Administration of China (CAAC). Die Herausforderung besteht darin, die bestehenden Luftfahrtregeln und -standards an die einzigartigen Merkmale der eVTOLs anzupassen, einschließlich ihres elektrischen Antriebs und ihrer senkrecht startenden und landenden Fähigkeiten. Die EASA arbeitet eng mit Herstellern und Industriepartnern zusammen, um Zertifizierungsprozesse zu entwickeln, die sowohl die Sicherheit als auch die Effizienz dieser neuen Flugzeuge gewährleisten. Eine erfolgreiche Zertifizierung wird entscheidend sein, um das Vertrauen der Passagiere und Investoren in diese Technologie zu stärken und den Weg für die kommerzielle Nutzung von eVTOLs in Europa zu ebnen.

Für einzelne eVTOLs ist eine so genannte **Type Certification** (TC) notwendig. Dies ist die umfassendste Zertifizierung und betrifft das eVTOL-Flugzeugmodell selbst. Die zuständige Luftfahrtbehörde prüft und bewertet das Design, die Konstruktion und die Leistung des Flugzeugs, um sicherzustellen, dass es den Sicherheitsstandards entspricht. Die erste TC für ein eVTOL weltweit wurde am 15.08.23 durch die CAAC an das Model 216 von Ehang verliehen. [4] Diese ist jedoch nur in China anerkannt und gültig und muss z. B. in der EU bei der EASA unabhängig davon in einem eigenen Prozess beantragt werden.

Flugzeug- und eVTOL-Hersteller müssen außerdem noch **Design Organisation Approval** (DOA) und **Production Organisation Approval** (POA) vorweisen können, um eVTOLs produzieren zu dürfen. Die DOA befähigt eine Organisation oder ein Unternehmen dazu, Flugzeugdesigns und -konzepte zu entwickeln und zu genehmigen. Dies bedeutet, dass die Organisation die Fähigkeit hat, sicherzustellen, dass das Flugzeugdesign den geltenden Sicherheits- und Lufttüchtigkeitsstandards entspricht. Die POA berechtigt eine Organisation oder ein Unternehmen dazu, Flugzeuge oder Flugzeugteile herzustellen. Die Organisation muss sicherstellen, dass ihre Produktionsprozesse den geforderten Qualitäts- und Sicherheitsstandards entsprechen. Dies umfasst die Überwachung der Fertigung, Qualitätssicherung und Konformität mit den genehmigten Flugzeugdesigns. Mit einer POA kann eine Organisation Flugzeuge oder Flugzeugteile für den kommerziellen Luftverkehr herstellen und an Flugzeughersteller oder Fluggesellschaften liefern. Von den deutschen eVTOL-Herstellern hat Volocopter sowohl DOA als auch POA bereits erhalten [5], Lilium hat im November 2023 die DOA-Zertifizierung durch die EASA erhalten. [6] Erfahrene Flugzeugbauer wie Boeing oder Airbus besitzen die DOA und POA aus ihrer bisherigen Produktion von Flugzeugen bereits und müssen deshalb nur die TC für das entsprechende eVTOL beantragen. An die TC schließen sich noch weitere Zertifizierungen an, die hauptsächlich die Sicherheit im regelmäßigen

Flugbetrieb gewährleisten sollen und bislang eng an bestehende Regulatorik für Flugzeuge angelehnt sind. Da zum momentanen Zeitpunkt noch kein Hersteller eine TC erhalten hat, besteht noch Unklarheit darüber, was genau für eine zertifizierte Instandhaltung von Fluggerät und Komponenten im täglichen Betrieb notwendig sein wird. [7]

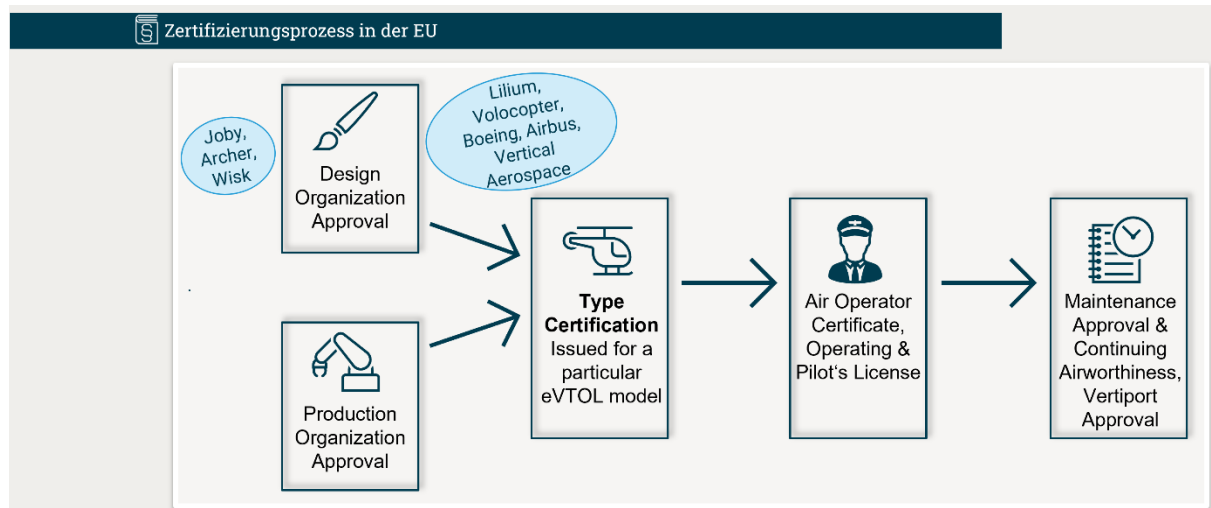


Abbildung 2: Übersichtsschema der Prozesse zur Zertifizierung von einsatzfähigen eVTOL-Modellen in der EU, sowie der momentanen Position einiger Hersteller. Eine zeitgleiche Bewerbung um die einzelnen Zertifikate ist möglich, jedoch müssen sie nacheinander in der dargestellten Reihenfolge vergeben werden.

02.01.02 MARKT- UND REICHWEITENANALYSE

Die folgende Übersicht präsentiert eine umfassende Darstellung verschiedener Dimensionen von eVTOL-Spezifikationen. Die Auswahl dieser Dimensionen basiert auf ihrer kritischen Bedeutung für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit und Anwendbarkeit der gezeigten Modelle in unterschiedlichen Szenarien. Hierbei werden Schlüsselemente wie das Herstellungsland, die Reichweite, die Reisegeschwindigkeit, die Kapazität (Anzahl der Reisenden), die geplante Autonomie, das maximale Abfluggewicht („Maximum Takeoff Weight“, MTOW) und das angestrebte Markteintrittsjahr, sowie der Status im Zertifizierungsprozess beleuchtet. Diese multidimensionalen Spezifikationen bieten eine umfassende Basis für eine eingehende Analyse und Bewertung der verschiedenen eVTOL-Modelle, um fundierte Entscheidungen im Hinblick auf ihre Eignung und Integration in den Luftverkehrssektor zu ermöglichen.

Potenzialanalyse für den Einsatz von Lufttaxi in Baden-Württemberg

Tabelle 1: Übersicht über vielversprechender eVTOL-Modelle, die sich in der Nähe der Marktreife befinden, sowie Spezifikation und Details zu erwartetem Markteintritt und Zertifizierung. Nicht voll batteriebetriebene Modelle sind grau markiert. MTOW steht für „Maximum Takeoff Weight“ und gibt an, wie viel Gewicht ein Flugzeug inkl. Eigengewicht beim Start tragen kann.

Hersteller	Modell	Land	Reichweite [km]	Reisegeschw. [km/h]	Anzahl Reisende	Autonom ² (geplant)	MTOW [kg]	Markteintritt ³	Zertifizierung ⁴
Volocopter	VoloCity	DEU	35	110	2	Ja	900	2024	TC Bew. EASA
Volocopter	Volo-Region	DEU	100	180	4	Ja	n/a	2026	TC Bew. EASA
Wisk Aero	Cora (6. Gen)	USA	144	222	4	Ja	n/a	2026	TC Bew. andere
Vertical Aerospace	VX4	UK	160	240	4	Nein	n/a	2025	TC Bew. EASA
SKYDRIVE	SD-05	JPN	10	100	2	Nein	1400	2025	TC Bew. andere
Lilium	Zero	DEU	175	250	4-6	Nein	3175	2025	TC Bew. EASA
Joby	S4	USA	240	320	4	Nein	2100	2024	TC Bew. andere
Ehang	216	CHN	35	130	2	Ja	585	2023	TC erhalten andere
ARCHER	MIDNIGHT	USA	160	240	5	Ja	3175	2025	TC Bew. andere
Airbus	CityAirbus NextGen	FRA	80	120	4	Ja	2200	2025	TC Bew. EASA
AIR	ONE	ISR	177	160	2	Nein	1100	2024	TC Bew. andere
Autoflight	Prosperity I	CHN	240	210	4	Ja	1500	2026	TC Bew. EASA
Alaka'i technologies	Skai (H2 fuel cell)	USA	640	190	5	n	n/a	2025	TC Bew. andere
Horizon Aircraft	CAVORITE X (hybrid)	CAN	500	350	5	n	1600	2026	TC Bew. andere

² Laut Hersteller geplant. Vs. zum Marktstark nicht verfügbar.

³ Laut Hersteller geplant. Angaben wurden in der Vergangenheit in vielen Fällen bereits verschoben.

⁴ TC Bew.: Es gibt bereits eine Bewerbung um eine Type Certification bei der jeweiligen Behörde (EASA oder andere nationale Behörde).

Die Auflistung in Tabelle 1 stellt die vielversprechendsten eVTOL-Modelle vor, die hohe Chancen haben in den nächsten drei Jahren auf den europäischen Markt zu kommen. Alle eVTOLs in Tabelle 1 werden bei Marktstart voraussichtlich pilotiert sein müssen, auch wenn autonomes Fliegen geplant ist. Aus diesem Grund ist die tatsächliche Passagierkapazität von zukünftig potenziell autonom fliegenden Modellen meist um eins verringert, wenn ein Pilot an Bord ist. Einige der Modelle sind klar für den UAM-Anwendungsfall gedacht (VoloCity, Ehang 216, Skydrive SD-05), die meisten Modelle zielen jedoch auf größere Reichweiten und Geschwindigkeiten für schwerpunktmäßigen RAM-Einsatz ab. Als Energieträger setzt die überwiegende Mehrheit der Hersteller auf den batterieelektrischen Antrieb. Aber auch Wasserstoff als Energieträger und hybride Modelle aus Verbrennungsmotor und Batterie befinden sich in der Entwicklung. Als genereller Trend ist bereits aus dieser Übersicht klar zu verzeichnen, dass für größere eVTOLs mit 4-6 Sitzplätzen eine spätere Markteinführung erwartet wird als für kleinere mit nur 2 Sitzplätzen. Dies erklärt sich mit der entsprechend höheren Energiedichte der Batterie, die für das Fliegen mit höherem Gewicht benötigt wird. Es ist zu erwarten, dass die mögliche Energiedichte in den kommenden Jahren zunimmt, beschleunigt auch durch den erhöhten Bedarf von besserer Batterietechnologie für den Automobilmarkt, sodass größere Fluggeräte mit mehr Sitzplätzen ermöglicht werden. Besonders starke Hoffnung liegt hierbei auf solid-state-Batterien, die die derzeit mögliche Energiedichte bei gleichbleibendem Gewicht etwa verdoppeln könnten. [8] So plant beispielweise Lilium um 2028 einen 16-Sitzer auf den Markt zu bringen, nähere Details sind aktuell noch nicht bekannt. [9] Einige weitere Firmen arbeiten ebenfalls bereits jetzt an ersten Prototypen von elektrisch betriebenen Fluggeräten mit 30-40 Sitzplätzen, so genannte Luftbusse, z. B. der SkyBus LA-44 von Lyte mit 40 Passagiersitzplätzen oder der Skybus von GKN mit 30 Sitzplätzen. [10], [11] Alle diese größeren, schwereren eVTOLs hängen allerdings massiv vom rechtzeitigen Fortschritt der Batterie- und Antriebstechnologie ab. Weiterhin ist vom Batteriefortschritt eine kontinuierliche Erhöhung der Reichweite aller Flugtaximodelle zu erwarten, zum Beispiel prognostiziert Lilium für das an sich gleichbleibende Lilium Zero-Modell eine Reichweitenentwicklung von momentan 175 km über 275 km im Jahr 2030 auf bis zu 480 km bis 2040. [12]

Verschiedene Studien erwarten eine Entwicklung, die mit Kurzstreckenflügen von 15-50 km für den innerstädtischen Shuttle-Service in großen Städten beginnt und sich dann kontinuierlich zu größeren Strecken weiterentwickelt, die dann ab 2030 auch interstädtische und regionale Verbindungen ermöglicht. [13]–[15]

Die in diesem Kapitel vorgestellten Modelle sind ein aktuelles Abbild der Marktsituation in 2023. Da der eVTOL-Markt bis jetzt sehr stark von Mergers & Acquisitions geprägt war, ist zu erwarten, dass sich diese Entwicklung noch bis mindestens 2030 fortsetzen wird, bis sich einige Marktführer mit ihren Zulieferern etabliert haben.

02.02 NOTWENDIGE BODENINFRASTRUKTUR

Um Flugtaxis der Öffentlichkeit als weiteren Verkehrsmodus in der Praxis zugänglich zu machen, braucht es Infrastruktur, die als Schnittstelle zwischen der bestehenden Verkehrsinfrastruktur und dem neuen Modus Flugtaxi dient. Diese nennt man *Vertiport*. Was einen Vertiport auszeichnet, welche regulatorischen Ansprüche es gibt bzw. geben wird und welche Konzepte es für den Aufbau von Vertiports gibt, wird im folgenden Abschnitt erläutert werden.

02.02.01 VERTIPTS

Vertiports sind als Start- und Landeplätze notwendig, um den neuen Verkehrsmodus Flugtaxi in die bestehende Verkehrsinfrastruktur zu integrieren. Es wird eine ungefähre Dichte von etwa 10 Vertiports pro 1 Mio. urbane Einwohner für dicht besiedelte Metropolregionen als sinnvoll eingestuft. [13] Nach der Definition der EASA handelt es sich grundsätzlich schlicht um Start- und Landeplätze für VTOLs. [16] Es sind jedoch auch komplexe Vertiport-Designs denkbar, die spezifisch auf die individuellen Gegebenheiten und Anforderungen vor Ort zugeschnitten sind. Neben den regulatorischen Anforderungen müssen Vertiports in der Praxis zusätzliche Kriterien erfüllen. Dies umfasst erstens die Gewährleistung eines effizienten Start- und Landebetriebs und zweitens die Sicherstellung eines effektiven sowie komfortablen Passagierboarding- und Ground-Handling-Prozesses. Teil des Ground-Handlings ist unter anderem die Energieversorgung, im Falle von batterieelektrischen eVTOLs bspw. Fast-Charging-Infrastruktur. Zum jetzigen Zeitpunkt ist unklar, ob zeit- und kostenaufwendige Sicherheitskontrollen ein Teil des Boarding-Prozesses sein müssen. Sollten keine Sicherheitskontrollen notwendig sein, könnten kleine und kostengünstige Vertiports in Betracht gezogen werden, die nicht mehr als ein einfaches „Helipad“ bieten und das AAM-Netzwerk wirtschaftlich ergänzen könnten. Gemäß den Richtlinien der EASA sind grundsätzlich auch komplexe Designs möglich, wobei es keine einheitlichen Begriffsdefinitionen für die jeweiligen Größenkategorien gibt. Eine mögliche Verwendung des Begriffs ist in Abbildung 3 dargestellt. Ein Vertihub repräsentiert die größte Kategorie. Dieses bietet die höchste Anzahl an FATOs⁵ und Stands⁶ und damit eine hohe Durchsatzkapazität sowie ausreichend Platz für längeres Parken. Ein Vertiport stellt die mittlere „Standard“-Kategorie dar, mit weniger FATOs (maximal drei) und Stands (4-10). Längere Parkzeiten sind nur begrenzt vorgesehen, wobei der Fokus auf der Maximierung des Durchsatzes und der Platzeffizienz liegt. Die kleinste Kategorie sind sogenannte Vertistations, bestehend aus einem FATO und bis zu drei Stands. Sie sind nicht

⁵ *Final Approach and Take-Off area*, ein FATO entspricht dem Bereich, auf bzw. über dem der abschließende An- bzw. Abflug ausgeführt wird. Innerhalb diesem wird idR auch Bodenkontakt hergestellt. Dieser Bereich nennt sich dann TLOF (*Touchdown and Lift-Off area*). Ein TLOF ist immer Teil eines FATOs.

⁶ Parkflächen mit sicherem Ground Handling von eVTOLs

für längere Parkzeiten vorgesehen und dienen der wirtschaftlichen Anbindung von Regionen mit schwach konzentrierter Nachfrage. Im weiteren Verlauf wird der Begriff Vertiport weiterhin als Sammelbegriff für alle Größen verwendet und gegebenenfalls spezifiziert.



Abbildung 3: Illustration möglicher Anwendungs- und Größenkategorien von Vertiports. Entnommen aus: [17]

Weltweit sind mehrere Unternehmen und Joint-Ventures an der konzeptionellen und physischen Entwicklung dieser Infrastruktur beteiligt. Sie bieten nicht nur umfassende Expertise, sondern auch vorgefertigte Lösungen an, um Vertiports und Vertistations effizient aufzubauen. Im Gegensatz dazu erfordern Vertihubs und andere anspruchsvolle Projekte, wie die Anbindung eines großen Bahnhofs in der Innenstadt an einen Vertiport, maßgeschneiderte Lösungen, die auf die spezifischen Gegebenheiten zugeschnitten sind. Dennoch besteht auch hier das Potenzial, durch die Expertise der Infrastrukturentwickler entsprechende Kostenvorteile und Effizienzgewinne zu realisieren. Zum Beispiel entwickelte und eröffnete Skyports Infrastructure in Kooperation mit Volocopter bereits 2019 den ersten Vertiport-Prototypen in Singapur. [18] Lilium hat zudem Kooperationsvereinbarungen mit den Infrastrukturentwicklern Ferrovial und Tavistock Development für den Aufbau eines Vertiport-Netzwerks in den USA. [19], [20] Siemens und Skyway haben in einer Vereinbarung angekündigt, gemeinsame ganzheitliche Anstrengungen vorzunehmen, welche von der Forschung und Entwicklung bis hin zum Bau und Betrieb reichen sollen. [21]

02.02.02 ERWARTETE REGULATORIK FÜR VERTIPTS

Die EASA definiert in *Special Condition for small-category VTOL aircraft* [16] Vertiports als „eine Fläche zu Lande, zu Wasser oder ein Bauwerk, die bzw. das ein Gebiet darstellt, das für die Landung und den Start von VTOL-fähigen Luftfahrzeugen genutzt wird oder genutzt werden soll“. Für Vertiports gibt es bisher keine spezifischen und beschlossenen Regelungen, daher werden in vergangenen und aktuell laufenden Studien und Tests meist die entsprechenden Regelungen für Helipads angewendet. Seitens der EASA wurde im Frühjahr 2022 ein qualifizierter Entwurf veröffentlicht: *Prototype Technical Specifications for the Design of VFR Vertiports for Operation with Manned*

VTOL-Capable Aircraft Certified in the Enhanced Category. [22] Dieser orientiert sich nach eigenen Angaben stark an den *ICAO Annex 14 Part 1 und Part 2* [23] und wurde in Kooperation mit weltweit führenden Vertiport-Unternehmen und VTOL-Herstellern erstellt. Insbesondere werden die wesentlichen Merkmale und Sicherheitsanforderungen für Vertiports beschrieben. Dabei werden spezifische Vorgaben für den Luftraum im Hinblick auf An- und Abflug sowie für den vertikalen Start und die Landung gemacht. Die Bodeninfrastruktur wird in Landeflächen (FATO), Stands (Parkflächen) und Fahr- bzw. Taxiwege unterteilt, die FATOs und Stands miteinander verbinden. Diese unterliegen unterschiedlichen Anforderungen an Markierung, Beschaffenheit und Größe. Ein FATO kann auch gleichzeitig als Stand dienen, jedoch darf es immer nur von einem VTOL zur gleichen Zeit genutzt werden. Der kleinste Vertiport entspricht in etwa der Fläche eines Helipads. Es ist zu beachten, dass die Voraussetzungen für die Landung eines VTOLs auf einem Vertiport weitgehend von Gewicht und/oder Durchmesser des VTOLs abhängen. Gegenwärtig ist unklar, in welchem Umfang Passagier-Sicherheitskontrollen erforderlich sind.

02.02.03 WEITERE VERTIPORT-KONZEPTE

Zur Analyse möglicher Designs von Vertiports verschiedener Größen hinsichtlich Kapazität und Effektivität gibt es über das kommerzielle Angebot von Infrastrukturentwicklern auch in der Literatur bereits eine Reihe von Analysen [24]–[26]. Zudem sind neben Neu-, Umwidmungs- und anderen Großprojekten auch lediglich Modernisierungen vorhandener Infrastruktur denkbar, so dass diese mit VTOLs kompatibel werden. Im Fokus stehen dabei zwei Szenarien:

Erstens, Flugplätze mit einer asphaltierten Start- und Landebahn sowie regionale Flughäfen. Um diese zu Vertiports auszubauen, bedarf es eines vergleichsweise geringen Aufwands, da der Großteil der notwendigen Infrastruktur bereits vorhanden ist. Zudem verfügen diese bereits über eine Anbindung an das öffentliche Straßennetz und teilweise auch an den ÖPNV. Meist fehlt jedoch die elektrische Anbindung, die für die Ladeinfrastruktur nötig ist. Vor diesem Hintergrund können Flugplätze und (Regional-) Flughäfen attraktive Bestandteile eines allgemeinen AAM-Netzwerkes sein. Konkrete Einblicke in mögliche Business-Cases und wie diese integriert werden können, folgen in Abschnitt 03.03.

Zweitens, sich bereits im Betrieb befindende Helipads. Diese ließen sich ebenfalls mit geringem Aufwand zu *Vertistationen* ausbauen. Da Helipads häufig in Privatbesitz sind, wird ein öffentlicher Flugtaxi-Service von diesen strukturell nicht profitieren. Ein ergänzender Business-Case könnten jedoch exklusive Flugtaxi-Services für die Eigentümer der Helipads sein, wie z. B. große Unternehmen.

02.03 NUTZERGRUPPEN

Um das Nachfragepotenzial nach Flugtaxi-Services zu bewerten, gilt es zunächst die Ansprüche und Bedürfnisse möglicher Nutzer zu analysieren und zu charakterisieren. Ziel ist es, konkrete Nutzergruppen abzuleiten, welche klar eingeordnet werden und ein strukturiertes und belastbares Bild der Nachfrage ergeben. Zunächst werden wichtige Faktoren auf Basis der Fachliteratur aufgezeigt, welche signifikanten Einfluss auf die allgemeine Nachfrage und Nutzungsbereitschaft von Personen nach Flugtaxi-Services haben. Anschließend werden basierend darauf Nutzergruppen definiert.

02.03.01 STUDIEN ZUR NUTZERAKZEPTANZ UND -ANFORDERUNGEN

Die Nutzerakzeptanz von eVTOLs hängt von mehreren entscheidenden Faktoren ab. Die wichtigsten Faktoren, welche persönliche und gesellschaftliche Akzeptanz beeinflussen, werden im Folgenden vorgestellt und erläutert.

Erstens spielen die **Sicherheit** und das empfundene Sicherheitsgefühl eine zentrale Rolle. Potenzielle Passagiere müssen das Vertrauen haben, dass eVTOLs die gleichen strengen Sicherheitsstandards erfüllen wie herkömmliche Flugzeuge. Dies erfordert transparente Zertifizierungsverfahren und eine umfassende Sicherheitskultur seitens der Hersteller und Betreiber. Um den Erfolg der AAM-Einführung zu gewährleisten, wird die Branche das Vertrauen der Öffentlichkeit gewinnen müssen und sie davon überzeugen müssen, dass das Reisen mit AAM-Flugzeugen sicher und zuverlässig sein wird. Vertrauen ist jedoch fragil und kann nach einer schlechten Erfahrung verloren gehen und nie wiederhergestellt werden. In einer Umfrage der Hochschule Stuttgart von 2019 schätzten 67% der Befragten es als wahrscheinlich ein, dass sie selbst in einem Flugtaxi mitfliegen würden, wenn sie die Möglichkeit dazu hätten. Hierbei wurde konkret nach einem Flug mit dem VoloCity von Volocopter gefragt und die Befragten bildeten die demographischen Kennzahlen der Stuttgarter Bevölkerung relativ gut ab (leichter Überhang an männlichen und an jungen Teilnehmern). [27] In einer etwas aktuelleren Befragung der EASA von 2021 waren 83% der Befragten positiv gegenüber UAM eingestellt, 49% konnten sich einen Flug mit einem Flugtaxi vorstellen. Hierbei unterstützt ein hohes Vertrauen in die bestehenden Regulierungen in der europäischen Luftfahrt die Akzeptanz von Fluggeräten, die von der gleichen Behörde zertifiziert und reguliert werden würden. [3] In einer weiteren Studie, durchgeführt vom Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, antworteten 75% der Befragten, dass ihnen ein Flug im Flugtaxi als „eher sicher“ bis „sicher“ erscheint. [28] Zur tatsächlichen Sicherheit und Belastbarkeit von eVTOLs müssen höhere Zahlen an Flugstunden und Einsätze unter unterschiedlichen Bedingungen wie Wetter und Lichtverhältnissen ab-

gewartet werden und darauf aufbauend Pannen- und Wartungsstatistiken ausgewertet werden. Es ist zu erwarten, dass ein medienwirksames Unfallereignis die Nutzerakzeptanz sehr schnell verringern kann.

Zweitens sind erschwingliche Preise von großer Bedeutung. In mehreren Studien zeigte sich ein **konkurrenzfähiges Leistungsangebot**, welche ohne große Preisaufschläge auf die aktuellen Verkehrsangebote wie Uber oder das Taxi auskommt, als wichtige Voraussetzung. [27], [29] **Wettbewerbsfähige Preise** für eVTOL-Flüge sind Kernvoraussetzung, um eine breite öffentliche Nachfrage zu generieren. Die Kosten-Nutzen-Abwägung bei potenziellen Passagieren ist auch von der **Reisezeitersparnis und Verlässlichkeit** abhängig. In der Fraunhofer-Studie gaben 38% der Befragten an, dass ihnen eine möglichst kurze Reisezeit wichtig sei, für 21% der Befragten soll die Mobilitätsform möglichst preisgünstig sein. [28] Die tatsächliche Preisgestaltung von eVTOL-Flügen bleibt bis auf Weiteres spekulativ. Hersteller wie Lilium und Joby werben mit Zielpreisen von 2-3 \$/Personen-km. [30] Dies setzt allerdings hohe Frequenzen (z. B. laut Lilium 25 100 km-Flüge pro Tag) mit ebenfalls hoher Auslastung von mind. 75% voraus und ist nicht direkt nach Markteintritt realistisch, jedoch laut Lilium bei zeitnahe Markteintritt etwa für 2026-27 bereits Ziel. Initial ist mit deutlich höheren Preisen zu rechnen, für Early Adopter auf Rundflügen und anderen Erlebnis-orientierten Flügen sind diese Preise jedoch vermutlich trotzdem akzeptabel. Grundsätzlich ist jedoch zu erwarten, dass für nicht touristische Flüge ein Preisaufschlag gezahlt wird, wenn keine Reisezeitersparnis erwartet werden kann.

Drittens spielt die **Integration in bestehende Verkehrssysteme** eine Schlüsselrolle. Effiziente Bodeninfrastruktur, bequeme Ein- und Ausstiegsorte sowie nahtlose Übergänge zu anderen Verkehrsträgern sind entscheidend, um die Nutzerakzeptanz zu fördern. In der Umfrage der Hochschule Stuttgart war die einfache Nutzbarkeit einer der wichtigsten Gründe, einen Flug mit dem VoloCity in Betracht zu ziehen. [27] Ebenso empfanden 57% der Befragten in der Fraunhofer-Studie es als wichtig, vom Flugtaxi-Start- bzw. Landepunkt aus eine direkte Anbindung an ein anderes Verkehrsmittel zu haben. [28] Allerdings wird auch die Anbindung bisher schlecht erschlossener Bereiche als erwarteter Vorteil von potenziellen Nutzern genannt. [3]

Schließlich sind **Umweltaspekte** von hoher Bedeutung. Die nachhaltigen Vorteile von eVTOLs, wie emissionsfreier Betrieb und Entlastung der Park- und Stausituation in der Stadt, können umweltbewusste Nutzer ansprechen. In der EASA-Befragung gaben 51% der Befragten an, dass Flugtaxis Staus in ihrer jeweiligen Stadt reduzieren könnten und 48% erwarten eine Reduktion der lokalen Emissionen durch die Einführung von Flugtaxis. [3]

Allerdings werden in allen Umfragen auch erwartete negative Aspekte genannt, die von den Anbietern adressiert werden müssen, um eine erfolgreiche Markteinführung

zu erreichen. Neben Sicherheitsbedenken waren die größten Befürchtungen der Befragten mögliche Lärmverschmutzungen und Verschattungen sowie der Eingriff in die Privatsphäre, welche vor allem die gesellschaftliche Akzeptanz von eVTOLs beeinflussen und weniger die individuelle Nutzungsbereitschaft. [2], [3], [27], [29]

02.03.02 RELEVANTE NUTZERGRUPPEN

In der Mobilitätsforschung wird häufig zwischen drei Nutzergruppen unterschieden: Pendlern, Geschäftsreisenden und Freizeitreisenden/Touristen. Namensgebend ist jeweils die Motivation der Reise, welche die Nachfrageeigenschaften in der Praxis stark prägen. So auch hier und im Folgenden. Die Nutzergruppen zeichnen sich jeweils durch ein sehr unterschiedliche Anspruchs- und Mobilitätsprofile aus. Entsprechend unterschiedlich ist das Nachfragepotenzial zu bewerten. Um ein etwas differenzierteres Bild zu erhalten, wurde der Freizeitreisende weiter unterteilt in den *Premiumurlauber* und *Erlebnistouristen*. Als weitere Nutzergruppe von eVTOLs wurde die *öffentliche Hand* ausgemacht. Diese wird voraussichtlich keine signifikante Verkehrsnachfrage entwickeln im Sinne einer Netzwerkauslastung generieren, sie kommt jedoch als Käufer und praktischer Nutzer von eVTOLs in Frage. Im Folgenden werden die Nutzergruppen im Detail erläutert (Zusammenfassung in Abbildung 4).

Insights: Persona-Nutzergruppen				
Premium-tourist	Erlebnis-tourist	Geschäfts-reisende	Berufs-pendler	Öffentliche Hand
<p>Beschreibung Der Urlaub beginnt/endet mit einer komfortablen, unkomplizierten An- bzw. Abreise oder beinhaltet den Flug mit einem eVTOL als Transport zwischen zwei Pol.</p> <p>Erwartung: Komfort und Zuverlässigkeit</p> <p>Größte Konkurrenz: Taxi</p>	<p>Beschreibung Der Urlaub beinhaltet den Rundflug mit einem eVTOL als ganz besonderes Erlebnis.</p> <p>Erwartung: Komfort und Early Adopter</p> <p>Größte Konkurrenz: Nicht vergleichbar</p>	<p>Beschreibung Mit einem hohen Value-of-Time eröffnen Schnelligkeit und Zuverlässigkeit im Transport wirtschaftliche Potentiale.</p> <p>Erwartung: Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit</p> <p>Größte Konkurrenz: Taxi und ICE</p>	<p>Beschreibung Staus, Verspätungen und Zugausfälle auf langen, stressigen Anfahrtswegen können überflogen werden.</p> <p>Erwartung: Preis wettbewerbsfähig, Reisezeitverkürzung, Zuverlässigkeit</p> <p>Größte Konkurrenz: Eigenes Auto</p>	<p>Beschreibung Kerosin-angetriebene und geräuschintensive Helikopter-Flüge könnten durch eVTOLs ersetzt werden.</p> <p>Erwartung: CO2-Neutralität, Zuverlässigkeit</p> <p>Größte Konkurrenz: Helikopter, Rettungsfahrzeug</p>

Abbildung 4: Übersicht über die erarbeiteten Nutzergruppen von AAM in Baden-Württemberg.

02.03.02.01 TOURISTISCHE NUTZUNG

Baden-Württemberg ist und bleibt ein beliebtes touristisches Ziel vieler deutscher und internationaler Urlauber. Mit rund 410 Mio. Tagesreisen, 53 Mio. Übernachtungen in

Beherbergungsbetrieben und etwa 280.000 an den Standort gebundenen Arbeitsplätzen (Stand 2021 [31]) ist der Tourismussektor in Baden-Württemberg von erheblicher wirtschafts-, arbeitsmarkt- und strukturpolitischer Bedeutung. Er erfüllt insbesondere in den überwiegend ländlich geprägten Heilbädern und Kurorten eine wichtige regional- und strukturpolitische Aufgabe und lenkt kaufkräftige Nachfrage in strukturschwächere Regionen und führt zu einer Stärkung der dortigen Wirtschaftskraft. Besondere touristische Ziele stellen der Schwarzwald mit den touristisch relevanten Landkreisen Breisgau Hochschwarzwald, Freiburg im Breisgau, Freudenstadt, Calw und Schwarzwald-Baar-Kreis, die Region Bodensee-Oberschwaben mit den Landkreisen Bodenseekreis, Ravensburg und Konstanz, die Großstädte sowie besondere Attraktionen im Ortenaukreis (Europapark Rust) und Baden-Baden (Heilbad und Kurort mit historischer Bedeutung) dar, siehe Tabelle 2 und Tabelle 3.

Tabelle 2: Landkreise mit den höchsten absoluten Übernachtungszahlen im Jahr 2022. [32]

Landkreis	Übernachtungen (in 1000)
Breisgau Hochschwarzwald (LKR)	4.605
Ortenaukreis (LKR)	4.183
Stuttgart (SKR)	3.306
Ravensburg (LKR)	3.181
Bodenseekreis (LKR)	3.049
Konstanz (LKR)	2.845
Freiburg im Breisgau (SKR)	2.040
Freudenstadt (LKR)	1.541
Mannheim (SKR)	1.457
Schwarzwald-Baar-Kreis (LKR)	1.400

Tabelle 3: Landkreise mit den höchsten Übernachtungsdichten gemessen an der dort dauerhaft wohnhaften Bevölkerungszahl im Jahr 2022. [31]

Landkreis	Übernachtungsdichte (je 1000 Einwohner)
Breisgau Hochschwarzwald (LKR)	17.324
Baden-Baden (SKR)	14.703
Bodenseekreis (LKR)	13.928
Freudenstadt (LKR)	12.928
Ravensburg (LKR)	11.082
Konstanz (LKR)	9.876
Ortenaukreis (LKR)	9.626
Freiburg im Breisgau (SKR)	8.798
Heidelberg (SKR)	8.728
Calw (LKR)	8.641

Premiumurlauber

Ein AAM-Flughafenshuttle kann für Premiumurlauber, die möglicherweise auf dem Weg zu einem ausländischen Ziel sind, ein natürlicher nächster Schritt für das Upgrade der eigenen Reise sein. Ebenso vorstellbar ist die Nutzung von AAM im Kontext der Regional Air Mobility als Flug ausgehend von einer Stadt zu einem touristischen Ziel, beispielsweise in den Schwarzwald, in Heilbäder und Kurorte wie Baden-Baden oder an den Bodensee. Insbesondere am Bodensee wären auch Alternativen zum Fährbetrieb denkbar, z. B. ausgehend von Konstanz. Dabei wird die direkte Reise zwischen zwei Vertiports als verkehrsunabhängige, individuelle und komfortable Transportmöglichkeit gesehen, die auch andernorts als Verbindung zwischen zwei touristischen Zielen denkbar wäre, insbesondere im Schwarzwald als besonders stark frequentierte Urlaubsregion. Typische Nutzer wären hierbei Singles, Paare sowie Kleingruppen.

Premiumurlauber zeichnen sich dadurch aus, dass Komfort, Erlebnis und vor allem Zuverlässigkeit des Flugtaxi-Services im Fokus stehen. Ein Reisezeitvorteil durch die Nutzung eines Flugtaxis muss nicht zwingend gegeben sein. Für einen entsprechend hohen Zugewinn an Komfort kann eine begrenzte Reisezeitverlängerung in Kauf genommen werden. Die größten Konkurrenten sind ICEs und Taxis, welche entsprechend den Maßstab für Verfügbarkeit und Komfort darstellen. Hier häufig auftretende, ungeplante Verzögerungen während der Reise durch hohes Verkehrsaufkommen könnten für Premiumurlauber jedoch durch Verwendung eines Flugtaxis vermieden werden. Eine Besonderheit dieser Nutzergruppe ist die Notwendigkeit für Gepäckstauraum. Auch wenn viele Reisende nur mit Handgepäck reisen, kann dies für diese Nutzergruppe eine Einschränkung darstellen.

Erlebnistouristen

In Baden-Württemberg befinden sich jetzt schon einige Ziele für Erlebnistourismus, insbesondere der Europa-Park Rust im Ortenau-Landkreis, aber auch zum Abfahrtsski- und Snowboardfahren im Hochschwarzwald. Es ist denkbar, dass diese Gruppe Urlauber sich auch für einen Flug mit einem eVTOL als ganz besonderes, neues Erlebnis interessieren würde und dies als interessantes eigenes oder kombiniertes Reiseziel in Betracht ziehen würden. Diese erlebnis-orientierten Flüge können auch von nur einem Vertiport als Start und Ziel ausgehend als Rundflüge attraktiv sein, idealerweise optimiert auf eine landschaftlich ansprechende Route.

Für solche Erlebnistouristen wäre eine entsprechende Neigung, neue technologische Innovationen selbst auszuprobieren und die Rolle der „Early Adopter“ einnehmen zu wollen, entscheidend. Wie auch bei den Premiumtouristen ist auch für diese Gruppe ebenso ein hoher Reisekomfort eine zentrale Erwartungshaltung. Der Preis ist nachrangig. Ebenso muss ein Reisezeitvorteil nicht gegeben sein, da das Erlebnis klar im

Vordergrund steht. Die Vertiports sollten mit anderen Verkehrsmitteln gut erreichbar sein. Ebenso wie bei den Premiumtouristen wären typische Nutzer voraussichtlich Einzelpersonen, Paare sowie Kleingruppen. Im Unterschied zu allen anderen Gruppen ist der Anteil dieser Gruppe langfristig klein und kann den Business Case eines gesamten Netzwerks nicht tragen. Während einer frühen Anlaufphase kann der Anteil dieser Nutzergruppe und damit der Beitrag zum Wachstum jedoch entscheidend sein.

02.03.02.02 WIRTSCHAFTSSTANDORT BADEN-WÜRTTEMBERG

Mit einem Bruttoinlandsprodukt über dem nationalen Durchschnitt, einer unterdurchschnittlichen Arbeitslosenquote und vielen international begehrten Exportprodukten zeichnet sich Baden-Württemberg als wichtiger Wirtschaftsstandort im nationalen und internationalen Vergleich aus. [33] Insbesondere im Ballungsraum Stuttgart mit den angrenzenden Landkreisen Böblingen, Ludwigsburg, Esslingen und Rems-Murr-Kreis befinden sich außerordentlich viele Firmenstandorte international tätiger Unternehmen mit und ohne Headquarter, siehe Tabelle 4. Aber auch in Nordbaden mit dem Städtedreieck Karlsruhe-Heidelberg-Mannheim mit den dort ansässigen international agierenden Unternehmen und renommierten Universitäten liegt ein Schwerpunkt wirtschaftlicher Aktivität und Innovationskraft.

Geschäftsreisende

Ausgehend von den oben beschriebenen Schwerpunkten Stuttgart und Nordbaden sind viele, oft zeitsensible, Geschäftsreisen zu erwarten, besonders im Kontext international tätiger Unternehmen. Es ist daher auch für die Persona der Geschäftsreisenden denkbar, dass Flugtaxis multimodal in bestehende Reiserouten integriert werden können, insbesondere als Flughafen-Shuttle aber auch zwischen zwei Vertiports, zum Beispiel am Firmenstandort und dem nächstgelegenen ICE-Bahnhof.

Erwartungen der Geschäftsreisenden-Persona umfassen den reibungslosen und schnellen Ablauf der Flugtaxi-Reise, während Parameter wie Komfort und Preis im geschäftlichen Kontext eine untergeordnete Rolle spielen. Da Taxis im Individualverkehr und ICEs im Öffentlichen Verkehr die größte Konkurrenz darstellen, müssen Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Flugtaxi-Anbindung mindestens auf Taxi-Niveau sein. Auch ein Zeitvorteil muss zwingend gegeben sein, um einen Marktvorteil zu erzielen, der ein zu zahlendes Premium rechtfertigt. Die Limitierung auf Handgepäck ist meist unproblematisch, die Verfügbarkeit jedoch notwendig.

Tabelle 4: Übersicht über baden-württembergische Landkreise mit der Anzahl der Firmenstandorte mit mehr als 2000 Beschäftigten an diesem Standort und der Anzahl der Firmenstandorte, bei denen auch das Headquarter der jeweiligen Firma dort lokalisiert ist.

Landkreis	Anzahl Firmenstandorte mit >2000 Beschäftigten	Anzahl Firmenstandorte mit >2000 Beschäftigten und Headquarter
Stuttgart (SKR)	6	5
Mannheim (SKR)	4	1
Böblingen	4	1
Biberach	3	1
Hohenlohekreis	2	2
Rhein-Neckar-Kreis	2	2
Rems-Murr-Kreis	2	2
Heilbronn	2	1
Bodenseekreis	2	1
Ludwigsburg	2	2
Rastatt	2	0
Esslingen	1	1

Berufspendler

Durch die hohe Anzahl an Beschäftigten und die hohen Pendlerzahlen (z. B. etwa 312.000 regelmäßig Einpendelnde nach Stuttgart, 137.000 nach Mannheim, 130.000 nach Karlsruhe [34]) stellen auch Berufspendler eine potenzielle Nutzergruppe von AAM dar. Für diese Persona ist eine direkte Verbindung zweier Vertiports im Rahmen einer Inter-City Reise der wichtigste Use Case.

Herausforderungen ergeben sich durch die sehr preiselastische Nachfrage und eine hohe Preis- und Zeitsensitivität, da das private Auto als zentrale Benchmark für Zuverlässigkeit und Reisezeit gewertet und somit ein Premium nur sehr eingeschränkt gezahlt wird. Angesichts von Stau und eingeschränkter Mobilität im urbanen Raum ergibt sich hier jedoch auch die Chance mittels Reisezeitverkürzung und hoher Zuverlässigkeit Mobilitätsnachfrage für Flugtaxis zu generieren, vor allem für Pendler auf vergleichsweise langen Strecken und mit schlechter Verkehrsanbindung. Da die Bedingungen dafür jedoch niedrige Preise und minimale Wartezeiten sind, ist diese Nutzergruppe nur im kleinen Maßstab relevant. Bei Berufspendelnden ist lediglich Stauraum für Handgepäck notwendig.

02.03.02.03 ÖFFENTLICHE HAND

Die Persona "Öffentliche Hand" als Nutzergruppe von eVTOLs repräsentiert staatliche und kommunale Organisationen sowie Einsatzkräfte im öffentlichen Sektor. Diese Nutzergruppe hat ein starkes Interesse daran, die Vorteile und Möglichkeiten von

eVTOLs vor allem in Situationen zu nutzen, in denen schnelle Reaktionen und effiziente Transportmöglichkeiten von entscheidender Bedeutung sind. Momentan werden die meisten dieser Einsätze mit Helikoptern bedient oder, wenn möglich, auf dem Boden von Rettungsfahrzeugen angefahren. Die wichtigsten Auftraggeber von Helikoptermissionen sind die ADAC Luftrettung und DRF-Deutsche Rettungsflugwacht, das Bundesamt für Bevölkerungs- und Katastrophenschutz, das Technische Hilfswerk, die Polizei und die Bundeswehr.

Für die Öffentliche Hand ist die Sicherheit der Bevölkerung oberstes Gebot. Daher ist es entscheidend, dass eVTOLs zuverlässig und sicher betrieben werden können. Schnelle Reaktionszeiten und die Fähigkeit, in schwer zugänglichen Gebieten zu operieren, sind entscheidend für den Erfolg der Einsätze. eVTOLs bieten hier signifikante Vorteile, ganz besonders im potentiell autonomen Betrieb und erweitern durch ihre kleinere Betriebslautstärke möglicherweise sogar das Einsatzspektrum von Helikoptern. Auch für die Nutzergruppe der Öffentlichen Hand sind Anschaffungspreis und Kosten je Flug von hoher Bedeutung, um in den vorgesehenen Budgets zu bleiben. Weiterhin müssen sich eVTOLs nahtlos in bestehende Rettungsinfrastrukturen integrieren lassen, um eine effiziente Zusammenarbeit mit anderen Organisationen, wie Rettungsdiensten, Polizei und Feuerwehr zu gewährleisten. Die Öffentliche Hand wird voraussichtlich keine signifikante Verkehrsnachfrage entwickeln im Sinne einer Netzwerkauslastung. Daher wird sie in der Wirtschaftlichkeits- und Szenarioanalyse nicht berücksichtigt.

02.04 IDENTIFIZIERTE USE CASES IN DER REGION

Auf Basis der Nutzergruppen können praktische Einsatzszenarien, sog. Use Cases, abgeleitet werden. Diese Stellen die wichtigsten praktischen Anwendungsfälle von eVTOLs aus heutiger Sicht dar. Im Folgenden werden die jeweiligen Use Cases den Nutzergruppen zugeordnet und bereits Ziele und Einsatzgebiete umrissen.

02.04.01 USE CASE: FLUGHAFEN-/ICE-SHUTTLE

eVTOLs bieten einen vielversprechenden Use Case als Shuttle zu oder zwischen hochfrequentierten Verkehrsknotenpunkten wie Flughäfen oder ICE-Bahnhöfen. Diese direkte Reise zwischen zwei Vertiports an gut angebundene Standorte ermöglicht es den Passagieren, Verkehrsengpässe zu umgehen und komfortabel zu reisen. Teil dieses Use Cases werden primär Premiumurlauber und Geschäftsreisende sein. Relevante Anteile an der Nachfrage von Erlebnistouristen sind in einer Anfangsphase ebenfalls denkbar. Insgesamt steht somit jedoch die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit Fokus, da sie sich darauf verlassen müssen, pünktlich an ihrem Ziel anzukommen. Der Komfort während des Fluges und eines nahtlosen Übergangs vom Bodentransport zum Lufttransport ist

ebenfalls ein entscheidender Faktor. Besonders für Geschäftsreisende muss eine Reisezeitverkürzung zu erwarten sein.

Um diesen Use Case erfolgreich umzusetzen, ist jeweils ein Vertiport an beiden Enden der Strecke erforderlich, welche jeweils gut erreichbar und angebunden sind. Diese Urban- and Regional-Air-Mobility-Lösung bietet eine vielversprechende Alternative zum herkömmlichen Taxi- oder Transportservice. Mit höheren Reichweiten steigt auch die Vielseitigkeit und Wettbewerbsfähigkeit der eVTOLs in diesem Bereich. In Baden-Württemberg wären die wichtigsten Zentren für potentielle Vertiports die Flughäfen Stuttgart, Friedrichshafen, Baden-Baden/Karlsruhe, bei höherer Reichweite auch Flughafen Frankfurt und München sowie wichtige ICE-Bahnhöfe wie Mannheim, Karlsruhe, Stuttgart, Ulm und Freiburg.

02.04.02 USE CASE: TOURISTISCHER RUNDFLUG

Mit Rundflügen an touristischen Hotspots können Passagiere eine völlig neue Perspektive auf bekannte Sehenswürdigkeiten erleben. eVTOLs haben daher das Potenzial, sich als besonderes Erlebnis im Tourismus zu etablieren. Entscheidend für potenzielle Kunden ist dabei die Bereitschaft, innovative Technologien zu nutzen (Early Adopters) und ein hoher Komfort während der Reise – der Flug selbst wird zum Premiererlebnis. Ein gut erreichbarer Vertiport an einem strategisch günstigen Punkt ist dabei unerlässlich, um die Zugänglichkeit zu gewährleisten. Wegen der eingeschränkten Reichweite sind eVTOLs besonders in der Anfangsphase ihrer Einführung bestens geeignet für kurze, intensive Flüge im touristischen Kontext. Dieser Use Case bietet somit eine vielversprechende Möglichkeit, eVTOLs erfolgreich auf den Markt zu bringen und erste Einsätze zu realisieren. Flüge würden am selben Vertiport starten und enden.

In Baden-Württemberg bieten sich hierfür besonders bestehende touristische, insbesondere erlebnistouristische Orte wie der Europapark Rust, der Bodensee oder Skigebiete im Schwarzwald an, sowie touristisch relevante Städte mit interessanter Architektur wie Heidelberg, Freiburg und Ulm.

Der Use Case des touristischen Rundflugs ist zwar vermutlich vor allem in der Markteinführungsphase relevant und kann für die Entwicklung eines BW-weiten Vertiportnetzwerks zuträglich sein, jedoch ist die Nachfragebewertung hierfür im Rahmen dieser Studie nicht möglich. Daher ist dieser Use Case in den quantitativen Analysen von Kapitel 3 ausgeklammert und informiert nur zum Teil die Standortwahl der ersten Vertiports in den beiden Hochlaufszszenarien (vor allem Rust und Friedrichshafen)

02.04.03 USE CASE: GESCHÄFTSREISEN STUTTGART UND RHEIN-NECKAR

Im Kontext eines Shuttle-Services zwischen wichtigen Verkehrsknotenpunkten und Werksgeländen präsentieren sich eVTOLs als mögliche Lösung für Geschäftsreisen. Diese Technologie ermöglicht es Geschäftsleuten, direkt zwischen zwei Vertiports zu

reisen, was Zeit spart und die Effizienz der Geschäftsreise erheblich steigert. Zuverlässigkeit ist für potenzielle Kunden in diesem Segment von entscheidender Bedeutung, da Geschäftsreisen oft präzise Zeitpläne erfordern. Zudem zielt der Einsatz von eVTOLs darauf ab, die Reisezeiten zu verkürzen, was einen wertvollen Beitrag zur Effizienzsteigerung von Geschäftsprozessen leistet. Mit Blick auf die regionale Luftmobilität bieten eVTOLs mit höheren Reichweiten erweiterte Einsatzmöglichkeiten und erhöhen somit ihre Wettbewerbsfähigkeit im Vergleich zu herkömmlichen Taxi- oder Verkehrsangeboten. Dieser Use Case eröffnet somit ein vielversprechendes Anwendungsfeld für eVTOLs im Geschäftsreisesegment.

Wichtige Orte, die eine Führungszentrale oder einen überregional wichtigen Standort in Baden-Württemberg aufweisen und damit Potenzial für einen hauptsächlich geschäftlich genutzten Vertiport-Standort bieten, sind Walldorf, Waiblingen, Oberkochen, Winnenden und verschiedene Firmenstandorte in und um Stuttgart.

02.04.04 USE CASE: BERUFSPENDLER

Auch für Berufspendler könnten eVTOLs eine interessante Option darstellen, da sie das Potenzial haben, die tägliche Pendelzeit erheblich zu verkürzen und den Verkehr in stark belasteten Gebieten zu entlasten. Wenn die eVTOLs in der Lage sind, sich schnell und direkt zwischen den Pendlerknotenpunkten oder von solchen zu wichtigen Industriestandorten zu bewegen, könnten sie eine effiziente Alternative zu herkömmlichen Verkehrsmitteln darstellen. Hierfür ist entscheidend, dass der Flugpreis wettbewerbsfähig zur privaten Autofahrt und zum ÖPNV ist. Zudem muss es gut erreichbare Vertiports in strategisch günstigen Lagen geben. Diese sollten in der Nähe der Pendlerknotenpunkte, wie Bahnhöfen oder zentralen Busbahnhöfen, platziert sein, um eine nahtlose Verbindung zu gewährleisten. Pendler haben zusätzlich sehr klare Zeitpläne und erwarten, pünktlich anzukommen. Daher ist die Zuverlässigkeit der eVTOLs von höchster Bedeutung.

02.04.05 USE CASE: ÖFFENTLICHE HAND

Haupteinsatzgebiet der momentan im Einsatz befindlichen Helikopter ist die medizinische Notfallversorgung, insbesondere nach Unfällen, aber auch zum Organ- und Bluttransport oder Personentransport zwischen zwei Krankenhäusern. 2022 gab es 2144 Einsätze der ADAC-Luftrettung in Baden-Württemberg zur medizinischen Notfallversorgung. [35] Folgende Einsatzgebiete sind allerdings ebenso Teil des momentanen Aufgabenbereichs von Helikoptern der öffentlichen Hand:

■ **Notfall- und Katastrophenhilfe:**

- Schneller Transport von Rettungskräften und medizinischem Personal zu Notfallorten, insbesondere in schwer zugänglichen Gebieten nach Naturkatastrophen wie Erdbeben, Überschwemmungen oder Waldbränden.
- Momentan 10 Rettungshubschrauber in Baden-Württemberg im Einsatz.

- **Luftüberwachung und Such- und Rettungseinsätze:**
 - Nutzung von eVTOLs zur Luftüberwachung in großen Gebieten, um vermisste Personen zu lokalisieren oder bei Such- und Rettungsaktionen zu unterstützen.
- **Brandbekämpfung und Waldbrandbekämpfung:**
 - Einsatz von eVTOLs zur schnellen Verlegung von Feuerwehrleuten und Ausrüstung in Brandgebiete, um Brände einzudämmen und zu bekämpfen.
- **Grenzüberwachung und Sicherheit:**
 - Nutzung von eVTOLs zur Überwachung von Grenzregionen und zur schnellen Reaktion auf Sicherheitsvorfälle.
 - Baden-Württemberg besitzt eine 179 km lange gemeinsame Grenze mit Frankreich, 316 km mit der Schweiz und 86 km Uferlänge des Bodensees als Grenzregion mit Schweiz und Österreich.
- **Transport von Einsatzkräften und medizinischer Ausrüstung:**
 - Schnelle Bereitstellung von Einsatzkräften wie Polizei, Feuerwehr und medizinischem Personal zu Einsatzorten, insbesondere in städtischen Gebieten mit Verkehrsengepässen.
- **Krisenmanagement und Evakuierung:**
 - Verwendung von eVTOLs zur effizienten Evakuierung von gefährdeten Gebieten bei drohenden Naturkatastrophen oder anderen Krisensituationen.
 - In Baden-Württemberg insbesondere relevant für Hochwasser- und Sturmereignisse, die im Zuge der Klimaerwärmung vermutlich an Häufigkeit zunehmen werden, sowie in Waldbrandsituationen. [36]
- **Umweltüberwachung und -management:**
 - Durchführung von Umweltinspektionen, Überwachung von Naturschutzgebieten und Schutz von Tier- und Pflanzenpopulationen aus der Luft.
- **Transport von RegierungsvertreterInnen:**
 - Schneller und effizienter Personentransport zu Standorten für Inspektionen, Meetings oder Notfallinterventionen.

Viele dieser Einsatzszenarien sind auch mit eVTOLs denkbar, vor allem perspektivisch bei höherer Reichweiten- und Payload-Grenzen der verfügbaren Modelle. Insgesamt ist der Einsatz von eVTOLs als Ersatz von momentan im Betrieb befindlichen Helikoptern besonders attraktiv durch die geringere Lärmbelastigung und die Emissionsreduktion gegenüber kerosin-betriebenen Helikoptern, wo immer es angesichts des zum Einsatzzeitpunkt bestehenden Lastenhefts möglich ist.

Da sich der Use Case Öffentliche Hand allerdings in Anwendung, Wirtschaftlichkeitsmodell und Zugänglichkeit der Flugzeuge sehr stark von den anderen Use Cases unterscheidet, wird er im folgenden Kapitel hinsichtlich Netzwerkvorschlag, Wirtschaftlichkeit und Szenarioanalyse nicht berücksichtigt.

03. BEWERTUNG DES POTENZIALS VON AAM IN BADEN-WÜRTTEMBERG

Um das Potenzial und mögliche Szenarien für den Hochlauf von AAM in Baden-Württemberg zu bewerten, werden in den folgenden Kapiteln zuerst Standort- und Emissionsanalysen und anschließend eine Wirtschaftlichkeits- und Szenario-betrachtung durchgeführt.

03.01 STANDORTANALYSE

In diesem Kapitel wird auf Ebene der Landkreise Baden-Württembergs analysiert, inwiefern diese sich als attraktive Region zur Platzierung von Vertiports und als Teil eines AAM-Netzwerkes eignen. Im Folgenden erweist sich ein Landkreis als „attraktiv“, wenn sich dieser innerhalb von Baden-Württemberg durch ein relativ zu anderen Landkreisen hohes Nachfragepotenzial auszeichnet. Die Analyse erfolgt makroskopisch auf Landkreis-Ebene, d.h. es werden keine konkreten Standorte für Vertiports innerhalb eines Landkreises identifiziert. Eine mikroskopische Analyse, welche unter anderem mindestens abstrakte bauliche und statische Bewertungen, eine Abschätzung der vorhandenen und benötigten Stromnetzkapazitäten und eine Analyse des lokalen Luftraums bedürfte, ist im Rahmen dieser Studie zur erstmaligen Potenzialabschätzung nicht relevant und daher nicht vorgesehen.

03.01.01 LANDKREIS-SCORING-SYSTEM

Um alle baden-württembergischen Landkreise vergleichbar hinsichtlich ihrer Relevanz für mögliche AAM-Routen bewerten zu können, wurde eine Gruppe von Key Performance Indicators (KPIs) erarbeitet. Mit diesen können die Ansprüche der identifizierten Nutzergruppen (vgl. Kapitel 02.03.02) beschrieben und jeder Landkreis im Hinblick auf die Attraktivität aus Sicht der jeweiligen Nutzergruppe bewerten werden. Eine Übersicht der erarbeiteten KPIs ist in Tabelle 5 zu finden. Diese werden im Folgenden erläutert.

Für Flüge mit einem eVTOL sind mittelfristig mindestens dem Taxi ähnliche oder auch höherer Preise zu erwarten (vgl. Kapitel 03.03.03). Ob sich eine einzelne Person jedoch für die Buchung eines eVTOLs entscheidet, hängt neben dem absoluten Preis und der Verbindungsleistungen, insbesondere der Reisezeiterparnis, auch entscheidend von den eigenen finanziellen Mitteln ab. [37] Aus diesem Grund wurde das **durchschnittliche Haushaltseinkommen** einbezogen. Die **Anzahl der Beschäftigten** im Landkreis ist ein Faktor, der auf Kundenpotenzial für Geschäftsreisen erfolgreicher Unternehmen und Pendelreisen hinweist. Eine hohe **Übernachtungsdichte** deutet auf eine beliebte und gut besuchte touristische Region hin, was die Attraktivität von eVTOL-Flügen für Premiumtouristen steigern kann. **Touristische Points of Interest (POI)** wie touristische

Attraktionen, ICE-Bahnhöfe und Flughäfen stellen konkrete Ziele bzw. Ausgangspunkte touristischer (Teil-) Reisen dar und steigern somit die Attraktivität einer Region. Das **Verhältnis zwischen der tatsächlichen Fahrstrecke und der Luftlinie** beeinflusst die wahrgenommene Effizienz der eVTOL-Flüge und hängt meist auch mit dem **potenziellen Zeitersparnis** bei der Reise zusammen, die ein entscheidendes Kriterium für viele potenzielle, vor allem geschäftliche Kunden ist. Zudem spielen **Unternehmensstandorte** mit großer industrieller Bedeutung eine wichtige Rolle, da sie zahlungskräftiges Geschäftspublikum anziehen und somit die Nachfrage nach eVTOL-Flügen erhöhen können. All diese Faktoren sind essenziell, um die Attraktivität und die tatsächliche Nutzung von eVTOL-Flugdiensten in einer bestimmten Region zu verstehen und zu bewerten.

Tabelle 5: Übersicht über die verwendeten KPIs und ihre Datenherkunft.

KPI	Datenquelle
Verfügbares, reales Haushaltseinkommen	WSI [38]
Beschäftigte im Landkreis	destatis [39]
Übernachtungsdichte	statistikbw [40]
Touristische Points of Interest (Attraktionen, ICE, Flughafen)	Land BW [41]
Verhältnis Fahrstrecke/Luftlinie	Eigene Berechnung
Zeitersparnis Fahrzeit	Eigene Berechnung
Unternehmens-PoI (Großer Industriestandort, ICE, Flughafen)	IHK [42]

Auf Basis der oben beschriebenen KPIs werden nun die identifizierten Nutzergruppen charakterisiert. Hierzu werden jeder Persona verschiedene KPIs zugeordnet und mit einem Gewichtungsfaktor versehen. Mit diesen werden den zugeteilten KPIs innerhalb der Personas unterschiedlich starker Einfluss zu Teil. Die Charakterisierung der Personas ist in Tabelle 6 zu finden. Die vorgestellten KPIs bzw. Charakterisierungen sollen in diesem Kontext die qualitative Nachfragewahrscheinlichkeit aus Sicht einer konkreten Person der jeweiligen Nutzergruppe beschreiben. Zum Beispiel: So steigt die Wahrscheinlichkeit, dass eine Person der Nutzergruppe „Premiumtourist“ ein Lufttaxi bucht, wenn sie so eine touristische Attraktion erreichen kann, oder wenn sie über ein hohes Einkommen verfügt. Letzteres wiegt dabei schwerer.

Tabelle 6: Übersicht über die Gewichtung der jeweiligen KPIs je Persona wie in Formel (1) beschrieben

Persona	KPIs	Gewichtungskoeffizient c_i
Premiumtourist	Verfügbares Einkommen	5
	Fahrstrecke/Luftlinie	1
	Geschätzte Zeitersparnis	1
	Anzahl Übernachtungen	1
	Vorhandensein POIs (Attraktionen, ICE-Station, Internationaler Flughafen)	2
Geschäftskunden	Anzahl Beschäftigte	2
	Vorhandensein POIs (Standorte Industrie, ICE-Station, Internationaler Flughafen)	4
	Fahrstrecke/Luftlinie	1
	Geschätzte Zeitersparnis	3
Berufspendler	Verfügbares Einkommen	4
	Fahrstrecke/Luftlinie	3
	Geschätzte Zeitersparnis	3

Auf Basis dieses Konzepts wird der Score $score_{Persona}$ eines Landkreises für eine Nutzergruppe dann wie folgt berechnet:

$$score_{Persona} = \sum_{i \in KPIs} c_i \cdot score_i^{LK} \quad (1)$$

Dabei entspricht c_i dem Gewichtungskoeffizienten der Persona für den KPI i und $score_i^{LK}$ dem normalisierten Wert der KPI i für den jeweiligen Landkreis.

Der Gesamtscore eines Landkreises berechnet sich aus der Summe aller Persona-Scores mit jeweiliger Gewichtung nach erwarteter Nachfragerrelevanz:

$$score_{Gesamt} = \sum_{Persona} d_{Persona} \cdot score_{Persona}^{LK} \quad (2)$$

Die $d_{Persona}$ -Gewichtungen wurden als 60% für Premiumtouristen, 35% Geschäftsreisende und 5% Pendelreisende angenommen basierend auf der Nachfrageverteilung des Fernreiseverkehrsmittels Flugzeug. [29], [43], [44]

Daraus ergibt sich ein aggregiertes Gesamtscoreing aller Landkreise, wie in Abbildung 5 dargestellt. Klar zu erkennen sind mehrere Potenzialschwerpunkte. Diese werden im folgenden Kapitel erläutert.

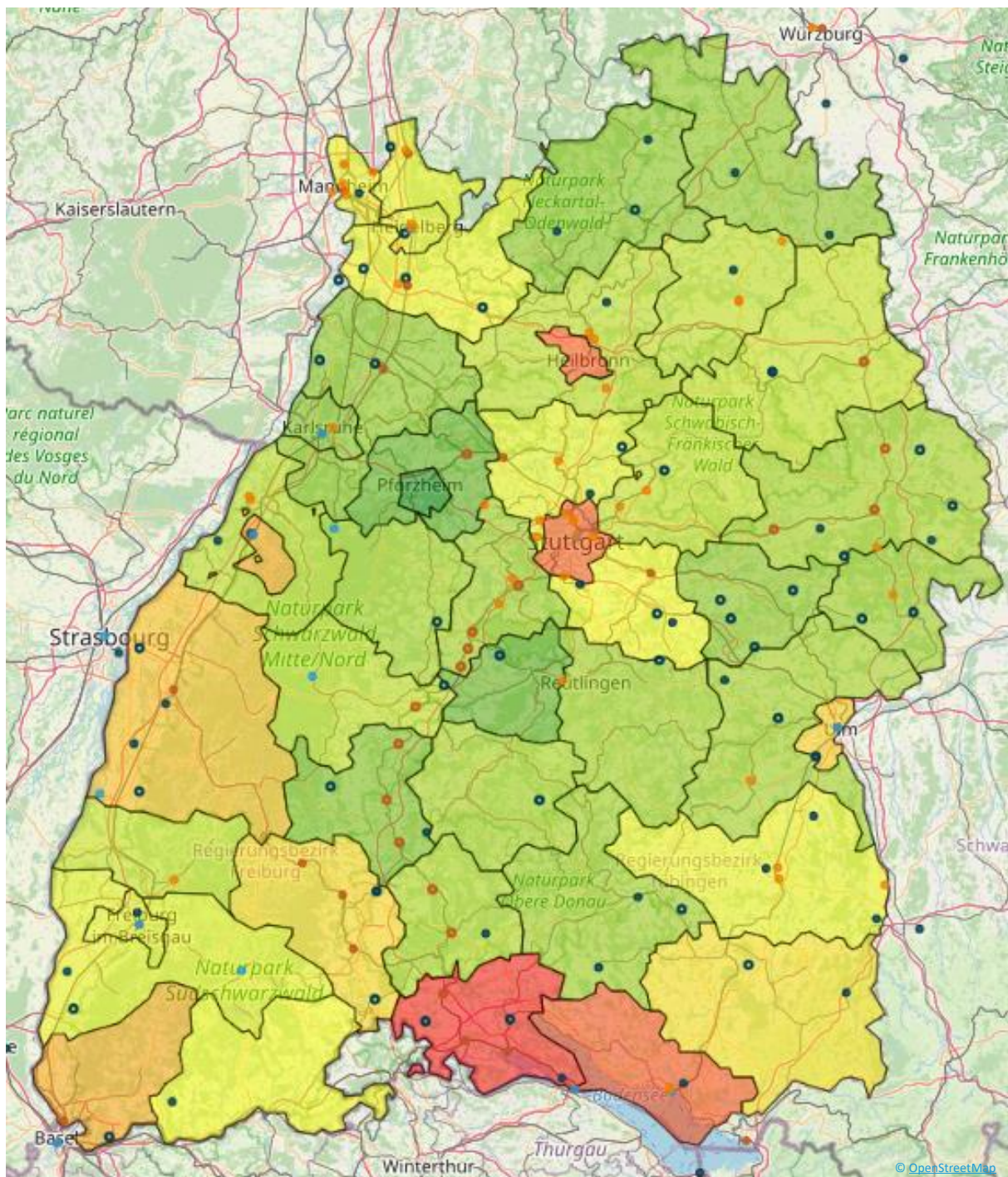


Abbildung 5: Gesamtscoreing der Landkreise in Baden-Württemberg. Je dunkler die Rotschattierung, desto größer das Potenzial für den Einsatz von AAM in diesem Landkreis, je dunkler die Grünschattierung desto geringer das Potenzial. Zudem ist die Verteilung wichtiger Infrastruktur dargestellt. Flugplätze blau (gefüllt, wenn gute infrastrukturelle Voraussetzungen), wichtige Industriestandorte hell-orange und IC(E) Bahnhöfe dunkel-orange.

03.01.02 IDENTIFIZIERTE URBANE UND REGIONALE CLUSTER

Urbane Cluster Stuttgart-Rhein-Neckar: Dieses zeichnet sich allgemein durch eine hohe Bevölkerungsdichte und viel Industrie aus. Hinzukommt die im Vergleich zu anderen Städten unterdurchschnittliche Anbindung von Heilbronn an Stuttgart und Mannheim/Heidelberg. In begrenztem Umfang könnten sich im Raum Stuttgart zudem UAM-Potenzial im eigentlichen Wortsinn ergeben. Dies wird im Kapitel 03.03.03 im Detail analysiert. Klar abgegrenzt werden können diese Schwerpunkte zum einen von Nordost- und Ost-Baden-Württemberg, welche von weniger zahlreichen Industriestandorten und einer geringeren Bevölkerungsdichte geprägt sind. Zum anderen von ebenfalls wirtschaftlich starken aber sehr gut zu erreichenden Zentren, wie Pforzheim oder Karlsruhe.

Regionale Cluster Schwarzwald, Bodensee, Schwäbische Alb: Diese Regionen zeichnen sich durch eine insgesamt unterdurchschnittliche Anbindung an andere wichtige Regionen in Baden-Württemberg aus, weisen gleichzeitig aber punktuell wichtige Industrien oder wichtige touristische Attraktionen auf (mehrere Schwarzwaldregionen, Europapark Rust, Bodensee etc.). Insbesondere können signifikante Reisezeitvorteile erzielt werden, sobald der Schwarzwald überflogen wird; auch in Richtung Stuttgart. Auch die Bodenseeregion bietet neben dem Potenzial für touristische Rundflüge auch das der „Luft-Fähre“ und somit in Baden-Württemberg ansonsten unerreichbare Reisezeitvorteile, siehe Abschnitt 03.03.07.

03.01.03 WEITERE EINFLUSSFAKTOREN

Neben der Nachfrage gibt es diverse weitere Faktoren, die beeinflussen, ob eine Region ein geeigneter Teil eines Flugtaxi-Netzwerks sein kann. Im Folgenden werden drei weitere Faktoren erörtert.

03.01.03.01 TOURISTISCHE „PULL“-FAKTOREN

Lokale Investitionen in Vertiports bspw. als Rundflugattraktion (vgl. Abschnitt 02.03.02.01), stärken das Netzwerk von der Angebotsseite und können auf diese Weise Nachfrage generieren und Folgeinvestitionen nach sich ziehen, die es bei einer reinen Nachfragebetrachtung nicht gegeben hätte. Das lokale wirtschaftliche Potenzial dieses Faktors ist nicht Teil dieser Studie, konkrete denkbare Fälle können aber bereits genannt werden und wurden im Netzwerkkonzept berücksichtigt. Aus Gesprächen mit dem Verkehrsministerium BW⁷ ergab sich, dass der Europapark-Rust ein interessanter Show-Case für den VoloCity sein könnte. Ein in dem Zuge errichteter Vertiport ließe sich vergleichsweise kostengünstig ausbauen, um Teil eines allgemeinen FlugtaxiNetzwerks zu sein. Eine mögliche Folgeinvestition wäre ein Ver-

⁷ Informationsstand November 2023

tiport in Freiburg. Eine Verbindung in „UAM-Distanz“ zum Europapark Rust wäre möglich.

Im Rahmen des Austausches mit dem Flughafen Bodensee-Airport Friedrichshafen wurde deutlich, dass lokale Rundflüge mit einem eVTOL am Bodensee intern bereits diskutiert wurden. Weitere Vertiports, welche primär der Steigerung der touristischen Attraktivität dienen, könnten in Titisee-Neustadt und Baiersbronn entstehen. Auch hier wären Verbindungen in „UAM-Distanz“ und somit Anreize für Folgeinvestitionen in Vertiports nach Villingen-Schwenningen, Freiburg oder Baden-Baden denkbar. Allgemein werden Rundflüge in Baden-Württemberg bereits von zahlreichen Flugplätzen aus angeboten, insbesondere auch von den Flughäfen Friedrichshafen, Mannheim und Stuttgart.

03.01.03.02 VORHANDENE INFRASTRUKTUR

Wie in der Wirtschaftlichkeits- und Szenarioanalyse deutlich werden wird, machen die Investitionen in einen Vertiport einen nicht vernachlässigbaren Teil der Flugkosten aus. Insbesondere Vertiports die auf bestehenden Gebäuden errichtet werden sollen, können besonders teuer werden. Daher bieten sich Standorte mit bereits vorhandener Bodeninfrastruktur im Besonderen an. Wichtigstes Kriterium ist, dass die vorhandene Infrastruktur das Starten und Landen von Flugzeugen und Helikoptern mit einem MTOW von 3200 kg (vgl. Markt- und Reichweitenanalyse) bereits ermöglicht. In diesem Falle fehlten zur „Mindestausstattung“ eines Vertiports mit den aktuellen technischen Anforderungen lediglich die Ladeinfrastruktur, sofern keine Sicherheitskontrollen notwendig werden sollten (vgl. Kapitel 02.02.02). Des Weiteren ist es wahrscheinlich, dass die lokale Bevölkerung den Flugbetrieb durch Lufttaxis an solchen Standorten eher akzeptiert als an Orten, an denen ein Vertiport auf der „grünen Wiese“ errichtet wird; ein nicht zu unterschätzender Faktor (vgl. Kapitel 02.03.01). Zudem ist mindestens die Verkehrsinfrastruktur für PKW-Verkehre bereits vorhanden, teilweise auch schon ÖPNV-Anbindungen. Neben den größeren Flughäfen Baden-Württembergs wie Stuttgart, Karlsruhe/Baden-Baden, Friedrichshafen und Lahr, sind auch deutlich kleinere Flugplätze interessant; insbesondere, wenn keine Sicherheitskontrollen erforderlich sein sollten. Dies überschneidet sich in Teilen mit touristischen Anreizen für die Regionen wie Baden-Baden, Freiburg, Villingen-Schwenningen etc. (vgl. oben). Aber auch Städte wie Biberach an der Riß oder Schwäbisch Hall könnten von der vorhandenen Infrastruktur profitieren.

03.01.03.03 ANBINDUNG LÄNDLICHER REGIONEN WIE NORD-OST-BADEN:

Besonders ländliche Regionen könnten von der Anbindung durch Lufttaxis hinsichtlich einer Reisezeitverkürzung stark profitieren; können gleichzeitig aber nur eine geringe Bevölkerungsdichte aufweisen. Dies hat zwei Konsequenzen. Zum einen eine insgesamt begrenzte Nachfragemenge und zum anderen wären unter Umständen längere Fahrten notwendig, um einen Vertiports überhaupt zu erreichen. Beides macht die

privatwirtschaftliche Investition in die Anbindung, als auch die Nutzung durch viele Personen unwahrscheinlich. Um lange Anfahrten zu vermeiden und somit die Attraktivität eines Vertiports bzw. des gesamten Netzwerks zu erhöhen, bräuchte es ein dichtes Netz an Vertiports. Damit dies kostengünstig möglich ist, müssen Vertiports Investitions-minimal errichtet werden. Vertiports bzw. Vertistations in Form von „Helipads“ (vgl. Kapitel 02.02.01) sind denkbar. An diesen würden Lufttaxis idealerweise nicht geladen, um die Infrastrukturkosten weiter zu drücken. Neben Vertihubs mit hoher Ladekapazität im Netzwerk, braucht es auch eVTOLs mit hoher Reichweite, um Hin- und Rückflug ohne Zwischenladung zu ermöglichen. eVTOLs mit den notwendigen Reichweiten werden kurzfristig nicht verfügbar sein (vgl. Kapitel 02.01.02). Die Kosten für große Hubs und reichweitenstarke eVTOLs sind heute nicht zuverlässig zu schätzen. Langfristig ist ein solches Szenario aber nicht auszuschließen. Auch weil es in Baden-Württemberg bereits diverse Flugplätze in ländlichen Regionen gibt, die teilweise bereits ein MTOW von 3200 kg erlauben, bspw. Lohrbach-Mosbach oder Niederstetten. (vgl. hierzu den vorherigen Abschnitt). Aus diesen Gründen findet im Folgenden jedoch keine Berücksichtigung der ländlichen Regionen im Netzwerk und in der Wirtschaftlichkeitsanalyse statt. Zu Anschauungszwecken wurde mit derselben Methodik des UAM Deep-Dives für Stuttgart (vgl. Kapitel 03.03.03) das Zeitersparnispotenzial des zum Stadtzentrum Stuttgart für den Norden Baden-Württembergs dargestellt. Neben der verbesserten Anbindung zu Städten wie Heilbronn (ca. 25 Minuten Ersparnis) oder Mannheim/Heidelberg (75 Minuten) wären Zeitersparnisse zu ländlicheren Regionen von 50 Minuten nach Lohrbach-Mosbach, 30 Minuten nach Schwäbisch-Hall oder 80 Minuten nach Niederstetten denkbar.

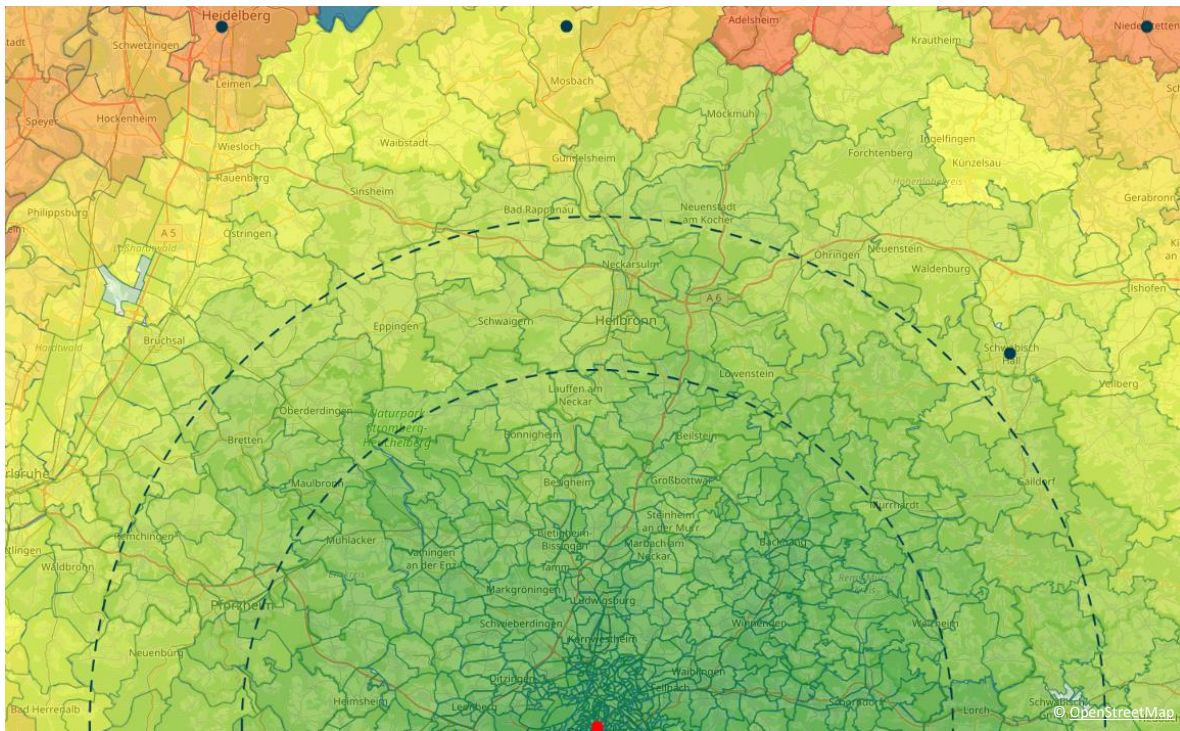


Abbildung 6: Zeitersparnispotenzial für AAM-Flüge zur Innenstadt Stuttgart (Markierung rot) gegenüber belasteten PKW-Fahrzeiten. Rot- >100 min, Gelb - >50 min, Grün - <50 min Zeitersparnis. Markiert dunkelblau von links: Heidelberg, Lohrbach-Mosbach, Schwäbisch-Hall, Niederstetten

03.02 EMISSIONSANALYSE

Die Emissionsreduktion spielt eine zentrale Rolle in der Entwicklung nachhaltiger Mobilitätslösungen. Dabei nimmt die Elektrifizierung von Verkehrsmitteln eine herausragende Position ein. Nicht nur im Bereich elektrisch betriebener Fahrzeuge, sondern auch in der urbanen und regionalen Luftmobilität wird verstärkt nach Wegen gesucht die Umweltauswirkungen zu minimieren. Dieses Kapitel untersucht die verschiedenen Aspekte der Emissionsreduktion im Kontext der eVTOL-Technologie und zeigt auf, wie sie einen Beitrag zur nachhaltigen Mobilität der Zukunft leisten können.

In der folgenden quantitativen Emissionsanalyse setzen sich die Gesamtemissionen eines Verkehrsmittels aus den entstehenden Treibhausgasemissionen aus der Kraftstoffherstellung bzw. Energieerzeugung (Rohstoffbeschaffung, Transformation, Transport und Aufbereitung) und der Kraftstoffnutzung (Verbrennung im Motor) zusammen. Aufgrund einer unzureichenden Datengrundlage wurden die Treibhausgasemissionen, die zur Herstellung einer eVTOLs anfallen, nicht in der Emissionsanalyse berücksichtigt. Der aktuelle Stand der Forschung und Veröffentlichung der Hersteller wurde dennoch zusammengefasst.

03.02.01 ENERGIEERZEUGUNG UND -NUTZUNG

In der Fachliteratur werden diese Anteile der Kraftstoffherstellung bzw. Energieerzeugung als Well-to-Tank und die der Kraftstoffnutzung als Tank-to-Wheel (bzw. Tank-to-Wake im Fluggerät-Kontext) unterschieden. Für batteriebetriebene Verkehrsmittel fallen während des Betriebs näherungsweise keine Emissionen an; nur durch die Herstellung des zum Betrieb notwendigen Stroms gehen in die Rechnung ein. Hierfür ist die Zusammensetzung des verwendeten Strommixes entscheidend. Durch die fortschreitende angestrebte Dekarbonisierung des Strommixes in Deutschland ist damit zu rechnen, dass eVTOLs und Elektroautos in der Zukunft immer stärker Emissionen einsparen können im Vergleich zu motorbetriebenen Verkehrsmitteln (Verbrenner-Auto, Helikopter).

Die Emissionsanalyse von eVTOLs und herkömmlichen Fahrzeugen ist von einer Vielzahl variabler Faktoren abhängig, die die Gesamtbilanz maßgeblich beeinflussen. Zunächst spielt die Fahr- bzw. Flugstrecke eine entscheidende Rolle. Durch die sehr energieintensive Start- bzw. Landephase (hover phase) sind kurze Strecken für eVTOLs mit einem deutlich höheren Energieverbrauch pro km verbunden, während sich auf längeren Strecken die optimierten Flugeigenschaften im Flug auf konstanter Höhe (cruise phase) positiv auf den Energieverbrauch pro km auswirken. Weiterhin ist die Auslastung der Fahrzeuge bzw. Fluggeräte entscheidend. Für PKW auf deutschen Straßen beträgt die durchschnittliche Auslastung 1,4 Personen pro PKW. [45] Für eVTOLs ist bei den kleineren Modellen wie dem VoloCity besonders relevant, ob sie autonom fliegen und damit ein Sitzplatz mehr zum Passagiertransport zur Verfügung steht. In jedem Fall verringert eine hohe Auslastung der eVTOL deren Emissionen pro Kopf. Zuletzt geht auch der räumliche Kontext in die Analyse ein, da in dicht besiedelten, städtischen Räumen mit einem höheren Kraftstoffverbrauch der Verbrenner-PKW zu rechnen ist als im ländlichen Gebrauch. Es ist anzumerken, dass für einen allgemeinen Vergleich des Energieverbrauchs die von boden-gebundenen Fahrzeugen zu fahrende Strecke zwischen Start und Ziel im Vergleich zur Luftlinie als im Bundesdurchschnitt 1,3-mal so lang angenommen wird. [46]

In den folgenden Abbildungen sind verschiedene Verkehrsmittel mit ihren zu erwartenden Emissionen pro Personenkilometer aus Kraftstoffherstellung und -nutzung dargestellt. Hierbei wurden exemplarisch zwei unterschiedliche eVTOL-Einsatzszenarien zugrunde gelegt: Zum einen als UAM-Beispiel ein kurzer 25 km Flug im städtischen Raum (Abbildung 7) und zum anderen ein RAM-Flug über 100 km im ländlichen Raum (Abbildung 8). In beiden Fällen wurden voll-ausgelastete, nicht-autonom fliegende eVTOLs und Helikopter angenommen, während für alle PKW die deutsche Durchschnittsauslastung von 1,4 einberechnet wurde. Außerdem wurde für alle elektrischen Verkehrsmittel der Strommix von 2022 aus der jüngsten Publikation des Umweltbundesamtes [47] sowie eine Hochrechnung für 2030 miteinbezogen. [48]

In beiden Fällen wird ersichtlich, dass eVTOLs (abgesehen vom VoloCity) bei voller Auslastung konkurrenzfähige Emissionen gegenüber PKWs mit Verbrennermotoren haben, insbesondere gegenüber Helikoptern, nicht jedoch mit e-Autos und ÖPNV mithalten können. Nur auf der langen Strecke sind die Emissionen deutlich unter denen von ICEVs, auf kurzen Strecken ist der Emissionsausstoß ähnlich oder sogar leicht darüber. Da eVTOLs in dieser Kraftstoff-zentrierten Analyse ausschließlich vom Strommix abhängig sind, ist der Vorteil gegenüber Verbrennern sehr wahrscheinlich in der Zukunft mit fortschreitender Dekarbonisierung des Strommixes noch größer.

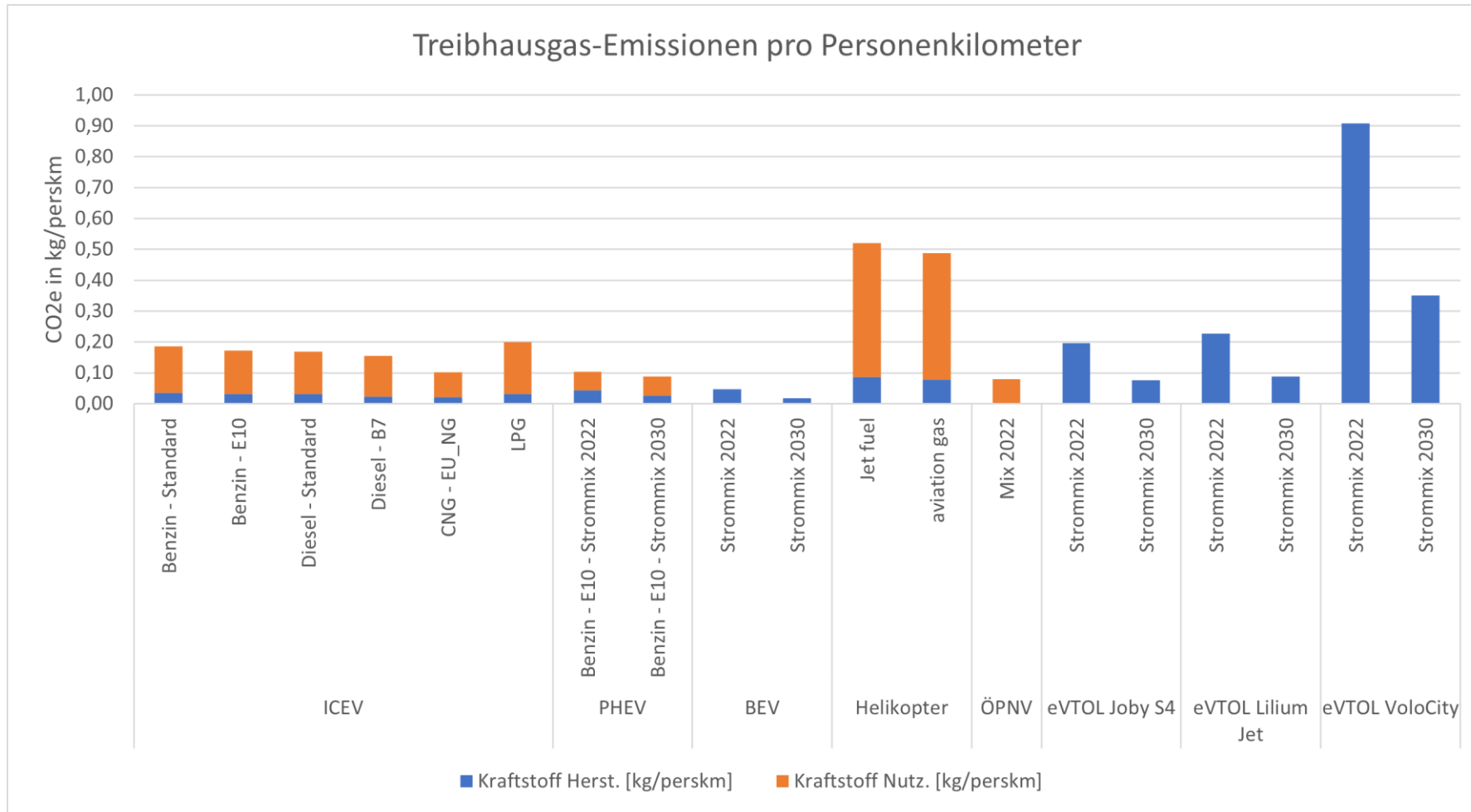


Abbildung 7: Emissionen pro Personenkilometer für verschiedene Fahrzeuge und Fluggeräte auf einer 25 km Luftlinien-Route im städtischen Raum. ICEV – Internal Combustion Engine Vehicle, PHEV – Plug-in Hybrid Electric Vehicle, BEV - Battery Electric Vehicle, Emissionen in CO₂e (CO₂-Äquivalente)

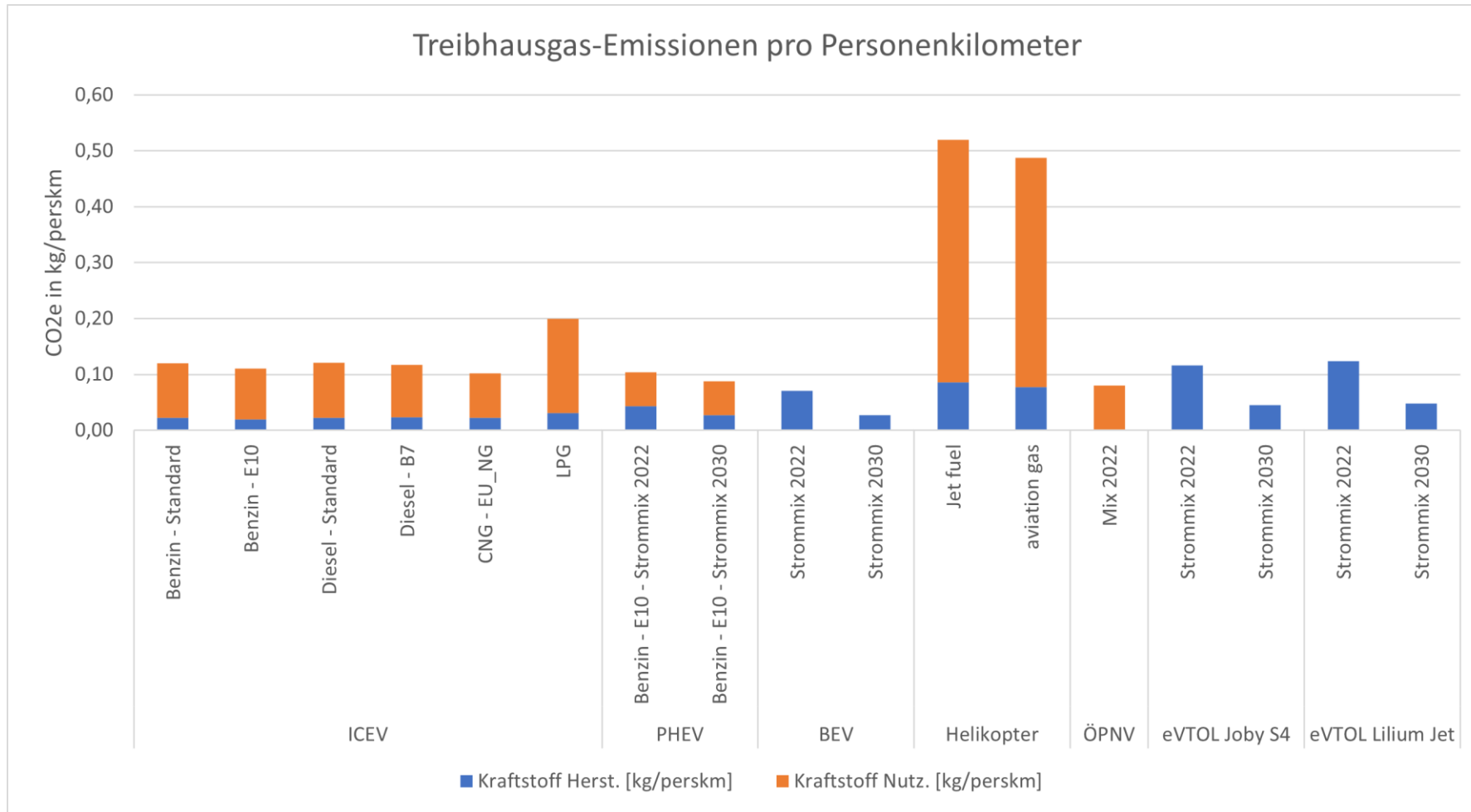


Abbildung 8: Emissionen pro Personenkilometer für verschiedene Fahrzeuge und Fluggeräte auf einer 100 km Luftlinien-Route im ländlichen Raum in CO_{2e}.

Aus dieser Analyse sowie gestützt durch verschiedenen Literaturergebnissen [45], [49], [50] ergeben sich folgende Empfehlungen, um die Nachhaltigkeit des Einsatzes von eVTOLs zu erhöhen:

- Keine kurzen Flüge unter 25 km fliegen, um Quotient hover/cruise niedrig zu halten. Emissionen für Flüge unter 25 km sind nicht vorteilhaft gegenüber PKW.
- Volle Sitzauslastung und Modelle mit vielen Sitzen bevorzugen, Leerflüge vermeiden.
- Fluggeräte wählen, die auf hohe Effizienz während der cruise-Flugphase optimiert sind (vectored thrust, fixed wing und tilt-rotor-Modelle besser als wingless-Modelle, die auf die hover-Flugphase optimiert sind).
- Fortschritte bei der Batterieentwicklung müssen von den Modellherstellern umgehend berücksichtigt werden um höhere spezifische Energiedichten auszunutzen und so das Gesamtgewicht des eVTOL zu senken oder die Reichweiten zu erhöhen (Li-Air-Batterien, solid state-Batterien).

03.02.02 EMISSIONEN AUS HERSTELLUNG UND WARTUNG

Treibhausgasemissionen von allen Transportmitteln, so auch eVTOLs, ergeben sich jedoch nicht ausschließlich aus dem Energieverbrauch und dessen Herstellung, wie in Abschnitt 03.02.01 dargestellt, sondern auch die aus der Produktion des Transportmittels und bei elektrischen Angetriebenen auch die der während Lebensdauer notwendigen Batterie(n). Durch die momentan noch ausstehende Markteinführung gibt es hierfür bisher nur Schätzungen, die auf von den Herstellern kommunizierte Angaben, vor allem zu Leergewicht und Batteriespezifikation, und sinnvollen ingenieur-wissenschaftlichen Annahmen basieren. So wurden beispielsweise die produktionsbedingten Emissionen für den VoloCity auf 9 t CO₂e⁸ pro Fluggerät geschätzt, während diese für die deutlich größeren Modelle Joby S4 und Lilium Jet bei höheren 31 bzw. 49 t CO₂e eingeschätzt wurden. [45]

Die mit der Batterie verbundenen Emissionen sind – unter der Annahme, dass ähnliche Herstellungsverfahren und Materialien wie für Elektroautos zum Einsatz kommen – deutlich umfangreicher erforscht und belaufen sich momentan auf etwa 200 kg CO₂e je kWh Kapazität der Batterie. Dies ist allerdings wiederum sehr abhängig vom Strommix während der Herstellung und könnte bei fortschreitender Dekarbonisierung auf bis zu 62 kg CO₂e/kWh fallen. [51] Typische Batteriegrößen reichen je nach Modell von 60 bis 300 kWh. Die Batterien sollen etwa 800 Ladezyklen standhalten, was einen jährlichen oder anderthalb-jährlichen Austausch nötig machen könnte. [45] Somit können bei 15-20 Jahren Lebensdauer eines eVTOLs bis zu 20 Batterien nötig sein. Insgesamt

⁸ carbon dioxide equivalent (CO₂-Äquivalente)

ergeben sich so beispielsweise für den VoloCity geschätzte 160 t CO₂e über den gesamten Lebenszyklus eines einzelnen Fluggeräts, für einen größeren Joby S4 entsprechend etwa 470 t CO₂e. Diese Schätzungen stehen etwa 100 t CO₂e Produktions- und Instandhaltungsemissionen für einen durchschnittlichen Verbrenner-PKW, bzw. 120 tCO₂e für ein Elektroauto gegenüber. [52]

Die zum jetzigen Zeitpunkt zur Verfügung stehenden, ermittelten und in diesem Abschnitt aufgearbeiteten Daten sind jedoch nicht belastbar und von hohen Unsicherheiten geprägt. Daher wurden diese nicht in die Berechnung mit einbezogen.

03.02.03 ENTLASTUNGSPOTENZIAL

Im Hinblick auf den potenziellen Einfluss neuer Mobilitätsformen auf die Verkehrswende ist nicht nur die Emissionsbilanz einzelner Flüge von Bedeutung, sondern auch inwieweit diese Mobilitätsformen zur Stauvermeidung und Entlastung von Straßen und Städten beitragen können. Hier würden eVTOLs durch die Nutzung des Luftraums und den geringen Flächenbedarf für den senkrechten Start- bzw. Landevorgang prinzipiell Potenzial bieten. Genauere Betrachtung der notwendigen Stückzahlen zeigt jedoch, dass sehr viele eVTOLs notwendig wären, die in näherer Zukunft nicht zu erwarten sind. Zudem ist für einen hohen Durchsatz von Vertiports eine gewisse Größe des Vertiports erforderlich, welches aus Platzgründen in der Innenstadt eine weitere Beschränkung darstellt.

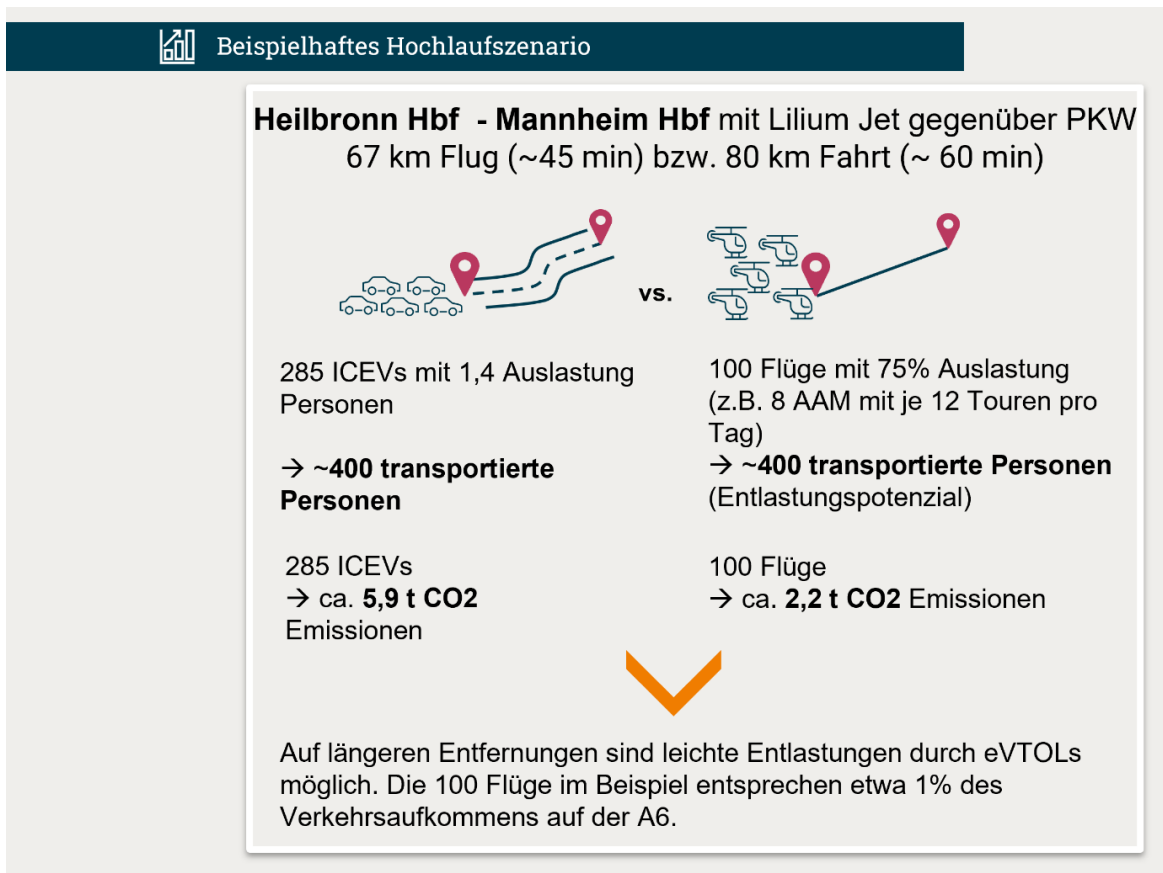


Abbildung 9: Am Beispiel einer Reise von Heilbronn nach Mannheim wird der Beitrag von eVTOLs zur Verkehrswende auf dieser Strecke evaluiert. Das Verkehrsaufkommen auf der A6 zwischen Mannheim und Heilbronn entstammt aktuellen Zählungen. [53]

Aus Abbildung 9 wird deutlich, dass im RAM-Bereich, z. B. auf der Strecke Mannheim-Heilbronn, täglich 8 Flugtaxi-Modelle mit je 12 Flügen verkehren müssten, um nur 1% des Verkehrsaufkommens auf der A6 zu ersetzen. Substanziellere Beiträge wie 10-20% Entlastung, die dann signifikant Staus und dichten Verkehr vermindern würden, erfordern dementsprechend 80-100 konstant im Einsatz befindliche Flugtaxis auf dieser einen Strecke. Weder sind diese Stückzahlen inkl. notwendiger Batterien und Ladeinfrastruktur momentan von Herstellerseite geplant und Platzverfügbarkeit für Vertiports mit ausreichender Kapazität in den meisten Gebieten gegeben noch ist eine solche Nachfrage in naher Zukunft realistisch. Weltweit werden bis 2035 15.000 bzw. bis 2040 45.000 eVTOLs zur Passagierbeförderung erwartet. [14], [54]

Betrachtet man urbane Einsatzszenarien von Flugtaxis ist zudem häufig von indirekten Flugtaxiverbindungen auszugehen. Eine Verbindung ist immer dann indirekt, wenn nicht die gesamte Reise durch ein Flugtaxi zurückgelegt werden kann. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn vom Zielvertiport noch ein Taxi zum eigentlichen Ziel gebucht werden muss. Somit würde gerechnet auf den gesamten urbanen Betrachtungsraum der Verkehr nicht in Höhe der Flugtaxikapazität entlastet werden, sondern

nur streckenabschnittsweise. Im Bereich der Vertiports dagegen wäre ein etwas erhöhtes Verkehrsaufkommen zu erwarten. Insgesamt ist der Beitrag von eVTOLs zur Verkehrsentlastung daher auf absehbare Zeit als sehr gering zu bewerten; insbesondere im urbanen Raum.

03.03 WIRTSCHAFTLICHKEITS- UND SZENARIOANALYSE

Ein eVTOL-Netzwerk wäre eine innovative Mobilitätsform für den Personentransport in Baden-Württemberg. Angesichts der Neuartigkeit ist es wichtig, die Wirtschaftlichkeit eines solchen Netzwerks gründlich zu untersuchen. Das folgende Kapitel zielt darauf ab, die finanzielle Rentabilität und die potenziellen Auswirkungen auf die Flugpreisentwicklung zu bewerten. Dies ermöglicht es Stakeholdern, fundierte Entscheidungen über Investitionen, Infrastrukturplanung und Geschäftsstrategien im Zusammenhang mit eVTOL-Netzwerken zu treffen. Die Untersuchung der Wirtschaftlichkeit von zwei unterschiedlich schnellen Hochläufen unter Berücksichtigung verschiedener Szenarien und Sensitivitäten gibt Aufschluss darüber, bei welchen Preisen ein solches Netzwerk tragfähig und rentabel sein kann.

03.03.01 ALLGEMEINE GESCHÄFTSMODELLE IM AAM-KONTEXT

Um einen laufenden Betrieb von eVTOL-Flügen sowohl im UAM als auch im RAM-Kontext zu gewährleisten, müssen verschiedene Firmen involviert sein, die jeweils unterschiedliche Geschäftsmodelle haben. In Kapitel 02.01.02 sind die auf dem europäischen Markt zu erwartenden Hersteller mit ihren geplanten Modellen vorgestellt worden. Die eVTOL-Hersteller sind maßgeblich für die Entwicklung, Produktion und Zertifizierung der Flugzeuge verantwortlich. Sie investieren beträchtliche Ressourcen in Forschung und Entwicklung, um sicherzustellen, dass ihre Modelle den strengen Sicherheits- und Leistungsstandards entsprechen. Hersteller bieten ihre eVTOLs entweder direkt an Airlines oder Flottenbetreiber an oder können in Ausnahmefällen auch selbst die Flüge anbieten (z. B. Volocopter in Singapur [55]). Das Hauptgeschäftsmodell für eVTOL-Hersteller besteht jedoch in jedem Fall aus dem Verkauf der Flugzeuge selbst. Zusätzlich können auch Serviceverträge für Wartung und technischen Support angeboten werden. Möglicherweise werden die Hersteller auch Leasingoptionen insbesondere für Privatpersonen in Betracht ziehen.

Zusätzlich zu den Herstellern bedarf es im Normalfall einer Airline, die die Flüge für die Passagiere anbietet. Dies können entweder bestehende Fluggesellschaften sein, die ihre Flotte um eVTOLs erweitern, oder spezialisierte eVTOL-Fluggesellschaften, die ausschließlich auf diesen Flugzeugtyp fokussiert sind. Diese Unternehmen erwerben oder leasen eVTOLs von Herstellern und betreiben sie in ihrem Netzwerk, erstellen Flugpläne oder bieten on-demand Flugtaxidienste an. Sie beschäftigen außerdem das notwendige Bordpersonal, besonders die Piloten und Pilotinnen. Das Geschäftsmodell

der Fluggesellschaften basiert auf Ticketverkäufen und Flugbuchungen. Neben dem Passagierverkehr könnten sie auch Frachttransporte und andere Dienstleistungen anbieten.

Schließlich sind Vertiport-Betreiber für den Betrieb und die Wartung der Abflug- und Ankunftseinrichtungen für eVTOLs verantwortlich. Sie müssen sich strategisch günstig in verkehrlichen, städtischen, wirtschaftlichen oder touristischen Zentren befinden, um den effizienten Betrieb der eVTOL-Flüge zu ermöglichen. Das Geschäftsmodell der Vertiport-Betreiber umfasst Lande- und Parkgebühren für eVTOL-Betreiber, möglicherweise auch Passagiergebühren. Zusätzlich könnten sie Einnahmen aus Mieteinnahmen für Einrichtungen und Werbeflächen generieren. Je nach Art des Vertiports und bestehender Infrastruktur (vgl. Abschnitt 02.02) können die Kosten je Vertiport sehr stark variieren.

Für den UAM-Anwendungsfall scheint sich im Moment die Lösung anzubieten, dass sowohl Herstellung der eVTOLs als auch Betrieb der UAM-Flüge von der gleichen Firma übernommen wird, die dann lediglich mit Vertiport-Unternehmen kooperieren muss. Im Gegensatz dazu sieht es für RAM-Flüge mehr nach der aus der etablierten Passagierluftfahrt bekannten Trennung in Hersteller, Airline und Vertiport-Betreiber aus. Einige Flugtaxi-Hersteller haben bereits Kooperationen mit einer existierenden Airline angekündigt, so z. B. Lilium und Lufthansa. [56]

03.03.02 ANNAHMEN DER WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE FÜR EIN NETZWERK IN BADEN-WÜRTTEMBERG

Zur Abschätzung der Preisentwicklung von AAM-Flügen in Baden-Württemberg wurde eine umfassende Wirtschaftlichkeitsanalyse für 2027-2037 durchgeführt.

Um das Potenzial eines AAM-Betriebs aus wirtschaftlicher Perspektive ganzheitlich quantifizieren und bewerten zu können, müssen sowohl die Geldströme des Flugtaxi-Service-Providers als auch die des Vertiport-Betreibers modelliert werden. Die Berechnung von Kosten, Einnahmen sowie den Wirtschaftlichkeits-KPIs wie dem Preis pro km erfolgt auf Basis eines gegebenen Routen-Netzwerkes und der damit verbundenen Auslastung in Start/Landungen pro Jahr sowie der Anzahl an beförderten Passagieren pro Jahr.

Grundlage ist das in Kapitel 03.01.02 vorgeschlagene Netzwerk sowie Herstellerangaben zu Kosten und Instandhaltung von drei verschiedenen Flugtaxi-Modellen (Volocopter VoloCity, Lilium Zero und Joby S4). Die Auswahl der Modelle soll repräsentativ für die Vielfalt der eVTOL-Modellkonstruktionen sein und impliziert keine Empfehlung gegenüber anderen Hersteller-Modellen. Weiterhin wurden einige Annahmen getroffen, die in Abbildung 10 dargestellt sind.

Die Berechnung der Kosten für **Flugtaxi-Service-Provider** folgt in ihrer Strukturierung in die Punkte **Vertiportgebühren, Ladebetrieb, Crew, Wartung und Reparatur, sowie Kapitalkosten** folgt weitestgehend dem Direct Operating Cost Model (DOC) für Flugtaxi [57]. Die Vertiport-Gebühren setzen sich aus Start-/Landegebühr, Grundgebühr und Passagiergebühr zusammen. Eventuelle Lärm-, Emissions- und Standgebühren werden in dieser Modellierung nicht berücksichtigt. Die Einnahmen stammen aus **Aeronautical revenues**, also Einnahmen aus dem Flugbetrieb durch den Verkauf von Tickets, und **Non-Aeronautical revenues**, wie Werbeeinnahmen, Gastronomie etc. Die Berechnung der Kosten und Einnahmen der Vertiport-Betreiber setzt sich aus **Kapitalkosten, Betriebskosten, Personalkosten**, und wiederum **Aeronautical und Non-Aeronautical Revenues** zusammen. Außerdem fallen **Indirect Operating Costs (IOC)** wie Steuern, Marketing und Zulassungsgebühren an.

Allen Berechnungen in der Szenarioanalyse gemein sind insbesondere Annahmen über Zinsen, Inflation, Energiepreise und Anschaffungs- bzw. Baukosten, sowie Gewinnmargen.



Abbildung 10: Übersicht der Annahmen aus der Wirtschaftlichkeitsanalyse

03.03.03 INFRASTRUKTUR

Wie in Abschnitt 02.02.03 angedeutet wurde, sind bereits existierende Flugplätze und (Regional-) Flughäfen von besonderer Bedeutung für ein potenzielles AAM-Netzwerk in Baden-Württemberg, da sie ein deutlich geringeres Investment erfordern als kom-

plett neue Flächen für Flugverkehr zu erschließen. In Abbildung 11 sind daher alle bestehenden Flugfelder in BW eingezeichnet. Ist der Kreis gefüllt, so ist auf diesen Start und Landung von Fluggeräten mit mind. 3175 kg zulässig sind. An diesen wäre nur ein geringes bis mittleres Investment notwendig, außerdem ist mit einem niedrigeren Zertifizierungs- und Genehmigungsaufwand zu rechnen, da dort bereits jetzt Fluggeräte fliegen dürfen.

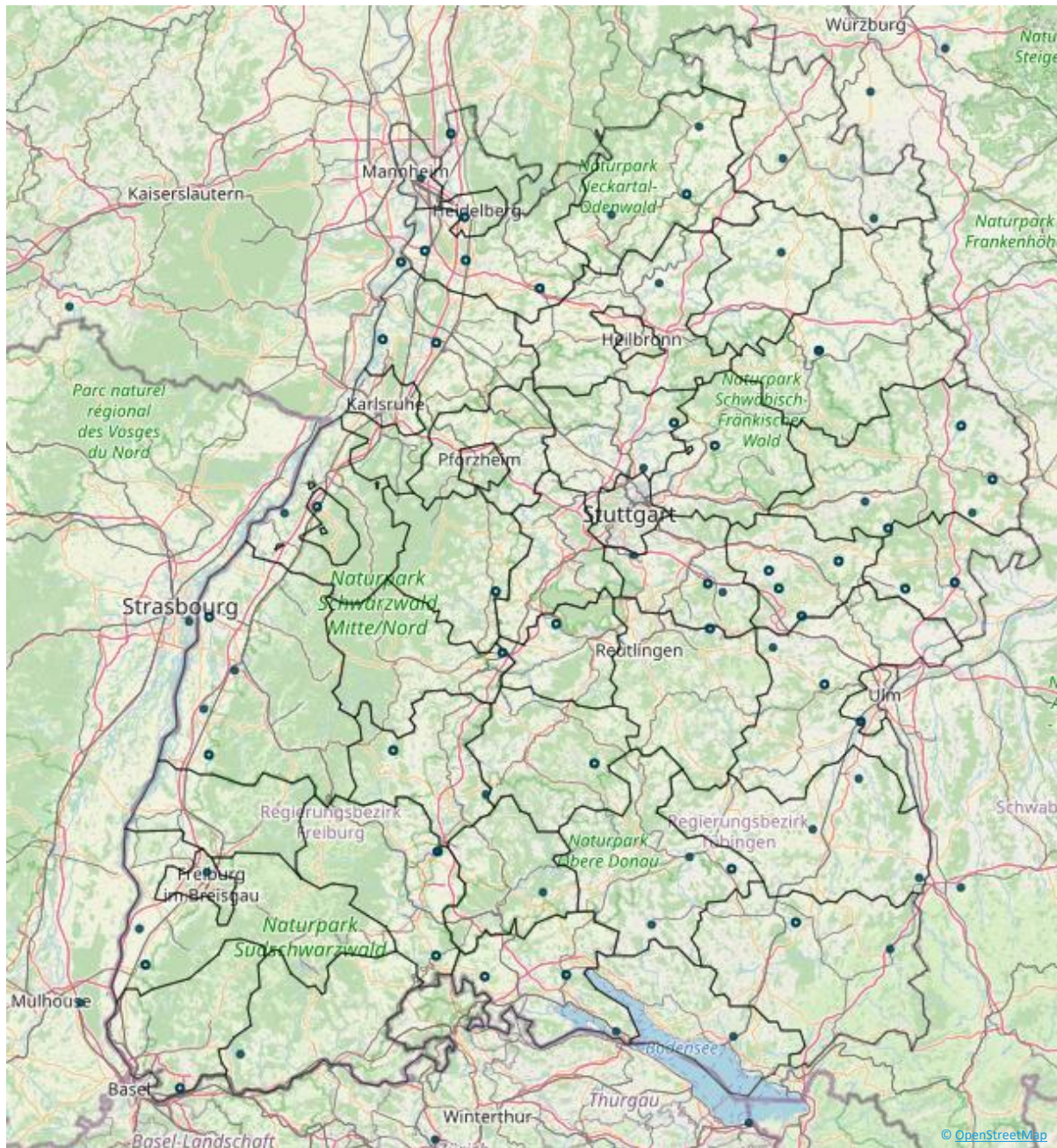


Abbildung 11: In blau sind alle existierenden Flugfelder in BW eingezeichnet. Gefüllt sind alle jene, die für eVTOL-Handling geeignet wären (MTOW von mind. 3175 kg).

In der Wirtschaftlichkeitsanalyse wurde basierend auf Expertengesprächen mit Kosten von 4 Mio. € für einen Vertiport auf einer bereits für privaten Flugverkehr genutzten Freifläche und 3 Mio. € an einem Flughafen gerechnet. Dabei wird eine Vertiport-Größe von etwa 2 FATOs und 5 Stands angenommen. Für den Vertiport auf einer Freifläche fallen Betonierungskosten für FATOs und Stands an, Ausrüstung der Elektrik für die Ladeinfrastruktur sowie Gebäudeinfrastruktur für die Passagierabfertigung. Auf geeigneten⁹ Flughäfen bzw. -plätzen muss ebenfalls Ladeinfrastruktur für die eVTOL-Batterieladung geschaffen werden. Alle weiteren notwendigen Gegebenheiten wären vermutlich vorhanden und könnten von den eVTOLs und Passagieren mitgenutzt werden. Auf einem Dach bspw. eines Parkhauses ist ein Vertiport zwar am einfachsten in bestehende städtische Infrastruktur hineinzudenken, verursacht jedoch hohe Kosten zur statischen Prüfung und eventuellen Stabilisierung, dazu kommen zudem Elektrik-Kosten. Für komplette Neubauten ohne Nutzung bestehender Infrastruktur ist eher mit 10-15 Mio. € zu rechnen.

Austausch mit Flughafenbetreibern

Zur genaueren Abschätzung des Potenzials der beiden großen Flughäfen in Baden-Württemberg, Stuttgart und Friedrichshafen fanden Gespräche mit Vertretern beider Flughäfen im Rahmen dieser Potenzialanalyse statt:

Der Einsatz von AAM am **Flughafen Friedrichshafen** eröffnet vielfältige Möglichkeiten, um die Attraktivität und Erreichbarkeit dieses Standorts erheblich zu steigern. Die Lage in Friedrichshafen ist innerhalb der Region gut, jedoch ist die verkehrliche Anbindung an andere wichtige Regionen in Baden-Württemberg bisher verhältnismäßig schlecht. Die Einstellung von Flugverbindungen nach Stuttgart, Zürich und München hinterließ eine Lücke im regionalen Luftverkehr, die durch den Einsatz von AAM geschlossen werden könnte. Die Wiederaufnahme dieser Verbindungen und die Einführung neuer Routen, beispielsweise nach Strasbourg, Heilbronn und Freiburg, sind mit RAM durchaus denkbar. Zusätzlich eröffnet sich ein vielversprechender Use Case UAM am Bodensee, mit Verbindungen von Friedrichshafen nach Lindau, Überlingen oder Konstanz. Es sind bereits Gespräche über touristische Rundflüge geführt worden. Die vorhandenen Kapazitäten und die Innovationsbereitschaft am Flughafen Friedrichshafen bieten eine gute Grundlage für die Integration von AAM, die nicht nur die regionale Konnektivität stärken, sondern auch neue Maßstäbe für effiziente und nachhaltige Luftmobilität setzen könnte.

Die Integration von AAM in den bestehenden Betrieb ist durchaus von Interesse für den **Flughafen Stuttgart**, wobei jedoch eine sorgfältige Einbindung in ein umfassendes

⁹ MTOW mind. 3175 kg

Netzwerk von großer Bedeutung ist. Es sollte nicht ausschließlich als Flughafenshuttle agieren, sondern vielmehr zusätzliche Routen und Verbindungen im Kontext eines AAM-Netzwerks ermöglichen. Ein entsprechendes Szenario wäre beispielsweise, dass Passagiere mit dem Zug oder Taxi zum Flughafen Stuttgart anreisen und von dort aus in kurzer Zeit nach Baden-Baden, Friedrichshafen oder anderen Zielen fliegen können. Der Flughafen Stuttgart verfügt bereits über verkehrliche Prüfungen und ausreichend Platz, was den Weg für eine potenzielle Integration von AAM ebnen könnte. Dennoch müssen die wirtschaftlichen Aspekte sorgfältig berücksichtigt werden, da eine Rentabilität essenziell ist. Es ist anzunehmen, dass staatliche Anschubsubventionierungen notwendig sein könnten, um die Einführung von AAM am Flughafen Stuttgart zu unterstützen. In diesem Kontext zeigt der Flughafen Stuttgart Interesse daran, nicht als First-Mover aufzutreten, sondern vielmehr von den Erfahrungen anderer Standorte zu lernen und eine optimierte Integration von AAM in ihre bestehenden Strukturen zu gewährleisten.

03.03.03.01 MULTIMODALE VERNETZUNG

Schlecht angebundene Regionen können mit eVTOLs möglicherweise besser angebunden werden. In Baden-Württemberg betrifft das basierend auf den hier durchgeführten Nachfrageanalysen vorrangig den Süden des Landes, insbesondere den südlichen Schwarzwald und die Region Bodensee-Oberschwaben, siehe Abbildung 12 und Abbildung 13. Jedoch wird die Einführung von AAM initial auf jeden Fall von nachfragestarken Standorten ausgehen, weshalb die Nachfragegruppe der schlecht Angebundenen auch in Abschnitt 02.03.02 nicht näher betrachtet wurde. Weiterhin ist die Verbesserung der Infrastruktur in solchen Regionen durch den Ausbau der Zug- und Busanbindungen deutlich einfacher zu skalieren.

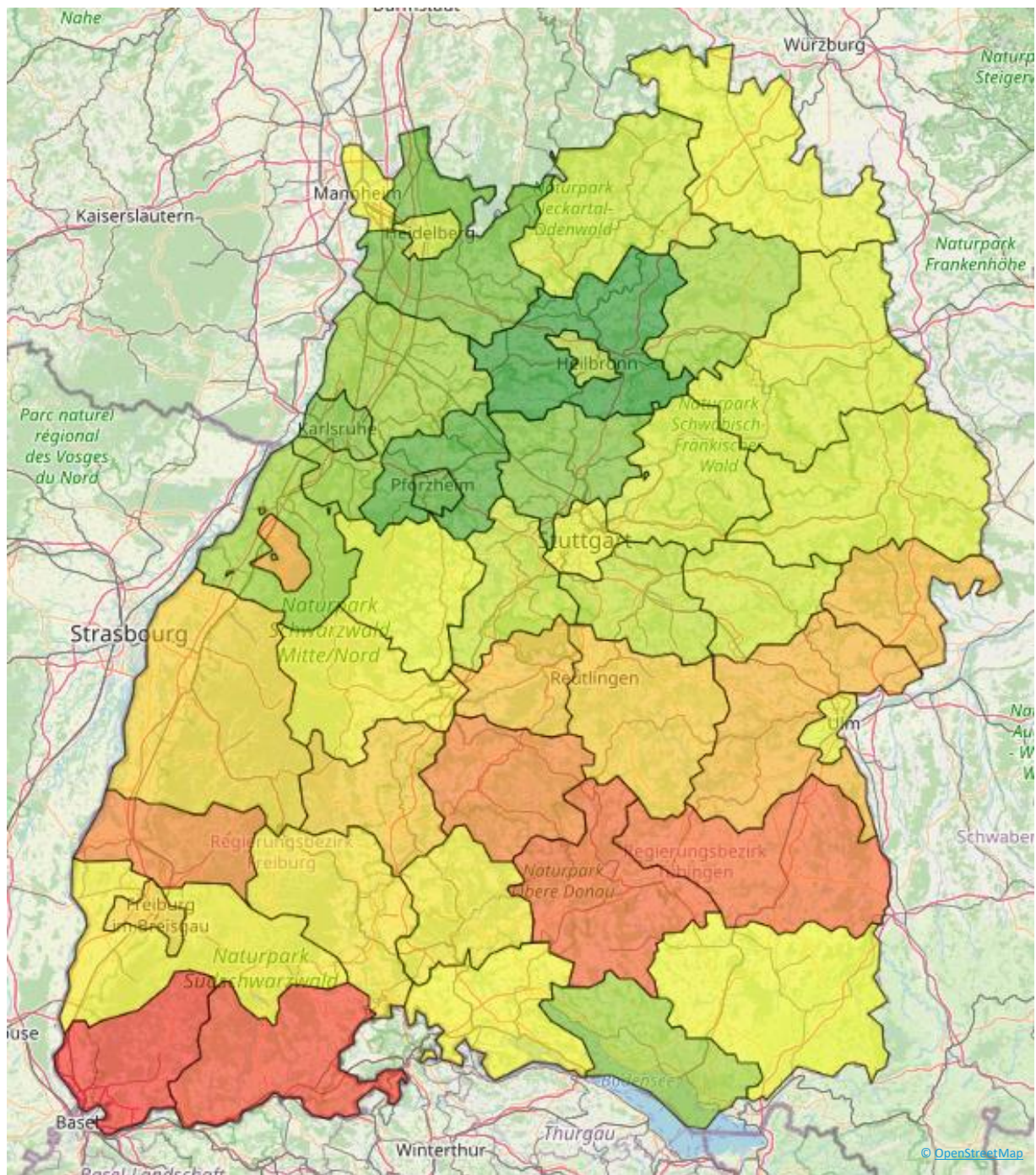


Abbildung 12: Identifikation der Landkreise mit schlechter PKW-Anbindung. Dargestellt ist die Anzahl aller Fahrten von einem Landkreis zu anderen Regionen in BW, Wirtschaftszentren und touristische Attraktionen bis zu 100 km Luftlinie Entfernung, die in das 80. Quantil der langsamstem PKW-Fahrten fallen, wiederum im Farbgradient von dunkelgrün – sehr wenige langsame Fahrten zu dunkelrot – sehr viele solche Fahrten.

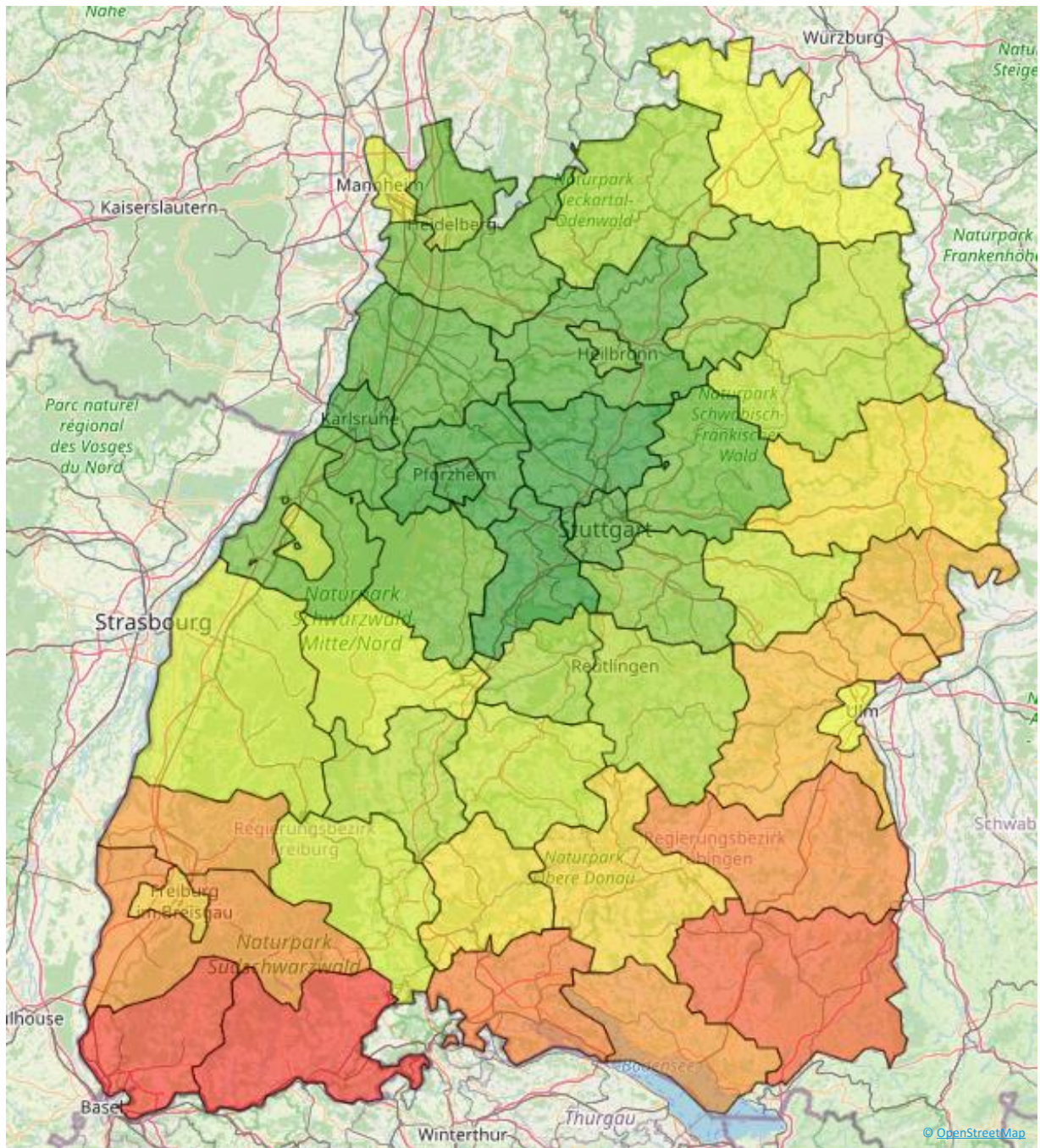


Abbildung 13: Anzahl der AAM-Verbindungen pro Landkreis zu anderen Regionen in BW, Wirtschaftszentren und touristische Attraktionen, die eine Zeitersparnis von mehr als 45 min im Vergleich zur PKW-Fahrzeit ergeben würde inkl. 15 min Boarding/Deboarding-Zeit. Dunkelgrün – wenige Verbindungen mit großem Reisezeitersparnispotenzial zu dunkelrot – viele solche Verbindungen.

03.03.04 VORSCHLAG EINES MÖGLICHEN NETZWERKS

Der Entwurf des in Abbildung 14 dargestellten BW-weiten Lufttaxi-Netzwerks basiert neben der in Kapitel 03.01 beschriebenen Nachfrage-getriebenen Standortanalyse auch auf den im vorhergehenden Abschnitt erläuterten Faktoren. Vorgeschlagen werden insgesamt 15 Vertiport-Standorte, 12 RAM- und 3 UAM-Routen. Bei der Auswahl der Routen zu beachten ist, dass grundsätzlich jede Flugverbindung zwischen zwei Vertiports denkbar ist. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde sich auf besonders interessante Routen beschränkt. Das abgebildete Netzwerk stellt dabei eine bereits weit fortgeschrittene Ausbaustufe dar. Zwei mögliche Hochlaufszszenarien, welche sich an dem hier dargestellten Pool an Routen und Vertiport-Standorten orientieren, beleuchtet die Wirtschaftlichkeitsanalyse möglicher Netzwerke und mögliche Spielräume der Preisgestaltung (siehe Kapitel 03.03.05). Der hier gezeigte Vorschlag soll nicht als ideales Lufttaxi-Netzwerk in BW verstanden werden.

Potenzialanalyse für den Einsatz von Lufttaxis in Baden-Württemberg

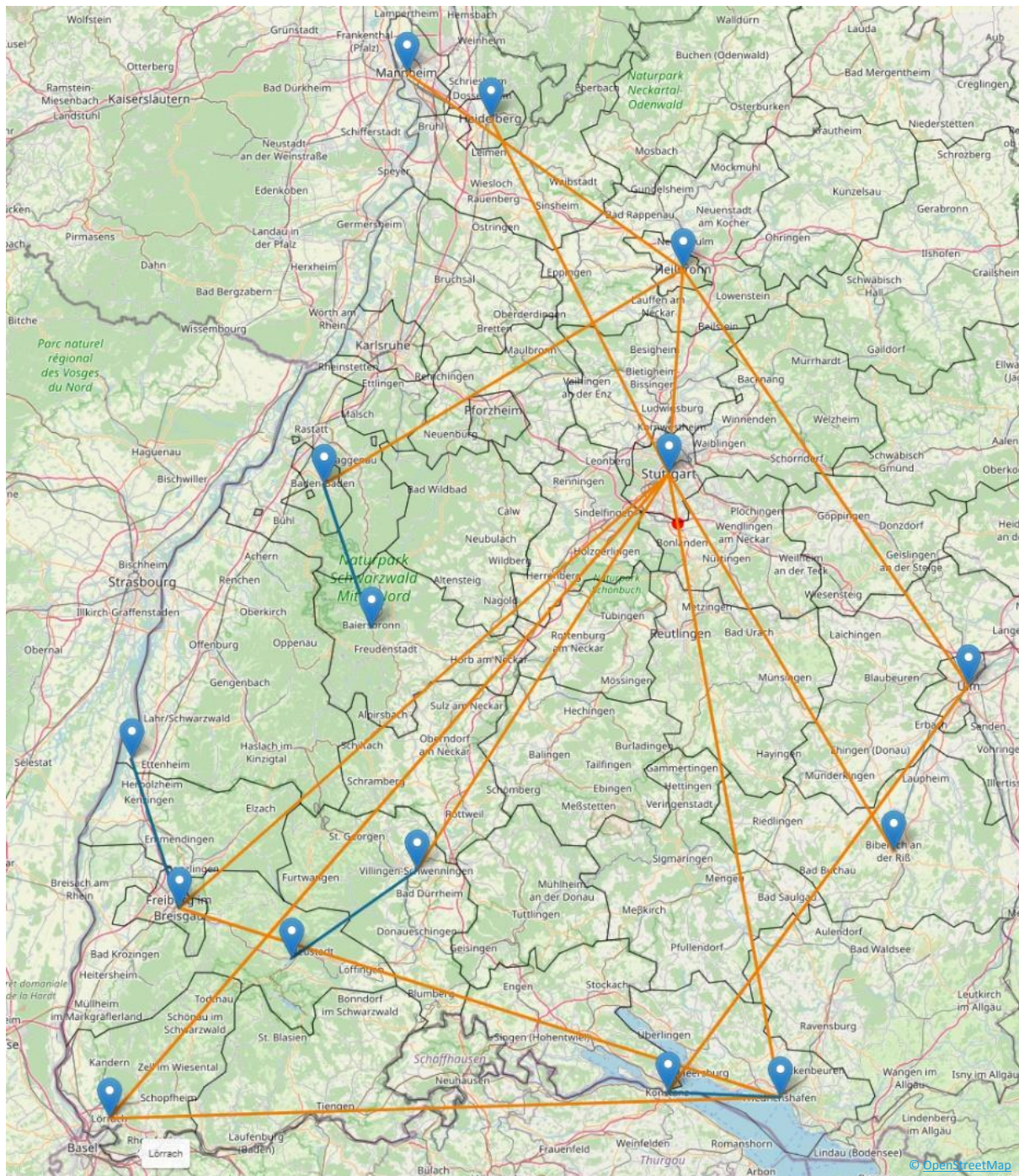


Abbildung 14: Vorschlag eines Baden-Württemberg-weiten Netzwerks basierend auf dem m und der bestehenden Infrastruktur. UAM-Routen sind in blau gezeigt, RAM-Routen in orange, Vertiport-Standorte sind durch einen blauen Zielmarker gekennzeichnet

03.03.05 SZENARIOANALYSE

Im Rahmen der Hochlaufsznarien sollen die zukünftige Nutzung und das Potenzial eines AAM-Services auf Basis der Ergebnisse der vorherigen Abschnitte unter Berücksichtigung von hemmenden und fördernden Faktoren wie z. B. Angebot, Kosten, und technischen Eigenschaften modelliert und abgeschätzt werden. Angesichts der Unsicherheiten hinsichtlich Markteingang, Regulatorik und Kostengestaltung wurden zwei unterschiedlich schnelle Hochläufe betrachtet. Die entsprechenden Flugrouten mit ihrem Einführungsjahr sind in Abbildung 15 dargestellt. Bei der Auswahl der Routen zu beachten ist, dass grundsätzlich jede Flugverbindung zwischen zwei Vertiports denkbar ist. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde sich auf besonders interessante Routen beschränkt. Die hier gezeigten Vorschläge sollen nur als exemplarische Darstellung einer Lufttaxi-Netzwerk-Entwicklung in BW verstanden werden. Diese dienen jedoch als Grundlage der Wirtschaftlichkeits- und Szenarioanalyse.

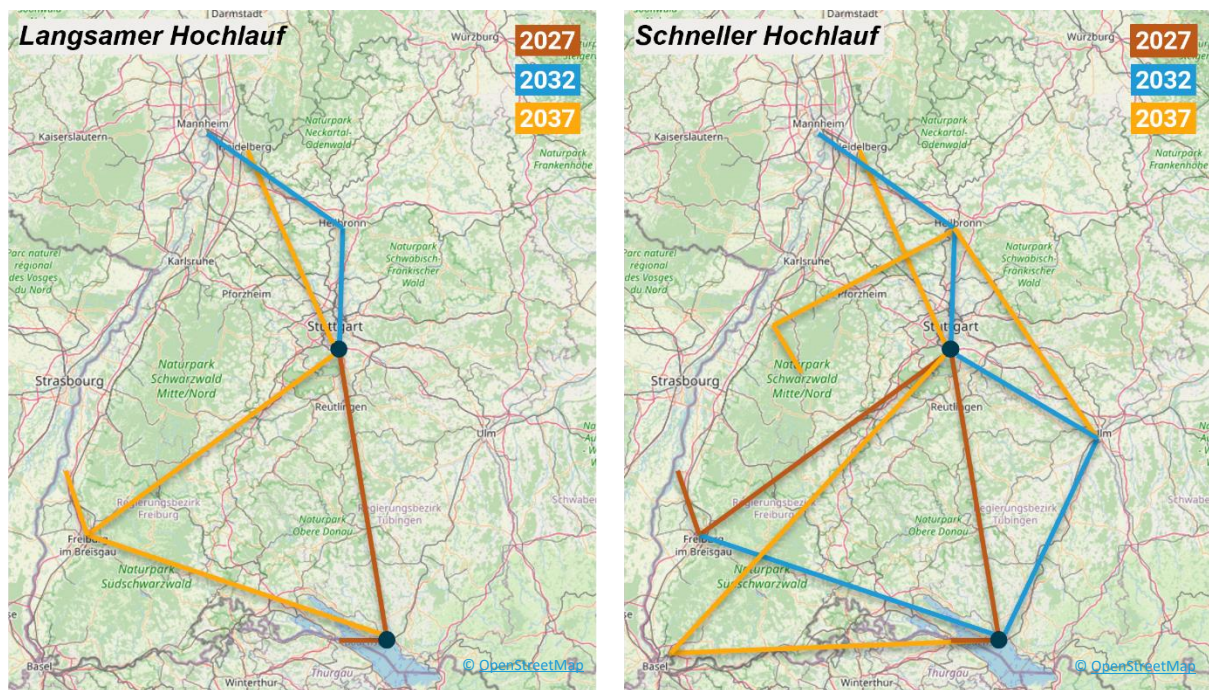


Abbildung 15: Langsames (links) und schnelles Hochlaufsznario (rechts) innerhalb des vorgeschlagenen Netzwerks. Strecken in Rot würden 2027 in Betrieb genommen werden, Strecken in Blau 2032 und Strecken in Gelb erst 2037. Die Flughäfen Stuttgart und Friedrichshafen sind mit schwarzen Punkten gekennzeichnet.

Auf Basis dieser Streckenkombinationen sowie verschiedener Sensitivitäten wie der noch ungeklärten Notwendigkeit von Flugsicherheitskontrollen, ob und wann autonomes Fliegen in Deutschland zugelassen wird, Auslastung der Flüge und Anteil von Leerflügen am Gesamtaufkommen, wurden drei verschiedene wirtschaftliche Szenarien berechnet. Aus jeweils einem eher neutralen Baseline-Szenario, einem optimisti-

schen Szenario, in dem sich alle Faktoren zugunsten eines niedrigen Flugpreises verhalten und einem pessimistischen Szenario, in dem von einem teureren Betrieb ausgegangen wird, kann eine erste Abschätzung über die zu erwartenden Preisrahmen für eVTOL-Flüge getroffen werden. In Abbildung 16 sind die genannten Einflussfaktoren der Sensitivitätsanalyse im Detail erläutert.



Abbildung 16: Szenarien und Sensitivitäten, die im Rahmen der Szenarioanalyse betrachtet werden. Sensitivitäten entsprechen bestehenden Parametrisierungen, deren Wert variiert wird. Szenarien sind fördernde bzw. hemmende Faktoren, die die wirtschaftliche Entwicklung der Szenarien verändern.

Außerdem wurden jeder Strecke zusätzlich zum Startjahr zeitlich veränderliche Stückzahlen von Flugtaximodellen zugeordnet, siehe Abbildung 17. Diese sind Schätzungen, die aufgrund der Marktlage und Wirtschaftlichkeitsanalyse als realistisch angenommen wurden. Die Zuordnung des konkreten Flugtaximodells gibt auf kurzen Strecken dem VoloCity Vorrang, bei längeren Strecken ist die Zuordnung von Lilium und Joby arbiträr und soll lediglich beide Hersteller im Modell verankern.

Definition der Hochlaufsznarien		
Motiviert wird der Unterschied zwischen den Szenarien durch gesellschaftliche und politische Einflussfaktoren wie der Investitionsbereitschaft , der Strenge regulatorischer Vorgaben , der Menge an bürokratischen Hürden bei Zertifizierungs- und Genehmigungsprozessen, sowie der Akzeptanz durch Kommunen und Gemeinden . Konfigurationen ändern sich als vereinfachende Annahme jeweils alle 5 Jahre.		
	Langsamer Hochlauf	Schneller Hochlauf
	Langsame Netzwerk- und Nachfrage-Entwicklung	Schnelle Netzwerk- und Nachfrage-Entwicklung
2027	Friedrichshafen-Konstanz 2 VoloCity Friedrichshafen-Stuttgart 1 Lilium Jet	Friedrichshafen-Konstanz 2 VoloCity Friedrichshafen-Stuttgart 1 Lilium Jet Freiburg-Rust 2 VoloCity Freiburg-Stuttgart 1 Joby S4
2032	Friedrichshafen-Konstanz 4 VoloCity Friedrichshafen-Stuttgart 2 Lilium Jet Mannheim-Heilbronn 2 Lilium Jet Heilbronn-Stuttgart 2 Lilium Jet	Friedrichshafen-Konstanz 4 VoloCity Friedrichshafen-Stuttgart 2 Lilium Jet Freiburg-Rust 3 VoloCity Freiburg-Stuttgart 2 Joby S4 Mannheim-Heilbronn 2 Lilium Jet Heilbronn-Stuttgart 2 Lilium Jet Freiburg-Friedrichshafen 2 Joby S4 Ulm-Friedrichshafen 1 Joby S4 Ulm-Stuttgart 2 Lilium Jet
2037	Friedrichshafen-Konstanz 4 VoloCity Friedrichshafen-Stuttgart 3 Lilium Jet Mannheim-Heilbronn 3 Lilium Jet Heilbronn-Stuttgart 4 Lilium Jet Heidelberg-Stuttgart 3 Joby S4 Freiburg-Rust 3 VoloCity Freiburg-Stuttgart 2 Joby S4 Freiburg-Friedrichshafen 2 Joby S4	Friedrichshafen-Konstanz 4 VoloCity Friedrichshafen-Stuttgart 3 Lilium Jet Freiburg-Rust 4 VoloCity Freiburg-Stuttgart 3 Joby S4 Mannheim-Heilbronn 3 Lilium Jet Heilbronn-Stuttgart 4 Lilium Jet Freiburg-Friedrichshafen 3 Joby S4 Ulm-Friedrichshafen 3 Joby S4 Ulm-Stuttgart 3 Lilium Jet Lörrach-Stuttgart 3 Lilium Jet Lörrach-Friedrichshafen 3 Joby S4
Langsames und schnelles Hochlaufsznario als Infrastrukturentwicklungsplan des Routen-Netzwerks. Den Zeitabschnitten sind jeweils Vertiports sowie Flottengröße je Modell der einzelnen Routen zugeteilt.		

Abbildung 17: Übersicht über alle Strecken und zugeordneten Modelle sowie deren Flottengröße im langsamen und schnellen Hochlaufsznario. Die genannten Modelle sind lediglich repräsentativ zu verstehen und entsprechen keiner Empfehlung gegenüber anderen Herstellermodellen.

Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeits- und Sensitivitätsanalyse für den schnellen und langsamen Hochlauf am Beispiel einzelner beispielhafter Strecken für das Baseline-Szenario sind in Abbildung 18 zu sehen. Geschätzte Preise des in den meisten Fällen als Hauptkonkurrent identifizierten Verkehrsmodus Taxi (vgl. Kapitel 02.04) wurden zur Einordnung ergänzt. Gezeigt sind die Gesamtkosten der Taxifahrt. Somit wurde implizit eine Taxiauslastung von einem Passagier angenommen.

Der Preis pro km verteilt die Gesamtkosten des Flugtaxi-Betriebs des Gesamtnetzwerks auf die Gesamtzahl der geflogenen Kilometer, berücksichtigt dabei aber nicht die unterschiedlichen Kapazitäten der eVTOL-Modelle und die sich daraus ergebenden Folgen für die Preisentwicklung pro Passagier.

Der Preis pro km pro PAX hingegen verteilt die Gesamtkosten auf die Gesamtzahl der *Revenue Passenger Kilometer* (RPK), also die Gesamtzahl der von den Passagieren zurückgelegten Kilometer in einem Jahr. Diese Angabe bietet somit mehr Aufschluss über die Entwicklung des Preisniveaus auf Passagier-Ebene. Letztlich wird die Höhe der von dem Vertiport-Betreiber zu erhebenden Grundgebühr pro Start/Landung aufgelistet, sowie die Gesamtkosten der jeweiligen Routen und die entsprechende Flugzeit.

Durchschnittsangaben für das Netzwerk	Langsamer Hochlauf			Schneller Hochlauf		
	2027	2032	2037	2027	2032	2037
Preis pro km pro PAX	3,50 €	3,00 €	2,00 €	4,50 €	4,00 €	2,50 €
Preis pro km	10,50 €	10,50 €	7,00 €	11,50 €	12,00 €	8,00 €
Grundgebühr pro Start/Landung	55 €	55 €	30 €	45 €	45 €	35 €

Route	Dauer in min	Tripkosten der Netzwerk-Routen						
Distanz Luftlinie								
Friedrichshafen-Konstanz	15	p.P.	150 €	135 €	100 €	140€	130 €	95 €
23 km – VoloCity		Ges.	150 €	135 €	100 €	140€	130 €	95 €
<i>Taxi</i>	60-75		70 €	80 €	90 €	70 €	80 €	90 €
Friedrichshafen-Stuttgart	30	p.P.	115 €	100 €	60 €	105 €	100 €	60 €
127 km – Lilium Jet		Ges.	695 €	610 €	375 €	620 €	590 €	370 €
<i>Taxi</i>	130		400 €	435 €	470 €	400 €	435 €	470 €
Heilbronn-Stuttgart	30	p.P.		40 €	30 €		40 €	30 €
41 km – Lilium Jet		Ges.		255 €	185 €		250 €	180 €
<i>Taxi</i>	45			140 €	150 €		140 €	150 €
Mannheim-Heilbronn	20	p.P.		55 €	50 €		65 €	50 €
67 km – Lilium Jet		Ges.		315 €	300 €		400 €	290 €
<i>Taxi</i>	50			190 €	205 €		190 €	205 €
Freiburg-Stuttgart	40	p.P.			95 €	170 €	165 €	110 €
131 km – Joby S4		Ges.			385 €	685 €	660 €	435 €
<i>Taxi</i>	125				650 €	550 €	600 €	650 €

Abbildung 18: Preise einzelner Strecken im schnellen und langsamen Hochlauf pro Kopf und je Flug im Baseline-Szenario, im Vergleich zu geschätzten Taxipreisen.

In jedem Fall sinkt der Preis pro Person über den Zeitraum 2027-2037 trotz einbezogener Inflation von Löhnen und sonstigen Kosten aufgrund der höheren Anzahl an Flügen und der damit einhergehenden stärkeren Auslastung der Vertiports. Allerdings ist der Preis im schnellen Hochlauf nicht für jede beispielhafte Strecke niedriger als im langsamen Hochlauf, was mit der Nutzung der Vertiports für eine oder mehrere Strecken zusammenhängt. Zusammen mit Abbildung 19 ergibt sich ein Einblick in das zu erwartende Preisspektrum für eine eVTOL-Nutzung in einem baden-württembergischen Netzwerk.

Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

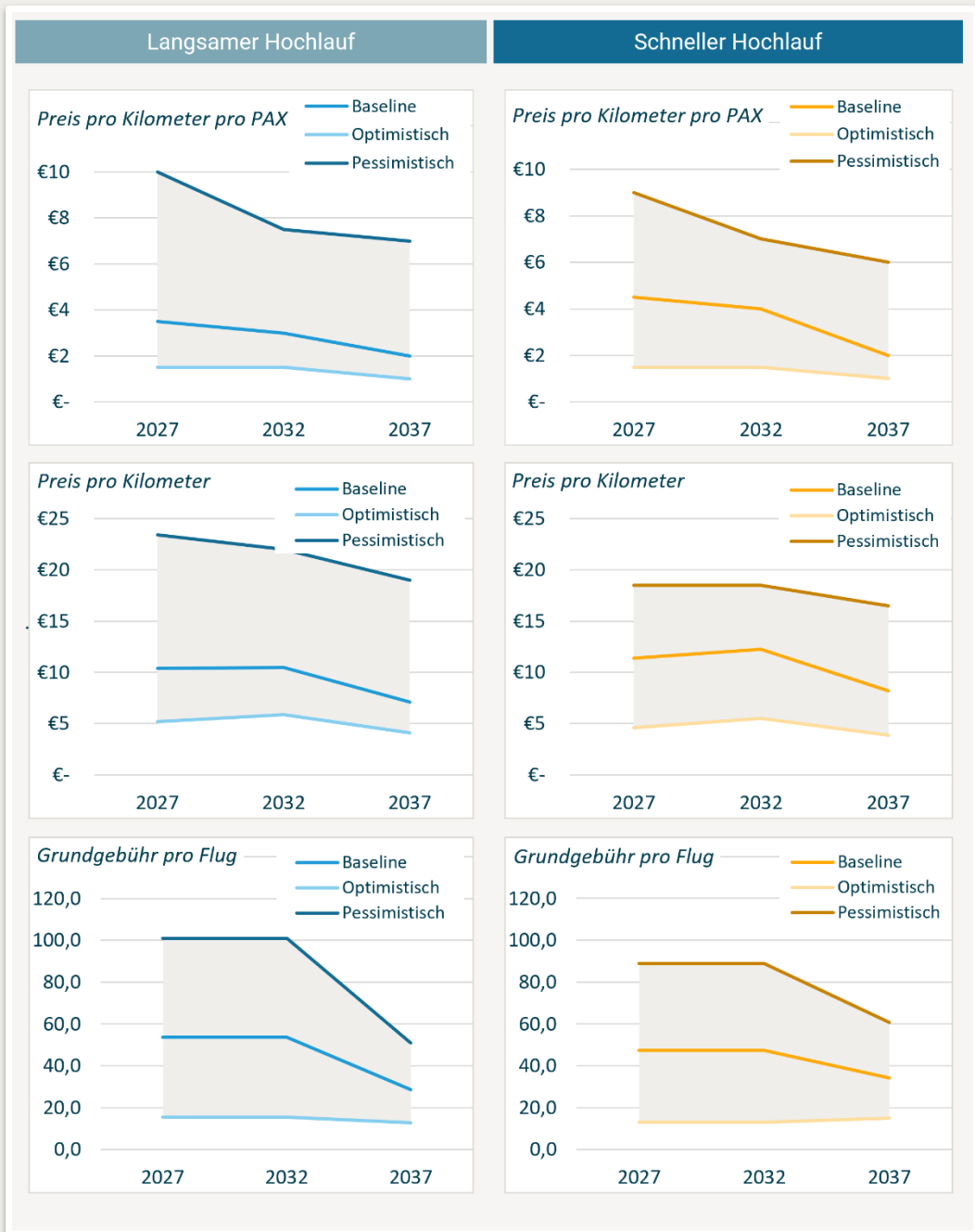


Abbildung 19: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für den langsamen und den schnellen Hochlauf. Dargestellt sind die sich aus der Analyse ergebenden Preisbereiche für den Preis je Personenkilometer, Preis je Kilometer und eine Grundgebühr je Flug.

Insgesamt muss die breite Preisspanne betont werden, die in der Vielzahl an Unsicherheiten durch den noch ausstehenden Markteintritt und den noch nicht final gesetzten regulatorische Rahmen begründet ist. Unter bestimmten Bedingungen wie einer hohen eVTOL-Auslastung, einer längeren Flugstrecke und einer starken Auslastung der Vertiports lassen sich jedoch bereits in den nächsten Jahren mit dem Taxi konkurrenzfähige Preise erzielen. Durch die niedrige Skalierbarkeit wird aber dennoch kein allgemein zugängliches Konkurrenzprodukt zum Taxi und erst recht nicht zum privaten PKW realisierbar sein.

03.03.06 DEEP DIVE METROPOLREGION STUTT GART

In diesem Abschnitt wird der Einsatz von Lufttaxis in der Stadt Stuttgart und ihrer unmittelbaren Umgebung, im wörtlichen Sinne die Anwendung von Urban Air Mobility, bewertet. Die Auswertung basiert auf Modelldaten, die vom Verband Region Stuttgart zur Verfügung gestellt wurden. Diese Modelldaten resultieren aus einem makroskopischen Verkehrsmodell entwickelt in PTV VISUM. Dieses Verkehrsmodell konzentriert sich auf die Stadt Stuttgart und Umgebung, berücksichtigt aber auch Verkehre von und nach deutlich entfernteren Orten wie Friedrichshafen, Ulm, Baden-Baden oder Heidelberg. In diesem Kontext bedeutet „makroskopisch“, dass nicht einzelne Verkehrsteilnehmer modelliert werden, sondern aggregierte Verkehrsströme. Verkehrsströme werden dabei unter anderem, aber primär zwischen sogenannten Bezirken gemessen. Ein Bezirk ist eine geographisch beliebig große und gestaltbare Zelle, welche eine Nachfragequelle bzw. -senke repräsentiert. Je kleiner eine solche Zelle, desto genauer, aber auch rechenaufwendiger ist das Modell. Im Falle des Modells des Verbands Region Stuttgart ist die Auflösung für das Kerngebiet sehr hoch. In der Innenstadt sind Bezirke gerade mal wenige Straßenzüge groß. PTV VISUM-Modelle eignen sich unter anderem dazu Belastungen und Auslastungen einzelner Streckenabschnitte oder ÖPNV-Verbindungen abzuschätzen. Da in dem Modell keine Lufttaxis als Verkehrsmodus integriert sind, eignet sich das Modell in seinem aktuellen Entwicklungsstand nur eingeschränkt, um Nachfragepotenziale abzuschätzen. PTV VISUM-Modelle liefern jedoch, abgeleitet aus der Auslastung, auch Fahrzeiten zwischen zwei Bezirken, sowohl mit dem PKW als auch mit dem ÖPNV. Ein konkretes Ergebnis ist die sogenannte „belastete“ und „unbelastete“ Fahrzeit des Individualverkehrs. Fahrzeiten bei freier Strecke sind „unbelastet“. Die „belastete Fahrzeit“ repräsentiert die „zu erwartende“ werktägige Fahrzeit mit dem PKW zwischen zwei Bezirken. In der Praxis bedeutet das, dass man in der Rush-Hour mit längeren, sonst mit etwas kürzeren Fahrzeiten zu rechnen hat. Auf Basis dieser belasteten Fahrzeit lässt sich abschätzen, welche Bezirke besonders von einer Lufttaxi-Verbindung profitieren würden (vgl. Kapitel 02.03.01).

Angenommen wird, dass Lufttaxis Luftlinie fliegen, und das mit 110 km/h. Für Start und Landung werden insgesamt pauschal 4 Minuten pro Flug zur Flugzeit hinzuge-rechnet. Zudem sind bei einem Flug mit einem Flugtaxi Umsteigezeiten (Boarding/De-boarding) an den Vertiports zu berücksichtigen. Diese werden pauschal mit insgesamt 15 Minuten bewertet. Die Ergebnisse dieser Analyse werden ausgehend von zwei Standorten analysiert: Stuttgart Hbf und Stuttgart Flughafen. Die Ergebnisse sind in folgenden Abbildungen gezeigt. Der rote Punkt markiert den Ausgangs-Vertiport. Betrachtet wird ein Gebiet innerhalb eines 20 km Radius um den Ausgangs-Vertiport.

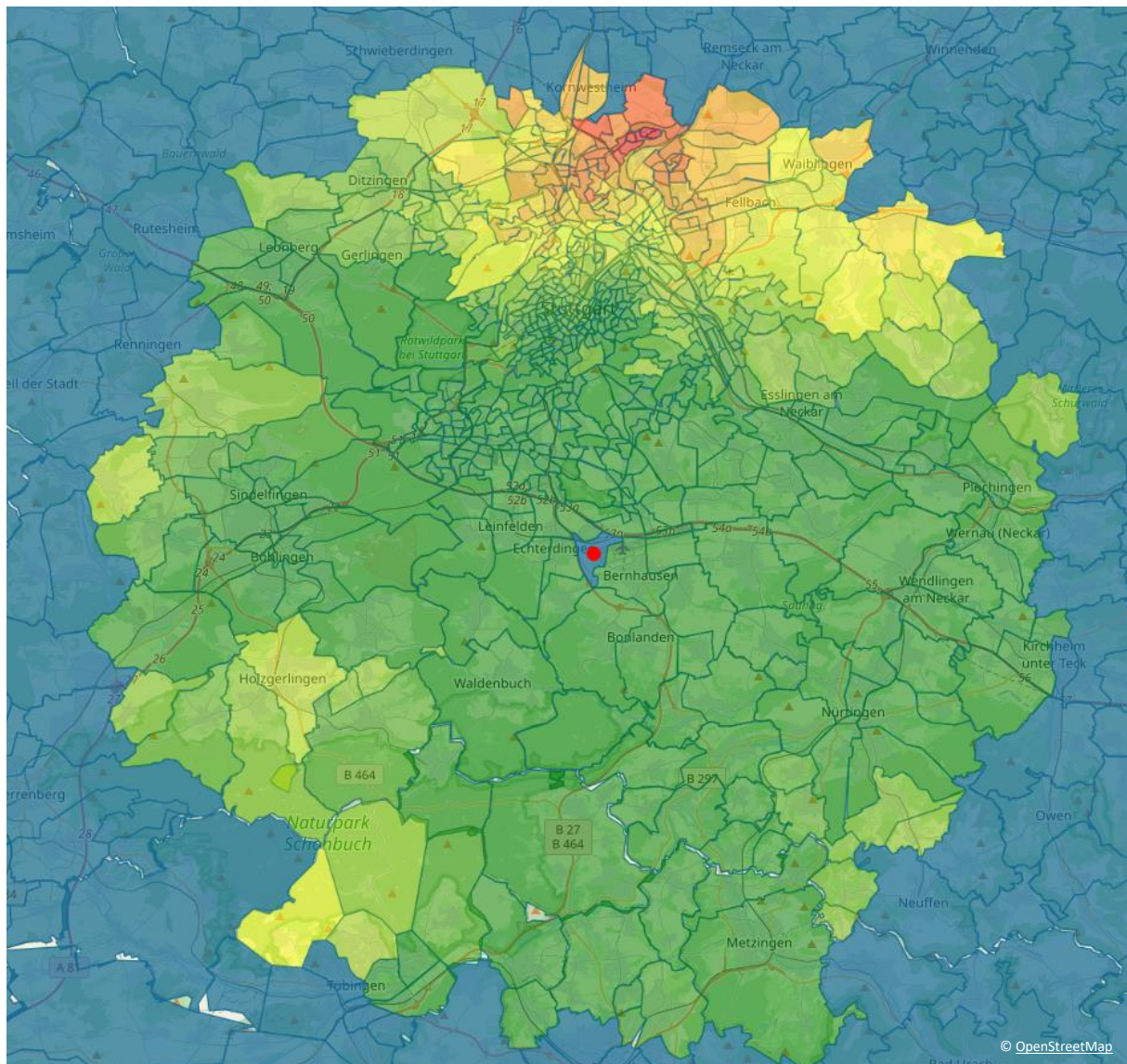


Abbildung 20: Zeitersparnispotenzial für UAM-Flüge vom Flughafen Stuttgart (roter Punkt) gegenüber belasteten PKW-Fahrzeiten. Rot- >20 min, Gelb- >10 min, Grün - <10 min Zeitersparnis

Ausgehend vom Flughafen Stuttgart ist zu erkennen, dass insgesamt nur wenige Gebiete überhaupt relevante Reisezeitvorteile versprechen. Insbesondere keine oder nur minimale Zeitersparnisse sind zu wichtigen Industriegebieten im Osten und Westen

Stuttgarts zu erwarten. Verbindungen in die Innenstadt können ebenfalls zeitlich nicht mit dem PKW konkurrieren. Lediglich im Norden Stuttgarts könnten Zeitgewinne erwartet werden. Nach Freiberg oder Mönchfeld könnten diese ca. 20 Minuten in der Spitze betragen. Zu wichtigen Industriegebieten in Zuffenhausen oder Feuerbach wären es noch ca. 15 Minuten.

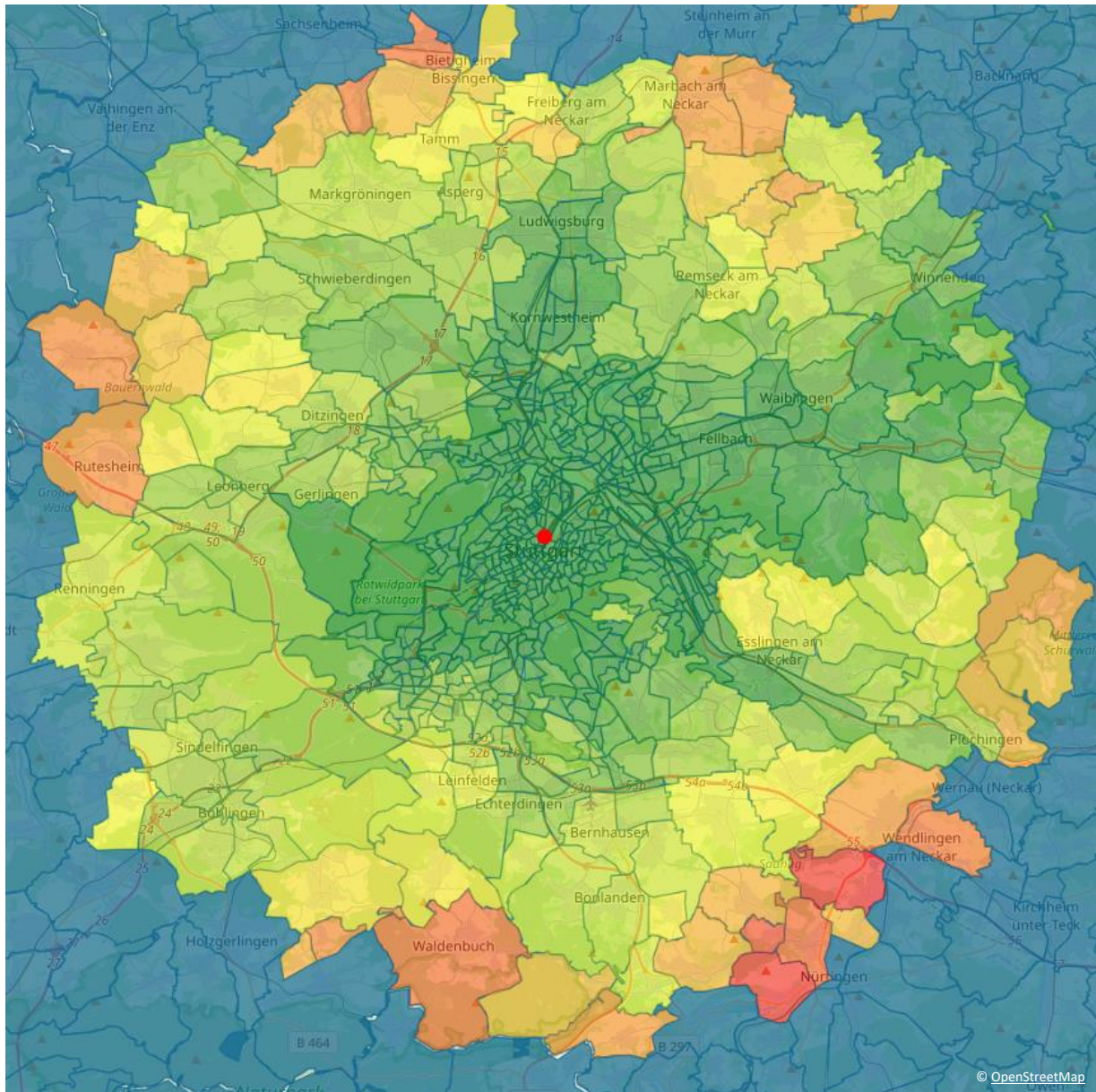


Abbildung 21: Zeitersparnispotential für UAM-Flüge vom HBF Stuttgart (roter Punkt) gegenüber belasteten PKW-Fahrzeiten. Rot- >15 min, Gelb - >7 min, Grün - <7 min Zeitersparnis

Ausgehend vom Hauptbahnhof Stuttgart wird klar, dass es keine wichtigen Industriestandorte gibt, zu denen ein relevanter Zeitvorteil (>5 Minuten) zu erwarten ist. Lediglich am Rande des betrachteten Gebiets könnten Zeitvorteile von >15minuten realisiert werden (Nürtingen, Bissingen).

Insgesamt lässt sich sagen, dass das Potenzial für den Einsatz von Lufttaxis in Stuttgart Stadt und Umgebung aus Perspektive der Zeitersparnis als sehr gering einzuschätzen ist. Hinzu kommt, dass der Bewegungsradius um den Vertiport herum, innerhalb dessen der Zeitvorteil tatsächlich realisiert werden kann, gering ist. Vom Ziel-Vertiport muss die Wegstrecke zum eigentlichen Ziel schließlich noch zurückgelegt werden. Diese müsste innerhalb der hier angegebenen Zeitersparnis liegen, da andernfalls die direkte Fahrt mit einem PKW voraussichtlich schneller ist.

03.03.07 DEEP DIVE UAM-CASE FRIEDRICHSHAFEN-KONSTANZ

Im Folgenden soll der konkrete Einsatz von eVTOLs auf der Strecke von Konstanz Stadt nach Friedrichshafen Bodensee Airport im Vergleich zu anderen Mobilitätsformen in Bezug auf Treibhausgas-Emissionen, Reisezeit und Preis genauer untersucht werden.

Die Luftlinie beträgt lediglich 23 km, während die Fahrdistanz auf der Straße 74 km beträgt, wenn man nicht mit der Fähre fährt. Dies stellt ein typisches UAM-Szenario dar, daher wurden die anderen Verkehrsmittel hier vorrangig mit dem VoloCity als repräsentatives eVTOL verglichen.

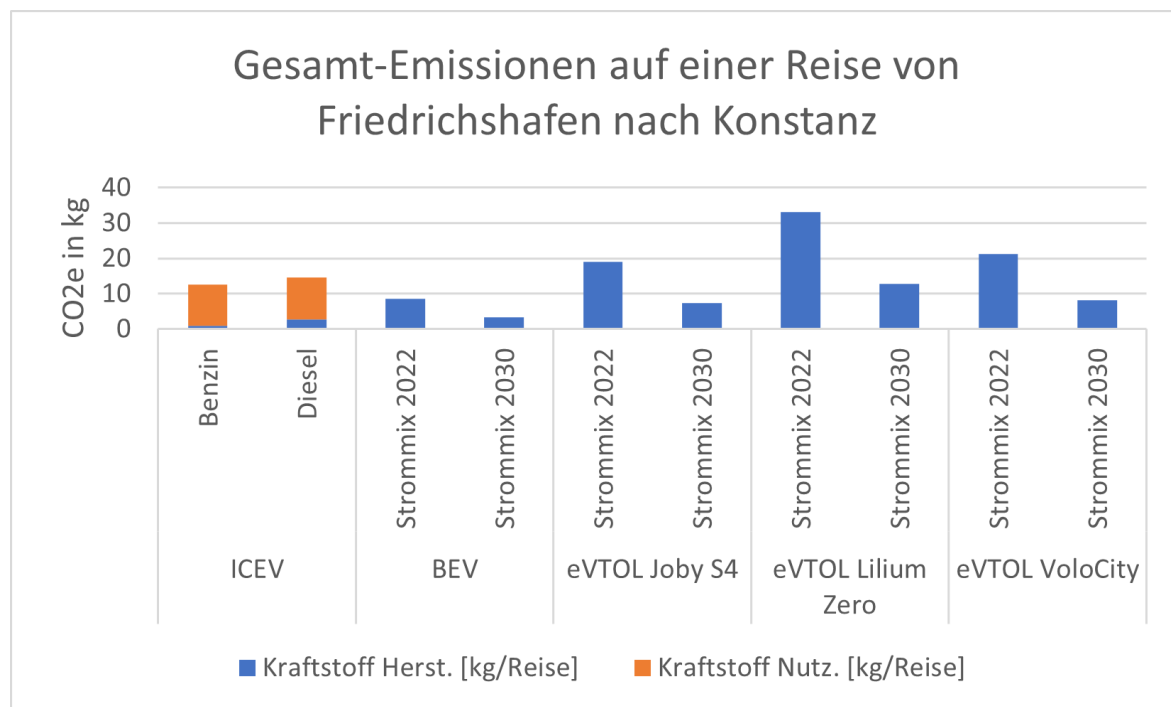


Abbildung 22: Gesamt-Treibhausgasemissionen verschiedener Verkehrsmittel auf der Reise zwischen Friedrichshafen und Konstanz-Staad in CO₂e

Emissionen

Die Emissionswerte pro Reise (in CO₂e) ergeben sich wie in Abbildung 22 aufgezeigt: Ein Benzin-betriebener PKW produziert ca. 13 kg, ein Dieselauto 15 kg, ein VoloCity mit dem Strommix 2022 etwa 21 kg und im Jahr 2030 voraussichtlich 8 kg. Hingegen erzeugt ein Elektroauto mit dem Strommix von 2022 etwa 8 kg und im Jahr 2030 nur noch 3 kg Emissionen. Bei durchschnittlicher Auslastung von 1,4 Personen im PKW beträgt die Pro-Kopf-Emission je Reise bei einem Verbrenner-PKW durchschnittlich 10 kg, während ein Elektroauto im Jahr 2022 6 kg und im Jahr 2030 nur noch 2 kg ausstößt. Der VoloCity schneidet im Jahr 2022 mit 21 kg und im Jahr 2030 mit 8 kg ab, da jeweils nur 1 Passagier an Bord sein kann. Der Lilium Zero würde 2022 bei voller Auslastung pro Passagier etwa 6 kg emittieren, 2030 hingegen nur noch 2 kg.

Reisezeiten

Die Fahrzeiterparnis ist ein weiterer wesentlicher Faktor: Die Autofahrt dauert etwa 1 Stunde und 15 Minuten ohne Fähre, mit Fähre etwa 1 Stunde, jedoch gebunden an den Fährfahrplan. Das Flugtaxi benötigt nur etwa 15-20 min Flugzeit plus geschätzte 15 min für das Boarding und Deboarding. Mit dem ÖPNV braucht man zwischen 1h und knapp 2h, jeweils immer mit Fährnutzung. Als Fahrradfahrer ist man 1,5 Stunden mit Fährnutzung unterwegs.

Kosten

In Bezug auf die Kosten variieren die Preise erheblich: Ein Taxifahrt mit Fähre kostet etwa 55€ plus 10-15€ für die vorangegangene Fährüberfahrt, alternativ (ohne Fähre, aber auf der längeren Strecke) etwa 200€. Der Preis für einen Flug mit einem VoloCity könnte im Jahr 2027 zwischen 85€ und 235€¹⁰ liegen, abhängig von verschiedenen Szenarien und Sensitivitäten, siehe Abbildung 23 für die mögliche Zusammensetzung dieses Preises aus den verschiedenen Posten im Baseline-Szenario. Bis 2037 könnte der Preis auf eine Spanne von 70-170€ sinken. Für weitere Informationen bzgl. der möglichen Preisgestaltung unter verschiedenen Hochlaufsznarien von eVTOLs in BW siehe Abschnitt 03.03.05. Ein ÖPNV-Ticket beginnt bereits ab 9,90€ pro Person in der 2. Klasse¹¹. Die Fahrt mit einem PKW kostete ca. 49€ plus 10-15€ für die Fähre¹². [58], [59]

¹⁰ pro Person und Strecke, Auslastung des VoloCity: eine Person

¹¹ Stand November 2023, bahn.de, ohne Vergünstigungen wie z. B. Jahreskarten oder BahnCard.

¹² Angenommen wurde der zulassungstärkste Mittelklassewagen 2023: VW Tiguan.

Fazit

Insgesamt ist der VoloCity auf dieser konkreten Strecke zwar vermutlich eine schnellere Alternative zu allen anderen bestehenden Verkehrsformen, jedoch kaum kompetitiv in Bezug auf Treibhausgasemissionen und Preis; hier nur im Vergleich zum Taxi. Gerade in der landschaftlich interessanten Region Bodensee kann aber zusätzlich zum Transport das Flugerlebnis Verkaufsargument sein.

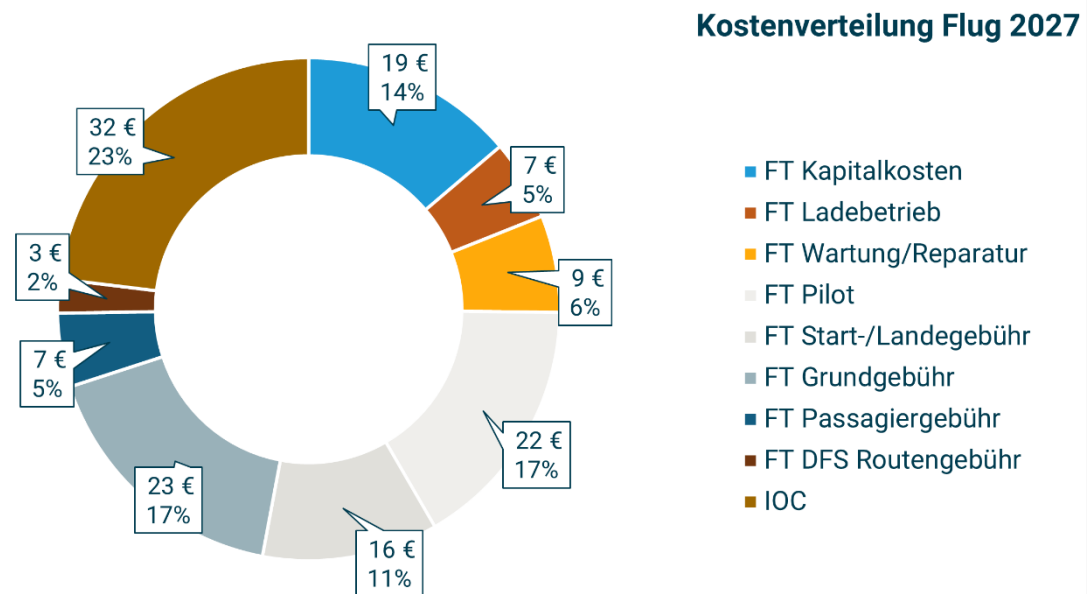


Abbildung 23: Verteilung der Kosten eines Flugs von Konstanz nach Friedrichshafen im Baseline-Szenario auf die unterschiedlichen Kostensegmente. FT – Flugtaxi, DFS – Deutsche Flugsicherung, IOC – Indirect Operating Costs

03.03.08 DEEP DIVE RAM-CASE FRIEDRICHSHAFEN-STUTTGART

Als beispielhafte RAM-Strecke wird im Folgenden die Reise zwischen den Flughäfen Friedrichshafen und Stuttgart betrachtet. Die Luftlinie erstreckt sich über 127 km, während die Fahrdistanz auf der Straße 186 km beträgt. Aufgrund der großen Distanz wurden hier der Lilium Zero und der Joby S4 näher betrachtet, beide sollten laut Herstellerangaben inkl. Sicherheitspuffer zu diesem Flug fähig sein.

Emissionen

Die Emissionswerte pro Reise (in CO₂e) variieren erheblich, siehe Abbildung 24 und Abbildung 25: Ein Benzin-betriebener PKW produziert 31 kg, ein Diesel-PKW 29 kg, ein Lilium Zero im Jahr 2022 88 kg und im Jahr 2030 34 kg und ein Joby S4 im Jahr 2022 56 kg und im Jahr 2030 22 kg. Ein Elektroauto emittiert im Jahr 2022 18 kg und im Jahr 2030 nur noch 7 kg. Bei einer Auslastung von 1,4 Personen im PKW ergibt sich

eine Emission pro Personenkilometer von durchschnittlich 120 g für einen Verbrenner-PKW, während ein Elektroauto im Jahr 2022 80 g und im Jahr 2030 nur noch 30 g ausstößt. Die beiden betrachteten eVTOL-Modelle emittieren bei voller Auslastung von je 4 bzw. 6 Personen mit dem heutigen Strommix ca. 110 g und im Jahr 2030 etwa 45 g pro Personenkilometer. Schon mit dem aktuellen Strommix erweisen sich also bei voller Auslastung die Flugtaxis als leicht umweltfreundlichere Option im Vergleich zu herkömmlichen Verbrenner-PKWs mit durchschnittlicher Auslastung von 1,4 Personen.

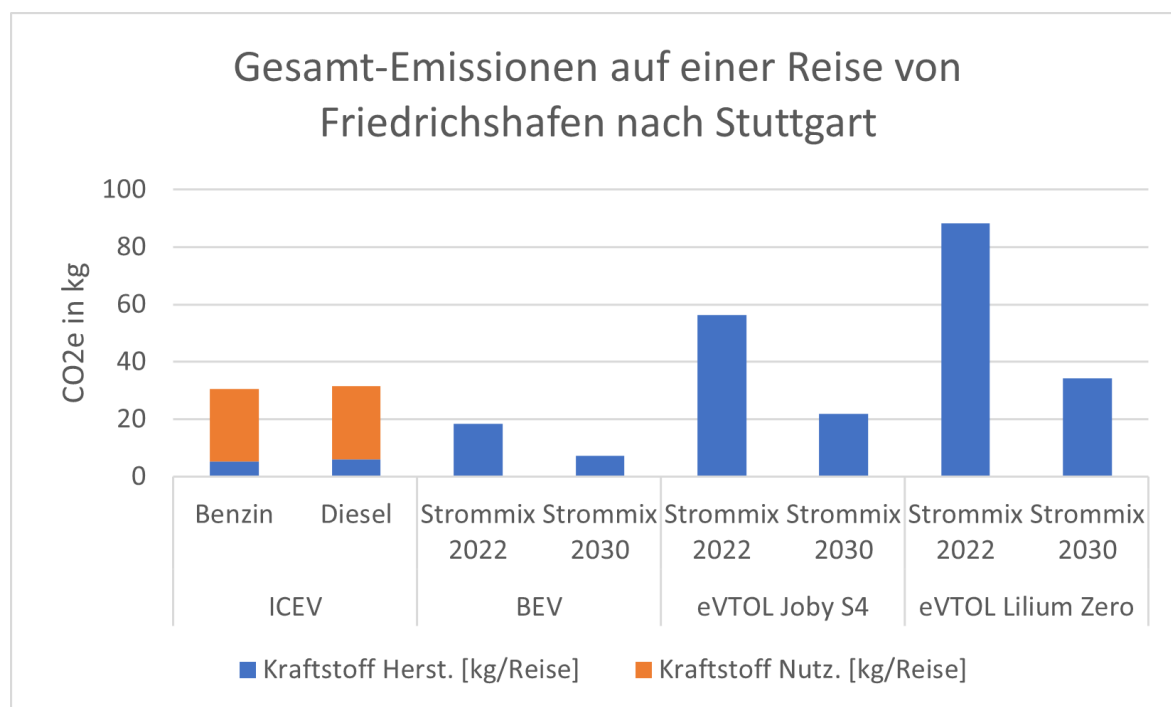


Abbildung 24: Gesamt-Treibhausgasemissionen verschiedener Verkehrsmittel auf der Reise zwischen den Flughäfen Friedrichshafen und Stuttgart in CO₂e

Reisezeit

Auch die Fahrzeiterparnis spielt bei längeren RAM-Strecken eine bedeutende Rolle: Die Autofahrt dauert etwa 2 Stunden und 10 Minuten. Ein Flugtaxi benötigt hingegen etwa 30 Minuten Flugzeit plus 15 Minuten für das Boarding und Deboarding. Nicht enthalten sind Anreise zum bzw. Weiterreise vom Vertiport. Der ÖPNV benötigt derzeit mindestens 3 Stunden und 30 Minuten, mit Fertigstellung Stuttgart21 wird jedoch eine Reduzierung auf unter 3 Stunden erwartet. Hier sind ebenfalls Anreise zum Bahnhof bzw. die Weiterreise nicht berücksichtigt.

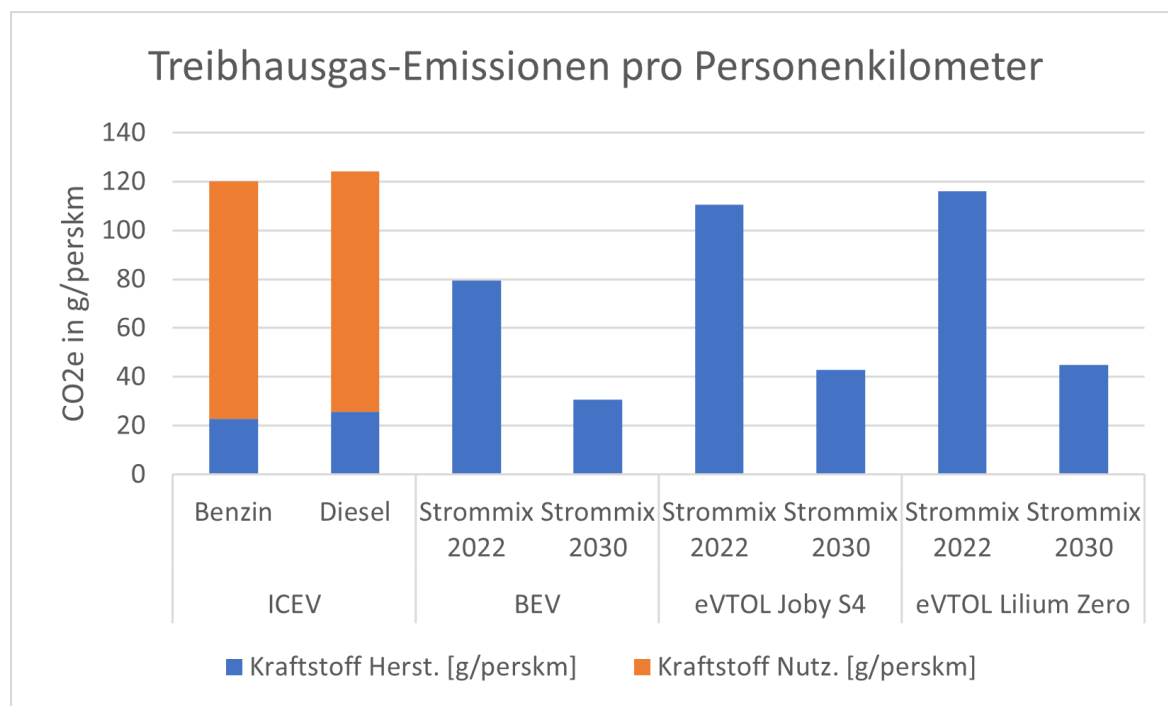


Abbildung 25: Treibhausgasemissionen pro Personenkilometer verschiedener Verkehrsmittel auf der Reise zwischen den Flughäfen Friedrichshafen und Stuttgart in CO₂e

Kosten

Bezüglich der Preise der einzelnen Verkehrsmittel präsentieren sich unterschiedliche Szenarien: Das Flugtaxi Joby S4 könnte im Jahr 2027 zwischen 355-1155 € pro Reise kosten – somit könnten die pro Kopf-Preise bei voller Auslastung zwischen 90-255 € liegen. Im Jahr 2037 könnten die eVTOL-Preis pro Reise sinken, sodass diese zwischen 240-765 € liegen könnten – womit sich pro-Kopf-Preis von 60-185 € ergeben könnten (vgl. die Szenarioanalyse in Kapitel 03.03.05 sowie Abbildung 26 für die mögliche Verteilung der Kosten pro Flug). Der ÖPNV beginnt bei 22 € (ohne ICE) bzw. 59 € mit ICE.¹³ Ein Taxi schlägt ohne Sondervertrag für etwaige Sammel-Shuttleservices mit etwa 400 € zu Buche. Die private PKW-Nutzung würde etwa 84 € Kosten verursachen inkl. Abnutzungskosten und zuzüglich eventuell anfallender Parkgebühren¹⁴. [58], [59]

¹³ Stand November 2023, bahn.de, ohne Vergünstigungen wie z. B. Jahreskarten oder BahnCard.

¹⁴ Angenommen wurde der zulassungsstärkste Mittelklassewagen 2023: VW Tiguan.

Kostenverteilung Flug 2032

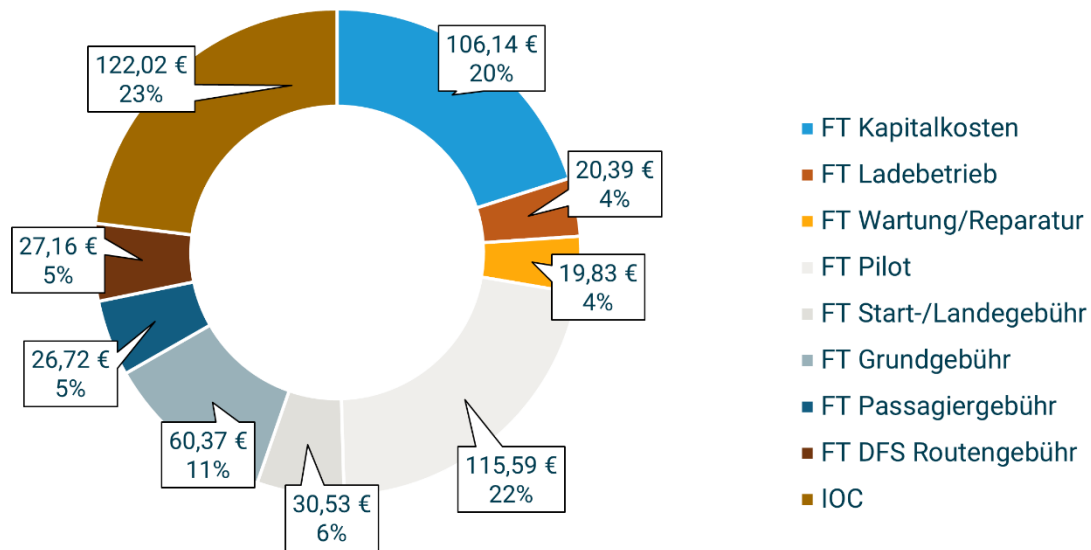


Abbildung 26: Verteilung der Kosten eines Flugs von Stuttgart nach Friedrichshafen im Baseline-Szenario auf die unterschiedlichen Kostensegmente.

Fazit

Auch an der zu erwartenden Preisgestaltung sieht man deutlich die Vorteile einer hohen Auslastung bei Flugtaxi-Services. Dann könnten diese auf längeren Strecken zusammen mit dem erheblichen Reisezeitvorteil durchaus kompetitiv mit dem Taxi sein, oder sogar gegenüber dem privaten PKW; jedoch nur, wenn diese jeweils alleine genutzt würden. Betrachtet man jedoch die Treibhausgasemissionen, so kann ein Flugtaxi unabhängig von der Auslastung keine Vorteile bieten gegenüber elektrisch betriebenen PKWs.

04. GESAMTBEWERTUNG UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Die umfassende Analyse des möglichen Einsatzes von eVTOLs in Baden-Württemberg hat ein detailliertes Bild der potenziellen Herausforderungen und Chancen gezeichnet. Ein entscheidender Faktor in dieser Gesamtbewertung ist die Standortauswahl, hierbei hat die hier durchgeführte Standortanalyse besonderes Potenzial in den Städten Stuttgart und Heilbronn sowie in der Bodenseeregion identifiziert. Die strategische Ausrichtung des Netzwerkes auf diese Regionen stellt daher einen bedeutenden Schritt dar, um die Akzeptanz und Effizienz des Systems zu fördern.

Die Emissionsanalyse liefert jedoch eine nuancierte Perspektive. Während eVTOLs aufgrund ihres elektrischen Antriebs mit Klimaneutralität werben, zeigt die Analyse, dass auf kurzen Strecken oder bei geringer Auslastung die Emissionsvorteile im Vergleich zu Verbrenner-PKWs begrenzt bis nicht vorhanden sind, solange der Ladestrom nicht klimaneutral erzeugt wurde. Auf längeren Strecken und bei großer Besetzung¹⁵ könnten eVTOLs bereits mit dem Strommix 2022 weniger CO₂e Emissionen im Betrieb verursachen als Verbrenner-PKW, jedoch nicht als ein elektrisch angetriebener PKW. Allerdings können sie in keinem Fall in einem Maße skaliert werden, um den Verkehr in Baden-Württemberg signifikant zu dekarbonisieren.

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse bietet Einblicke in die finanzielle Seite der eVTOL-Implementierung. Die Szenarien mit langsamem und schnellem Hochlauf liefern unterschiedliche Perspektiven, wobei hierfür ein nicht-subventioniertes Wirtschaftsmodell für Flugbetreiber und Vertiport-Betreiber angenommen wurde.

Die ermittelten Preise im Bereich von 2-4€ pro Personenkilometer im Baseline-Szenario (1-10€ in der vollen Spannbreite zwischen pessimistischem und optimistischem Szenario), zuzüglich einer Grundgebühr von 35-55€ (entsprechend 10-100€ im pessimistischen bzw. optimistischen Szenario), bis zum Jahr 2037 zeigen eine wirtschaftliche Machbarkeit, allerdings primär auf längeren Strecken und bei hoher Auslastung. Diese Ergebnisse eröffnen die Möglichkeit einer Wettbewerbsfähigkeit im Vergleich zum Taxi und in einigen Fällen sogar zur 1. Klasse der Bahn.

Ein weiterer Schlüsselaspekt liegt in der Betonung der Integration bestehender Infrastruktur, insbesondere von bestehenden Flughäfen, in das eVTOL-Netzwerk. Dieser Ansatz könnte nicht nur die Effizienz steigern, sondern auch die Akzeptanz in der Bevölkerung fördern, da er auf vertrauten Strukturen aufbaut.

¹⁵ Hohe Auslastung mit 4-5 Passagieren.

Insgesamt ist die Integration von eVTOLs in Baden-Württemberg mit einer guten strategischen Planung, Investitionswillen und Berücksichtigung der genannten Aspekte realisierbar. Es ist entscheidend, die Erkenntnisse dieser Gesamtbewertung in konkrete Handlungsschritte zu übersetzen, um eine zukunftsweisende und nachhaltige Mobilitätstransformation zu ermöglichen. Ein signifikanter Beitrag zur verkehrlichen Entlastung ist jedoch innerhalb des betrachteten Zeitraums nicht zu erwarten.

04.01 HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Aufbauend auf der Analyse, den vorgestellten Ergebnissen sowie den Herausforderungen lassen sich konkrete Handlungsempfehlungen für das Land Baden-Württemberg ableiten.

Vernetzung aller (AAM-)Stakeholder in der Region: Die Vernetzung von AAM-Stakeholdern wie eVTOL-Herstellern, Vertiport-Betreibern, AAM-Service-Providern und Flughäfen mit lokalen Verbänden, Kommunen, Behörden sowie auch Unternehmen außerhalb der Luftfahrtindustrie ist eine Voraussetzung für die erfolgreiche und sinnvolle Implementierung von AAM. Nur durch Zusammenarbeit der verschiedenen Akteure kann relevante Regulatorik weiterentwickelt und potenziell ein sozial und ökonomisch nachhaltiges AAM-Netzwerk in der Region realisiert werden. Insbesondere können konkrete Nachfrageerwartungen aufgebaut und somit Unsicherheiten abgebaut werden.

Wirtschaftlichkeit und Umsetzbarkeit kritisch bewerten: Ausgehend von der Marktentwicklung und entstehenden Zusammenarbeiten müssen Einsatz- und Hochlaufzenarien bewertet werden. So ist z. B. anzunehmen, dass der Einsatz von eVTOLs flächendeckend zuerst in anderen Regionen der Welt (New York, Metropolen in Brasilien oder auch dem Mittleren Osten) entstehen, welche sich durch eine insgesamt schlechtere Verkehrsinfrastruktur und höhere Bevölkerungsdichte auszeichnen. Umso relevanter wird es sein, dass die verschiedenen Stakeholder aus Wirtschaft, Politik und Gesellschaft gemeinsam tragbare Lösungen entwickeln und auch Sonder-Use-Cases für die Markteintrittsphase suchen. Vor allem Erlebnis- und Premiumtouristen können als Early Adopter auftreten und der Tourismusstandort Baden-Württemberg kann hierdurch an Attraktivität gewinnen. Nach einer Anfangsphase mit Schwerpunkt auf weniger preissensiblen Nutzern ist eine konkurrenzfähige Preisgestaltung und Wettbewerbsfähigkeit wichtig, um weitere Nutzergruppen – trotzdem voraussichtlich im Premiumsegment – anzusprechen.

Integration in existierende Infrastruktur: Für den Aufbau erster (Pilot-)Strecken ist es insbesondere wichtig die konkreten Vertiport-Standorte zu identifizieren. Es ist vorteilhaft bestehende Infrastrukturen wie (Regional-)Flughäfen zu nutzen, um die initialen Investitionsausgaben des eVTOL-Netzwerks zu reduzieren. Dies ermöglicht eine schnellere Implementierung und nutzt zudem existierende intermodale Verknüpfungen.

Weiterführende Emissionsreduktion: Obwohl die Emissionsanalyse auf kurzen Strecken im Vergleich zu bestehenden Verkehrsmitteln negativ ausfällt, kann eine kontinuierliche Technologieentwicklung und Nutzung erneuerbarer Energien die Emissionsbilanz verbessern. Insbesondere durch die Substitution existierender Flüge mit Helikoptern und gecharterten Kleinflugzeugen durch eVTOLs kann ein Beitrag zur Dekarbonisierung geleistet werden. Insgesamt wird AAM durch die hohe notwendige Energie und die geringe Skalierbarkeit nach heutigem Kenntnisstand zwar ein ergänzendes Mittel sein, jedoch keinen wegweisenden Beitrag zur Mobilitätstransformation in Baden-Württemberg leisten können.

Analysen zu Lärmemissionen: In Abschnitt 02.03.01 wurde auf Basis mehrerer Studien erläutert, inwiefern die Lautstärke der eVTOLs ein wichtiger Faktor für die Akzeptanz von Flugtaxis in der Bevölkerung darstellt. Aktuell liegen jedoch keine Klassifikation bzw. Vorgaben seitens der EASA für die Lautstärke von eVTOLs vor. Gleichzeitig gibt es kaum bis keine Hersteller-Angaben zum Geräuschpegel der eVTOL-Modelle, insbesondere nicht während Starts und Landungen. Daher muss abgewartet und analysiert werden, wie stark die tatsächliche Lautstärke die gesellschaftliche Akzeptanz beeinflussen wird und was dies für die angedachten Einsatzbereiche und die Standortwahl bedeutet.

04.02 AUSBLICK FÜR WEITERE FORSCHUNGSMÖGLICHKEITEN

Die vorliegende Potenzialanalyse stellt eine erste umfassende Betrachtung des Einsatzes von AAM in Baden-Württemberg dar. Mit einem daten- und modellbasierten Ansatz werden relevante Ergebnisse entlang der gesamten Wertschöpfungskette erzielt, welche als Grundlage für weiterführende Studien sowie für politische Entscheidungsprozesse verwendet werden können. Im Folgenden wird auf einige Themen eingegangen, die in der Zukunft noch weiter vertieft bzw. anhand sich ändernder Datenlagen kontinuierlich angepasst werden können.

Mangelnde Datenverfügbarkeit auf Seite der Hersteller von eVTOLs

Die vorliegende Studie sowie auch der Großteil aller Analysen zur Machbarkeit und dem Potenzial von Advanced Air Mobility sind momentan durch eine relevante Einschränkung geprägt: die begrenzte Bereitstellung und Verfügbarkeit von Informationen seitens der eVTOL-Hersteller. Aufgrund der aktuellen Wettbewerbssituation veröffentlichen viele Hersteller entweder keine oder nur unpräzise Angaben zu Schlüsselfaktoren wie Reichweite, Verbrauch, Lärmemissionen oder Preis ihrer eVTOL-Modelle. In der Forschung ist man daher gezwungen, auf Annahmen zurückzugreifen, um KPIs wie den Preis pro Kilometer zu berechnen. Eine alternative Forschungsperspektive könnte sich darauf konzentrieren, unter welchen Parametern ein AAM-Netzwerk wirtschaftlich betrieben werden kann und positive Auswirkungen auf eine Region haben könnte. Weiterhin werden mit Markteintritt genauere Informationen über die eVTOL-Modelle verfügbar werden, die dann entsprechend aktualisiert in die Erwägungen eingearbeitet werden sollten. Hierfür kann die sowieso notwendige engere Zusammenarbeit mit eVTOL-Herstellern und Betreibern genutzt werden.

Einbeziehung der zukünftigen Änderung des Mobilitätsverhaltens

Ein weiterer relevanter Aspekt in der Betrachtung von attraktiven Routen für AAM ist die potenzielle Änderung des Mobilitätsverhaltens und der Nachfrageverteilung in der Zukunft. Die Projektergebnisse beruhen auf aktuellen Daten zu Demografie und Mobilitätsverhalten; gleichzeitig vollzieht die Gesellschaft landesweit einen demografischen Wandel. Für Baden-Württemberg wird ein weiteres Bevölkerungswachstum prognostiziert [60] bei gleichzeitigem Anstieg des Anteils an über 65-jährigen in der Bevölkerung. [61] Künftige Studien zu Nutzergruppen und Mobilitätsverhalten müssen unter Berücksichtigung dieser Entwicklungen durchgeführt werden, um aussagekräftigere und dynamische Prognosen durch bspw. die Nachfragemodellierung zu ermöglichen.

Zeitabhängige Nachfragemodellierung und Netzwerkoptimierung

In Abschnitt 03.03.05 wurde bereits die Relevanz von Vertiport-Auslastung und der Anzahl an Leerflügen als Schlüsselfaktoren für den wirtschaftlichen Betrieb eines AAM-Netzwerkes diskutiert. Anknüpfend an diesen Punkt stellt die (numerische) Optimierung von Flugplänen einen weiteren interessanten Forschungsbereich (vor allem für die Lufttaxi-Betreiber) dar. Ein Netzwerk wie in dieser Studie vorgeschlagen bedarf einer komplexen Flugplanung, um sicherzustellen, dass es nicht zu Engpässen in der Flugtaxi-Verfügbarkeit an einzelnen Vertiports kommt bei gleichzeitiger Minimierung von Leerflügen. Ein weiterer Aspekt in der Optimierung von Flugplänen stellt die Zeitabhängigkeit der Nachfrage dar. In der Wirtschaftlichkeitsanalyse wurde implizit eine

über den Tag gleichverteilte Nachfrage angenommen, um die theoretische Auslastung zu berechnen. Studien zu Nutzergruppen wie bspw. Pendlern kommen zu dem Schluss, dass es im Tagesverlauf zu starken Nachfrageschwankungen und starken Ungleichgewichten in der Flussrichtung von Reisen kommt. [62] Dadurch könne eine große Zahl an Leerflügen entstehen, der man durch tages- und/oder auslastungsabhängiges Pricing entgegenwirken könnte. Insgesamt wäre also ein Studienansatz von Interesse, der Flugpläne in Kombination mit dem Pricing dynamisch im Hinblick auf Leerflüge und Auslastung optimiert.

05. BIBLIOGRAFIE

- [1] Verband unbemannte Raumfahrt, "Advanced Air Mobility." Accessed: Dec. 18, 2023. [Online]. Available: <https://verband-unbemannte-luftfahrt.de/themen/advanced-air-mobility/>
- [2] D. Duwe, L. Keicher, P. Ruess, and F. Klausmann, "QUO VADIS 3D MOBILITY," 2019.
- [3] EASA and McKinsey & Company, "Study on the societal acceptance of Urban Air Mobility in Europe," 2021.
- [4] Ehang, "EHang Unmanned Aircraft Cloud System Approved by the CAAC." Accessed: Sep. 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.ehang.com/news/984.html>
- [5] Volocopter, "Volocopter Secures Production Organisation Approval." Accessed: Sep. 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.volocopter.com/newsroom/volocopter-secures-production-organisation-approval/>
- [6] Lilium, "Lilium Receives EASA Design Organization Approval," 2023, Accessed: Dec. 19, 2023. [Online]. Available: https://lilium.com/newsroom-detail/lilium-receives-easa-design-organization-approval?_gl=1*16dtxmk*_up*MQ..*_ga*MTEx-ODQ1OTk1Mi4xNzAyMDI4NzYy*_ga_9YC7ETNZ98*MTcwMjAyODc2MS4xLjEuMTcwMjAyODc3NS4wLjAuMA..
- [7] Volocopter, "A Complete Guide to Certification (VoloCity Air Taxi Edition)." Accessed: Dec. 19, 2023. [Online]. Available: <https://www.volocopter.com/en/blog/how-one-volocopter-aircraft-is-being-prepped-to-soar>
- [8] X. Qiao, G. Chen, W. Lin, and J. Zhou, "The Impact of Battery Performance on Urban Air Mobility Operations," *Aerospace*, vol. 10, no. 7, Jul. 2023, doi: 10.3390/aerospace10070631.
- [9] Lilium, "Lilium: Analyst Presentation," 2021. Accessed: Sep. 06, 2023. [Online]. Available: <https://investors.lilium.com/static-files/e1912f16-b455-4929-a7df-f8b4dd5c2446>
- [10] Lyte Aviation, "Expanding Horizons." Accessed: Sep. 06, 2023. [Online]. Available: <https://lyteaviation.com/>

- [11] GKN Aerospace, "GKN AEROSPACE-LED SKYBUS COLLABORATION PROJECT COMPLETES SUCCESSFUL FEASIBILITY STUDIES," 2022, Accessed: Sep. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.gknaerospace.com/en/newsroom/news-releases/2022/gkn-aerospace-led-skybus-collaboration-project-completes-successful-feasibility-studies/>
- [12] Lilium, "Report of Foreign Private Issuer to the US Securities and Exchange Commission."
- [13] N. S. Ernest, U. Tripoli, J. Gonzales, and M. Arbery, "Advanced air mobility: winning business models for passenger flight." Accessed: Sep. 05, 2023. [Online]. Available: <https://www.kearney.com/industry/transportation-travel/article/-/insights/advanced-air-mobility-winning-business-models-for-passenger-flight>
- [14] Roland Berger and The Roland Berger Center for Smart Mobility, "Urban Air Mobility," 2020.
- [15] T. Mayor and J. Anderson, "Urban air mobility is poised to take off as a premium service option in the world's largest, most congested cities," 2019.
- [16] EASA, "SPECIAL CONDITION Vertical Take-Off and Landing (VTOL) Aircraft Special Condition for small-category VTOL aircraft Statement of Issue," 2019.
- [17] A. Hussain, M. Metcalfe, and V. Rutgers, "Infrastructure barriers to the elevated future of mobility." Accessed: Oct. 26, 2023. [Online]. Available: <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/future-of-mobility/infrastructure-barriers-to-urban-air-mobility-with-VTOL.html>
- [18] Skyports Press Release, "World's first vertiport showcase in Singapore." Accessed: Oct. 26, 2023. [Online]. Available: <https://skyports.net/vertiports/>
- [19] Lilium Press Release, "Lilium partners with Tavistock development and City of Orlando to establish first region in the US." Accessed: Oct. 26, 2023. [Online]. Available: <https://lilium.com/newsroom-detail/lilium-partners-with-tavistock-and-orlando>

- [20] Lilium Press Release, "Ferrovial and Lilium to develop US Vertiport Network." Accessed: Oct. 26, 2023. [Online]. Available: <https://lilium.com/newsroom-detail/ferrovial-and-lilium-develop-us-vertiport-network>
- [21] Siemens Press Release, "Siemens and Skyway collaborate to develop infrastructure to pave way for Vertiports." Accessed: Oct. 26, 2023. [Online]. Available: <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-and-skyway-collaborate-develop-infrastructure-pave-way-vertiports>
- [22] EASA, *Prototype Technical Specifications for the Design of VFR Vertiports for Operation with Manned VTOL-Capable Aircraft Certified in the Enhanced Category*. <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/prototype-technical-design-specifications-vertiports>, 2022.
- [23] ICAO, *Annex 14 to the Convention on the International Civil Aviation*. 1951.
- [24] L. Preis, "Quick Sizing, Throughput Estimating and Layout Planning for {VTOL} Aerodromes {\textendash} a Methodology for Vertiport Design," *{AIAA} {A V I A T I O N} 2021 {FORUM}*, Jul. 2021, doi: 10.2514/6.2021-2372.
- [25] K. Schweiger and L. Preis, "Urban Air Mobility: Systematic Review of Scientific Publications and Regulations for Vertiport Design and Operations," *Drones*, vol. 6, no. 7, p. 179, Jul. 2022, doi: 10.3390/drones6070179.
- [26] L. Preis and M. Vazquez, "Vertiport Throughput Capacity under Constraints Caused Byvehicle Design, Regulations and Operations," *Bauhaus Luftfahrt e. V.*, 2023.
- [27] P. Planing and Y. Pinar, "Acceptance of air taxis - A field study during the first flight of an air taxi in a European city," 2019. [Online]. Available: www.hft-stuttgart.de
- [28] S. Stegmüller, F. Braun, A. Flyingcab, U. A. Mobility, and A. Sicht Der Nutzer, "Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO Akzeptanzstudie FlyingCab Experimentelle Akzeptanzerhebung im Kontext Urban Air Mobility," 2020.

- [29] Booz Allen Hamilton, "Final Report Urban Air Mobility (UAM) Market Study," 2018. Accessed: Dec. 19, 2023. [Online]. Available: https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20205005881/downloads/UAM_Commuter_Scenarios_05_11_2020.pdf
- [30] Lilium Press Release, "Shareholder Letter Q1/2023." Accessed: Oct. 30, 2023. [Online]. Available: https://investors.lilium.com/Q1_2023_Shareholder_Letter#:~:text=We%20currently%20estimate%20the%20Lilium,ser-vices%20with%20our%20shuttle%20aircraft.&text=R%20endere%20d%20utilizing%20c%20omputer%20graphic%20s
- [31] dwif, "Wirtschaftsfaktor Tourismus für Baden-Württemberg 2021," 2022. Accessed: Sep. 20, 2023. [Online]. Available: https://wm.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-wm/interne/Dateien_Downloads/Tourismus/dwif-Wirtschaftsfaktor_Tourismus_Baden-Wu%CC%88rttemberg_2021.pdf
- [32] Statistisches Landesamt BW, "Tourismus - Übernachtungsdichte Baden-Württemberg 2022." Accessed: Sep. 20, 2023. [Online]. Available: https://www.statistik-bw.de/TourismGastgew/Tourismus/GT_uebernachtDichte.jsp
- [33] Ministerium für Wirtschaft Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg, "Wirtschaftsdaten 08/2023," 2023.
- [34] Statistisches Landesamt BW, "Pendelnde der 20 größten Arbeitsmarktzentren."
- [35] ADAC, "Baden-Württemberg 2022: ADAC Luftrettung fliegt 2144 Einsätze." Accessed: Sep. 22, 2023. [Online]. Available: <https://presse.adac.de/regionalclubs/wuerttemberg/baden-wuerttemberg-2022-adac-luftrettung-fliegt-2144-einsaetze.html#:~:text=F%C3%BCr%20die%20schnelle%20notfallmedizinische%20Versorgung,ADAC%20Rettungshubschrauber%20%E2%80%9EChristoph%2022%E2%80%9C>
- [36] Landesanstalt für Umwelt Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, "Fakten-Folgen-Perspektiven: Klimawandel in Baden-Württemberg," 2015.

- [37] M. Fu, R. Rothfeld, and C. Antoniou, "Exploring Preferences for Transportation Modes in an Urban Air Mobility Environment: Munich Case Study," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2673, no. 10, pp. 427–442, Oct. 2019, doi: 10.1177/0361198119843858.
- [38] Wirtschafts- und Sozialwissenschaftliches Institut (WSI), "EINKOMMEN IM REGIONALEN VERGLEICH." Accessed: Dec. 19, 2023. [Online]. Available: <https://www.wsi.de/de/einkommen-14582-einkommen-im-regionalen-vergleich-40420.htm>
- [39] destatis, "Gemeindeverzeichnis-Informationssystem GV-ISys." Accessed: Dec. 19, 2023. [Online]. Available: https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Regionales/Gemeindeverzeichnis/_inhalt.html
- [40] statistikbw, "Tourismus - Übernachtungsdichte." Accessed: Dec. 19, 2023. [Online]. Available: https://www.statistik-bw.de/TourismusGastgew/Tourismus/GT_uebernachtDichte.jsp
- [41] Ministerium für Wirtschaft Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg, "URLAUBSLAND BADEN-WÜRTTEMBERG - Reisegebiete." Accessed: Dec. 19, 2023. [Online]. Available: <https://wm.baden-wuerttemberg.de/de/tourismus/urlaubsland-baden-wuerttemberg/reisegebiete>
- [42] IHK Region Stuttgart, "Die größten Unternehmen in Baden-Württemberg und der Region Stuttgart." Accessed: Dec. 19, 2023. [Online]. Available: <https://www.ihk.de/stuttgart/standort-region-stuttgart/fakten/bedeutende-unternehmen-677868>
- [43] M. Rimjha *et al.*, "DEMAND FORECAST MODEL DEVELOPMENT AND SCENARIOS GENERATION FOR URBAN AIR MOBILITY CONCEPTS," 2020.
- [44] M. Rimjha, "Urban Air Mobility: Demand Estimation and Feasibility Analysis," Virginia Polytechnic Institute and State University, 2021. Accessed: Dec. 19, 2023. [Online]. Available: <https://vtechworks.lib.vt.edu/server/api/core/bitstreams/35333724-7684-4c91-8b4f-883f0128a37e/content>

- [45] N. André, "Sustainable Design of Electric Vertical Take-Off and Landing Aircraft for Urban Air Mobility," München, 2022. Accessed: Sep. 20, 2023. [Online]. Available: <https://media-tum.ub.tum.de/doc/1618545/1618545.pdf>
- [46] R. H. Ballou, H. Rahardja, and N. Sakai, "Selected country circuitry factors for road travel distance estimation," *Transp Res Part A Policy Pract*, vol. 36, no. 9, pp. 843–848, Nov. 2002, doi: 10.1016/S0965-8564(01)00044-1.
- [47] Umweltbundesamt, "CO₂-Emissionen pro Kilowattstunde Strom stiegen in 2022." Accessed: Sep. 11, 2023. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom-stiegen-in>
- [48] Transport & Environment, "How clean are electric cars?," 2020.
- [49] S. Sripad, V. Viswanathan, and D. A. Weitz, "The promise of energy-efficient battery-powered urban aircraft," *PNAS*, vol. 118, no. 45, 2021, doi: 10.1073/pnas.2111164118/-/DCSupplemental.
- [50] A. Kasliwal *et al.*, "Role of flying cars in sustainable mobility," *Nat Commun*, vol. 10, no. 1, Dec. 2019, doi: 10.1038/s41467-019-09426-0.
- [51] A. Regett, W. Mauch, and U. Wagner, "Carbon footprint of electric vehicles - a plea for more objectivity," 2019.
- [52] G. Bieker, "A GLOBAL COMPARISON OF THE LIFE-CYCLE GREENHOUSE GAS EMISSIONS OF COMBUSTION ENGINE AND ELECTRIC PASSENGER CARS," 2021. [Online]. Available: www.theicct.org/communications@theicct.org
- [53] Bundesanstalt für Straßenwesen, "Automatische Verkehrszählung: Zählstelle Sinsheim." Accessed: Dec. 18, 2023. [Online]. Available: https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Aktuell/zaehl_aktuell_node.html?sessionid=96B0EB77A4F0D2F21CCF1E1B8611A733.live11293?nn=1819516&cms_detail=8158&cms_map=0
- [54] Porsche Consulting, "The Future of Vertical Mobility – Sizing the market for passenger, inspection, and goods services until 2035."
- [55] Volocopter Press Release, "Volocopter wird Flugtaxidienste in Singapur anbieten." Accessed: Oct. 26, 2023. [Online]. Available:

<https://www.volocopter.com/de/newsroom/volocopter-wird-flugtaxidienste-in-singapur-anbieten/>

- [56] Lufthansa Press Release, "Lufthansa Group und Lilium unterzeichnen Absichtserklärung für strategische Partnerschaft." Accessed: Dec. 19, 2023. [Online]. Available: <https://newsroom.lufthansa-group.com/lufthansa-group-und-lilium-unterzeichnen-absichtserkl%C3%A4rung-f%C3%BCr-strategische-partnerschaft>
- [57] J. Pertz *et al.*, "Estimating the Economic Viability of Advanced Air Mobility Use Cases: Towards the Slope of Enlightenment," *Drones*, vol. 7, no. 2, p. 75, Jan. 2023, doi: 10.3390/drones7020075.
- [58] ADAC, "ADAC Autokosten Herbst/Winter 2023." Accessed: Dec. 18, 2023. [Online]. Available: <https://assets.adac.de/Autodatenbank/Autokosten/autokostenuebersicht.pdf>
- [59] statista, "Anzahl der Neuzulassungen von Personenkraftwagen in Deutschland nach Modell von Januar bis November 2023." Accessed: Dec. 18, 2023. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/253300/umfrage/automodelle-mit-den-meisten-monatlichen-neuzulassungen-in-deutschland/>
- [60] StatistikBW, "Bevölkerungsvorausberechnung im Kreisvergleich." Accessed: Dec. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.statistik-bw.de/BevoelkGebiet/Vorausrechnung/Kreisdaten.jsp>
- [61] Demografie Portal Bund Länder, "Baden-Württemberg demografisch." Accessed: Dec. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.demografie-portal.de/DE/Politik/Baden-Wuerttemberg/baden-wuerttemberg-demografisch.html>
- [62] J. Herget, F. Toepsch, and K. Timmer, "Marktpotenzial von Flugtaxi - Nachfrageanalyse am Beispiel des Flughafens Frankfurt und der Region Rhein-Main," *Internationales Verkehrswesen*, vol. 1, 2021.