



Baden-Württemberg
Ministerium für Verkehr

Fliegen mit SAF und Wasserstoff

Bedarfsanalyse für SAF und Wasserstoff im Luftverkehr
in Baden-Württemberg





**Baden-Württemberg
Ministerium für Verkehr**

Impressum

Auftraggeber:



**Baden-Württemberg
Ministerium für Verkehr**

Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg (VM)
Dorotheenstraße 8
70173 Stuttgart

Auftragnehmer:

d-fine

d-fine GmbH
An der Hauptwache 7
60313 Frankfurt am Main

Stand (Quellen): Juni 2025

Management Summary

Baden-Württemberg (BW) verfolgt das ambitionierte Ziel, bis 2040 klimaneutral zu sein. Die „Roadmap reFuels“ unterstützt die Nutzung alternativer Kraftstoffe zur Reduktion von Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor. Im Luftverkehr bieten nachhaltige Drop-in-Flugkraftstoffe (Sustainable Aviation Fuels = SAF), für die aktuell eine Beimischung zu fossilem Kerosin bis zu 50 Prozent zugelassen ist, sowie Wasserstofftechnologien ein großes Potential. Derzeit macht biogenes SAF etwa 90 Prozent der SAF aus, während strombasiertes SAF – auch Power-to-Liquid-Kraftstoff (PtL) genannt – noch nicht großflächig kommerziell verfügbar ist.

Ziel der Studie ist es, die Entwicklung von SAF und Wasserstoff anhand von Szenarien abzuschätzen, um eine Planbarkeit für die Flughafeninfrastruktur und den Bezug dieser Kraftstoffe über entsprechende Lieferketten herzustellen. Der Aufbau neuer Infrastrukturen bedarf einer vorausschauenden rechtzeitigen Planung. Um hier Vorreiter zu sein, sind weitergehende Aktivitäten notwendig. Den Spielraum des Landes soll diese Studie aufzeigen.

Die Verwendung von grünem Wasserstoff zur direkten Verbrennung oder in Brennstoffzellen ermöglicht höhere Emissionseinsparungen als SAF. In der Luftfahrt wird voraussichtlich flüssiger Wasserstoff (LH₂) benötigt, da dieser größere Reichweiten ermöglicht.

Markteintritt von Flugzeugen mit Wasserstoffantrieb gestaffelt ab den 2030er Jahren

Die Entwicklung von Flugzeugen mit alternativen Antrieben wird von Airbus und Start-ups vorangetrieben. Kleinere Maschinen mit Wasserstoffantrieben könnten ab den 2030er Jahren erscheinen, der Markteintritt größerer Flugzeuge wird etwa 10 Jahre später erwartet. Der Einsatz von SAF ist bis mindestens 2040 in großen Mengen notwendig. Eine langsame Hochlaufphase lässt vermuten, dass SAF langfristig für die meisten Flugzeuge benötigt wird. Auch Flottenmodernisierungspläne der Airlines deuten auf eine lange Abhängigkeit von SAF hin.

In BW besteht Potential für Wasserstoffeinsatz – SAF ist dennoch langfristig notwendig

In Baden-Württemberg liegen drei Verkehrsflughäfen in Stuttgart, Friedrichshafen und Karlsruhe/Baden-Baden, die über 90 Prozent der motorisierten Flüge im Land abwickeln. Rund 50



Prozent der Flüge sind Flugstrecken unter 800 km, die künftig mit Wasserstoffflugzeugen möglich sind. Etwa 5 Prozent der Flüge erfolgen mit kleineren Maschinen, für die ab 2030 alternative Technologien verfügbar sein könnten. Über 80 Prozent werden mit Airbus A320 oder Boeing 737 durchgeführt, weshalb die Einführung neuer Technologien von der Entwicklung ähnlicher Modelle abhängt. 78 Prozent der Flüge folgen festen Routen, was die Planbarkeit für Wasserstoffflugzeuge gewährleistet. Da die Verfügbarkeit von Wasserstoff an Partnerflughäfen unsicher ist, bleibt SAF langfristig wichtig aufgrund seiner Drop-In-Fähigkeit.

SAF bleibt bis 2050 wichtigste Option zur Treibhausgasminde rung in der Luftfahrt

Einflussfaktoren auf den zukünftigen Bedarf an SAF und Wasserstoff sind u.a. das Verkehrsaufkommen, Kraftstoffpreise, Effizienzsteigerungen der Flugzeuge und die Verfügbarkeit der Kraftstoffe bzw. Fluggeräte. Einen zentralen Einfluss hat die Regulierung, z.B. durch verpflichtende SAF-Quoten oder Tankering – die Mitnahme von mehr Kraftstoff als für den Folgeflug notwendig. Die Szenarien zeigen bis 2050 unterschiedliche Auswirkungen auf Energiebedarf und Emissionen: Im Szenario der „Konventionellen Technologien“ sinkt der Gesamtenergiebedarf durch Effizienzsteigerungen neuer Flugzeuge und ein geringes Wachstum, wobei Wasserstoff praktisch unbedeutend bleibt. Im „SAF-Fokus“-Szenario wird strombasiertes SAF zum zentralen Kraftstoff, während Wasserstoff einen bedeutenden Anteil von etwa 6 Prozent erreicht. Dies führt bei nahezu gleichbleibendem Energiebedarf zu einer Emissionsreduktion von rund 55 Prozent im Jahr 2050. Im „Technologiemix“-Szenario sind strombasiertes SAF und Wasserstoff mit einem Anteil von je knapp 20 Prozent gleichbedeutend, mit dem höchsten Anteil bei biogenem SAF. Fossiles Kerosin liegt jeweils noch bei etwa 30 Prozent in 2050. Ohne CO₂-Preis bleibt fossiles Kerosin bis 2050 der günstigste Kraftstoff gefolgt von synthetischem paraffinischem Kerosin aus hydroprozessierten Estern und Fettsäuren (HEFA) und flüssigem Wasserstoff. Strombasiertes SAF bleibt langfristig der teuerste Kraftstoff.

Einsatz von SAF erfordert im Gegensatz zu Wasserstoff kaum neue Infrastruktur

Biogenes SAF ist bereits kommerziell verfügbar, während strombasierte SAF hinsichtlich Skalierung und Effizienz Entwicklungsbedarf haben. Der Transport von SAF ist unkompliziert. Unnötige Transportemissionen sollten ausgeschlossen werden. Die Produktion von grünem



Wasserstoff ist nicht durch Rohstoffgrenzen beschränkt, sondern von grüner Stromverfügbarkeit und Elektrolyseuren abhängig. Ein weiterer, Produktion und Abnahme beeinflussender Faktor, ist die Regulierung und die davon abhängige Wirtschaftlichkeit. Stuttgart soll an das Wasserstoffkernnetz angeschlossen werden. So könnte gasförmiger Wasserstoff (GH₂) etwa ab 2030 bezogen werden, wenn eine Verbindung zum Flughafen hergestellt werden kann. LH₂ muss entweder an die Flughäfen per LKW, Bahn oder Schiff geliefert oder aus GH₂ verflüssigt werden.

Flughäfen in Baden-Württemberg benötigen bis 2050 keine Verflüssigungsanlage

Flughäfen, die Wasserstoff bereitstellen, benötigen ab einem gewissen Volumen mindestens einen spezifischen Tank und die Infrastruktur zur Betankung der Flugzeuge. Ab Mitte der 2040er Jahren werden in einem ambitionierten Szenario bereits acht bis schließlich dreizehn LH₂-Lieferungen pro Tag im Jahr 2050 in BW benötigt. Dann ist ein Wasserstofftanklager am Flughafen Stuttgart sinnvoll. An den anderen Flughäfen im Land und in der Übergangszeit reicht zunächst der Tankwagen selbst als Lager aus. Lager und Betankungs-LKWs sind für Flughäfen im Land die kosteneffizienteste Lösung – eine Verflüssigungsanlage an Flughäfen in BW ist für die geringen Bedarfe bis 2050 in keinem Szenario wirtschaftlich und nachhaltig.

Regulatorische Maßnahmen können Einsatz von SAF – und später Wasserstoff – fördern

Finanzielle Anreize, z. B. durch die Nutzung der Luftverkehrssteuer oder Einnahmen aus dem European Trading System (EU ETS), und regulatorische Sicherheit durch Bestandsschutz für Erstanlagen, sog. first mover, sowie die Prüfung und Ermöglichung von Importen, unterstützen Investitionen und den Ausbau der SAF-Produktion. Für die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff muss der Bedarf in der Luftfahrt in sektorübergreifende Bedarfsanalysen und Planungen zum Infrastrukturaufbau integriert werden. Die Förderung von Produktions- und Importmöglichkeiten für Wasserstoff muss im Einklang mit der Wasserstoff-Roadmap des Landes erfolgen. Zudem kann ein CO₂-Preis für fossiles Kerosin den Einsatz von SAF und Wasserstoff wirtschaftlich attraktiver machen.



Das Land Baden-Württemberg sollte zudem weiterhin auf einen unterstützenden rechtlichen Rahmen auf nationaler und europäischer Ebene einwirken. Zu letzterem gehören der Abschluss der Novelle der Energiesteuerrichtlinie, die Klarstellung von Importmöglichkeiten für SAF, die Anpassung der Quotenentwicklung hin zu linearer Entwicklung zur Förderung des SAF-Produktionshochlaufs, die Verlängerung der Zuteilung von Zertifikaten für die SAF-Nutzung sowie eine Überprüfung der Regelungen zum Tankering und Anrechenbarkeit von Wasserstoff unter ReFuelEU Aviation. Auf Bundesebene sollte das Land Baden-Württemberg auf eine einheitliche Regelung zur Besteuerung von Wasserstoff unabhängig von der eingesetzten Technologie einwirken, sowie eine angepasste Berechnung der Flugsicherungsgebühren für Wasserstoffflugzeuge mit höherem Gewicht vorbereiten.

Initiativen an Flughäfen und die Entwicklung und Förderung von Konzepten zum Umgang mit Wasserstoff sind zudem notwendig für die Integration von Wasserstoff in die Luftfahrt in BW und sollten durch Vernetzung breit verwertet werden.



Inhaltsverzeichnis

1.	Ziel der Studie	8
2.	Methodisches Vorgehen	10
3.	Einsatz von SAF und Wasserstoff als Kraftstoff in Flugzeugen	13
3.1.	Technischer Hintergrund.....	13
3.2.	Status-Quo und Ausblick Flugzeugentwicklung.....	26
4.	Profil der bewegten Flugzeuge in Baden-Württemberg	33
4.1.	Status-Quo.....	33
4.2.	Ausblick.....	41
5.	Szenariobasierte Bedarfsanalyse	48
5.1.	Ableitung der Szenarien	49
5.2.	Ergebnisse.....	57
5.3.	Einordnung und Vergleich mit bestehenden Studien.....	69
6.	Infrastrukturanforderungen	71
6.1.	SAF	71
6.2.	H ₂ -Produktion und Lieferkette	74
6.3.	H ₂ an Flughäfen	77
6.4.	Marktübersicht H ₂	79
6.5.	Rahmenbedingungen an den Flughäfen und -plätzen in Baden-Württemberg	81
7.	Handlungsempfehlungen	85
7.1.	Sicherstellung der lokalen SAF- und Wasserstoffverfügbarkeit	86
7.2.	Einwirkung auf nationale Gesetze und Regulierung der EU	91
7.3.	Lokale Maßnahmen	95
8.	Fazit	98



1. Ziel der Studie

Das Land Baden-Württemberg hat sich das ambitionierte Klimaziel gesteckt, bis 2040 netto-klimaneutral zu sein. Mit der „Roadmap reFuels für Baden-Württemberg“ von 2022 soll das Angebot und die Nachfrage nach alternativen Kraftstoffen unterstützt werden. Diese sind insbesondere für den Luftverkehr relevant, da dieser heute noch hauptsächlich auf fossile Energieträger angewiesen ist. Die Potentiale des Einsatzes alternativer Flugkraftstoffe für Baden-Württemberg und die damit verbundenen Herausforderungen im Rahmen der ReFuelEU Aviation Verordnung sind bereits ausführlich in der Studie „Vorreiter unter ReFuelEU Aviation – Was ist für Baden-Württemberg möglich?“ betrachtet wurden [1].

Neben nachhaltigen Flugkraftstoffen (Sustainable Aviation Fuels oder SAF) könnte zukünftig auch Wasserstoff in Flugzeugen als Kraftstoff eingesetzt werden. Grüner Wasserstoff ermöglicht nahezu emissionsfreie Flüge, allerdings werden für dessen Einsatz neue Antriebssysteme, Fluggeräte und Infrastruktur benötigt. Obwohl erste Demonstrationsflüge mit Wasserstoff bereits Jahre zurückliegen, wird es bis zur Markteinführung großer Passagiermaschinen noch einige Jahre dauern. Mit der Luft- und Raumfahrtstrategie setzt Baden-Württemberg auf die Förderung einer nachhaltigen Luftfahrt. Dabei stehen auch die Produktion von strombasierten SAF und die Förderung der Forschung für die Wasserstoffnutzung in Flugzeugen im Fokus [2]. Neben technischen Entwicklungen an Flugzeugen ist auch an den Flughäfen und -plätzen die notwendige Infrastruktur für den Umgang mit Wasserstoff von Anlieferung, Lagerung bis Vertankung noch nicht vorhanden. Infrastrukturanpassungen sind aber nicht nur an Flughäfen notwendig, sondern auch zur Produktion, Verteilung und Belieferung der Industrie weltweit. Insbesondere kleinere Flughäfen stehen vor der Herausforderung hoher Investitionskosten der Wasserstoffinfrastruktur, sowie aktuell noch häufig unklarer Bedarfe.

Voraussetzung zur Schaffung geeigneter Import- und Transportstrecken und zur Errichtung der notwendigen Infrastrukturen an den Flughäfen sowie die künftige Bereitstellung der Kraftstoffe über bestimmte Logistikketten ist die Kenntnis über die Bedarfe. In verschiedenen Berichten wie beispielsweise der Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg, der Wasserstoff- und Brennstoffzellen Strategie der Region Stuttgart oder in den Sektorzielen 2030 und klimaneutrales Baden-Württemberg 2040 der Industrie und des Verkehrssektors werden Bedarfsermittlungen für das Land veröffentlicht. Der Luftverkehr wird zwar berücksichtigt, es werden jedoch keine konkreten Angaben gemacht.



Ziel der vorliegenden Studie ist es, die Entwicklung von SAF und Wasserstoff in Baden-Württemberg abzuschätzen, um eine Planbarkeit für die Flughafeninfrastruktur und den Bezug dieser Kraftstoffe über entsprechende Lieferketten herzustellen. Hierzu wird das Potential des Einsatzes von SAF und Wasserstoff bewertet, vor dem Hintergrund der Flugzeugbewegungen in Baden-Württemberg ausgewertet und basierend auf drei Szenarien ermittelt. Auf dieser Grundlage kann bestimmt werden, welche Infrastrukturanpassungen an den Flughäfen im Land zu welchem Zeitpunkt notwendig und wirtschaftlich sinnvoll sind, um den Einsatz von Wasserstoff in Flugzeugen zu fördern. Dies ist insbesondere relevant, da der Aufbau neuer Infrastrukturen einer vorausschauenden Planung und eines rechtzeitigen Planungsbeginns bedarf, sodass die neuen Technologien zum Zeitpunkt der Marktreife einsetzbar sind. Außerdem ist zu beachten, dass neben dem Aufbau dieser Infrastrukturen auch der Umgang damit erprobt werden muss, um zuverlässig und sicher zu funktionieren.



2. Methodisches Vorgehen

In diesem Kapitel wird das methodische Vorgehen zur Analyse der gegenwärtigen und zukünftigen Entwicklungen in der Luftfahrt in Baden-Württemberg erläutert. Eine Kombination aus umfassender Literatur- und Marktrecherche sowie gezielten Expertenbefragungen bildet die Grundlage für die Analyse der Potentiale und Herausforderungen von nachhaltigen Flugkraftstoffen und Wasserstoff als alternative Antriebsoptionen in der Region.

Literaturrecherche

Für die umfassende Auswertung der bestehenden Literatur zu Wasserstoff, nachhaltigen Flugkraftstoffen sogenannten SAF (Sustainable Aviation Fuels) und weiteren alternativen Antrieben in der Luftfahrt (wie z. B. Batterien oder Brennstoffzellen) wird ein methodisch strukturierter Ansatz gewählt. Der Schwerpunkt liegt auf der Zusammenfassung relevanter Quellen aus Wissenschaft und Industrie sowie von Stellungnahmen und Studien, die im Auftrag politischer Entscheidungsträger erstellt wurden. Diese bieten Einblicke in den technischen Hintergrund, die Verfügbarkeit von Kraftstoffen und Flugzeugen, die Entwicklung des Luftverkehrs und die erforderliche Infrastruktur. Ergänzend dazu werden Erfahrungsberichte aus Pilotprojekten analysiert und in den spezifischen Kontext der Luftfahrt in Baden-Württemberg gesetzt.

Es werden Studien und Artikel aus Fachzeitschriften, Berichte von Forschungsinstituten wie dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Publikationen von Netzwerken und Verbänden wie dem European Hydrogen Backbone sowie Industrieberichte von Airbus, MTU Aero Engines und weiteren Luftfahrtunternehmen ausgewertet. Ziel ist es, ein klares Bild der aktuellen und zukünftigen Technologien in der Luftfahrt zu zeichnen, die Potentiale und Herausforderungen von SAF und Wasserstoff als Kraftstoffe in der Luftfahrt herauszustellen und notwendige infrastrukturelle Anpassungen darzustellen sowie diese in einen zeitlichen Kontext zu stellen. Der Grund dafür ist, dass neue Infrastrukturen vorausschauend und strategisch geplant werden müssen, da ihre Fertigstellung einen rechtzeitigen Planungsbeginn erfordert. Dies ist bei SAF durch die vorhandenen Quoten der Europäischen Union (EU) und die Analyse der Bestandsflotten einfacher als bei Wasserstoff, bei dem die wahrscheinliche Marktreife und ein Markthochlauf von brennstoffzellenbasierten Flugzeugen abgeschätzt



werden muss. Der Hochlauf von wasserstoffbasiertem Fliegen hat wiederum Einfluss auf den künftigen Marktanteil von SAF.

Expertenbefragungen und Erfahrungsaustausch

Ein zentrales Ziel und ein wichtiger Bestandteil dieser Studie ist die Berücksichtigung der verschiedenen Stakeholder, die eine wesentliche Rolle in der Entwicklung und Implementierung von wasserstoffbasierten Antriebstechnologien und alternativen Kraftstoffen in der Luftfahrt spielen. Zu den identifizierten Stakeholdern gehören Airlines, Flughäfen, Forschungseinrichtungen, sowie Industriepartner der Luftfahrtbranche. Weitere wichtige Akteure sind Netzwerke wie H₂ für BW sowie Produzenten und Lieferanten von Wasserstoff.

Um umfassende Einblicke und Daten zu gewinnen, werden standardisierte Fragebögen eingesetzt, die verschiedene Schwerpunkte abdecken. Diese Fragebögen richten sich an Airlines, Flughäfen und Industriepartner und zielen darauf ab, spezifische Informationen und Perspektiven der verschiedenen Akteure insbesondere in Bezug auf Baden-Württemberg zu erfassen. Die ermittelten Daten sollen dabei helfen, die Herausforderungen, Chancen und Erwartungen der Stakeholder im Hinblick auf die Einführung von Wasserstofftechnologien in der Luftfahrt besser zu verstehen. Sie werden in die Analyse der Infrastrukturanforderungen einfließen und bei der Entwicklung von Szenarien zur Bedarfsschätzung von Wasserstoff und SAF genutzt. Darüber hinaus werden sie bei der Entwicklung der Handlungsempfehlungen berücksichtigt.

Stakeholdergruppe	Beschreibung der Fokusthemen
Airlines	<ul style="list-style-type: none">- Aktuelle Flottenkapazität und Ausblick auf die Flottenplanung- Erwarteter Hochlauf von Wasserstofftechnologien in der Luftfahrt- Nutzung von SAF
Flughäfen	<ul style="list-style-type: none">- Flugzeugtypen und Verkehrsprognosen- Wasserstoffbetankung und SAF-Infrastruktur- Chancen und Herausforderungen mit H₂ (Wasserstoff) und SAF- Aktuelles Engagement, Partner und (Pilot-)Projekte
Forschung	<ul style="list-style-type: none">- Stand und Bewertung der Technologieentwicklungen und -potential für H₂ und SAF
Industriepartner	<ul style="list-style-type: none">- Markthochlauf und Skalierung der SAF- und H₂-Produktion- Chancen und Herausforderungen- Ausbau von Produktions- und Versorgungsnetzwerken- Aktuelles Engagement und Investitionen in nachhaltige Technologien



Netzwerke	- Ausbau von H ₂ - und SAF-Infrastruktur
H₂ Produzenten / Lieferanten	- Infrastruktur, Logistik und Lagerung von Wasserstoff - Verfügbarkeit und Versorgungssicherheit von H ₂ und SAF

Tabelle 1: Auflistung der konsultierten Stakeholder und Themenschwerpunkte.

Mit einzelnen, relevanten Stakeholdern wie dem Flughafen Stuttgart werden in Ergänzung zu dem Fragebogen auch Interviews geführt, um die durch den Fragebogen gewonnen Erkenntnisse tiefergehend betrachten zu können.

Auswertung der Flugbewegungen

Für die Analyse der Flugbewegungen in Baden-Württemberg werden Daten von der Deutschen Flugsicherung (DFS), dem Statistischen Bundesamt und dem Flughafenverband Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen (ADV) genutzt. In der Untersuchung werden verschiedene Aspekte der Flugaktivitäten berücksichtigt, darunter welche Flugzeugtypen aktiv sind, welche Strecken am häufigsten geflogen werden, und welche Entfernungen dabei überwunden werden. Zusätzlich wird analysiert, welche Airlines die Flüge betreiben und wie alt die eingesetzten Flugzeuge sind. Auf der Betrachtung des Luftverkehrs der Region sowie der Flottenzusammensetzung resultiert ein Verständnis des Status Quo, welches als Ausgangspunkt für die Prognose zukünftiger Entwicklungen dient.

Szenariobasierte Prognose

Zur Schätzung des zukünftigen Bedarfs an SAF und Wasserstoff in der Luftfahrt in Baden-Württemberg werden Prognosen in fünf Jahresritten für 2035 bis 2050 erstellt. Dazu werden verschiedene Szenarien entwickelt, die sowohl die erwartete Entwicklung des Luftverkehrs als auch Fortschritte in der Technologie einbeziehen. Die Methodik umfasst die Analyse von Marktdaten, die Auswertung bestehender Prognosen und die Bewertung politischer Rahmenbedingungen, um differenzierte Bedarfsprognosen für beide Kraftstoffarten zu erstellen.



3. Einsatz von SAF und Wasserstoff als Kraftstoff in Flugzeugen

Die technische Innovation im Luftfahrtsektor konzentriert sich zunehmend auf alternative Kraftstoffe und Antriebstechnologien, um Treibhausgasemissionen deutlich zu senken. Während nachhaltige Konzepte wie wasserstoffbasierte und batterieelektrische Antriebe theoretisch große Potentiale bieten, gibt es in ihrer Entwicklung in der Praxis technische und wirtschaftliche Herausforderungen. Etablierte Unternehmen der Luftfahrtindustrie sowie innovative Start-ups treiben viele Projekte voran, jedoch sind umfassende kommerzielle Anwendungen und der breite Markteintritt solcher Technologien noch mit Unsicherheiten behaftet. Aus heutiger Perspektive könnte der Antriebswechsel zunächst in kleineren Flugzeugen wahrscheinlich sein und nicht in den heute sehr gebräuchlichen Flugzeugen mit 180-200 Sitzen oder bis zu 244 Sitzen bei einer platzsparenden Sitzanordnung wie z. B. dem A321neo.

3.1. Technischer Hintergrund

Um die Treibhausgasemissionen aus der Luftfahrt zu reduzieren, gibt es verschiedene technische Möglichkeiten von biogenen oder strombasierten SAF bis zu vollständig neuen Wasserstoffantriebskonzepten oder rein elektrischen Antrieben mit Batterien. Wasserstoff kann in drei verschiedenen Verfahren eingesetzt werden: Als Ausgangsstoff zur Herstellung von strombasiertem nachhaltigem Flugkraftstoff, zur direkten Verbrennung in Triebwerken oder zur Stromerzeugung in Wasserstoff-Brennstoffzellen. Im Folgenden werden diese nachhaltigeren Verfahren im Vergleich zu fossilem Kerosin genauer betrachtet.

Die umfassende Nutzung von nachhaltigen Kraftstoffen und Wasserstofftechnologien bietet das Potential, die Emissionen im Luftverkehr erheblich zu reduzieren

Zur Beurteilung der Nachhaltigkeit eines Kraftstoffes werden dessen Lebenszyklusemissionen betrachtet. Diese werden im Rahmen des internationalen CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) Programms verwendet, um Emissionsreduktionen durch die Verwendung nachhaltiger Kraftstoffe zu bewerten und zu kompensieren. Das

Programm setzt Nachhaltigkeitskriterien für die Produktion und erfordert die Zertifizierung der Kraftstoffe durch anerkannte Systeme. [3]

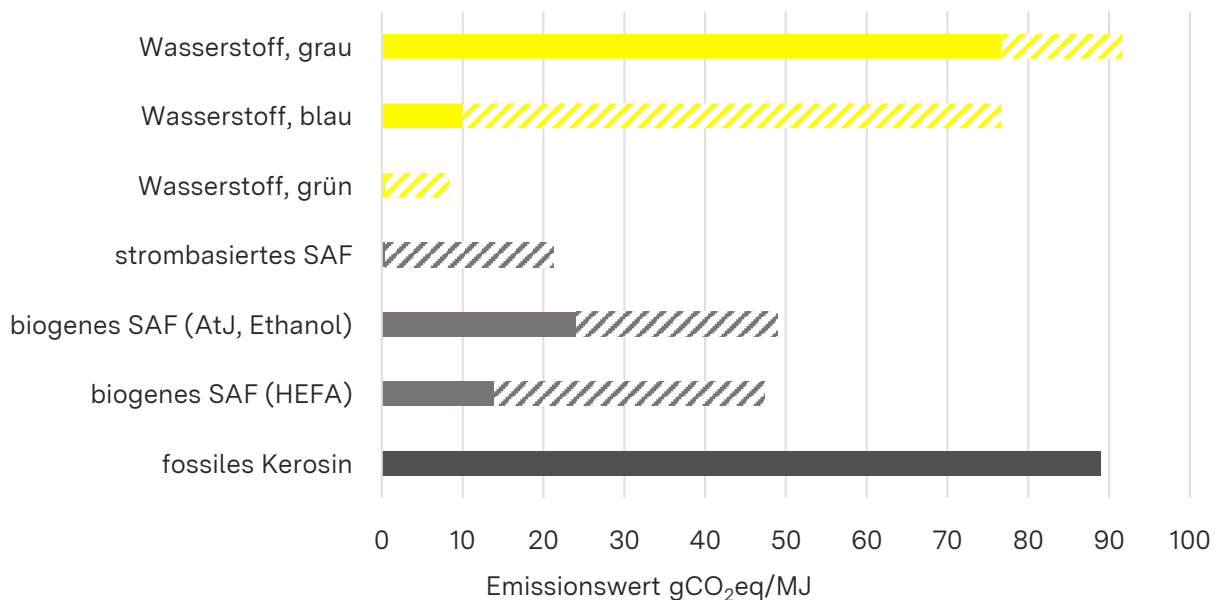


Abbildung 1: Der Emissionswert (oder Lebenszyklusemissionen) zeigt, wie viel CO₂ (Kohlenstoffdioxid) und andere Treibhausgase ein Kraftstoff verursacht. Die Einheit, gemessen in Gramm pro Megajoule (gCO₂eq/MJ), zeigt die Klimawirkung verschiedener Gase in Bezug auf CO₂. Emissionen aus veränderter Landnutzung zum Anbau von Rohstoffen vor allem für biogenes SAF werden in dem dargestellten Wert nicht berücksichtigt. Die Emissionswerte von fossilem Kerosin und biogenem SAF sind konsistent mit den nach CORSIA anrechenbaren Werten. Der gestrichelte Bereich zeigt die Spannweite der Emissionen durch die Verwendung unterschiedlicher Rohstoffe. Es werden die Emissionen durch den Rohstoffanbau inklusive des Abbaus, die Weiterverarbeitungen bis zum Kraftstoff und den Transport bis zur Nutzung im Flugzeug berücksichtigt (Well-to-Wing). Für Wasserstoff werden zusätzlich Emissionen durch den Aufbau der Produktionsanlagen berücksichtigt. Der gestrichelte Bereich für strombasiertes SAF spiegelt unterschiedliche Energiebedarfe der einzelnen Prozessschritte sowie die Nachhaltigkeit des verwendeten Stroms wider. Die Spannweite umfasst vollständig aus erneuerbaren Quellen gewonnenen Strom bis hin zu einem europäischen Strommix aus fossilen und erneuerbaren Quellen. [133] [29] [138] [160] [144]

SAF können gegenüber fossilem Kerosin eine Emissionsreduktion von 45 Prozent für biogenes AtJ (Alcohol-to-Jet) bis zu über 95 Prozent (strombasiertes SAF bei vollständiger Nutzung von erneuerbarer Energie) erreichen, abhängig vom Herstellungspfad und den verwendeten Rohstoffen, vgl. Abbildung 1. Für die Beurteilung der Klimawirkung von Wasserstoff ist es noch entscheidender als bei SAF, die Herstellung zu betrachten. Bei der ausschließlichen Verwendung von fossilen Energieträgern zur Herstellung können die Lebenszyklusemissio-



nen sogar über denen von fossilem Kerosin liegen; werden hingegen rein erneuerbare Energiequellen verwendet, ist eine Emissionsreduktion von nahezu 100 Prozent möglich (vgl. Abbildung 1, grauer und grüner Wasserstoff).

Rund 90 Prozent der aktuell verwendeten nachhaltigen Flugkraftstoffe ist HEFA-SAF, welches hauptsächlich auf pflanzlichen und tierischen Ölen und Fetten basiert

Gegenwärtig werden zur Reduzierung der Emissionen am häufigsten biogene SAF als nachhaltige Flugkraftstoffe verwendet. Der wesentliche Vorteil aller SAF ist, dass diese drop-in-fähig sind. Damit ist gemeint, dass sie bis zu den zugelassenen Beimischungsquoten mit konventionellem Kerosin (sog. Jet Fuel A1) gemischt werden können. Man unterscheidet SAF nach verschiedenen Herstellungspfaden und den verwendeten Rohstoffen, die die Lebenszyklusemissionen beeinflussen, siehe Abbildung 1. So unterscheidet man SAF biogenen, also organischen, (z. B. aus Speiseölen, Zucker oder Alkohol) und nicht-biogenen, synthetischen Ursprungs. Mit geschätzt über 90 Prozent [4] den größten Anteil an der weltweiten SAF-Produktion hat derzeit synthetisches paraffinisches Kerosin aus hydroprozessierten Estern und Fettsäuren (HEFA), welches auf pflanzlichen und tierischen Ölen und Fetten basiert [5]. Für das AtJ-Verfahren werden Alkohole wie Isobutanol und Ethanol verwendet [6].

Bezeichnung	Beschreibung	zugelassene Beimischungsquote [Prozent vol.]	Mögliche Ausgangsstoffe
HEFA-SPK (Synthetisiertes paraffinisches Kerosin aus hydroverarbeiteten Estern und Fettsäuren)	Ester und Fettsäuren aus Ölen und Fetten Mit > 90 Prozent größter Anteil an weltweiter SAF-Produktion Unter angepassten Betriebsbedingungen entsteht HVO	max. 50 Prozent	<ul style="list-style-type: none">- Pflanzenöle (z. B. Rapsöl)- Gebrauchtes Speiseöl- Tierische Fette
HC-HEFA-SPK (Synthetisiertes paraffinisches Kerosin aus hydroverarbeiteten Kohlenwasserstoffen, Estern und Fettsäuren)	HEFA mit Kohlenwasserstoffen Herstellung nur aus einer Algenart zugelassen, soll auf alle biogenen Kohlenwasserstoffe, Ester und Fettsäuren erweitert werden	max. 10 Prozent	<ul style="list-style-type: none">- Botryococcus braunii Algen
AtJ-SPK (Alkohol-zu-Jet Synthetisches Paraffinisches Kerosin)	Kerosin, das aus Ethanol oder Isobutanol hergestellt wird Zukünftig sollen weitere Alkohole zugelassen werden	max. 50 Prozent	<ul style="list-style-type: none">- Ethanol / Isobutanol aus- Zucker (z. B. aus Biomasse)- Stärkehaltigen Pflanzen



AtJ-SKA (Alkohol-zu-Jet synthetisches Paraffinisches Kerosin mit Aromaten)	AtJ-Kraftstoff mit Aromaten Zugelassen für verschiedene Alkohole	max. 50 Prozent	- Alkohole aus... - Zucker (z. B. aus Biomasse) - Stärkehaltigen Pflanzen
FT-SPK (Fischer-Tropsch hydroprozessiertes synthetisiertes paraffinisches Kerosin)	Paraffinisches Kerosin, durch Fischer-Tropsch Synthese aus Synthesegas hergestellt	max. 50 Prozent	- Biogene Ausgangsstoffe - Erneuerbare Biomasse - Nicht-biogene Ausgangsstoffe - CO ₂ aus DAC oder Industrieabgasen - H ₂ aus Elektrolyse

Tabelle 2: Definition und Vergleich einer Auswahl der insgesamt 8 nach ASTM Spezifikation D7566-24B zugelassenen Herstellungspfade für synthetische Mischkomponenten. [4]

Strombasiertes, synthetisches SAF, sogenanntes eSAF oder PtL-SAF (Power-to-Liquid), wird aus Wasserstoff, der durch die Elektrolyse von Wasser erzeugt wird, und CO₂ (Kohlenstoffdioxid) hergestellt. Der FT-SPK aus **Error! Reference source not found.** entspricht PtL. Bei der Verbrennung wird CO₂ emittiert. Wenn dieses zuvor aus der Atmosphäre durch Direct Air Capturing (DAC) gewonnen wurde, entsteht ein geschlossener Kohlenstoffkreislauf. Neben der Fischer-Tropsch-Synthese kann PtL auch durch die Weiterverarbeitung von Methanol hergestellt werden [7]. Die Herstellung von PtL-SAF benötigt etwa die 10- bis 15-fache Menge Wasserstoff verglichen mit der Herstellung von biogenen SAF [8]. [9]

Die ReFuelEU Aviation Verordnung schreibt eine Mindestbeimischungsquote in der EU für SAF von 2 Prozent ab 2025, von mindestens 6 Prozent ab 2030 und von 70 Prozent ab 2050 vor [10]. Zusätzlich ist für 2030 eine Mindestquote für die Beimischung von PtL-Kraftstoffen in Höhe von 1,2 Prozent vorgesehen, die in den Folgejahren bis 2050 auf 35 Prozent steigt. Die ReFuelEU Aviation Verordnung ist Teil des EU-Gesetzespakets „Fit für 55“ und zielt auf die Reduzierung von Treibhausgasemissionen in der Luftfahrt durch die Vorgabe von Mindestbeimischungsquoten für SAF. Diese führen zu einem geschätzten Bedarf von 2,2 Millionen Tonnen biogenem Kraftstoff und 0,6 Millionen Tonnen PtL in der EU im Jahr 2030. Im Jahr 2024 werden in der EU knapp 1 Millionen Tonnen biogenes SAF hergestellt, wobei bis 2030 eine Steigerung auf 3,2 bis 4,4 Millionen Tonnen erwartet wird, was die geplante Mindestquote sicherstellt. PtL-Kraftstoffe sind hingegen noch in der Entwicklung, und ihre ausreichende Produktion hängt von zeitnahen Investitionsentscheidungen ab. Um die SAF-Nutzung zu fördern, sind also rechtliche Anpassungen auf nationaler und EU-Ebene und spezifische Anreizsysteme zentral, diese bilden die Basis für die Ausweitung der Produktionskapazitäten und das



Schließen von Abnahmeverträge. So beinhaltet die ReFuelEU Aviation Verordnung die Einführung eines europäischen Book-and-Claim-Systems für SAF, welches in Kooperation mit der EASA (European Union Aviation Safety Agency) innerhalb der nächsten 3 Jahre vorbereitet werden soll. Ein Book-and-Claim-System ermöglicht die Entkopplung des physischen Produktes von dessen Umweltvorteilen durch den Austausch von Zertifikaten. [1] [3] [11] [12]

Der Einsatz von SAF kann nicht nur CO₂-Emissionen senken, sondern auch die Emissionen anderer Treibhausgase und Stoffe. Durch den Einsatz von SAF kann je nach Beimischungsquote die Klimawirkung von Kondensstreifen um bis zu 26 Prozent reduziert werden, was auch auf die signifikante Reduzierung von Rußpartikeln zurückzuführen ist [13].¹

Wasserstoffverbrennung, Wasserstoff-Brennstoffzelle und elektrische Antriebe ermöglichen höhere Emissionseinsparungen verglichen mit SAF

Bei der direkten Verbrennung von Wasserstoff in Triebwerken entstehen im Gegensatz zur Verbrennung von SAF oder konventionellem Kerosin ausschließlich Nicht-CO₂-Emissionen durch Stickoxide und Wasserdampf. Bei der Verbrennung von einem Kilogramm Kerosin werden etwa 14 g Stickoxide freigesetzt (0,32 g/MJ) [14]. Durch die Nutzung von Wasserstoff ist eine Reduzierung von bis zu 90 Prozent verglichen mit der Stickoxidemission von Kerosin möglich ist. [15]

Bei der Wasserstoffverbrennung wird die rund 2,6-fache Menge Wasserdampf emittiert, verglichen mit fossilem Kerosin. Die Treibhauswirkung des Wasserdampfes ist deutlich geringer als die von CO₂-Emissionen. So besteht Wasserdampf wenige Tage bis 1 Jahr in der Atmosphäre, während CO₂ eine Lebensspanne von bis zu 100 Jahren hat. Die Klimawirkung der erhöhten Wasserdampfemissionen wird durch die fehlenden CO₂-Emissionen bei der Wasserstoffverbrennung kompensiert. Durch die partikelfreie Verbrennung von Wasserstoff bilden sich einerseits weniger Eispartikel für Kondensstreifen, andererseits sind die, die sich bilden

¹ Mit der Implementierung der EU Regulierung 2024/2493 sollen die Nicht-CO₂-Emissionen genauer überwacht und dokumentiert werden. Luftfahrtunternehmen sind seit dem 1. Januar 2025 verpflichtet, die Nicht-CO₂-Effekte aus ihren Flügen zu berichten. [161] [134]



größer aufgrund der größeren Wassermenge. Genaue Auswirkungen sind aktuell noch Gegenstand der Forschung [16], z. B. im „Blue Condor“ Projekt des DLRs [17]. [15] [18]

Neben der direkten Verbrennung von Wasserstoff, kann dieser auch in einer Brennstoffzelle zur Stromerzeugung verwendet werden, so dass ein elektrischer Motor das Flugzeug antreiben kann [19]. Die PEM-Brennstoffzelle (Proton Exchange Membrane) ist aktuell die vielversprechendste zum Einsatz in der Luftfahrt [20]. In dieser reagiert Wasserstoff mit Sauerstoff, als Emissionsprodukt entsteht nur Wasser. [21]

Eine Elektrifizierung der Antriebe kann die Emissionen weiter reduzieren und die Umweltauswirkungen minimieren, wenn Strom aus regenerativen Quellen eingesetzt wird. Ein rein batterie-elektrischer Antrieb ermöglicht den vollständig emissionsfreien Flug sofern ausschließlich grüner Strom verwendet wird. [20]

Wasserstoff-Brennstoffzellen können im Flugzeug Effizienzvorteile von 1,5 bis 3 Prozent gegenüber konventionellem Kraftstoff ermöglichen – trotz energieintensiver Herstellung

Der Wirkungsgrad beschreibt, wie effizient die Energie aus der Energiequelle (durch Nutzung der Rohstoffe und Strom) zunächst zu Treibstoff im Tank verarbeitet wird und schließlich in aerodynamische Leistung umgewandelt wird, die letztlich den Auftrieb und Schub des Flugzeugs erzeugt. Dabei wird unterschieden zwischen dem Well-to-Tank-Wirkungsgrad (Rohstoffgewinnung bis zur Bereitstellung des Kraftstoffs) und dem Tank-to-Wing-Wirkungsgrad (Umsetzung des Kraftstoffs im Flugzeug in Vortrieb).

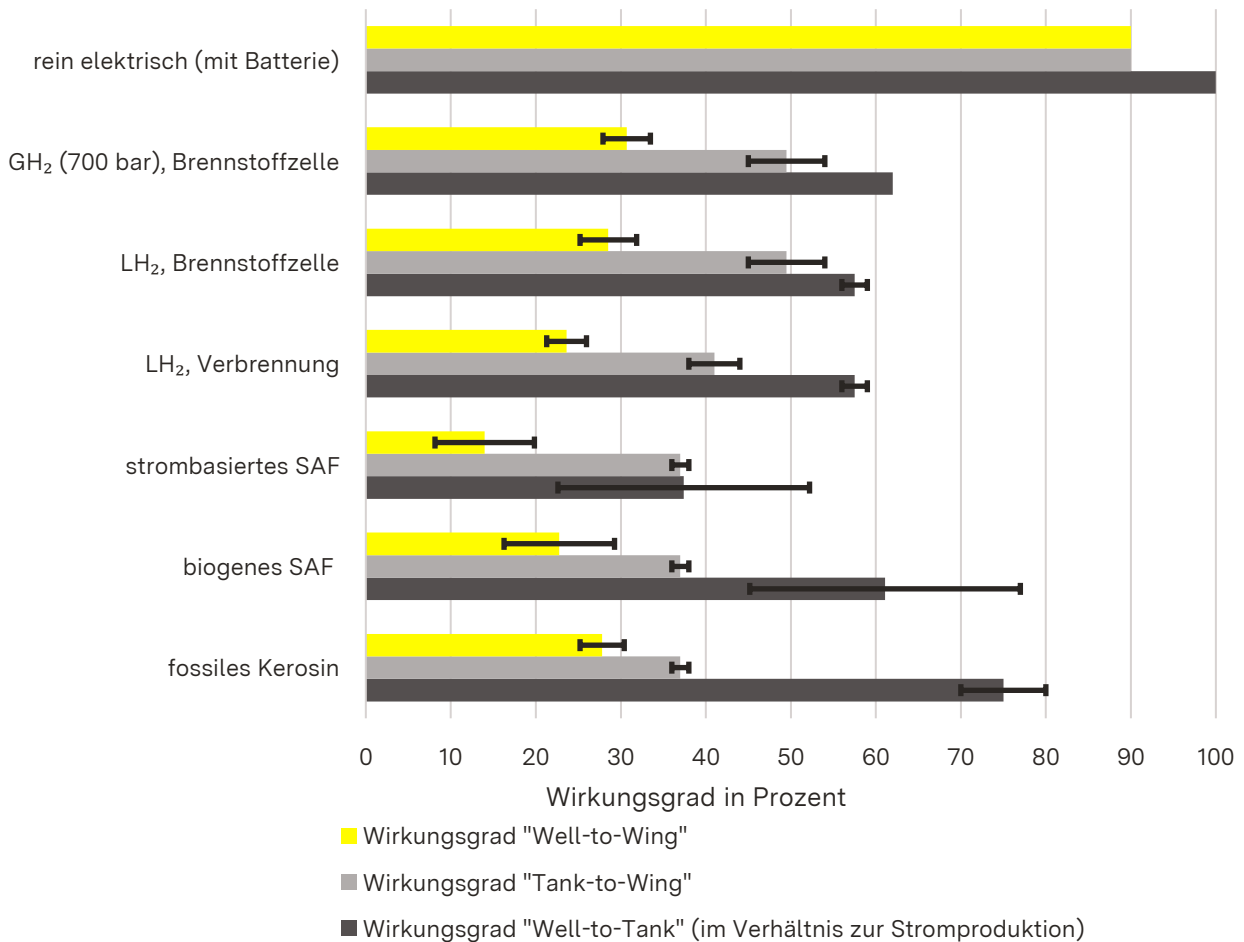


Abbildung 2: Wirkungsgrade verschiedener Kraftstoffe in unterschiedlichen Antriebskonzepten. Die schwarzen Linien markieren mögliche Schwankungen. Elektrischer Strom wird dabei als Referenz mit einem Wirkungsgrad von 100 Prozent angenommen. [139] [140] [141] [142] [24] [143] [144] [145] [20] [23]

Die energieintensive Herstellung von Wasserstoff führt zu niedrigeren Well-to-Tank-Wirkungsgraden verglichen mit biogenem SAF oder fossilem Kerosin. Die Nutzung von Wasserstoff im Flugzeug hat hingegen in der Brennstoffzelle einen um knapp 10 Prozent bis über 15 Prozent höheren Tank-to-Wing-Wirkungsgrad verglichen mit der Verbrennung von konventionellem Kraftstoff. Neben der nutzbaren elektrischen Energie entsteht Abwärme, was leistungsstarke Kühlsysteme für die Brennstoffzellen erfordert [20]. Die wesentlich effizientere Nutzung im Flugzeug führt zu insgesamt höheren Well-to-Wing-Wirkungsgraden. Diese umfassen die gesamte Kette vom Rohstoffanbau über die Stromerzeugung bis zur Umwandlung

des Kraftstoffs in Vortrieb im Flugzeug. In Verbindung mit den geringen Emissionswerten machen diese höheren Well-to-Wing-Wirkungsgrade die Nutzung von Wasserstoff in der Luftfahrt attraktiv.

Ein elektrischer Motor in Kombination mit einer Batterie erreicht einen etwa dreimal höheren Wirkungsgrad als eine Brennstoffzelle. Der limitierende Faktor ist in diesem Fall die Energiedichte, welche über das mitzuführende Gewicht des Kraftstoffs entscheidet und daher entscheidend ist, um die Einsatzfähigkeit eines Flugzeugantriebes zu beurteilen.

Wasserstoff bietet hohe Energiedichte bezogen auf das Gewicht, benötigt jedoch größere Tanks – elektrische Antriebe beschränken durch geringe Energiedichte Reichweiten

Für die energetische Betrachtung von Kraftstoffen ist es entscheidend, sowohl die mitzuführende Kraftstoffmasse als auch das erforderliche Tankvolumen zu berücksichtigen. Diese beiden Größen werden durch die gravimetrische und volumetrische Energiedichte beschrieben und sind durch die Kraftstoffdichte miteinander verknüpft. Die gravimetrische Energiedichte beschreibt die spezifische Energie je Masse, während die volumetrische Energiedichte die Energie bezogen auf Volumen darstellt. Während SAF und fossiles Kerosin eine hohe volumetrische Energiedichte haben, ist Wasserstoff hinsichtlich seiner gravimetrischen Energiedichte deutlicher Favorit. So ist Wasserstoff bei derselben Energiemenge dreimal leichter als Kerosin und SAF. Die relativ geringe Dichte von Wasserstoff stellt jedoch eine Herausforderung an Wasserstofftanksysteme im Flugzeug dar: Selbst in verflüssigter Form (liquid hydrogen, LH₂), die bei -253 °C vorliegt, wird ein etwa viermal größeres Tankvolumen benötigt als bei Kerosin oder SAF [22]. Diese Unterschiede beeinflussen maßgeblich das Design und die Technologie von Flugzeugen, die Wasserstoff als Kraftstoff einsetzen möchten. So wird beispielsweise zur Speicherung von 36 MJ, nur etwas mehr als 1 Liter Jet A-1 benötigt, aber über 4 Liter Wasserstoff.

Balkendiagramm zu gravimetrischer (MJ/kg, gelb) und volumetrischer Energiedichte (MJ/l, grau) verschiedener Kraftstoffe: fossiles Kerosin, biogenes SAF und strombasiertes SAF mit hoher volumetrischer Energiedichte bei mittlerer gravimetrischer; flüssiger und gasförmiger Wasserstoff mit sehr hoher gravimetrischer, aber deutlich geringerer volumetrischer



Energiedichte; rein elektrischer Antrieb mit Batterie mit den niedrigsten Energie-dichten. Zum Vergleich: Eine Batterie zur Bereitstellung von 36 MJ hätte ein Volumen von knapp 29 l bei einem Gewicht von rund 50 kg. Diese geringe Energiedichte, wie in Abbildung 3 dargestellt ist, erfordert große und schwere Batterien. Aus diesem Grund erreichen batterieelektrische Flugzeuge trotz des hohen Wirkungsgrads von 90 Prozent im Reiseflug (vgl. Abbildung 2) [23], nach der aktuellen Forschung nur Reichweiten von rund 200 km. Mittelfristig können Reichweiten von über 500 km erwartet werden. Längere Interkontinentalflüge werden aus heutiger Sicht ohne größere Innovationen voraussichtlich nicht möglich sein. [20]

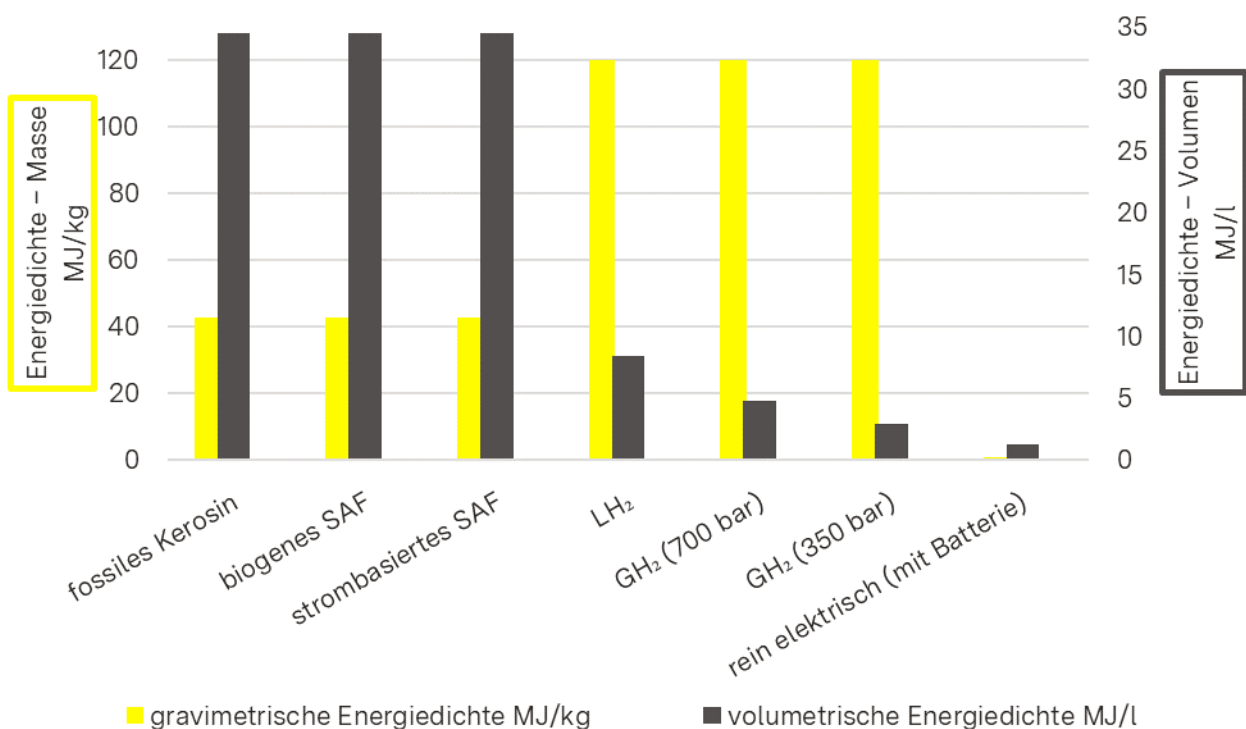


Abbildung 3: Energiedichten verschiedener Kraftstoffe [130] [129] [23]

Bei kurzen Strecken in kleineren Flugzeugen bieten LH₂-Brennstoffzellen Vorteile hinsichtlich Emissionen und Energieeffizienz pro Sitzplatz

Der Wirkungsgrad eines Antriebssystems gibt zwar dessen Effizienz an, reicht jedoch allein nicht aus, um die tatsächliche Effizienz im Luftfahrtkontext zu bewerten. Entscheidend ist vielmehr, wie viel Energie benötigt wird, um eine bestimmte Nutzlast oder Passagierzahl über eine definierte Strecke zu transportieren. Eine geeignete Vergleichsgröße stellt daher der



Energieverbrauch pro verkauften Sitzplatz und geflogenem Kilometer (Revenue Passenger Kilometer, RPK) dar, da sie eine ganzheitlichere Betrachtung der Effizienz ermöglicht.

Die ATR 72 ist ein Regionalflugzeug, das in verschiedenen Studien anhand von Modellberechnungen zur Bewertung der Effizienz verschiedener Antriebstechnologien modelliert wurde. So wird dieses Flugzeug zunächst so ausgelegt, dass Nutzlast und Wasserstofftankensystem ideal für die Brennstoffzelle sind. Bei der Verwendung von LH₂ in der Brennstoffzelle können durch die kompaktere Tankgröße mit 58 Personen acht Passagiere mehr befördert werden als bei der Nutzung von GH₂ (gasförmiger Wasserstoff) in der Brennstoffzelle. Die höhere Energiedichte von LH₂ verglichen mit GH₂ ermöglicht nicht nur mehr Sitzplätze, sondern auch einen geringeren Energieverbrauch pro Sitzplatz bei der Nutzung einer Brennstoffzelle, trotz des besseren „Well-to-Tank“-Wirkungsgrades von GH₂ gegenüber LH₂. [24]

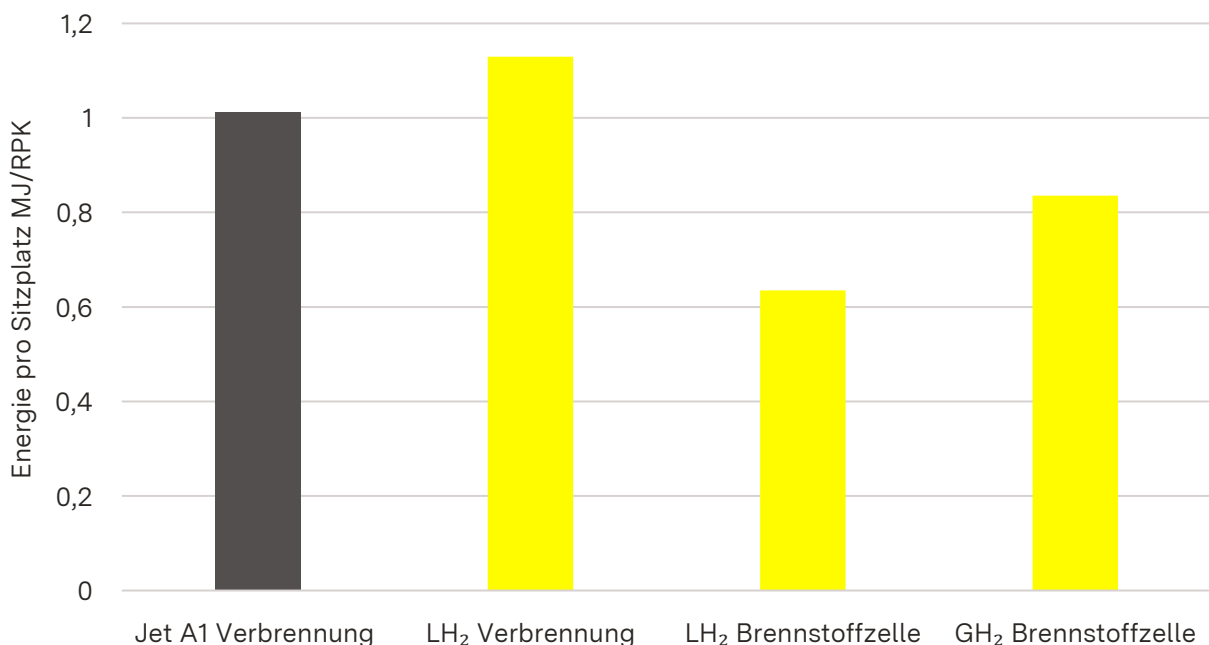


Abbildung 4: Energiebedarf pro belegten Sitzplatz und Kilometer (RPK) für ein konventionelles Flugzeug und simuliert für ein Flugzeug mit LH₂-Verbrennung und LH₂ bzw. GH₂ Brennstoffzellen mit 50 bis 78 Sitzplätzen bei einer Reiselänge von 400 km [24]. Zur tatsächlichen Erreichung dieser Effizienzen in echten Wasserstoffflugzeugen ist weitere Forschung und Entwicklung notwendig. Insbesondere die Effizienz der Brennstoffzelle wird optimistisch eingeschätzt – in der Praxis sind diese Werte noch nicht erreicht. Für die angegeben Werte wurde eine Auslastung von 85 Prozent angenommen [135]. [24]

Die ermittelten Werte sind Ergebnis einer Modellierung und können in der Praxis noch nicht erreicht werden. Andere Studien berechnen auch für die Brennstoffzelle einen leicht höheren Energiebedarf für Brennstoffzellen-Flugzeuge verglichen mit konventionellen Flugzeugen



[25]. Die Effizienz der Brennstoffzelle zu verbessern, ist noch Gegenstand der Forschung. Einen entscheidenden Einfluss haben dabei die Dimensionen des Tank- und Kühlsystems. Neben der Effizienz der Brennstoffzelle bei der Energiebereitstellung, können Flugzeuge auch von der effizienteren Nutzung der Energie durch mehrere Propeller profitieren [25].

Bei Verwendung der LH₂-Verbrennung kann zwar die Passagierkapazität von 78 Personen wie beim konventionellen Vergleich erreicht werden, der Energieverbrauch pro Sitzplatz liegt jedoch über dem der konventionellen Maschine und die Reichweite nimmt um fast 30 Prozent ab. Bei kleineren Flugzeugen dieser Größenordnung werden Gewichtseinsparungen durch den leichteren Wasserstoff verglichen mit Kerosin durch die notwendigen größeren und schwereren Tanksysteme kompensiert oder sogar übertroffen, was die Reichweite negativ beeinflusst [26]. Für kürzere Strecken und kleinere Maschinen ist die Verwendung einer Brennstoffzelle mit LH₂ unter Berücksichtigung der Emissionen und der Energieeffizienz die beste der in Abbildung 4 dargestellten Optionen. Betrachtet man aber größere Maschinen und längere Strecken, ist die Stromdichte der Brennstoffzelle in Kombination mit ihrem notwendigen Kühlsystem aktuell zu gering verglichen mit einer Gasturbine und kann die höheren Schubanforderungen größerer Flugzeuge nicht erfüllen. Untersuchungen zeigen, dass Brennstoffzellen bei niedrigeren Stromdichten effizienter arbeiten. Die höhere spezifische Leistung, die für den Schub größerer Flugzeuge notwendig ist, wird jedoch bei höheren Stromdichten erreicht. [27] [28]

Bei größeren Flugzeugen führt die höhere Masse der LH₂-Tanks zu einer geringeren Energieeffizienz pro Sitzplatz verglichen mit konventionellen Antrieben

Um einen besseren Einblick in die Effizienz größerer Passagiermaschinen zu geben, die in der kommerziellen Luftfahrt auf Kurz- und Mittelstrecken häufig im Einsatz sind, wird im Folgenden der Energiebedarf eines A320neo und mit einer Simulation eines Flugzeuges gleicher Passagierkapazität (165 Personen) mit einem Antrieb basierend auf der Verbrennung von LH₂ verglichen. Dieses Wasserstoffflugzeug ist aktuell noch nicht im Einsatz. Vergleichbare Modelle könnten ab den 2040er Jahren verfügbar werden.

Trotz des leicht besseren Wirkungsgrades der Wasserstoffverbrennung (vgl. Abbildung 2) ist der Energiebedarf gemessen in MJ/RPK für das simulierte Flugzeug, das durch LH₂ Verbrennung angetrieben wird, etwa 10 Prozent bis knapp 15 Prozent höher, wie in Abbildung 5 (links) zu erkennen ist. Der Grund dafür ist das deutlich schwerere Tanksystem für LH₂ verglichen mit einem System für konventionellen Jet A-1. Dieser Unterschied kann nicht durch das geringere Gewicht von Wasserstoff (vgl. Abbildung 3) ausgeglichen werden. In der dargestellten Simulation eines Fluges über 3.180 km wiegt das Tanksystem des A320neo 286 kg und benötigt 920 kg Kraftstoff. Das Tanksystem für Wasserstoff wiegt hingegen 9.390 kg und es werden 3.970 kg flüssiger Wasserstoff benötigt. Damit ist das gefüllte Tanksystem für Wasserstoff bereits beim Start etwa 1,3-mal schwerer und bei der Landung etwa 10-mal schwerer. Zur Optimierung der Effizienz und der Reichweite von Wasserstoffflugzeugen ist die Verbesserung des Verhältnisses der Masse des Kraftstoffs zu der Summe aus der Kraftstoffmasse und der des Tanksystems notwendig. [29]

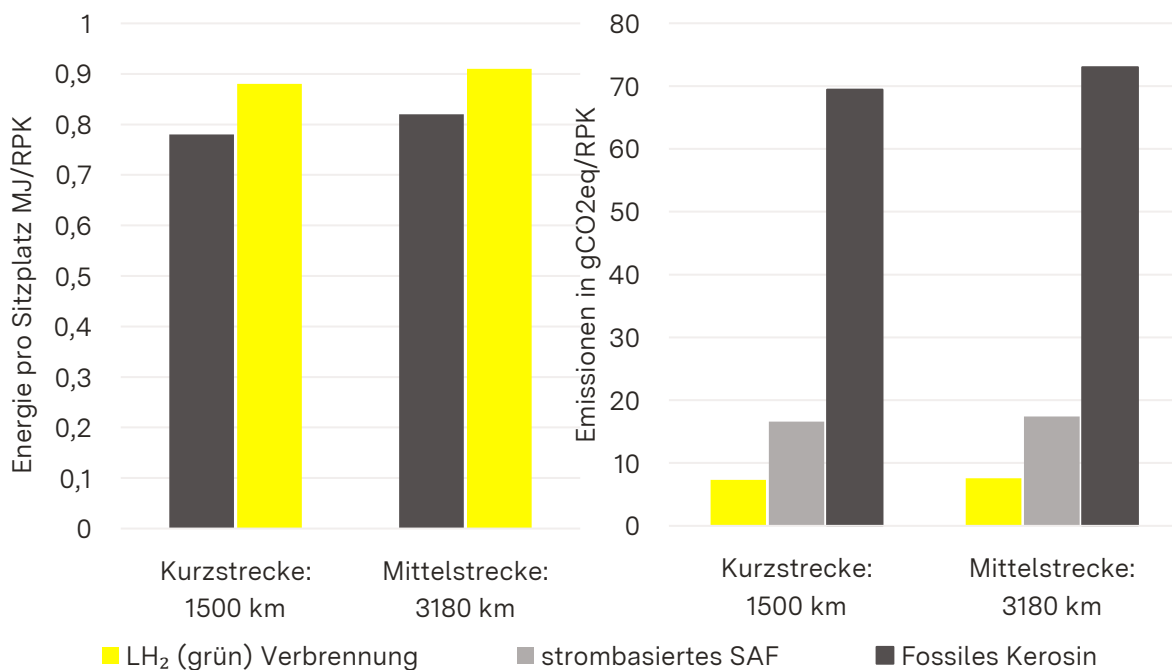


Abbildung 5: Energiebedarf und Emissionen pro belegten Sitzplatz und Kilometer (RPK) für einen A320neo und ein ähnliches Flugzeug mit einem LH₂-Verbrennungsantrieb für Kurz- und Mittelstrecken. 1.500 km ist der Median der Strecken des A320neos. 90 Prozent der Strecken sind kürzer als 3.180 km. Zur Berechnung der Emissionen wurden die maximalen Werte für grünen Wasserstoff (inkl. Bau der Produktionsanlage) und strombasiertes SAF verwendet [29]

Obwohl der Start- und Steigflug am energieintensivsten ist und davon auszugehen ist, dass es hier keine wesentlichen Unterschiede zwischen der 1.500 km und der 3.180 km Strecke gibt, liegt der Energiebedarf pro belegten Sitzplatz und Kilometer bei der längeren Strecke

etwa 5 Prozent über dem der kürzeren Strecke. Grund dafür ist, dass für die längere Strecke mehr Treibstoff benötigt wird, der transportiert werden muss.

Der höhere Energieverbrauch pro Sitzplatz und Kilometer bei der Wasserstoffverbrennung wird durch die deutlich geringeren Emissionen von grünem Wasserstoff übertroffen. Werden die Emissionen des Baus der Wasserstoffproduktionsanlagen nicht einbezogen, wird pro Sitzplatz und Kilometer bei Verwendung von fossilem Kerosin das bis zu 170-fache emittiert wird, wie in Abbildung 5 (rechts) dargestellt ist.

Wasserstoff und elektrische Antriebe sind emissionsarm, traditionelle Treibstoffe und SAF sind jedoch insbesondere bei Langstrecken und größeren Flugzeugen noch lange nötig

Der Einsatz von Wasserstoff und elektrischen Antrieben bietet erhebliche Vorteile in Bezug auf die Emissionsreduktion, da sie nahezu emissionsfrei arbeiten. Die geringe Energiedichte von Wasserstoff stellt jedoch eine Herausforderung dar, insbesondere bei der Auslegung der Tanksysteme, die in vielen Flugzeugen zu erhöhten Platz- und Gewichtsanforderungen führen. Aufgrund dieser technischen Anforderungen ist der Einsatz von Wasserstoffantrieben und auch rein elektrischen Antrieben nicht für alle Flugzeuggrößen und Strecken geeignet.

	fossiles Kerosin	biogenes SAF	strombasiertes SAF	LH ₂ Verbrennung	LH ₂ Brennstoffzelle	rein elektrisch
Regionalverkehr bis 80 PAX				Demonstrationen	Demonstrationen	Demonstrationen
Kurzstrecke bis 1.500km, ca. 165 PAX	✓	✓	✓	zukünftig bis ca. 3700 km	zukünftig max. 2000 km	zukünftig max. 1000km
Mittelstrecke 1.500-3.500km, ca. 250 PAX						
Langstrecke über 3.500km und 250 PAX						

Abbildung 6: Streckenabdeckung verschiedener Antriebe und Kraftstoffe. Kombinationen zu Hybridantrieben sind möglich [136]

Die Kombination alternativer Antriebe mit Antrieben, die fossile Kraftstoffe oder SAF nutzen,



zu Hybridantrieben ermöglicht längere Reichweite, insbesondere für elektrische Antriebe [20]. Gleichzeitig kann zum Teil rein elektrisch geflogen werden oder durch die Unterstützung der Batterie die Belastung der Verbrennungsmaschine reduziert werden [20]. Abbildung 6 gibt eine Übersicht der realisierbaren Streckenlängen und Passagierkapazitäten der verschiedenen Kraftstoffe und Antriebsarten. Insbesondere auf Langstreckenflügen oder bei größeren Maschinen sind traditionelle Treibstoffe noch unverzichtbar.

3.2. Status-Quo und Ausblick Flugzeugentwicklung

Biogene SAF bieten bereits eine marktreife Lösung, da sie als Drop-in-Kraftstoffe direkt in bestehenden Flugzeug- und Triebwerkstechnologien nutzbar sind, ohne dass technische Anpassungen erforderlich sind. So ist beispielsweise die Nutzung einer SAF-Beimischung von 50 Prozent bereits seit 2022 in allen Flugzeugen von Airbus möglich [30]. Die Zertifizierung für eine Nutzung von 100 Prozent SAF soll bis 2030 für diese Flugzeuge erfolgen [30]. Zur Erreichung einer CO₂-Emissionsfreien Luftfahrt sollen laut der IATA 65 Prozent der Emissionen durch den Einsatz von SAF reduziert werden und 13 Prozent durch den Einsatz alternativer Antriebstechnologien wie Wasserstoffantriebe [31]. Weitere Einsparungen können durch effizientere Prozesse, Anpassungen in der Infrastruktur erreicht werden [31]. Verbleibende Emissionen sollen ausgeglichen oder durch entsprechende Verfahren gebunden werden [31]. Um das Emissionsreduktionspotential von alternativen Antrieben auszuschöpfen, ist im Gegensatz zum SAF-Einsatz die Entwicklung neuer Technologien erforderlich. Diese unterscheiden sich in zwei Ansätzen: Wasserstoffverbrennung und Brennstoffzellentechnologie. Die Einsatzfähigkeit von elektrischen Flugzeugen ist vor allem von der Batterieentwicklung abhängig. Um die Vorteile verschiedener Antriebsarten auszunutzen und Nachteile zu kompensieren, können verschiedene Konzepte zu hybriden Antrieben kombiniert werden. In der Luftfahrtbranche treiben sowohl etablierte Unternehmen wie zum Beispiel Airbus, Boeing, MTU und Rolls-Royce als auch innovative Start-ups wie H2FLY und ZeroAvia [32] die Entwicklung der wasserstoffbasierter Antriebstechnologien voran.

Größere Flugzeuge für Langstrecken werden noch länger auf SAF zur Emissionsreduktion angewiesen sein und voraussichtlich erst ab den 2040er Jahren marktreif sein

Die Entwicklung von Wasserstofftechnologien in der Luftfahrt verläuft abhängig von der zugrundeliegenden Antriebstechnologie unterschiedlich schnell. Die Wasserstoffverbrennung



kann von bestehenden Erfahrungen mit konventionellen Flugzeugantrieben profitieren, da sie auf ähnlichen Prinzipien basiert. Dies ermöglicht eine schnellere Integration in aktuelle Flugzeugdesigns, beispielsweise mit wasserstoffbetriebenen Turbofan- oder Turboprop-Triebwerken. Trotz der Bestrebungen in Forschung und Entwicklung werden größere Maschinen für die kommerzielle Luftfahrt mit Wasserstoffantrieben voraussichtlich nicht vor 2040 im Einsatz sein. Kleinere Maschinen für den regionalen Luftverkehr könnten bereits ab den 2030er aktiv sein. Eine Auswahl konventioneller sowie alternativer Flugzeuge ist in der folgenden Abbildung 7 dargestellt.

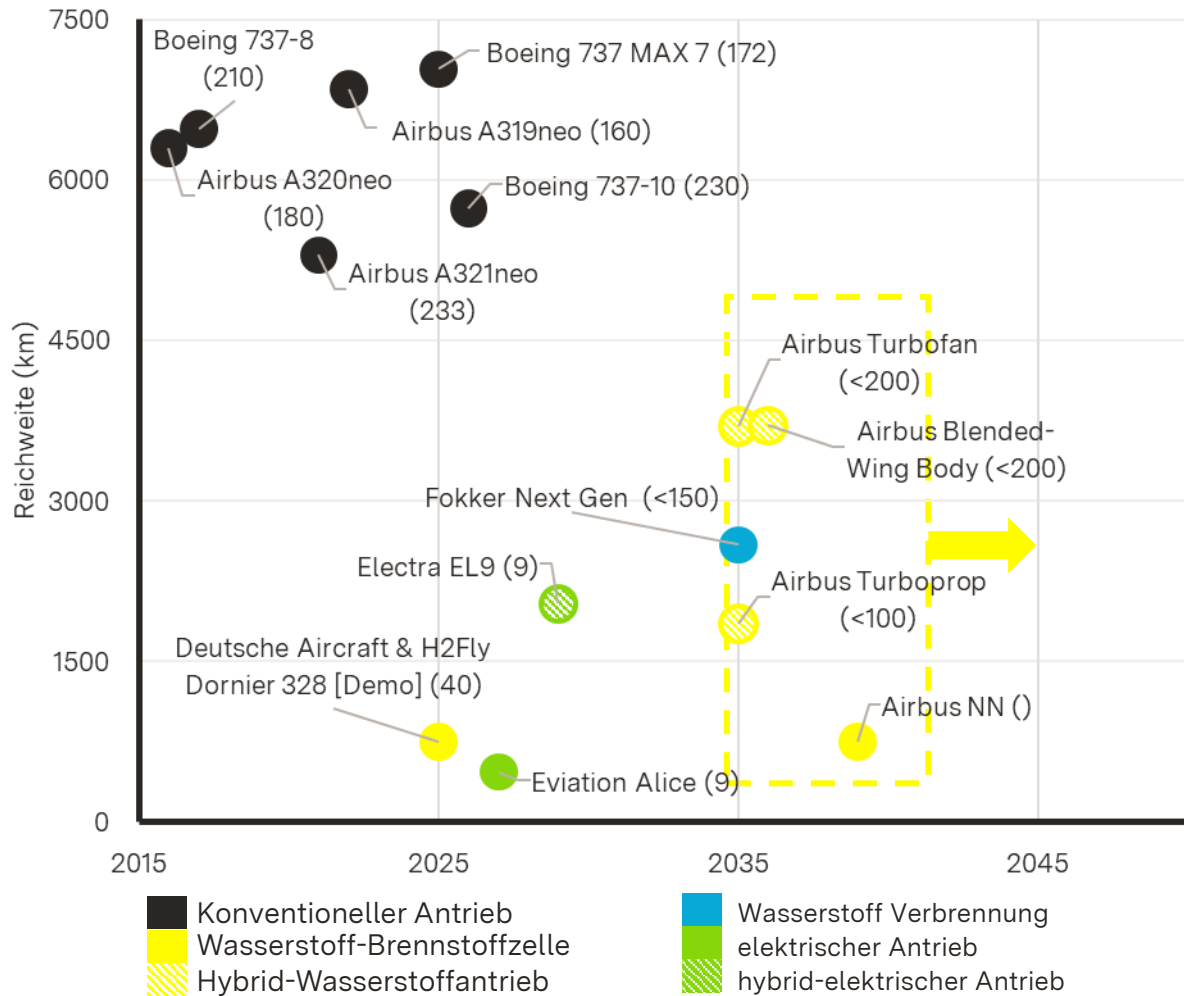


Abbildung 7: Auswahl verschiedener Flugzeuge dargestellt nach maximaler Reichweite und (voraussichtlichem) Markteintritt. Insbesondere die Markteintritte der Flugzeuge mit alternativen Antrieben können sich zeitlich verschieben und beruhen zum Teil auf eigenen Schätzungen basierend auf den Veröffentlichungen von Herstellern [147] [148] [149] [150] [33] [151] [152] [153] [154] [155] [156] [157] [158]

Traditionelle Flugzeughersteller erforschen Wasserstofftechnologien, konkrete Markteintrittspläne fehlen oder werden verschoben – wie zuletzt Airbus' ZEROe-Passagierflugzeug

Airbus verfolgt mit ihrem ZEROe Projekt das Ziel, kommerzielle Flugzeuge mit Wasserstoffantrieb anbieten zu können. Während zunächst Markteintritte ab etwa 2035 geplant waren, sind diese Anfang 2025 um bis zu 10 Jahre verschoben wurden [33]. Technologisch werden dafür



zwei Triebwerkstypen eingesetzt: Jet (Turbofan) und Propeller (Turboprop). Turbofan-Triebwerke erzeugen Schub, indem sie kleine Luftmengen stark beschleunigen und dadurch höhere Reisegeschwindigkeiten und große Reichweiten ermöglichen [34]. Im Gegensatz dazu beschleunigen Turboprop-Triebwerke mit Propellern große Luftmengen leicht, was sie effizienter im Treibstoffverbrauch macht und kürzere Landebahnen nutzbar macht – ideal für Kurzstreckenflüge [35]. Airbus verfolgte die Entwicklung von vier verschiedenen Flugzeugkonzepten.

- Das **Turbofan-** und das **Blended-Wing Body Konzept** sind zwei Konzepte und zielen auf Flugzeuge mit einer Passagierkapazität von unter 200 Personen, die als Antriebe zwei hybrid-Wasserstoff Turbofan-Triebwerke nutzen. Es sollen so Reichweiten von über 3700 km bzw. 2700 km erreicht werden. [36]
- Das **Turboprop-Konzept** beschreibt ein etwas kleineres Flugzeug mit einer Kapazität von unter 100 Passagieren und einer Reichweite von 1850 km das von zwei hybrid-Wasserstoff Turboprop-Triebwerken angetrieben wird. [36]
- Das letzte Konzept ist für ein **elektrisches Flugzeug**, dessen Propeller mit Wasserstoff-Brennstoffzellen angetrieben werden. In der sogenannten „Pod“-Konfiguration sind sechs Turboprop-Triebwerke mit acht Blättern an den Flügeln befestigt [37]. [36]

Seit 2025 konzentriert sich Airbus jedoch nur noch auf die Brennstoffzellen Technologien [38].

Darüber hinaus kooperiert Airbus mit Wasserstoffproduzenten und -verteilern, Flughäfen und Airlines, um den Aufbau des notwendigen Ökosystems zu unterstützen [36]. Die Forschung von hybriden Antriebssystemen zur Effizienzsteigerung und Verbrauchsreduktion von fossilem Kerosin oder SAF findet auch in kleineren Maschinen statt. Dazu haben Projekte wie der EcoPulse-Demonstrator, der CityAirbus NextGen und das DisruptiveLab in Zusammenarbeit mit Daher und Safran gehört. Das Eco-Pulse-Demonstrator Projekt wurde 2024 beendet und auch an dem CityAirbus wird aktuell nicht weitergeforscht. [39]

Boeing ist seit 2008 in verschiedene Projekte zur Demonstration von Wasserstofftechnologien in Flugzeugen – Verbrennung und Brennstoffzellen – involviert. Veröffentlichte Pläne zur Entwicklung und Produktion von Flugzeugen mit einem Antrieb basierend auf Wasserstoff sind



verglichen mit dem Airbus ZEROe-Konzept weniger konkret. Boeing sieht ab 2030 die Möglichkeit Batterien und Brennstoffzellen in kleineren Flugzeugen mit bis zu 19 Passagieren und Reichweiten von bis zu 920 km einzusetzen. Wasserstoff-Brennstoffzellen können ab 2040 in diesen Flugzeugen eingesetzt werden. In größeren Flugzeugen und auf längeren Strecken von über 1800 km soll zunächst SAF, ab 2030 vor allem SAF basierend auf Wasserstoff und ab 2040 flüssiger Wasserstoff zur Verbrennung in Triebwerken eingesetzt werden. [40] Das könnte aber nur ein allmählicher Prozess in Abhängigkeit vom Flugzeugalter der Flotten sein.

Etablierte Hersteller entwickeln Triebwerke zur Verbrennung von Wasserstoff und Wasserstoff-Brennstoffzellen

Traditionelle Triebwerkshersteller der Luftfahrt wie MTU Aero Engines oder Rolls-Royce arbeiten in eigenen Strategien und Projekten an der Entwicklung wasserstoffbasierter Antriebe.

MTU Aero Engines fasst ihre Strategie zur Erreichung einer emissionsfreien Luftfahrt in der Technologie-Agenda „Clean Air Engine“ (Claire) zusammen. Bis 2035 soll eine Wasserstoff-Brennstoffzelle für den Einsatz auf kürzeren Strecken zur Verfügung stehen sowie ein Turbofan zur Verbrennung von Wasserstoff. Ab 2050 soll die Brennstoffzelle auch auf Kurz- und Mittelstrecken eingesetzt werden können. Die elektrische Energie der Brennstoffzelle wird von einem Elektromotor genutzt, um einen Propeller anzutreiben. In Zusammenarbeit mit der EASA arbeitet MTU Aero Engines an dem Zulassungsverfahren der Technologie. [41] [42]

Ab Mitte 2030er Jahre plant Rolls-Royce den Einsatz von Wasserstoff in Flugzeugen kleinerer und mittlerer Größe. Wasserstoff-Brennstoffzellen werden als Alternative zu Batterien in rein elektrischen Flügen gesehen. Neben der Brennstoffzellentechnologie wird auch die direkte Verbrennung von Wasserstoff in Triebwerken betrachtet. In Zusammenarbeit mit dem DLR, der Universität Loughborough und easyJet führte Rolls Royce bereits erfolgreiche Test zur Verbrennung von 100 Prozent Wasserstoff in Triebwerken durch. [43] [44]



Neuere Unternehmen erzielen vor allem Erfolge in der Entwicklung von Wasserstoff- und elektrischen Antrieben in kleineren Flugzeugen

Neben diesen etablierten Unternehmen, die bereits in der Herstellung und Entwicklung konventioneller Flugzeuge und ihrer Antriebe erfolgreich waren, arbeiten weitere, jüngere Unternehmen und Start-ups an der Entwicklung von mit Wasserstoff betriebenen Flugzeugen.

H2FLY ein Unternehmen aus Baden-Württemberg, welches als Ausgründung der Universität Ulm und des DLR 2015 unter der Führung von Prof. Dr. Josef Kallo entstand, fokussiert sich auf das Design, den Bau und den Test eines elektrischen, auf Wasserstoff basierenden Antriebsstrang für Flugzeuge. Bereits 2016 wurden erste Testflüge mit dem Wasserstoff-Brennstoffzellen Antriebsstrang durchgeführt. In einem weiteren Testflug konnte H2FLY 2022 eine Flughöhe von 7.000 Fuß bzw. über 2,1 km erreichen und die Integration der Flugzeuge mit Wasserstofftechnologie in den Luftraum und die Operationen am Boden nachweisen. 2023 konnte dann auch flüssiger Wasserstoff erfolgreich verwendet werden. In Kooperation mit der amerikanischen Muttergesellschaft Joby Aviation wurde ein erfolgreicher Testflug von 523 Meilen mit flüssigem Wasserstoff, welcher vor der Nutzung in den Brennstoffzellen gasförmig wird, durchgeführt [45]. H2FLY kooperiert mit der Deutschen Aircraft, um in 2025 eine Dornier 328 mit einem Antrieb basierend auf Wasserstoff-Brennstoffzellen umzubauen. Im Rahmen des Projektes BALIS 2.0 arbeitet H2FLY zusammen mit dem DLR und Diehl Aerospace an der Entwicklung einer Brennstoffzelle für ein regionales Flugzeug mit einer Passagierkapazität von 40 bis 80 [46]. [47]

Ein weiteres neues Unternehmen aus Baden-Württemberg ist die **Airline flyv**, die ab Mai 2025 individualisierten Flugverkehr anbietet. Es werden kleinere Passagiermaschinen mit einer Kapazität von 9 Personen verwendet. Obwohl der Start zunächst mit konventionellen Flugzeugen stattfinden soll, ist im Zuge der Vergrößerung der Flotte die Nutzung von Flugzeugen mit elektrischen und Wasserstoffantrieben geplant. [48] [49]



In Baden-Württemberg werden regional Infrastrukturen zur Forschung an alternativen Antrieben für Flugzeuge geschaffen und Projekte durchgeführt

Im Rahmen der Luft- und Raumfahrt Strategie von Baden-Württemberg „**THE aerospace LÄND**“ sollen Projekte zur Schaffung einer nachhaltigeren Luftfahrt unterstützt werden. Dabei geht es um die Forschung an alternativen Antriebssystemen und SAF. [2]

Der Flughafen Stuttgart ist in dem von Airbus geleiteten **Projekt GOLIAT** (Ground Operations of Liquid Hydrogen Aircraft) aktiv. Ziel ist die Entwicklung und der Test von LH₂-Betankungstechnologien und Betriebsabläufen am Boden. Darüber hinaus sollen Regeln für die Zertifizierung und Standardisierung im Umgang mit LH₂ an Flughäfen geschaffen werden. [50]

Auch am Institut für Luftantriebe der Universität Stuttgart wird an Technologien für eine nachhaltige Luftfahrt geforscht. Anfang 2025 erhielt dieses einen Druckbehälter für einen Höhenprüfstand, um insbesondere Antrieb auf Wasserstoffbasis in Flughöhen testen zu können. [51]



4. Profil der bewegten Flugzeuge in Baden-Württemberg

Eine Analyse der Flugbewegungen und eingesetzten Flugzeuge in Baden-Württemberg bildet die Grundlage zur Analyse des Potentials und benötigten Volumens alternativer Flugkraftstoffe wie SAF und Wasserstoff. Unter Berücksichtigung allgemeiner Trends und Herausforderungen in der europäischen und deutschen Luftfahrt werden Wachstumsraten für den baden-württembergischen Luftverkehr in drei Szenarien ermittelt. Diese liegen langfristig pro Jahr zwischen 0,5 Prozent und 1,8 Prozent.

4.1. Status-Quo

In Baden-Württemberg wird das Luftverkehrsaufkommen überwiegend von den Flughäfen Stuttgart (STR), Friedrichshafen (FDH) und Karlsruhe/Baden-Baden (FKB) bedient. Langstreckenflüge kommen dabei kaum vor und die weit überwiegende Mehrheit der Verbindungen liegt im regionalen Flugverkehr und Kurzstreckenbereich.

Zur Analyse der bewegten Flugzeuge in Baden-Württemberg werden Daten zu Flugbewegungen ausgewertet, die von der Deutschen Flugsicherung (DFS), dem statistischen Bundesamt und dem Flughafenverband Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen (ADV) bereitgestellt wurden. Betrachtet werden dabei Starts und Landungen an baden-württembergischen Flughäfen und -plätzen.

Die Verkehrsflughäfen in Stuttgart, Friedrichshafen und Karlsruhe / Baden-Baden decken über 90 Prozent der startenden Flüge mit motorisierten Luftfahrzeugen im Land ab

Es werden Flüge betrachtet, die von den Verkehrsflughäfen Stuttgart, Friedrichshafen, Karlsruhe/Baden-Baden sowie von vier weiteren Regionalflughäfen in Baden-Württemberg gestartet sind. Mit rund 70 Prozent der Flugbewegungen in Baden-Württemberg ist Stuttgart der bedeutendste Flughafen der Region, gefolgt von dem Flughafen Karlsruhe / Baden-Baden mit 18 Prozent und Friedrichshafen mit 6 Prozent. Etwa 6 Prozent der Flugbewegungen finden an Regionalflughäfen oder -plätzen statt.

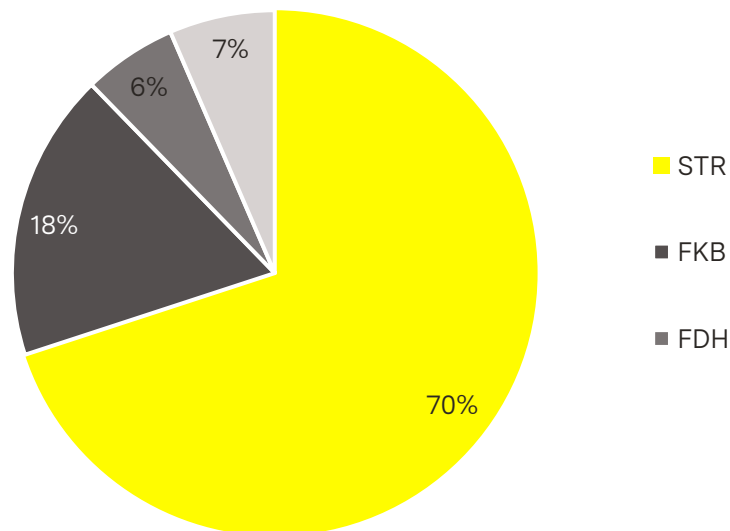


Abbildung 8: Die Verteilung der Flugbewegungen in Baden-Württemberg aufgeteilt nach Startflughafen zeigt die Bedeutung des Flughafens Stuttgarts und den beiden weiteren Verkehrsflughäfen in Friedrichshafen und Karlsruhe / Baden-Baden im Zeitraum November 2023 bis Oktober 2024. Unter Sonstiges werden weitere Flugbewegungen aus Baden-Württemberg angegeben, die nicht einem Flughafen oder Flugplatz zugeordnet werden konnten. Eigene Darstellung nach [159]

Knapp 50 Prozent der Flüge in Baden-Württemberg haben eine Länge von weniger als 800 km und könnten ab 2030 auf alternative Technologien umgestellt werden

Etwa die Hälfte der von Baden-Württemberg aus gestarteten Flüge gehören mit Strecken von weniger als 800 km Länge zum Regionalverkehr. Für diese Entfernungen ist der Einsatz alternativer Antriebstechnologien ab den 2030er Jahren möglich (vgl. Abbildung 7). Kurz- und Mittelstreckenflüge mit einer Länge von bis zu 1.500 km bzw. 3.500 km machen jeweils rund ein Viertel des Flugaufkommens aus. Auf diesen Strecken könnte Wasserstoff als alternativer Antrieb ab Mitte der 2040er Jahre zum Einsatz kommen.



Längere Kurz- und Mittelstreckenflüge sind bis mindestens 2040 weiterhin auf SAF angewiesen sind – Wasserstoff spielt aktuell keine Rolle für Langstreckenflüge

Langstreckenflüge, die über 3.500 km hinausgehen, stellen nur etwa 1 Prozent der von Baden-Württemberg ausgehenden Flüge dar. Dazu gehören z. B. wenige Flüge nach Atlanta (bis Oktober 2024), Rabil (Kap Verde) oder Dubai [52]. Um Emissionen zu reduzieren, sind diese Flüge voraussichtlich langfristig auf SAF angewiesen.

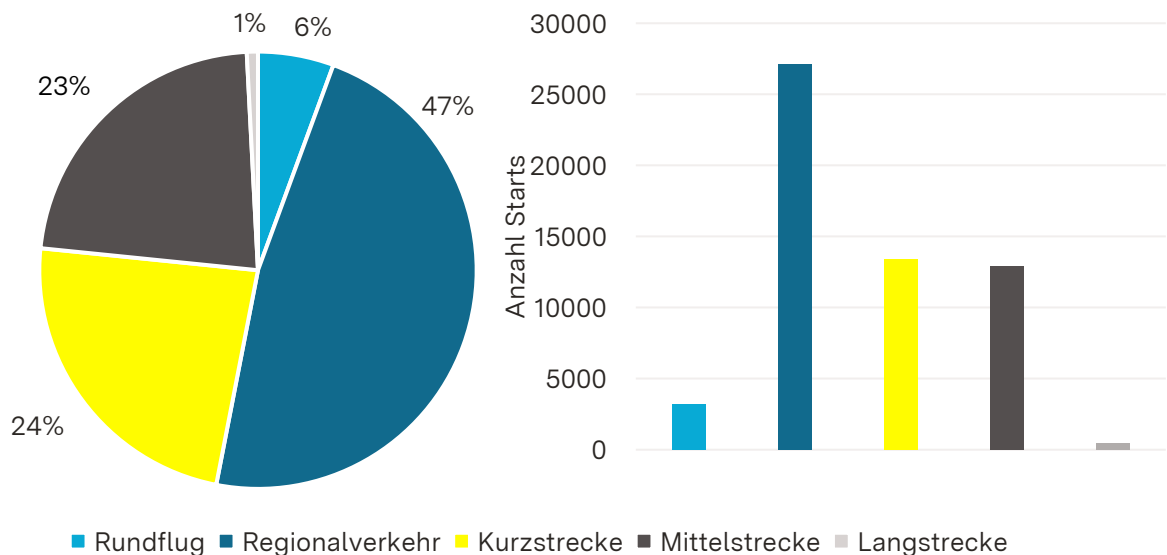


Abbildung 9: Verteilung der Flugbewegungen nach Streckenlängen. Flüge, deren Start- und Zielflughafen 800 km oder weniger auseinander liegen, gelten als Regionalverkehr. Kurzstrecken sind Flugdistanzen zwischen 800 km und 1.500 km. Mittelstrecken liegen zwischen 1.500 km und 3.500 km. Alle längeren Strecken sind Langstrecken. Rundflüge haben denselben Start- und Zielflughafen. Es werden die Starts von November 2023 bis Oktober 2024 gezeigt. Eigene Darstellung nach [159]

5 Prozent starten mit weniger als 10 Passagieren von größeren Flughäfen – für diese existieren ab 2030 alternative Flugzeuge mit Wasserstoff- oder Elektroantrieb

Zur Beurteilung, ob ein Flug zukünftig mit einem Flugzeug mit einem alternativen Antrieb durchgeführt werden könnte, ist es notwendig, neben der zurückzulegenden Strecke auch die erforderliche Größe des Flugzeuges zu betrachten. So werden knapp 20 Prozent der regionalen Flüge in Baden-Württemberg mit Flugzeugen durchgeführt, deren maximales Startgewicht unter 14 t liegt, was einer Passagierkapazität von etwa 35 Personen entspricht [53]. Es



wird angenommen, dass die notwendige Infrastruktur zum Betanken von Flugzeugen mit Wasserstoff zunächst an größeren Flughäfen verfügbar sein wird (vgl. Kapitel 6). Betrachtet man nur die drei Verkehrsflughäfen, für die eine Wasserstoffversorgung also wahrscheinlicher scheint als für kleinere Flugplätze, verringert sich der Anteil dieser kleineren Maschinen auf den kurzen Strecken auf rund 12 Prozent. Das entspricht rund 5 Prozent aller Flüge an Verkehrsflughäfen in Baden-Württemberg. Ab 2030 könnten kleinere Flugzeuge mit einer Kapazität von etwa 9 Personen mit Wasserstoff- oder elektrischen Antrieben auf regionalen Stre-

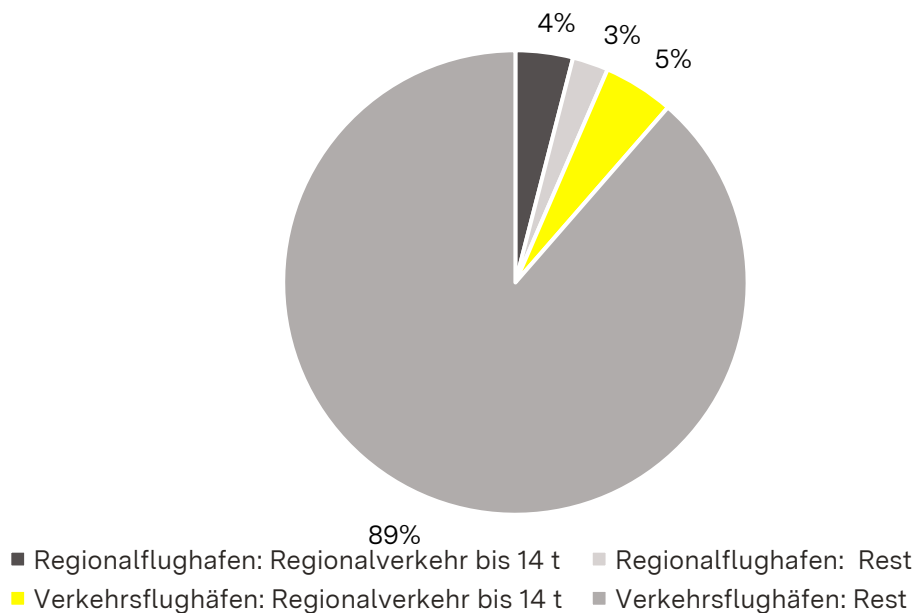


Abbildung 10: Verteilung der Flugbewegungen in Baden-Württemberg mit Kennzeichnung des Anteils von Maschinen mit einem Gewicht bis zu 14 t an Verkehrs- und Regionalflughäfen bzw. -plätzen. „Rest“ enthält alle Flugbewegungen, die nicht als Regionalverkehr klassifiziert werden oder die mit schwereren Flugzeugen durchgeführt worden sind. Es werden die Flugbewegungen aus November 2023 bis Oktober 2024 gezeigt. Eigene Darstellung nach [159]

cken betrieben werden (vgl. Abbildung 7). Betrachtet man Flugzeuge unter 7 t, welche diese Passagierkapazität aufweisen [54], entspricht der Anteil ihrer Flugbewegungen für Strecken im regionalen Luftverkehr auf Verkehrsflughäfen in Baden-Württemberg rund 5 Prozent. Elektrische Flugzeuge sind energieeffizienter und ressourcenschonender als Wasserstoffflugzeuge und daher langfristig vielversprechend in dem Segment der kleinen Maschinen. Kurzfristig kann der Fokus auf Wasserstoffantrieben in kleinen Flugzeugen die Technologieentwicklung und den Fortschritt auch in größeren Passagiermaschinen fördern.

Aus technischer Sicht besteht ab 2030 das Potential für umfassende Erneuerungen der kleineren Flugzeuge mit alternativen Antriebstechnologien; jedoch ist nicht zu erwarten, dass diese Flugzeuge einfach ersetzt werden. Die Faktoren, die zu einer tatsächlichen Markteinführung alternativer Technologien führen werden in Kapitel 5.1 betrachtet.

Über 80 Prozent der Flüge werden mit der Airbus 320 oder Boeing 737 Familie durchgeführt, der Hochlauf ist von der Entwicklung dieser oder ähnlicher Flugzeugtypen abhängig

An den Verkehrsflughäfen in Baden-Württemberg gehören über 80 Prozent der startenden Flugzeuge der Airbus 320 oder Boeing 737 Familie an. Während in Stuttgart sogar 59 Prozent der startenden Maschinen zur Airbus 320 Familie zugeordnet werden können, ist der Anteil in

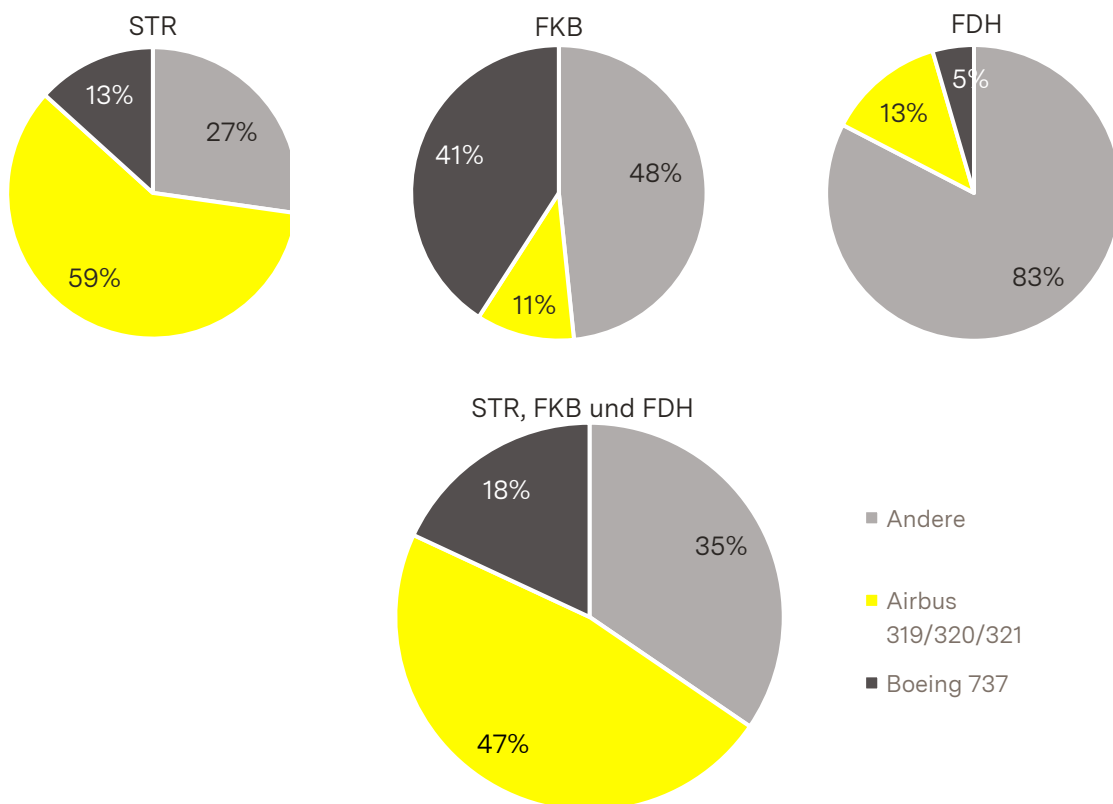


Abbildung 11: Verteilung der genutzten Flugzeugtypen an den Verkehrsflughäfen Stuttgart, Friedrichshafen und Karlsruhe / Baden-Baden. Es werden Daten zu Flugzeugbewegungen aus dem Jahr 2024 dargestellt. Eigene Darstellung nach [131]



Friedrichshafen mit 13 Prozent deutlich geringer. An diesem insgesamt kleineren Flughafen (vgl. Abbildung 8) starten mehr kleinere Maschinen. Die breite Einsatzmöglichkeit von Wasserstoff in der baden-württembergischen Luftfahrt ist somit eng an die Entwicklung dieser beiden Flugzeugtypen gebunden.

Den Ankündigungen von Airbus und Boeing folgend (vgl. Abbildung 7) ist somit noch bis mindestens 2040 der Einsatz von SAF in größeren Mengen notwendig, um diese Flugzeuggrößen bedienen zu können. Auch in diesem Fall ist von einer langsamen Hochlaufphase auszugehen, sodass SAF für den Großteil der startenden Flugzeuge langfristig benötigt wird, um Emissionen zu reduzieren.

78 Prozent der Flüge an Verkehrsflughäfen sind auf festen Routen geplant, was die Planung für den Einsatz von Wasserstoff erleichtert

Wasserstoffflugzeuge können nur sinnvoll eingesetzt werden, wenn Wasserstoff am Start- und Zielflughafen verfügbar ist. Es ist abzusehen, dass Wasserstoff längerfristig nicht an sämtlichen Flughäfen verfügbar sein wird. Aus diesem Grund wird Wasserstoff insbesondere während des Hochlaufes in erster Linie auf festgeplanten Routen eingesetzt werden können, wenn für beide Flughäfen die Sicherheit besteht, Wasserstoff tanken zu können. Dies betrifft 78 Prozent der startenden Flüge an den Verkehrsflughäfen. Werden Regionalflughäfen mitbe-

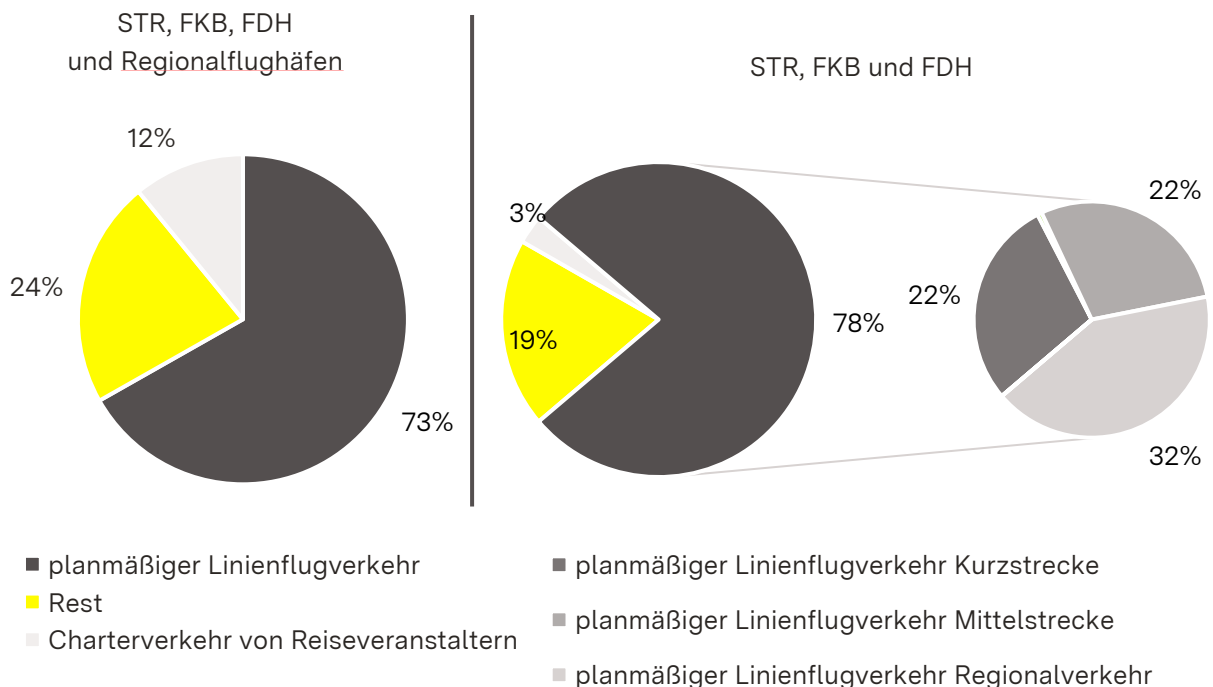


Abbildung 12: Verteilung der Flugbewegungen in Baden-Württemberg von November 2023 bis Oktober 2024 nach Flugtyp. Die Anteile von Langstrecken und Rundflügen im planmäßigen Linienflugverkehr liegen unter 0,5 Prozent und sind deswegen nicht in der Abbildung erkennbar. Eigene Darstellung nach [159]

trachtet sinkt der Anteil auf 73 Prozent. Insbesondere die planmäßigen Flugbewegungen im regionalen Linienflugverkehr, welche 32 Prozent an den Verkehrsflughäfen ausmachen, könnten zunächst für den Einsatz von Wasserstofftechnologien in Betracht gezogen werden. Auf den Mittelstrecken wird auch im planmäßigen Linienflugverkehr langfristig SAF notwendig sein. Diese bilden 22 Prozent der Flugbewegungen ab.



Ohne die Verfügbarkeit von Wasserstoff an den Partnerflughäfen, bleibt der Einsatz von SAF langfristig notwendig zur Emissionsreduktion

Um den Einsatz von Wasserstoffantrieben in der Luftfahrt in Baden-Württemberg zu realisieren, ist der Aufbau einer umfassenden Wasserstoffinfrastruktur nicht nur an den lokalen Flughäfen, sondern auch an wichtigen Partnerflughäfen innerhalb Deutschlands und Europas entscheidend. Die Flughäfen in Frankfurt, Hamburg, München und Berlin sowie in London, Wien, Amsterdam, Antalya und auf Mallorca sind dabei von zentraler Bedeutung. Rund 38 Prozent der Flugbewegungen im planmäßigen Linienflugverkehr aus den drei großen Flughäfen in Baden-Württemberg finden zu diesen Flughäfen statt. Das sind knapp 30 Prozent aller Flugbewegungen an den drei Flughäfen. Die Verfügbarkeit von Wasserstoff an diesen Standorten ist essenziell, um einen breiten Einsatz von wasserstoffbetriebenen Flugzeugen in der Luftfahrt in Baden-Württemberg zu ermöglichen. Einige dieser Flughäfen wie z. B. Frankfurt, Hamburg, Amsterdam und London gehören genau wie Stuttgart laut einer Analyse des DLRs zu Flughäfen, die früh Wasserstoff anbieten (vgl. bezüglich der Vorreiterflughäfen auch Kapitel 5.1) [55].

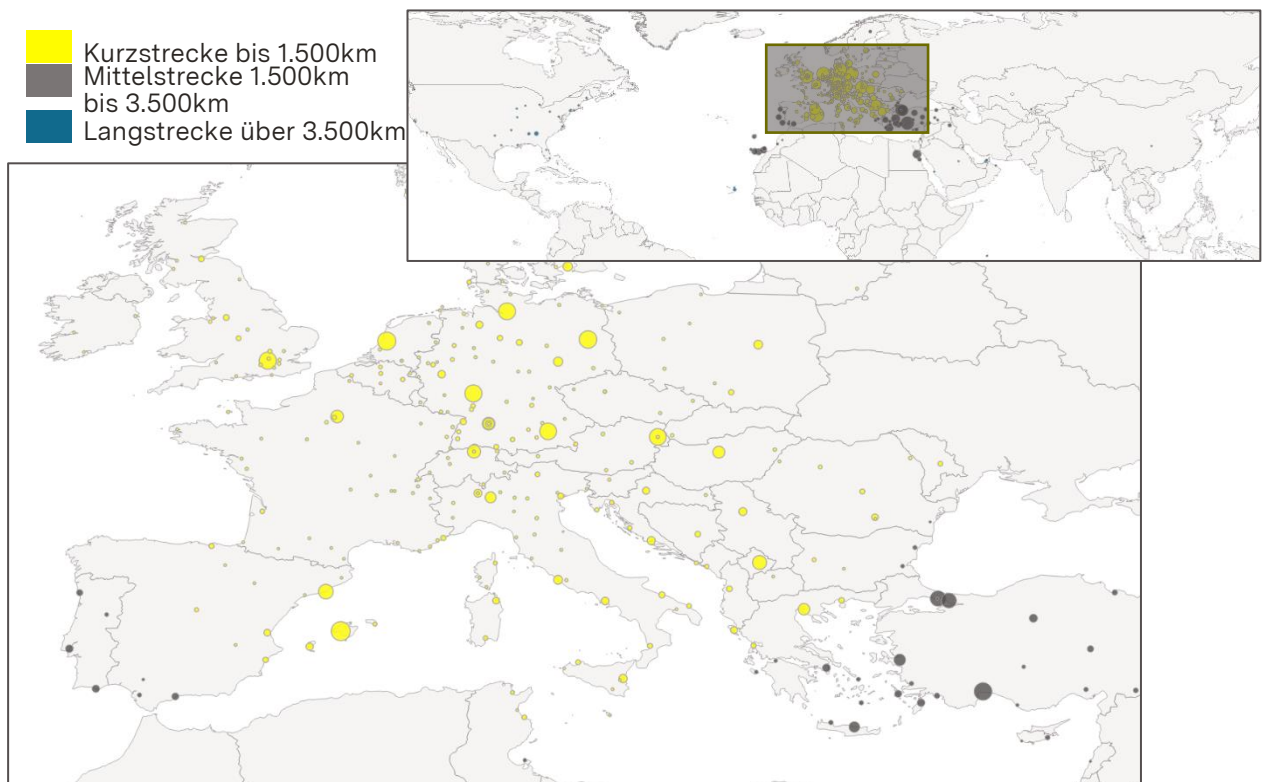


Abbildung 13: Streckenziele, die von den Flughäfen STR, FKB und FDH im Jahr 2024 angefliegen wurden. Die Anzahl der Flüge wird in der Größe der Markierungen wiedergespiegelt. Eigene Darstellung nach [131]



4.2. Ausblick

Zur Prognose des Luftverkehrsaufkommens in Baden-Württemberg spielt sowohl die allgemeine Luftverkehrsentwicklung als auch das Alter und die Modernisierung der Flugzeugflotten eine entscheidende Rolle, insbesondere im Hinblick auf die Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoffflugzeugen. Zudem werden die Besonderheiten in Deutschland und speziell im Land selbst sowie die europäische Entwicklung berücksichtigt.

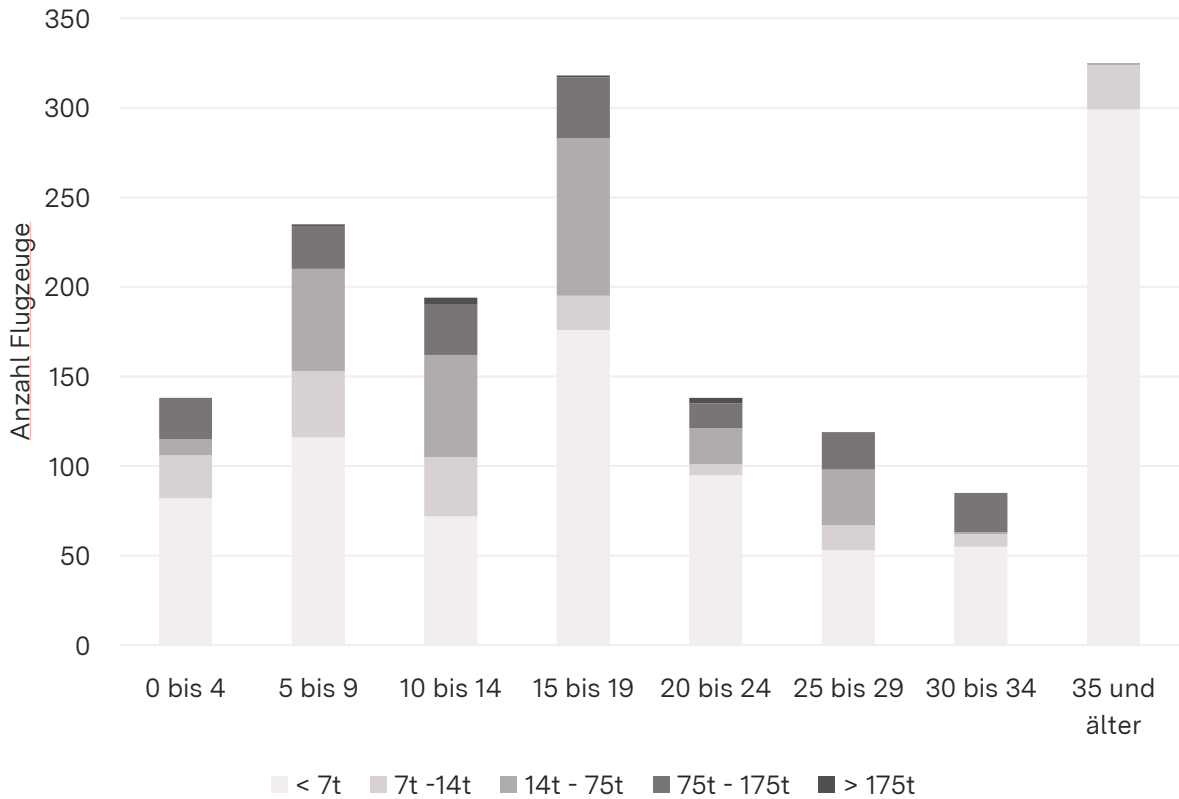


Abbildung 14: Darstellung des Alters der in Deutschland registrierten und in 2024 bewegten Flugzeuge an den Flughäfen STR, FKB, FDH und MHG. Eigene Darstellung nach [52].

In Baden-Württemberg liegt der Altersdurchschnitt der eingesetzten Flugzeuge bei rund 22 Jahren

Das Durchschnittsalter der in Baden-Württemberg eingesetzten und in Deutschland registrierten Flugzeuge liegt bei knapp 22 Jahren. Auffällig ist dabei das Alter der kleineren Maschinen mit einem Gewicht von unter 7 t, die rund 61 Prozent der registrierten Flugzeuge ausmachen. Dieses liegt bei etwa über 25 Jahren.

Berücksichtigt man, dass das durchschnittliche Ausmusterungsalter von Passagiermaschinen bei 25 bis 30 Jahren liegt [56], könnten viele dieser Maschinen mit einem Flugzeug mit einem elektrischen oder Wasserstoffantrieb ersetzt werden, wenn diese ab den 2030er Jahren (vgl. Abbildung 7) verfügbar sind.

Aktuelle Modernisierungspläne der Airlines deuten auf lange Abhängigkeit von SAF in Baden-Württemberg hin

Es wird erwartet, dass in Europa in den nächsten 10 Jahren über 30 Prozent der Flotte ausgemustert werden [56]. Auch für die Airlines, die in Baden-Württemberg und insbesondere Stuttgart aktiv sind, bestehen Pläne zur Flottenmodernisierung und -erweiterung.

Für die Airline Eurowings, die knapp ein Drittel aller Flugbewegungen am Flughafen Stuttgart durchführt, ist durch die Anschaffung von 40 neuen Boeing 737-8 MAX Flugzeugen in den Jahren 2027 bis 2032 die größte Modernisierung der Unternehmensgeschichte geplant [57]. Diese Flugzeuge müssen voraussichtlich nicht vor 2050 ausgetauscht werden. Bei einer Flotte von 139 Maschinen [58] und unter Berücksichtigung der Anschaffung der A320neo und A321neo Maschinen ab 2022 [59] könnte der Einsatz von Wasserstoffflugzeugen bei reiner Betrachtung der Marktverfügbarkeit und dem Ausmusterungsalter der Flugzeuge Ende der 2040er Jahre möglich sein. Konkrete Pläne dazu sind aktuell nicht veröffentlicht.

Knapp 7 Prozent der Flüge in Stuttgart werden von Lufthansa durchgeführt. Die Lufthansa Group, zu der auch Eurowings gehört, modernisiert Ihre Flotte kontinuierlich. Aktuell sind rund 250 Flugzeuge bestellt, darunter 100 Langstreckenflugzeuge. Eine genaue Aufteilung aller Maschinen auf die verschiedenen Airlines der Gruppe ist noch nicht vollständig veröffentlicht. [60]

Sun Express, die mit 5 Prozent der Flugbewegungen nach Eurowings und Lufthansa die meisten Flüge am Flughafen Stuttgart durchführt, plant eine Erweiterung der Flotte auf 166 Maschinen bis 2035. Dazu tragen 45 Boeing 737 MAX bei, die 2027 bis 2035 ausgeliefert werden sollen. [61]

Condor modernisiert die Kurz- und Mittelstreckenflotte der Airline bis 2029 mit 41 neuen Flugzeugen der Typen A320neo und A321neo [62]. Diese Flugzeuge sollte bis 2050 eingesetzt werden können und SAF zur Emissionsreduktion nutzen.

Ryanair plant bis 2034 300 neue Boeing 737 MAX 10 in die Flotte zu integrieren. Neben diesen Flugzeugen sollen 2034 noch rund 500 andere Flugzeuge eingesetzt werden. Für diese wäre



ein Austausch mit Wasserstoffflugzeuge Ende der 2040er Jahre theoretisch möglich. Dazu gibt es bislang allerdings keine veröffentlichten Pläne. [63]

WIZZ Air, die als Airline zu den größten Kunden am Flughafen Karlsruhe / Baden-Baden gehört, plant mit einem Flottenwachstum von 194 Flugzeugen von 2026 bis 2030. Dazu steigt vor allem die Anzahl der A321neo Flugzeuge um 235. So werden auch Flugzeuge ersetzt, die ausgemustert werden. 2030 soll das Durchschnittsalter der Flotte bei 4,7 Jahren liegen. Eine größere Modernisierung mit Wasserstoffflugzeugen ist daher vor 2050 für diese Airline unrealistisch. [64]

Der Einsatz von Wasserstoffflugzeugen ist nicht nur von Marktverfügbarkeit abhängig, auch flächendeckende Infrastrukturen oder homogene Flotten sind von Bedeutung

Neben der reinen Marktverfügbarkeit und dem Bedarf an neuen Flugzeugen beeinflussen weitere Faktoren die Entscheidung zur Anschaffung von Wasserstoffflugzeugen. Die erforderliche Infrastruktur (vgl. Kapitel 6) an für die Airline relevanten Standorten muss gewährleistet sein. Zudem profitieren Airlines von einer homogenen Flotte, da diese einfacher zu verwalten ist. Die Einführung einzelner Wasserstoffflugzeuge könnte die Flexibilität einschränken und die Planung, den Betrieb sowie die Instandhaltung erschweren. Darüber hinaus könnten Passagiere die neue Technologie als unsicher empfinden. Studien zur Akzeptanz der neuen Technologien zeigen jedoch hohe Zustimmungswerte - über 80 Prozent der Befragten äußern keine Bedenken, mit Wasserstoffflugzeugen zu fliegen [65] [66].

Die Entwicklung des Verkehrsaufkommens kann die Geschwindigkeit der technologischen Entwicklungen und Markttrends in der Luftfahrtindustrie beeinflussen

Allgemeine gesellschaftliche Trends, wie demografische Veränderungen, Einkommensentwicklungen und zunehmendes Umweltbewusstsein sowie technologische Entwicklungen beeinflussen das Verkehrsaufkommen. Die wirtschaftliche Entwicklung, gemessen am Bruttoinlandsprodukt, dem Volumen des Welthandels und der Stabilität der Finanzmärkte, wirkt sich ebenso auf den Luftverkehr aus, wie politische Rahmenbedingungen und Umweltfaktoren, einschließlich der Verfügbarkeit von Energieträgern, Ressourcen und Energiepreisen. Zudem ist die Entwicklung der Luftfahrtindustrie im Speziellen von Bedeutung. Wichtige Faktoren hierbei sind sowohl technologische Fortschritte als auch die Marktentwicklung. [67]



Zwischen 2019 und 2050 wird weltweit ein Flugverkehrswachstum von etwa 3,1 Prozent pro Jahr erwartet, während in Europa von 2020 bis 2050 die Rate bei etwa 1,1 Prozent liegt

Während weltweit ein Wachstum von rund 3,1 Prozent pro Jahr für 2019 bis 2050 angenommen wird [68], liegt die Wachstumsrate für 2024 bis 2050 in Europa bei 0,7 Prozent bis 2,2 Prozent abhängig vom betrachteten Szenario. Insbesondere in Asien und Afrika wird ein höheres Wachstum als in Europa erwartet [68], was sich auch in der Verteilung der europäischen Flüge widerspiegelt. Interkontinentalverbindungen aus Europa nehmen zwischen 2024 und 2050 überdurchschnittlich zu. Jährliche Wachstumsraten liegen zwischen 2,0 Prozent nach Nordamerika und 3,4 Prozent in den Nahen Osten. Darüber hinaus liegen Regionen, wie Urlaubsinseln oder touristische Ziele und Handelszentren über dem Durchschnitt [68]. Ein Grund für geringere Wachstumsraten ist die Verfügbarkeit von schnellen Zugverbindungen im Fernverkehr [68]. Es wird erwartet, dass in der EU (Europäische Union) und in der EFTA (Europäische Freihandelszone) 2026 wieder das Flugvolumen aus 2019 erreicht wird [69]. [70]

Der deutsche Flugverkehr entwickelt sich langsamer als in der EU

In Deutschland erholt sich der Luftverkehr langsamer von dem Einbruch der Corona Pandemie als in Europa. Obwohl die Passagierzahlen im Jahr 2024 um rund 8 Prozent im Vergleich zum Vorjahr gestiegen sind, liegen sie noch bei rund 85 Prozent des Volumens aus 2019. In Europa habe sie 2024 bereits das Niveau von 2019 erreicht. Insbesondere der innereuropäische Verkehr liegt mit 50 Prozent in Deutschland deutlich unter dem Niveau vor der Pandemie. Der innerdeutsche Flugverkehr wächst noch weniger stark, dabei zeigt sich, dass Zubringerflüge zu den Flughäfen Frankfurt und München mit 61 Prozent des Niveaus von 2019 stärker wachsen, als dezentrale Flüge innerhalb Deutschlands, die in 2024 21 Prozent des Volumens von vor der Corona Pandemie betragen. In Deutschland sind zum einen die Standortkosten bedingt durch Steuern und die Kosten zur Flugsicherung vergleichsweise hoch, zum anderen ist durch die zentrale Lage in Europa die Nutzung von Fernverkehrszügen gut möglich. [71] [72]

Es wird für Deutschland in den Jahren 2024 bis 2050 ein jährliches Wachstum von rund 1,3 Prozent pro Jahr in den Jahren 2024 bis 2050 angenommen, dabei werden die Auswirkungen von SAF-Mengen entsprechend der ReFuel-EU Aviation Quoten auf den Ticketpreis berücksichtigt. Liegt dieses Wachstum bei rund 1,8 Prozent wird an deutschen Flughäfen im Jahr 2050 eine Kapazitätslücke von 50.000 bis 100.000 Flügen erwartet. [70]



In Baden-Württemberg wird das Wachstum durch die geringe Anzahl an Langstreckenflügen und die mögliche Verlagerung des Verkehrs auf die Bahn eingeschränkt

Die Entwicklung des Luftverkehrs in Baden-Württemberg zeigt einige Unterschiede im Vergleich zum gesamten Bundesgebiet. Wie im Rest Deutschlands ist das Verhältnis zwischen Passagieren, die ins Ausland und Inland reisen, ähnlich verteilt. Im Bereich des Inlandsfrachtverkehrs hebt sich Stuttgart jedoch vom nationalen Durchschnitt ab. Während in Stuttgart das Volumen des Inlandsfrachtverkehrs relativ hoch ist und etwa 50 Prozent ausmacht, liegt es in Deutschland insgesamt bei weniger als 5 Prozent. Dies führt zu einer stärkeren Abhängigkeit von der wirtschaftlichen Entwicklung im Inland, wobei Stuttgart kein bedeutender Frachtflughafen in Deutschland ist. [73]

In Baden-Württemberg werden nur wenige Langstreckenflüge durchgeführt (vgl. Abbildung 9). Zusätzlich sind Drehkreuze in Frankfurt und München von Stuttgart schnell mit dem Zug zu erreichen. Da gerade für diese Flugverbindungen bzw. Streckentypen größere Wachstumsraten prognostiziert werden, entwickelt sich der Flugverkehr in Baden-Württemberg voraussichtlich langsamer. Es wird so ein Wachstum der Passagierkapazität für 2025 von etwa 6 Prozent im Vergleich zum Vorjahr erwartet. Damit könnte der Flughafen Stuttgart im Jahr 2025 rund 70 Prozent des Flugvolumens von 2019 erreichen. Die Kapazität des Flughafens liegt bei etwa 400 Starts und Landungen pro Tag. Im Gegensatz dazu erreicht der deutlich kleinere Flughafen Karlsruhe / Baden-Baden etwa 160 Prozent des Volumens von 2019. [74]

Ein weiteres Hindernis für das Wachstum in Stuttgart sind die hohen Betriebskosten, insbesondere infolge gestiegener Luftverkehrssteuern, die sich von 2019 bis 2024 für innereuropäische Flüge mit 150 Passagieren mehr als verdoppelt haben. Dies könnte dazu führen, dass Fluggesellschaften auf andere Flughäfen ausweichen. So werden im Jahr 2024 am Flughafen Stuttgart 19 Ziele weniger angefliegen als im Jahr 2019. [72]



Die Wachstumsrate des Luftverkehrs in Baden-Württemberg wird langfristig zwischen 0,5 und 1,8 Prozent liegen

Unter Berücksichtigung der Besonderheiten im Luftverkehr in Baden-Württemberg und gemeinsamer europäische und deutscher Trends lässt sich eine Wachstumsrate in drei Szenarien bestimmen. In einem Szenario mit einem moderaten Wachstum wächst das Luftverkehrsaufkommen langfristig um etwas über einem 1 Prozent pro Jahr. Wird ein starkes Wachstum angenommen, kann eine langfristige Wachstumsrate von 1,6 Prozent bis 1,7 Prozent erreicht werden, bei einem geringen Wachstum von 0,4 Prozent bis 0,5 Prozent.

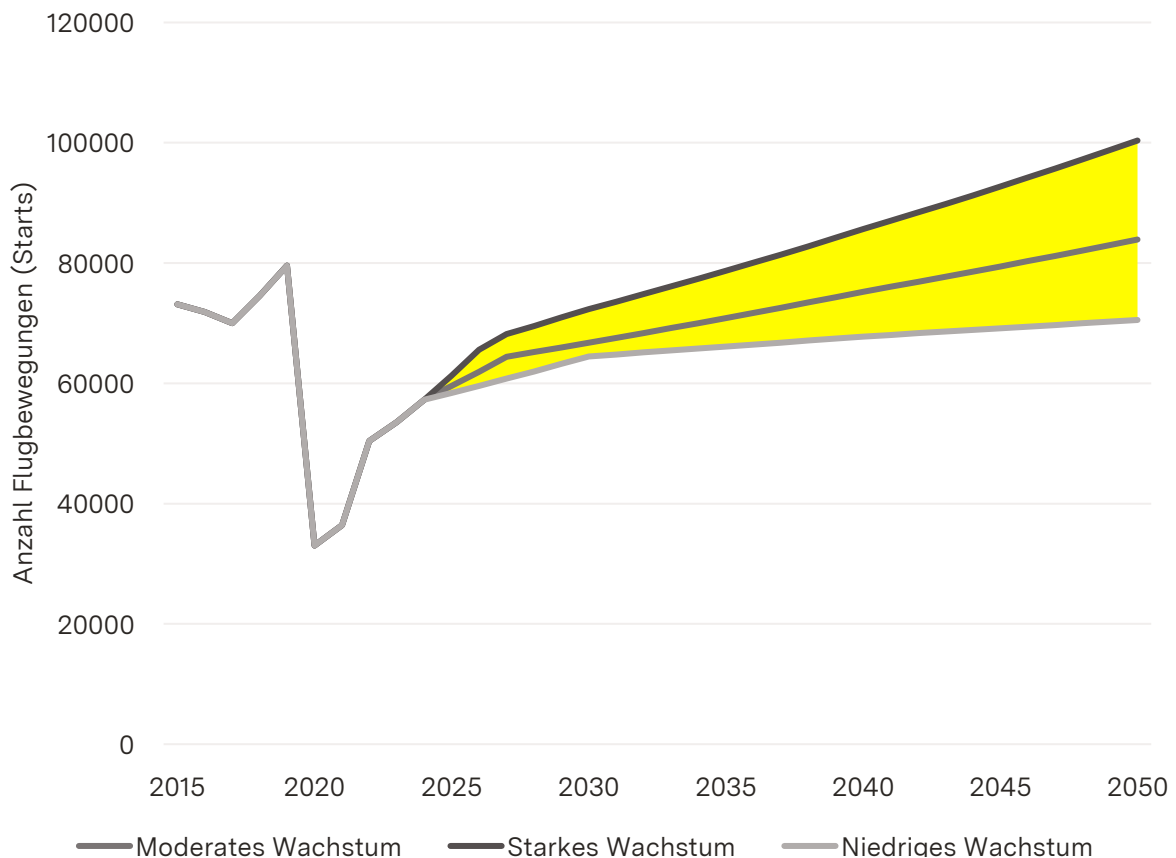


Abbildung 15: Darstellung des Luftverkehrsaufkommen in Baden-Württemberg von 2015 bis 2024 sowie der Prognos ab 2025 bis 2050. In den kommenden Jahren wird als Ausgleich der Folgen der Covid Pandemie zunächst ein stärkeres Wachstum erwartet. Dieses schwächt sich in den folgenden Jahrzehnten ab. Die Zahlen von 2015 bis 2023 berücksichtigen nur die drei Hauptverkehrsflughäfen im Land [172] [171] [170] [169] [168] [167] [166] [165] [164].

5. Szenariobasierte Bedarfsanalyse

Der Bedarf an biogenem und strombasiertem SAF sowie an Wasserstoff für die Luftfahrt in Baden-Württemberg wird anhand von drei verschiedenen Szenarien bestimmt. Es wird dabei der Zeitraum von 2025 bis 2050 betrachtet. Für verschiedene Einflussfaktoren auf die Bedarfsentwicklung werden in den Szenarien unterschiedlichen Annahmen getroffen. Es zeigt sich, dass biogenes und strombasiertes SAF in allen Szenarien relevante Kraftstoffe sind. Grund dafür sind die SAF-Quoten der ReFuelEU Aviation Verordnung und die Tatsache, dass zumindest biogenes SAF bereits am Markt verfügbar ist. Die Wasserstoffnutzung kann nur in ambitionierteren Szenarien einen relevanten Beitrag zur Emissionsreduktion leisten. Eine entscheidende Rolle spielt hier die Entwicklung des Verkehrsaufkommens. Im Vergleich zu bestehenden Analysen liegen die Ergebnisse dieser Studie im mittleren Bereich. Dabei ist zu berücksichtigen, dass noch vor zwei bis drei Jahren, die Entwicklung von Wasserstoff in der Luftfahrt deutlich positiver eingeschätzt wurde als heute.

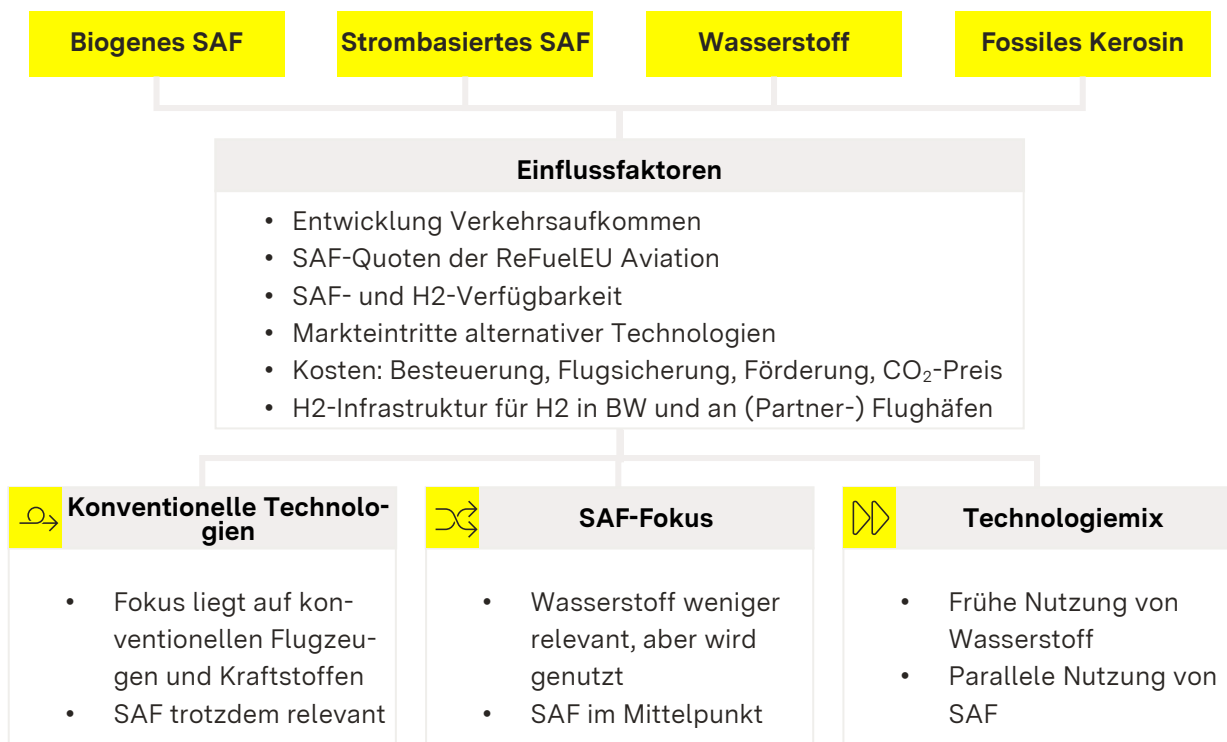


Abbildung 16: Es werden die Kraftstoffe fossiles Kerosin, SAF (biogen und strombasiert) und Wasserstoff berücksichtigt. Unter Berücksichtigung verschiedener Einflussfaktoren werden drei Szenarien abgeleitet, in denen die Nutzung von SAF und Wasserstoff unterschiedlich ausgeprägt ist.



5.1. Ableitung der Szenarien

Verschiedene Entwicklungen am Markt und in der Regulatorik können zum Teil einen erheblichen Einfluss auf die Verbreitung von Wasserstoff und SAF in der Luftfahrt haben. Es werden unterschiedliche Annahmen für diese Themenbereiche getroffen und so drei Szenarien entwickelt. Im Folgenden werden einige Einflussfaktoren genauer betrachtet und deren Auswirkungen in den verschiedenen Szenarien analysiert. Weitere Details sind Anlage I hinterlegt.

Ein höheres Luftverkehrsaufkommen ermöglicht höhere Anteile alternativer Technologien durch größere Flotten und mehr Investitionen

Ein erhöhtes Verkehrsaufkommen bietet ein erhebliches Potential für die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger. Dies betrifft nicht nur die absolute Menge an Wasserstoff, die verwendet wird, sondern auch der relative Anteil von Wasserstoff als Flugkraftstoff nimmt zu. Mit steigenden Wachstumsraten im Luftverkehr werden neue Flugzeuge schneller benötigt, wodurch die Einführung von Flugzeugen, die mit Wasserstoff betrieben werden, gefördert wird. Darüber hinaus spricht ein hohes Flugaufkommen auch dafür, dass die Unternehmen im Luftverkehr erfolgreich operieren und so mehr finanzielle Mittel für die Anschaffung innovativer Technologien zur Verfügung stehen könnte. [75] [55]

ReFuelEU-Vorgaben zu Beimischungsquoten haben großen Einfluss auf realisierte Quoten nachhaltiger Kraftstoffe

Die ReFuelEU Aviation Verordnung gibt Mindestbeimischungsquoten für SAF vor (vgl. Kapitel 3.1). Eine deutsche Quote für strombasiertes SAF, die über den Quoten der EU liegt, soll abgeschafft werden [76]. Da nachhaltige Kraftstoffe zum einen teurer als fossiles Kerosin sind und zum anderen deren Verfügbarkeit insbesondere für strombasiertes SAF ab etwa Mitte der 2030er Jahre nicht ausreichen könnte, weil die Nachfrage stärker steigt als die Produktionskapazitäten, sind die Mindestvorgaben der ReFuelEU Aviation Verordnung entscheidende Einflussfaktoren. Für biogenes SAF gibt es bereits Produktionsanlagen, das Angebot kann aber z. B. durch die Verfügbarkeit der notwendigen Rohstoffe eingeschränkt werden. Auch die Strafzahlungen bei Nichterfüllung der Quoten können einen Einfluss auf die Kraftstoffpreise haben, insbesondere wenn das Angebot knapp ist. Grüner Wasserstoff kann auf die vorgeschriebenen SAF- und PtL-Quoten angerechnet werden [77]. Eine Anrechnung auf die Quote



für strombasierte Kraftstoffe kann die Nutzung von Wasserstoff fördern, geht aber zu Lasten der Nachfrage nach strombasiertem SAF. [1]

„Tankering“, also das Tanken für den Hin- und Weiterflug bereits am Startflughafen, ist für SAF umstritten und soll durch die Regelung der ReFuelEU Aviation Verordnung verhindert werden, da die Flugzeuge so schwerer werden und mehr Kraftstoff verbrauchen. Für die Betreiber von Flügen ergeben sich durch „Tankering“ verschiedene Vorteile durch reduzierte Umschlagszeiten an Flughäfen, die Ausnutzung von Kostenvorteilen für SAF an bestimmten Flughäfen und eine erhöhte Flexibilität insbesondere bei kleinen Fluggesellschaften mit flexiblen Aufträgen. [10]

Mit „Tankering“ und der Verfügbarkeit von Wasserstoff an Vorreiterflughäfen können ab den 2040er Jahren rund zwei Drittel der Flüge ab Stuttgart für Wasserstoff geeignet sein

Der realisierte Wasserstoffbedarf in der Luftfahrt ist im Wesentlichen auch davon abhängig, ob Wasserstoff an den Start- und Zielflughäfen getankt werden kann. Eine Analyse des DLRs identifiziert die Top 50 der Vorreiterflughäfen (englisch: „Early Adopter“) im Jahr 2040, die sich aufgrund der Größe, der Verkehrsstruktur und weiterer Faktoren wie bspw. der Verfügbarkeit grüner Elektrizität oder der Bestrebungen der Betreiber besonders für den Wasserstoffeinsatz eignen [55]. An diesen sollte Wasserstoff im Jahr 2040 bereitstehen, sodass ein Netzwerk gebildet wird. Zu den Vorreiterflughäfen gehört auch Stuttgart [55]. Knapp 30 Prozent der Flüge von Stuttgart und etwa ein Viertel aller Flüge aus Baden-Württemberg haben einen anderen Vorreiterflughafen zum Ziel (vgl. Abbildung 17). Um die Nutzung von Wasserstoff auf weiteren Strecken zu ermöglichen, könnte zusätzlich „Tankering“ genutzt werden. Während der Hochlaufphase von Wasserstoff könnte „Tankering“ die mangelnden Tankmöglichkeiten an anderen Flughäfen ausgleichen, da nicht an jedem angeflogenen Flughafen Wasserstoff zum Tanken bereitstehen muss. Knapp 30 Prozent der Flüge ab Stuttgart sind Teil des Netzwerkes der Vorreiterflughäfen, an denen Wasserstoff früher zur Verfügung stehen könnte. Der hohe Anteil an Kurzstrecken ermöglicht theoretisch die Umstellung weiterer Flüge ab Stuttgart auf Wasserstoff - etwa 16 Prozent ab 2030 und weiterer 24 Prozent ab 2040 (vgl. Abbildung 17). Werden abgehenden Flüge aus ganz Baden-Württemberg betrachtet, könnten etwa dreiviertel mit Wasserstoffflugzeugen durchgeführt werden, wenn am Startflughafen und an den Vorreiterflughäfen Wasserstoff bereitsteht und „Tankering“ erlaubt ist (vgl. Abbildung 17).

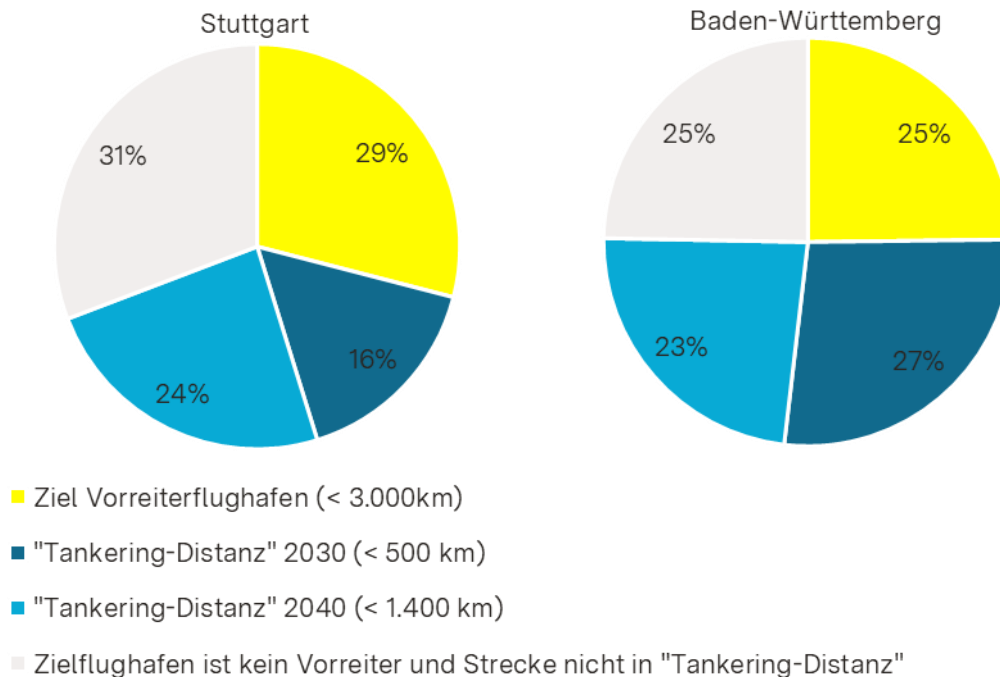
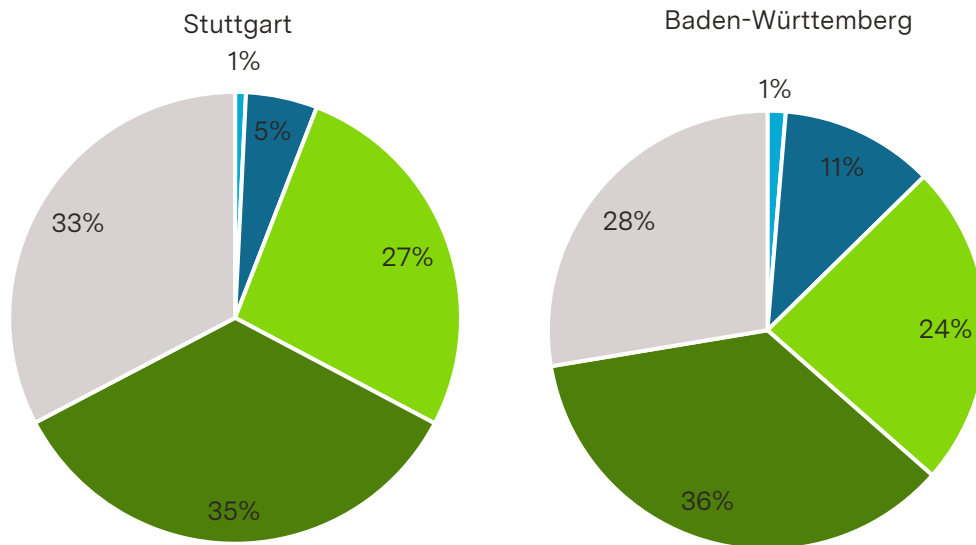




Abbildung 17: Verteilung der Flugbewegungen aus Stuttgart und gesamt Baden-Württemberg nach Zielort und Flugdistanz zur Darstellung des Potentials für den Einsatz von Wasserstoff. Die Größe der Flugzeuge ist dabei noch nicht berücksichtigt. Baden-Württemberg umfasst die drei Verkehrsflughäfen und weitere Regionalflughäfen und -plätze. Eigene Darstellung nach [159]



Zusätzlich zur Streckenlänge muss die geringere Passagierkapazität der Wasserstoffflugzeuge gegenüber herkömmlichen Flugzeugen berücksichtigt werden. Flugzeuge mit einem Antrieb basierend auf Wasserstoff werden in zwei Wellen auf den Markt kommen. Ab den 2030er Jahren ist mit kleinen Regionalflugzeugen zu rechnen, ab etwa den 2040er Jahren mit größeren Passagiermaschinen (vgl. Kapitel 3.2). Knapp 6 Prozent aller Flüge ab Stuttgart werden mit kleineren Flugzeugen durchgeführt und verbinden Vorreiterflughäfen innerhalb einer Distanz von 1100 km oder operieren in der sogenannten „Tankering“-Distanz (vgl. Abbildung 18). Diese Flüge könnten ab den 2030er Jahren mit Wasserstoffflugzeugen durchgeführt werden. Somit stellen diese 6 Prozent einen maximalen Wasserstoffanteil in Stuttgart dar, der praktisch jedoch nicht ausgeschöpft werden wird. Unter Berücksichtigung dieser Entwicklungen sowie der Vorreiterflughäfen und „Tankering“-Distanzen könnten dann maximal rund zwei Drittel der Flüge mit Wasserstoffflugzeugen durchgeführt werden, wobei auch dieser Anteil in der Praxis nicht realisiert werden wird.



Kleinere Flugzeuge (ca. 2030)

 Ziel Vorreiterflughäfen und / oder in „Tankering-Distanz“
 in „Tankering-Distanz“

Größere Flugzeuge (ca. 2040)

 Ziel Vorreiterflughäfen und / oder in „Tankering-Distanz“
 in „Tankering-Distanz“


 Ziel ist kein Vorreiterflughafen, Distanz zu groß für „Tankering“ oder Flugzeuge zu schwer

Abbildung 18: Darstellung der Verteilung der Flugbewegungen (Starts) ab Stuttgart bzw. Baden-Württemberg insgesamt nach Flugzeuggröße und Distanz bzw. Ziel zur Darstellung des Potentials für Wasserstoffantriebe. Kleine Flugzeuge haben ein Gewicht bis 7 t, größere ein Gewicht bis 80 t. Für kleine Flugzeuge (Markteintritt ca. 2030) wird eine Reichweite von 1100 km mit einer „Tankering“-Distanz von 500 km angenommen. Zum Markteintritt von größeren Flugzeugen (ca. 2040) wird eine Reichweite von 3000 km und eine „Tankering“-Distanz von 1400 km angenommen. Baden-Württemberg umfasst die Flughäfen STR, FKB, FDH und MHG (Mannheim). Eigene Darstellung nach [52]

Emissionen von Wasserstoff sinken in den folgenden Jahren mit der zunehmenden Bereitstellung von grünem Wasserstoff bis zum Jahr 2050

Um die Folgen des Einsatzes verschiedener Kraftstoffe zu bewerten, werden die erzeugten Emissionen betrachtet. Zur Berechnung werden die Werte aus Abbildung 1 angenommen. Für biogenes und strombasiertes SAF wird dabei ein Durchschnittswert gebildet. Für Wasserstoff



wird angenommen, dass sich die Lebenszyklusemissionen sowohl aus grünem als auch grauem Wasserstoff ergeben. Sie werden entsprechend dem Anteil erneuerbarer Energien am Strommix gewichtet. Der verbindliche Zielwert für den Anteil erneuerbarer Energien in der EU liegt 2030 bei 42,5 Prozent. Bis 2050 sollen ausschließlich erneuerbare Energien verwendet werden. In Deutschland ist der Anteil erneuerbarer Energien höher als der EU-Durchschnitt. So wurden 2024 fast 63 Prozent des Stroms aus erneuerbaren Quellen erzeugt. Es wird hier dennoch der EU-Mix angenommen, da mit Wasserstoffimporten aus dem europäischen Ausland zur Deckung der Nachfrage gerechnet wird. [78] [79]

Wasserstoffimporte aus Ländern außerhalb der EU sind auch möglich, wobei dabei berücksichtigt werden sollte, dass es innerhalb der EU Bestrebungen gibt, unabhängiger von Energielieferungen aus Drittländern zu werden. In der Importstrategie für Wasserstoff der Bundesregierung liegt der Schwerpunkt bei internationalen Importen auf dem Import von kohlenstoffarmem Wasserstoff. In der aktuellen Hochlaufphase von Wasserstoff ist das Angebot zu wettbewerbsfähigen Preisen aber auch im Ausland noch begrenzt. [80]

Ohne CO₂-Preis bleibt fossiles Kerosin der günstigste Kraftstoff gefolgt von HEFA-SAF und flüssigem Wasserstoff; strombasiertes SAF bleibt langfristig der teuerste Kraftstoff

Auf Kurz- und Mittelstrecken sind 20 Prozent bis 30 Prozent der Kosten eines Fluges sind auf Treibstoffkosten zurückzuführen. Bei Flügen ab Stuttgart liegt dieser Anteil leicht über 20 Prozent [81]. Der Preis von Wasserstoff und SAF ist somit entscheidend für ihre Anwendung in der Praxis und wird von Betreibern der Flüge häufig als Argument gegen diese Kraftstoffe verwendet. Es wird prognostiziert, dass die Preise für biogenes und strombasiertes SAF und flüssigen Wasserstoff fallen werden. Trotzdem liegen sie auch 2050 noch über dem von fossilem Kerosin, wobei erwartet wird, dass biogenes HEFA-SAF nur leicht über dem Preis von fossilem Kerosin liegen wird (vgl. Abbildung 19). Da Wasserstoff ein Vorprodukt zur Herstellung von strombasiertem SAF ist, wird dessen Preis immer über dem von Wasserstoff liegen. Durch die

Einführung eines CO₂-Preises für fossiles Kerosin könnte der Preisunterschied teilweise ausgeglichen werden, sodass die Nutzung alternativer Kraftstoffe und Wasserstoff attraktiver

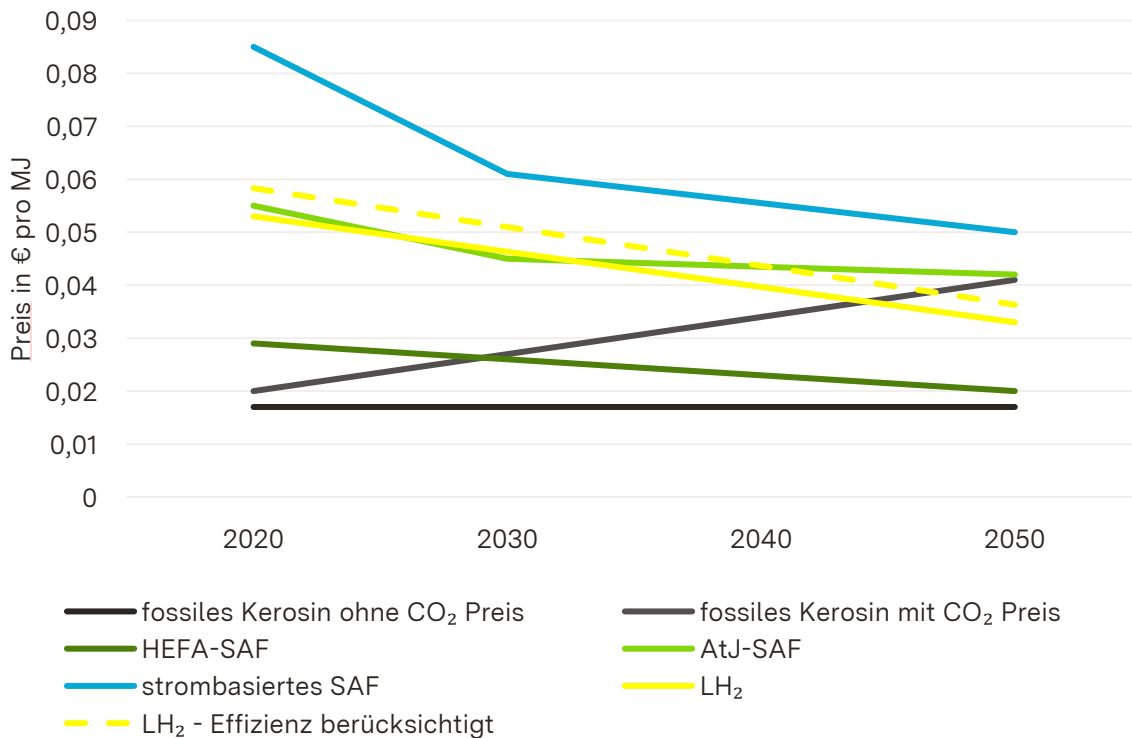


Abbildung 19: Preisentwicklung verschiedener Kraftstoffe. Es wurde ein CO₂ Preis von 50 € pro t bis 180 € pro t angenommen. Für Wasserstoff wird sowohl der Standardpreis pro MJ dargestellt (gelb – durchgehend) als auch der um den höheren Energiebedarf) korrigierte Preis (gelb – gestrichelt) dargestellt. Darstellung nach [82]

wird. [24] [82]

Höhere Kraftstoffpreise könnten zu höheren Ticketpreisen und so zu einer reduzierten Nachfrage führen. Analysen zeigen allerdings, dass auch bei Berücksichtigung eines CO₂-Preises von 800 Euro pro Tonne CO₂ oder erhöhter Kraftstoffpreise durch die Verwendung von SAF der Luftverkehr weiter wächst [55] [75]. Kraftstoffkosten sorgen für etwa 20 Prozent der Kosten eines Fluges, auf einer Strecke von Stuttgart nach Palma de Mallorca mit einem A320 bei einer Kapazität von 180 Plätzen und einer 90 Prozent Auslastung [81]. Eine Auswertung der Ticketpreise des DLRs von 2002 bis 2019 konnte zeigen, dass diese pro Jahr leicht gesunken sind, während im selben Zeitraum der Ölpreis um über 70 Prozent gestiegen ist, was durch Effizienzgewinne sowohl im Flugzeug als auch in weiteren Geschäftsprozessen erreicht werden



konnte [55]. Es ist also anzunehmen, dass sich ein höherer, zukünftiger Kraftstoffpreis nicht im selben Verhältnis in den Ticketpreisen widerspiegelt.

Die Richtlinie (EU) 2003/87/EG in Verbindung mit deren Änderung durch die Richtlinie (EU) 2023/958 zielt darauf ab einen Unterstützungsmechanismus für nachhaltige Kraftstoffe innerhalb des Emissionshandelssystems aufzubauen. Es sollen Emissionszertifikate in Abhängigkeit von der Nutzung nachhaltiger Kraftstoffe zugeteilt werden. Dadurch soll der Preisunterschied zu fossilem Kerosin berücksichtigt und teilweise ausgeglichen werden. Eine aktuelle Initiative thematisiert die Berechnung dieses Preisunterschiedes. Die Zuteilung soll bis Ende 2030 stattfinden. [83] [84]

Neben einer Ausweitung des Emissionshandelssystems wird auch immer wieder die Einführung einer Kerosinsteuer diskutiert. Flugbenzin und Kerosin sind in Deutschland von Steuern befreit. Eine Besteuerung im internationalen Luftverkehr ist nicht mit der EU-Richtlinie 2003/96 vereinbar. Die gewerbliche Personenbeförderung unterliegt in Deutschland der Luftverkehrssteuer. Eine Erhöhung dieser Steuer der letzten Bundesregierung soll nun zurückgenommen werden. Grundsätzliche Änderungen im Sinne von Steuererhöhungen oder -einführungen sind aktuell nicht geplant und werden deshalb nicht betrachtet. [85] [76]

Kostensteigerungen im Betrieb wasserstoffbetriebener Flugzeuge können nicht nur durch gesteigerte Kraftstoffkosten entstehen, sondern auch durch höhere Einkaufskosten bei Investitionen in neue Flugzeuge und mögliche höhere Flughafengebühren bedingt durch die Investitionskosten der Flughäfen in die für Wasserstoff notwendige Infrastruktur oder längere Zeiten der Flugzeuge am Boden. [86]

Bis 2050 können Effizienzsteigerungen von rund 30 Prozent erreicht werden

Weitere Potentiale zur Emissionsreduktion bestehen neben der Umstellung auf nachhaltige Kraftstoffe in der Optimierung der operationellen Abläufe und der verwendeten Maschinen. Flugzeuge werden zunehmend effizienter und benötigen somit weniger Kraftstoff. Bis 2050 können Effizienzverbesserungen von etwa 30 Prozent erwartet werden. Zunächst geht man von jährlichen Steigerungen von 1,08 Prozent aus, wobei ab 2035 eine Zunahme auf jährlich 1,15 Prozent erwartet wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass dann neue Flugzeuggenerati-



onen weit verbreitet sind, die durch technische Optimierungen eine höhere Effizienz ermöglichen. Dabei können zunächst die bestehenden Konzepte optimiert werden. Darüber hinaus bieten vor allem völlig neue Flugzeugmodelle z. B. die „Blended Wing Body“-Bauweise, bei der Rumpf und Tragflächen eine Einheit bilden, großes Potential. [75] [87]

Den Szenarien „Konventionelle Technologien“, „SAF-Fokus“ und „Technologiemix“ liegen unterschiedliche Annahmen zu Markt- und regulatorischen Entwicklungen zugrunde

Basierend auf den beschriebenen Faktoren wurden drei Szenarien abgeleitet, denen unterschiedliche Annahmen zu Grunde liegen:

1. „Konventionelle Technologien“
1. „SAF-Fokus“
2. „Technologiemix“

Kategorie	Konventionelle Technologien	SAF-Fokus	Technologiemix
Verkehrsaufkommen	geringes Wachstum	moderates Wachstum	starkes Wachstum
ReFuelEU Quoten	SAF-Quote (exkl. PtL) wird mit Ablauf des Book-and-Claim-Verfahrens erreicht	SAF-Quoten (inkl. PtL) werden erreicht, H ₂ wird auf SAF-Quote angerechnet	SAF-Quoten (inkl. PtL) werden erreicht, H ₂ wird auf PtL-Quote angerechnet
SAF-Verfügbarkeit	PtL-Produktion zu gering	ausreichend	ausreichend
H₂-Verfügbarkeit	ausreichend	ausreichend	ausreichend
Markteintritte von H₂-Flugzeugen			
kleine Regionalflugzeuge (~ 9 Personen)	2035	2030	2030
größere Flugzeuge (~ 150 Personen)	2045	2043	2038



H₂-Infrastrukturausbau (bis 2050)	kaum Veränderungen	moderater Ausbau	ambitionierter Ausbau
Kosten	kein CO ₂ -Preis, keine oder wenige finanzielle Vorteile für SAF und H ₂	kein CO ₂ -Preis, finanzielle Förderung (Investitionssicherung) für SAF und H ₂	CO ₂ Bepreisung oder Besteuerung, finanzielle Förderung (Gebührevorteile, Investitionssicherung) für SAF und H ₂ , fossiles Kerosin bleibt günstigster Kraftstoff
„Tankering“ und Vorreiterflughäfen	H ₂ ist an Vorreiterflughäfen verfügbar, „Tankering“ ist nicht erlaubt	H ₂ ist an Vorreiterflughäfen verfügbar, „Tankering“ ist begrenzt möglich	H ₂ ist an Vorreiterflughäfen verfügbar, „Tankering“ ist erlaubt

Tabelle 3: Übersicht verschiedener Annahmen in den drei Szenarien „Konventionelle Technologien“, „SAF-Fokus“ und „Technologiemix“. Vgl. Anlage I für weitere Details.

5.2. Ergebnisse

In dem ambitionierten Szenario „Technologiemix“ wird in Baden-Württemberg ab dem Jahr 2030 Wasserstoff benötigt. Der Bedarf steigt zunächst nur leicht und schließlich bis 2050 auf über 19.000 t an. In dem Szenario „Konventionelle Technologien“ kann sich Wasserstoff nicht so schnell durchsetzen. Es werden weniger als 490 t Wasserstoff im Jahr 2050 benötigt, was etwa 0,6 Prozent des gesamten Energiebedarfes des in der Luftfahrt in Baden-Württemberg verwendeten Kraftstoffs entspricht. Dafür liegt der SAF-Anteil an der Energieherkunft mit knapp 70 Prozent deutlich über dem SAF-Anteil des ambitionierten Szenarios von knapp 55 Prozent. Dies ist vor allem auf den großen Unterschied in dem Ausmaß der Wasserstoffnutzung zurückzuführen.

Die relativen Emissionsreduktionen durch die Verwendung nachhaltiger Kraftstoffe bzw. Wasserstoff liegen in den Szenarien „SAF-Fokus“ und „Technologiemix“ mit 57 Prozent leicht über den 55 Prozent des konventionellen Szenarios. Durch die Verwendung von Wasserstoff werden im Jahr 2050 zwar weniger Treibhausgase emittiert als durch die Verwendung von strombasierten SAF, was im „SAF-Fokus“-Szenario zum wichtigsten Kraftstoff wird, der Effekt wird



allerdings teilweise durch die geringere Effizienz von Wasserstoffflugzeugen kompensiert. Zusätzlich wird mehr biogenes SAF verwendet, was wiederum zu mehr Emissionen führt als strombasiertes SAF. So kommt es schließlich zu den ähnlichen relativen Emissionseinsparungen im „SAF-Fokus“- und „Technologiemix“-Szenario. Durch die unterschiedlichen Luftverkehrsaufkommen wird die absolut höchste Emissionseinsparung durch die Verwendung alternativer Kraftstoffe in Höhe von 680.000 tCO₂eq im Jahr 2050 erreicht., was der Reduktion um 57 Prozent gegenüber 2024 entspricht. Es verbleiben in diesem Szenario Emissionen von etwa 509.000 tCO₂eq. Zu den insgesamt geringsten Emissionen in Höhe von 365.000 tCO₂eq kommt es jedoch im Szenario „Konventionelle Technologien“ im Jahr 2050. Das entspricht etwa 28 Prozent weniger Emissionen als im „Technologiemix“-Szenario, wobei der Gesamtenergiebedarf etwa 32 Prozent über dem des konventionellen Szenarios liegt.

5.2.1 Energie- und Kraftstoffbedarf

Der Anteil von Wasserstoff zur Deckung des gesamten Energiebedarfes liegt je nach Szenario im Jahr 2050 bei knapp 1 Prozent bis 17 Prozent. Der Anteil von fossilem Kerosin sinkt in allen Szenarien, getrieben durch die ReFuelEU Quoten, auf 30 Prozent.

„Konventionelle Technologien“: Der Gesamtenergiebedarf sinkt aufgrund zunehmender Effizienz neuer Flugzeuge und geringem Wachstum; Wasserstoff ist praktisch irrelevant

Der Fokus auf konventionelle Technologien und Kraftstoffen ist unter anderem Folge eines schwach wachsenden Luftverkehrsaufkommen. Die damit verbunden Energiebedarfe können bereits durch die prognostizierten Effizienzgewinne ausgeglichen werden, sodass der Gesamtenergiebedarf ab 2030 sinkt. Bei einem langfristig niedrigen Wachstum werden weniger neue Flugzeuge benötigt und neue Flugzeuge mit Wasserstofftechnologien kommen nur langsam im Markt an. Der Wasserstoffbedarf liegt 2050 gerade mal bei 58 Millionen MJ und entspricht damit rund 0,6 Prozent des Energiebedarfs.

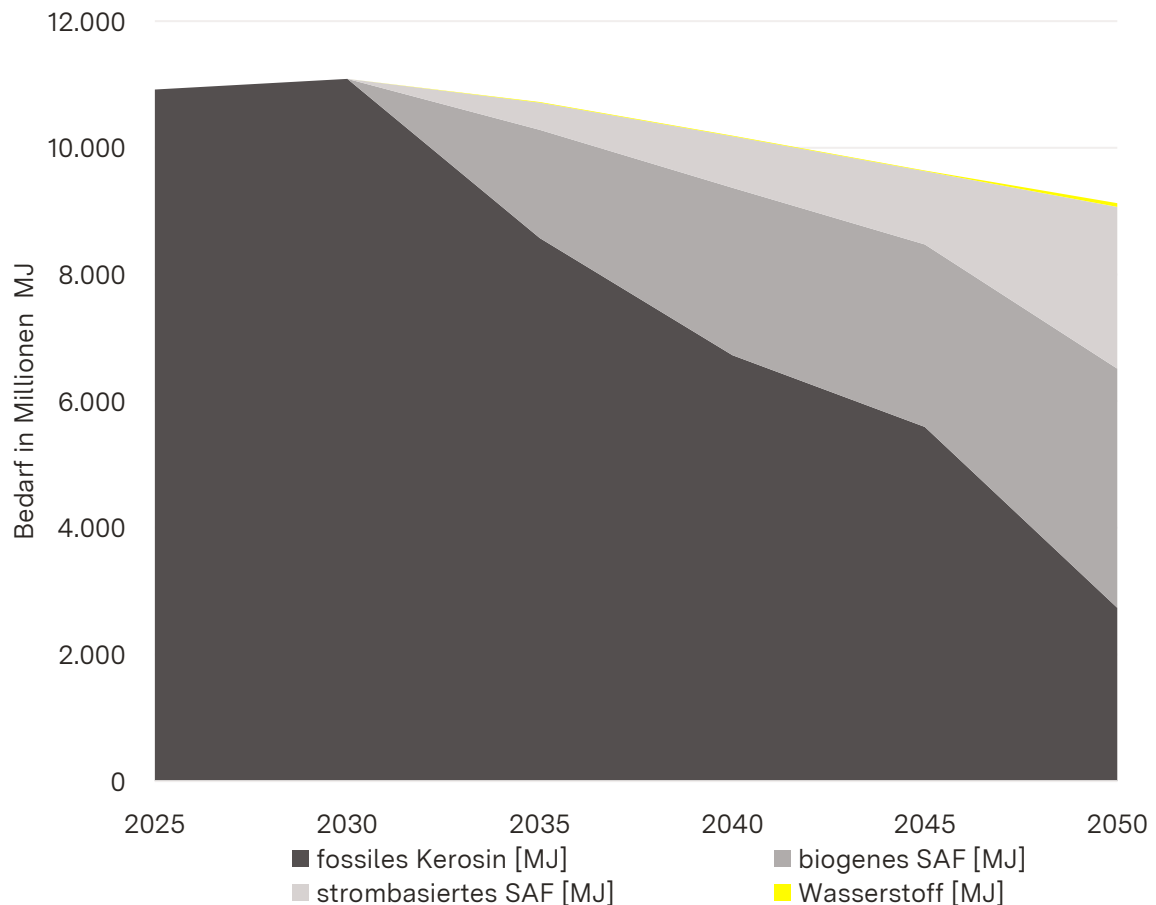


Abbildung 20: Energiebedarf nach verschiedenen Energieträgern in Millionen MJ im Szenario „Konventionelle Technologien“.

„SAF-Fokus“: Der Gesamtenergiebedarf sinkt ab 2040 leicht; Strombasiertes SAF ist der wichtigste Kraftstoff; Wasserstoff wird mit einem Anteil von 6,4 Prozent relevant

Im Szenario „SAF-Fokus“ kann ein stärker steigendes Verkehrswachstum durch eine gesteigerte Effizienz der Flugzeuge kaum kompensiert werden. Trotzdem sinkt der Bedarf an fossilem Kerosin ab 2030 durch höhere Mengen an biogenem und strombasiertem SAF. Durch den steigenden Bedarf an strombasiertem SAF und Wasserstoff ab 2040, wächst der biogene SAF-Anteil nur noch langsam und es deutet sich eine Trendumkehr hin zu sinkenden biogenen SAF-Bedarfen an.

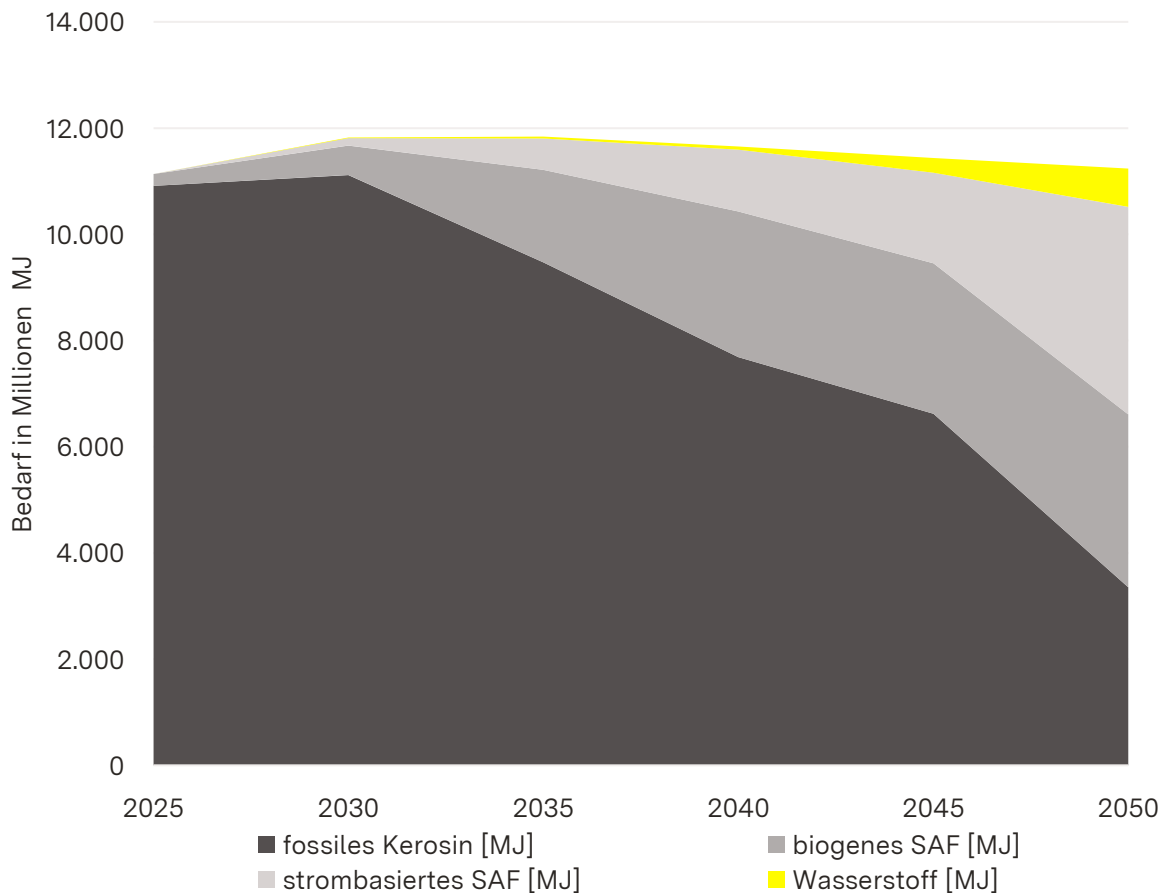


Abbildung 21: Energiebedarf nach verschiedenen Energieträgern in Millionen MJ im Szenario „SAF-Fokus“

„Technologiemix“: Der Gesamtenergiebedarf steigt konstant an; biogenes SAF wird zum wichtigsten Kraftstoff; strombasiertes SAF und Wasserstoff sind nahezu gleichbedeutend

Die Anrechnung von Wasserstoff auf die PtL-Quote der ReFuelEU Aviation Verordnung, fördert den Einsatz von Wasserstoff im „Technologiemix“-Szenario, da zu erwarten ist, dass dieser günstiger ist (vgl. Abbildung 19). So steigt der Wasserstoffanteil auf 16,9 Prozent. Gleichzeitig führt dies zu Schwankungen im PtL-Bedarf, bedingt durch die steigenden Beimischungsvorgaben und die davon nur bedingt abhängige Verbreitung von Wasserstoffflugzeugen. So fällt der PtL-Bedarf von 2040 bis 2045 um rund 22 Prozent, während von 2045 bis 2050 eine Steigerung um mehr als das Dreifache folgt. Ab 2039 wird Wasserstoff auch in größeren Flugzeugen eingesetzt, was zu einer stärkeren Wasserstoffsteigerung in diesem Zeitraum führt. Der Bedarf an fossilem Kerosin fällt in den Jahren 2040 bis 2045 etwas schwächer



als davor und danach, was an der weniger stark steigenden SAF-Quote in diesen Jahren liegt. Als weitere Folge der Anrechnung der Wasserstoffnutzung auf die PtL-Quote steigt der Anteil biogenen SAFs stärker an als im Szenario „SAF-Fokus“ und liegt im Jahr 2050 bei 34,5 Prozent. Auch in diesem Szenario steigt der Gesamtenergiebedarf bis 2050 an, während der Bedarf an fossilem Kerosin ab 2030 sinkt.

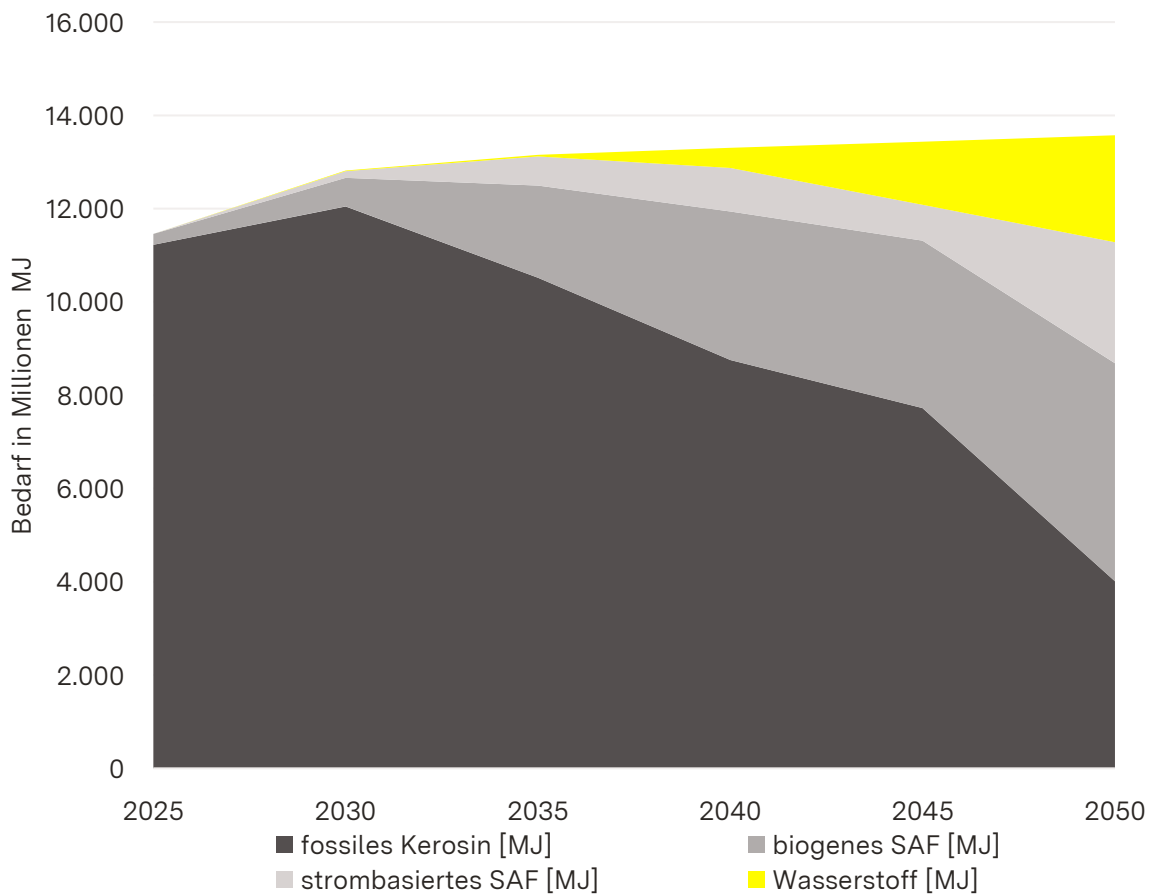


Abbildung 22: Energiebedarf nach verschiedenen Energieträgern in Millionen MJ im Szenario „Technologiemix“

Der Einfluss der ReFuelEU -Quoten gibt in allen Szenarien den Anteil fossiler Kraftstoffe am Gesamtenergiemix vor

Im Vergleich der Szenarien zeigt sich der Einfluss der SAF-Quote der ReFuelEU Aviation Verordnung deutlich. Da Preise für nachhaltige Kraftstoffe in allen Szenarien über denen des fossilen Kraftstoffes liegen, wenn keine CO₂-Besteuerung oder Bepreisung vorgenommen wird, wird der erlaubte Anteil an fossilem Kraftstoff voll ausgeschöpft.

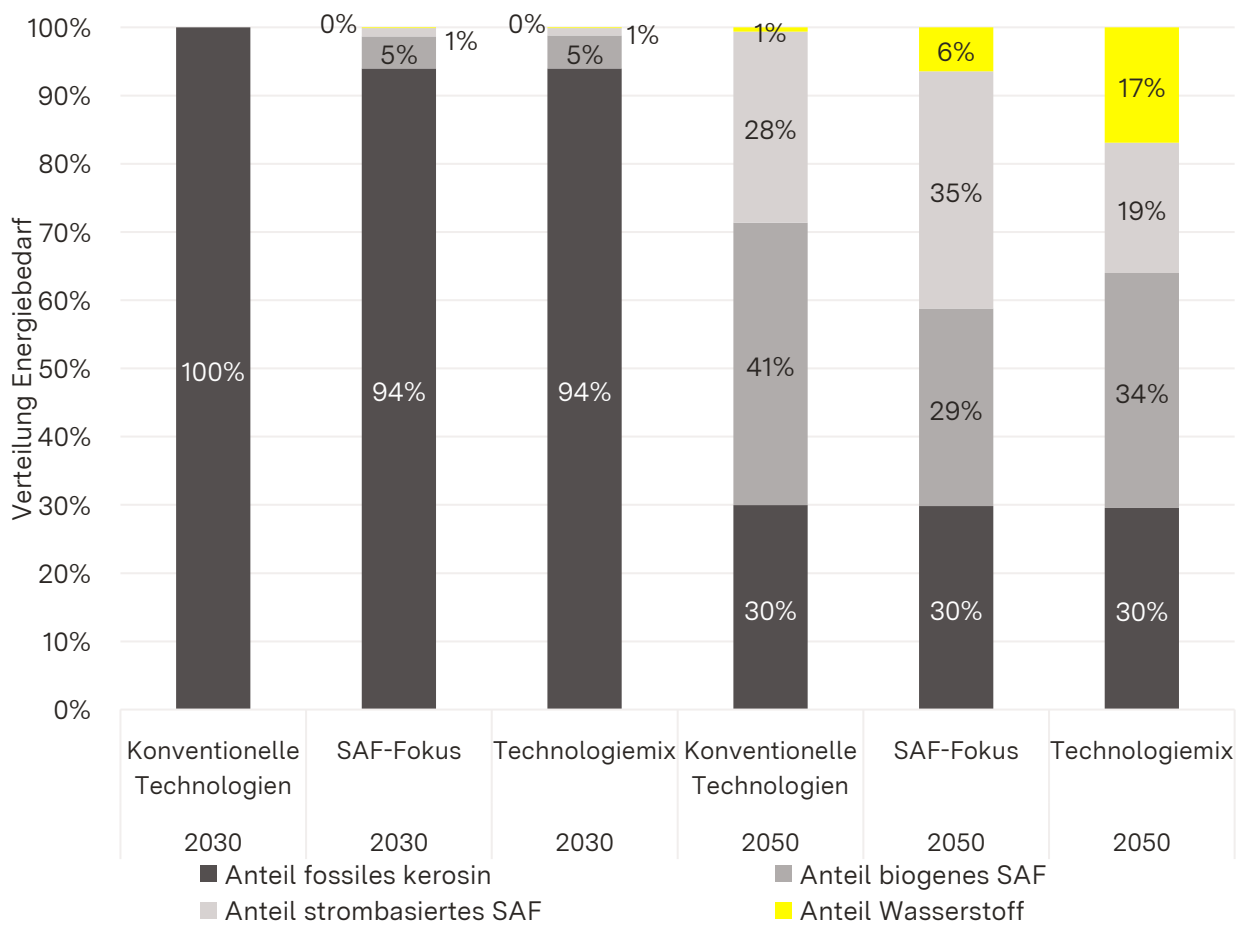


Abbildung 23: Gegenüberstellung der Kraftstoffverteilung in den drei Szenarien in den Jahren 2030 und 2050.

Im Vergleich der Szenarien „SAF-Fokus“ und „Technologiemix“ im Jahr 2050 werden die unterschiedlichen Effekte der Anrechnung von Wasserstoff auf die allgemeine SAF-Quote und



auf die PtL-Quote deutlich (vgl. Abbildung 23). Der Wasserstoffeinsatz kann mit den bestehenden Quoten auf Kosten des PtL-Einsatzes gefördert werden. Wasserstoff ist zwar auch effizienter in der Herstellung als PtL, strombasiertes SAF bietet aber hinsichtlich Emissionen und Rohstoffnutzung Vorteile gegenüber biogenem SAF. Die Anrechnung von Wasserstoff auf die Quote für strombasiertes SAF erscheint dennoch sinnvoll, um den Wasserstoffhochlauf zu unterstützen. Langfristig sollte jedoch sichergestellt werden, dass biogenes SAF durch strombasiertes SAF und Wasserstoff ersetzt wird.

5.2.2 Emissionen

Der Einsatz von biogenem und strombasierten SAF führt je nach Szenario im Jahr 2050 zu Emissionsreduktionen von 440.000 t („Konventionelle Technologien“) bis 520.000 t („SAF-Fokus“), gemessen am CO₂-Äquivalent. Die Nutzung von Wasserstoff ermöglicht im Jahr 2050 Einsparungen von über 4.000 t („Konventionelle Technologien“) bis über 175.000 t („Technologiemix“). Da den Szenarien unterschiedliche Annahmen zum Verkehrswachstum zu Grunde liegen, ermöglichen die relativen Angaben einen klareren Vergleich der Folgen der Kraftstoffkombinationen zwischen den Szenarien; Biogenes und strombasiertes SAF führen zu einer Reduktion von 42 Prozent („Technologiemix“) bis 55 Prozent („Konventionelle Technologien“) und Wasserstoff zu einer weiteren Reduktion von 1 Prozent („Konventionelle Technologien“) bis 15 Prozent („Technologiemix“).



„Konventionelle Technologien“: Emissionen sinken ab 2030 bis 2050 um über 60 Prozent verglichen mit 2024

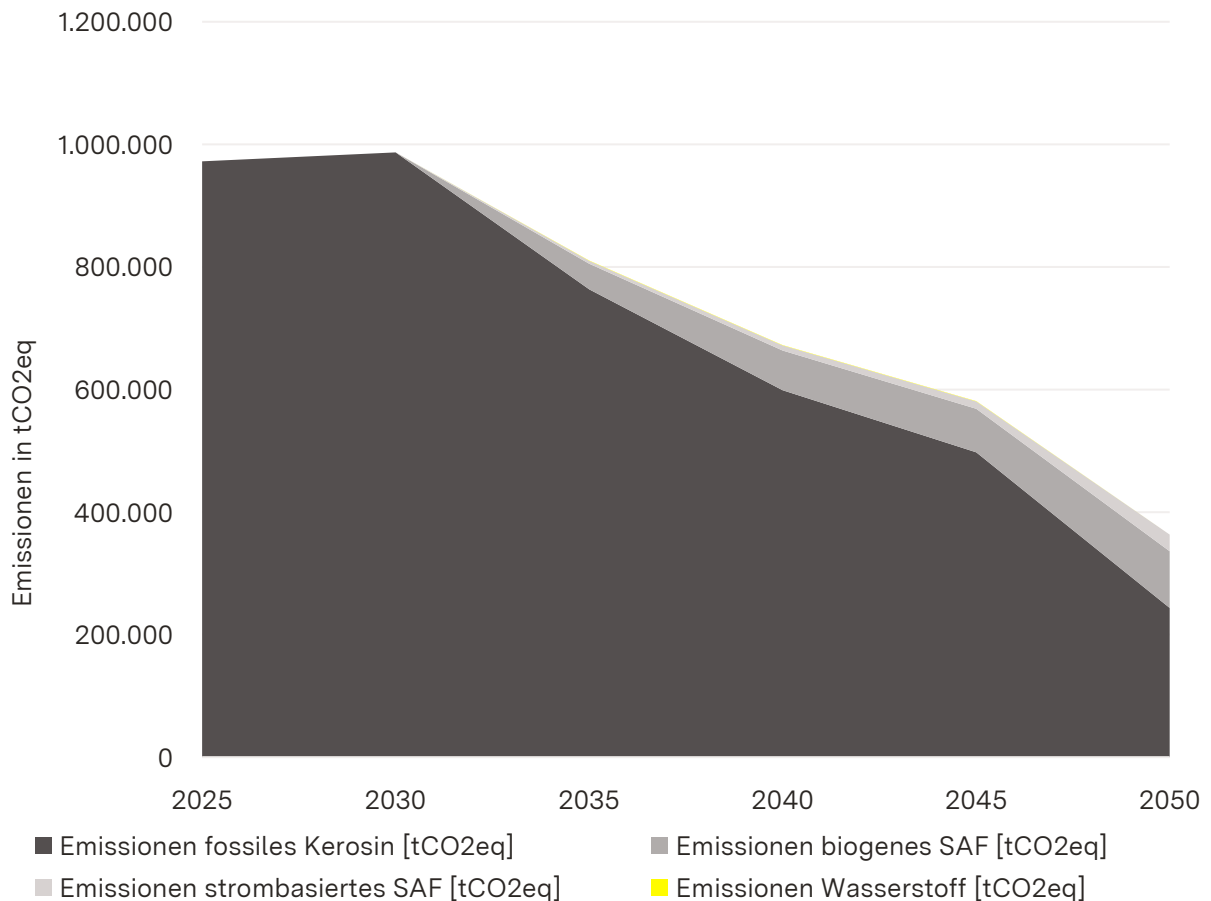


Abbildung 24: Emissionen aus den verschiedenen Energieträgern in Millionen MJ im Szenario „Konventionelle Technologien“

Im Szenario „Konventionelle Technologien“ wird mit rund 360.000 t CO₂eq die geringste Emissionsmenge erreicht. Dies ist nicht auf den Einsatz nachhaltiger Kraftstoffe, sondern viel mehr auf das geringere Luftverkehrswachstum verglichen mit den anderen Szenarien zurückzuführen. Die gesteigerte Effizienz in Verbindung mit dem geringen Wachstum würde ohne den Einsatz von nachhaltigen Kraftstoffen bereits zu einer Emissionsreduktion von 150.000 t CO₂eq führen. Der Einsatz nachhaltiger Kraftstoffe führt im Jahr 2050 zu einer Emissionsreduktion um 55 Prozent, was knapp 450.000 t CO₂eq entspricht. Es entstehen dann knapp 70 Prozent der Emissionen durch die Verbrennung von fossilem Kerosin, obwohl nur noch knapp 30 Prozent des Energiebedarfes durch fossiles Kerosin gedeckt wird. Knapp



55 Prozent der Emissionsreduktion entsteht im Jahr 2050 durch die Verwendung von biogenem SAF. Wasserstoff ist durch die geringe Menge trotz des niedrigen Emissionswertes für nur knapp 1 Prozent der Reduktion im Jahr 2050 verantwortlich und somit praktisch nicht relevant.

„SAF-Fokus“: Emissionsreduktion von rund 55 Prozent bis zum Jahr 2050 trotz nahezu gleichbleibenden Energiebedarfes

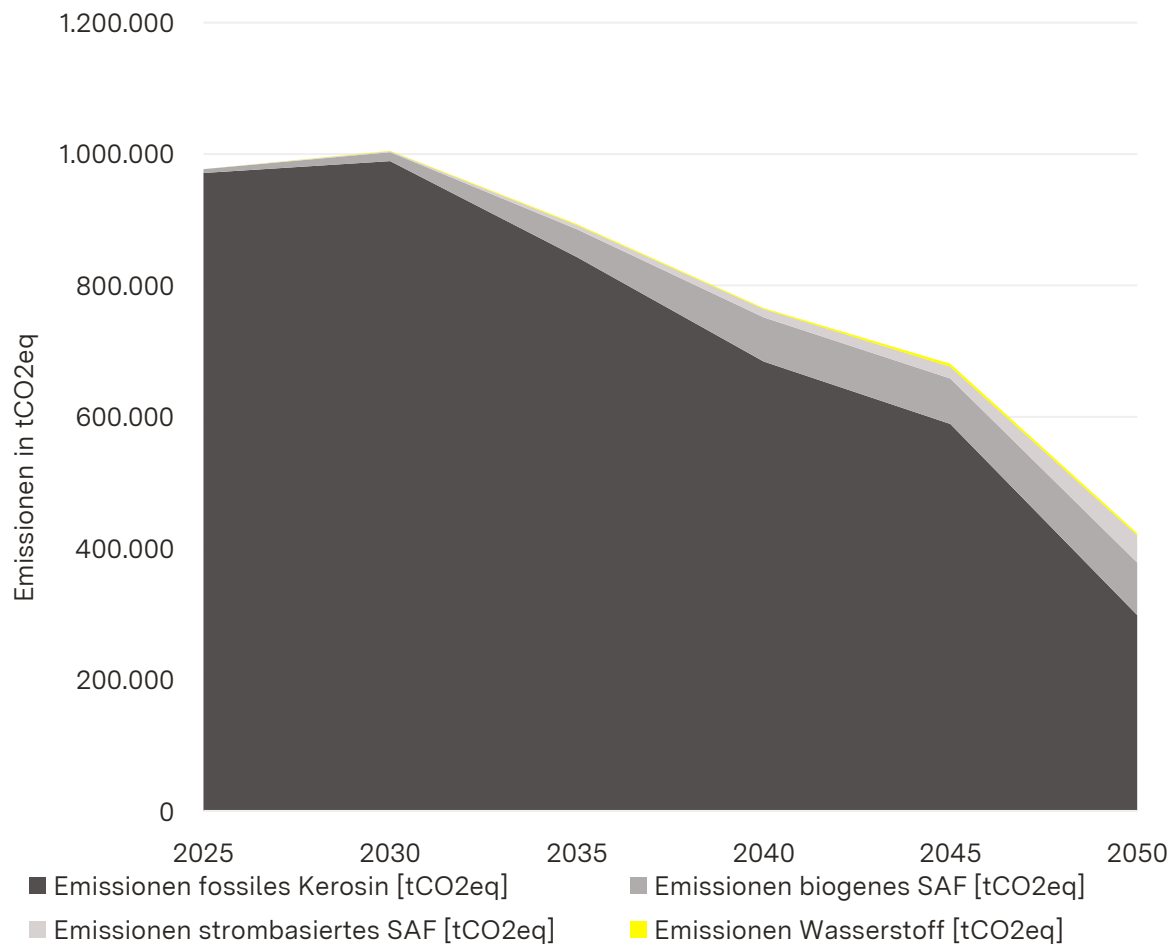


Abbildung 25: Emissionen aus den verschiedenen Energieträgern in Millionen MJ im Szenario „SAF-Fokus“

Im „SAF-Fokus“-Szenario werden die Emissionsreduktionen zunächst durch den Einsatz von biogenem SAF getrieben. Mit steigenden Anteilen strombasierten SAFs können die Reduktionen auch durch den geringen Emissionswert weiter erhöht werden, sodass die Gesamtemissionen fallen. Durch den Einsatz von Wasserstoff können etwa 55.000 tCO₂ im Jahr 2050 eingespart werden, was rund 5 Prozent der Emissionsreduktionen durch nachhaltige Kraftstoffe entspricht.

„Technologiemix“: Positive Klimawirkung von grünem Wasserstoff wird erkennbar

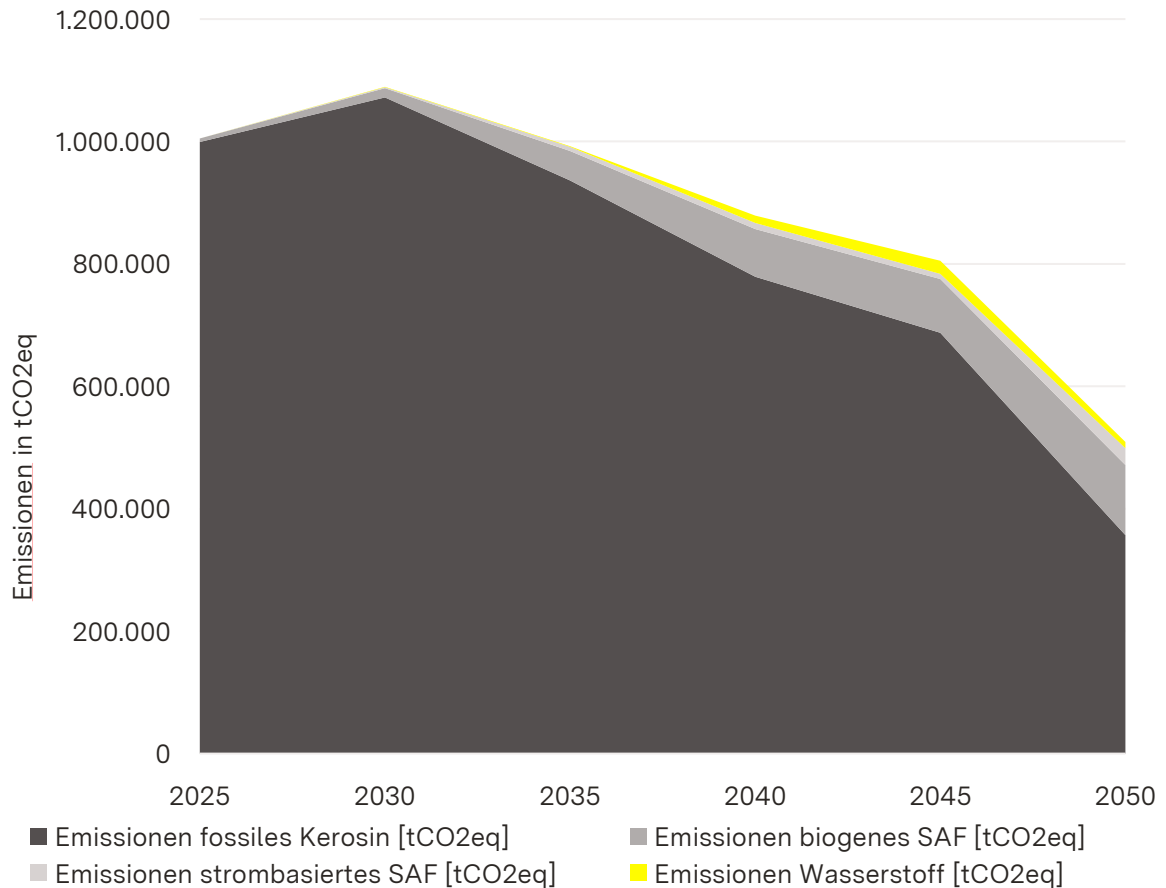


Abbildung 26: Emissionen aus den verschiedenen Energieträgern in Millionen MJ im Szenario „Technologiemix“

Durch das stärker steigende Verkehrsaufkommen im ambitionierten „Technologiemix“-Szenario sinken die absoluten Emissionen von 2024 bis 2050 nur um knapp 50 Prozent. Die Nutzung von SAF und Wasserstoff ermöglicht dabei im Jahr 2050 eine Emissionsreduktion von 57 Prozent gegenüber der Verwendung von rein fossilem Kerosin. Der abnehmende Anteil von grauem Wasserstoff am gesamten Wasserstoffverbrauch führt zu stetig wachsenden Emissionsreduktionen bei der Wasserstoffnutzung. Im Jahr 2050 wird angenommen, dass es sich ausschließlich um grünen Wasserstoff handelt. Dabei deckt dieser knapp 17 Prozent des Energiebedarfes und ermöglicht so eine Emissionsreduktion von knapp 15 Prozent. Da zu diesem Zeitpunkt angenommen wird, dass Wasserstoffflugzeuge etwas mehr Energie benötigen als



konventionelle Flugzeuge, spiegelt sich das Potential des grünen Wasserstoffs noch nicht vollständig wider.

Unterschiedliche Effekte auf das Klima werden in den Szenarien erst später deutlich

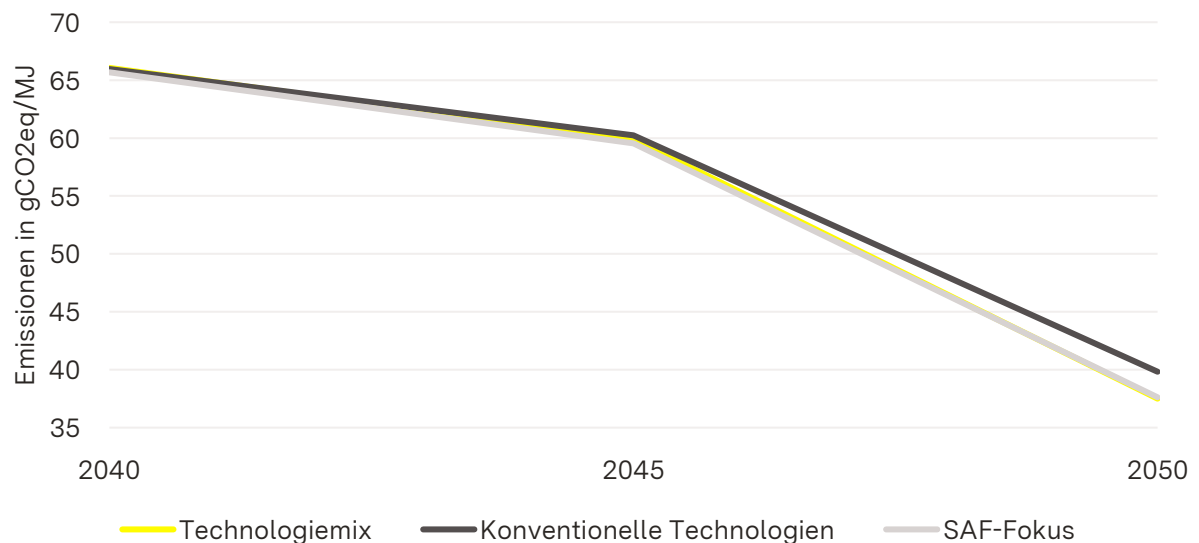


Abbildung 27: Emissionswerte in Tonnen des CO₂-Äquivalents der verschiedenen Szenarien für die Jahre 2040 bis 2050. Entsprechend der Anteile der verschiedenen Energieträger (fossiles Kerosin, SAF und Wasserstoff) am gesamten Energiebedarf, wurden ein Emissionswert (CO₂-Äquivalent) pro MJ berechnet. Zum Vergleich: Der Emissionswert von rein fossilem Kerosin beträgt 89 gCO₂eq/MJ.

Auch wenn man die gesamten Emissionen der Szenarien unabhängig vom Verkehrsaufkommen und stattdessen bezogen auf die Energiemenge betrachtet, unterscheiden sich die Szenarien ab dem verzögerten SAF-Einsatz im Szenario „Konventionelle Technologien“ im Jahr 2035 erst 2045 wieder erkennbar (vgl. Abbildung 27). Grund dafür ist zum einen, dass auch in diesem Szenario die SAF-Quoten nahezu vollständig erreicht werden. Zum anderen wird im Szenario „SAF-Fokus“ erst ab 2045 mehr strombasiertes SAF als biogenes SAF verwendet und im Szenario „Technologiemix“ wird Wasserstoff erst ab 2045 wirklich relevant. Obwohl die Emissionen bezogen auf die bereitgestellte Energiemenge in den Szenarien „SAF-Fokus“ und „Technologiemix“ im Jahr 2050 gleich hoch sind, deutet sich bereits an, dass in den folgenden Jahren im „Technologiemix“ die niedrigsten Emissionen pro bereitgestelltem MJ erreicht werden können.



5.3. Einordnung und Vergleich mit bestehenden Studien

Vergleichbare Analysen zu den zukünftigen Bedarfen von SAF und Wasserstoff sind bereits von anderen Organisationen durchgeführt worden. Dabei wurden jedoch keine Betrachtungen spezifisch für den Flugverkehr in Baden-Württemberg durchgeführt, sondern beispielweise für Europa oder weltweit.

Der Anteil von Wasserstoff in der Luftfahrt im Jahr 2050 schwankt in bestehenden Analysen sehr; die Ergebnisse dieser Studie befinden sich im Mittelfeld

So wird in *Analysing the Costs of Hydrogen Aircraft* (Steer, 2023) [86] ermittelt, dass im Jahr 2050 rund 65 Prozent der Passagierkilometer im innereuropäischen Flugverkehr mit Wasserstoffflugzeugen durchgeführt werden bei einem Markteintritt von diesen Flugzeugen im Jahr 2035. In *Market Uptake and Impact of Key Green Aviation Technologies* (Europäische Kommission, 2022) [55] beträgt der Anteil von Wasserstoff- und elektrischen Flugzeugen an allen Starts in diesem Segment sogar 71 Prozent und in Stuttgart werden rund 72 Prozent der Flüge mit Wasserstoff durchgeführt. Dabei ist zu beachten, dass diese Studien im Jahr 2023 bzw. 2022 veröffentlicht wurden. Es ist davon auszugehen, dass die für die Wasserstoffnutzung notwendigen Entwicklungen in den letzten Jahren deutlich langsamer voran gegangen sind als zuvor erwartet. So wird in *Market Uptake and Impact of Key Green Aviation Technologies* (Europäische Kommission, 2022) [55] angenommen, dass bereits im Jahr 2035 Wasserstoffflugzeuge mit einer Passagierkapazität von bis zu 250 Sitzen auf dem Markt sind, während in den hier abgeleiteten Szenarien der Markteintritt für deutlich kleinere Flugzeuge (Passagierkapazität ~150) zwischen 2038 und 2045 liegt.

Im Jahr 2024 wurden von Eurocontrol bereits deutlich reduzierte Zahlen veröffentlicht. So schwankt der Anteil der Wasserstoff- und elektrischen Passagierflugzeuge in Europa in diesen Szenarien zwischen 1,7 Prozent und 8,3 Prozent [75]. Der Markteintritt kleinerer Flugzeuge liegt dann zwischen 2025 und 2040, der für größere Flugzeug zwischen 2035 und 2045 [75] und damit in einem ähnlichen Zeitrahmen verglichen mit den vorliegenden Szenarien. Die von Airbus kommunizierten Verschiebungen der Markteintritte der ZEROe Flugzeuge (vgl. Kapitel 3.2) ist in der Eurocontrol-Studie noch nicht berücksichtigt. Der Anteil der Langstrecken, auf denen ein Wasserstoffeinsatz nicht möglich ist, ist allerdings deutlich höher als in Baden-Württemberg. So werden im Jahr 2050 knapp 8 Prozent der Flüge länger als 4.000 km sein



[75], während in Baden-Württemberg nicht mal 1 Prozent der Flüge länger als 3.500 km ist (vgl. Kapitel 4.1).

Eine Modellierung des zukünftigen Energieverbrauchs nach Kraftstoff für Flüge in der Europäischen Union ist mit der Analyse- und Modellierungsanwendung „Cascade“ von Boeing möglich. Dieses zeigt einen Marktanteil von Wasserstoff für mittlere und größere Flugzeuge nur in einem ambitionierten Szenario mit einer jährlichen Wachstumsrate von 2,5 Prozent, welche etwas höher ist als die in den vorliegenden Szenarien angenommene Wachstumsraten von durchschnittlich etwa 0,8 Prozent bis 2,3 Prozent pro Jahr. Dieser beträgt dann im Jahr 2050 40 Prozent bei einem Markteintritt im Jahr 2039. Regionalflugzeuge mit einem Wasserstoffantrieb können in einem ambitionierten und einem moderaten Szenario ab den Jahren 2037 bzw. 2042 auf den Markt kommen und der Wasserstoffanteil beträgt im Jahr 2050 dann 36 Prozent bzw. 14 Prozent. [88]



6. Infrastrukturanforderungen

Während für SAF aufgrund ihrer Drop-in-Fähigkeit keine oder nur minimale Infrastrukturanpassungen an den Flughäfen notwendig sind, erfordert die Nutzung des im Luftverkehr neuen Kraftstoffs Wasserstoff eine komplett neue Infrastruktur, die parallel zur bestehenden Infrastruktur für konventionellen Kraftstoff aufgebaut werden muss. Neben infrastrukturellen und operationellen Anpassungen an den Flughäfen müssen auch die Verteilnetzwerke zum Transport an die Flughäfen neu aufgebaut bzw. wesentlich erweitert werden. Hinzu kommen umfangreiche zusätzliche Anforderungen an Sicherheit und Brandschutz für das hochentzündliche Gas Wasserstoff in einem besonders sicherheitsrelevanten Umfeld.

6.1. SAF

Die Produktion von SAF befindet sich sowohl in Europa als auch weltweit noch im Hochlauf. Während es für biogenes SAF erste große Produktionsanlagen gibt, wird strombasiertes SAF derzeit meist nur in kleinerem Maßstab hergestellt. Aufgrund der chemischen Ähnlichkeit zu fossilem Kerosin kann auch der SAF-Transport ähnlich organisiert werden. Dabei ist jedoch auf möglichst emissionsarme Transportwege zu achten, sodass die potentiell höheren Emissionen durch längere Transporte nicht die Emissionseinsparungen des Kraftstoffs übersteigen.

Für biogenes SAF gibt es bereits kommerzielle Produktionsanlagen; die Herstellung von strombasiertem SAF befindet sich im Forschungsmaßstab

SAF wird in Europa derzeit in 19 Anlagen produziert, davon befinden sich drei in Deutschland (Stand: Mai 2024). Dabei wird mit knapp 1 Million Tonnen im Jahr 2024 in der EU hauptsächlich SAF biogenen Ursprungs nach dem HEFA-Verfahren oder im sogenannten Co-Processing-Verfahren hergestellt (vgl. Kapitel 3.1). Zu den großen und etablierten Lieferanten von biogenem SAF gehören Neste, Air bp und Total Energies. Strombasiertes SAF wird bislang nur in Forschungs- und Demonstrationsanlagen produziert. Das DLR entwickelt alternative und nachhaltige Flugkraftstoffe und begann im Herbst 2024 mit dem Bau der staatlich geförderten „Technologieplattform für PtL-Kraftstoffe“. Das Unternehmen Concrete Chemicals plant ab 2028 in einer Anlage bei Berlin jährlich etwa 0,03 Millionen Tonnen strombasiertes SAF herzustellen [89]. [3]



Das Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg fördert verschiedene Projekte zur Produktion von PtL-Kerosin, u.a. ein weiteres Projekt des DLR zur beschleunigten Einführung klimafreundlicher SAF durch PreScreening. Das vorhandene Verfahren soll durch den Aufbau einer Online-Plattform (Dashboard) die Zusammenarbeit mit Industrie und Herstellern fördern sowie um eine PreScreening-Analyse zur Vorhersage von Gefrierpunkt und Viskosität des Kerosins ergänzt werden. [90]

In Zusammenarbeit mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) werden die Möglichkeiten der Mineralölraffinerie Oberrhein (MiRO), umweltfreundlicher und nachhaltiger zu werden, untersucht. Die MiRO ist die einzige Raffinerie Baden-Württembergs. Teil des Projektes ist die Vorbereitung einer Produktionsinfrastruktur für strombasiertes Kerosin und Koppelprodukte für die Verarbeitung, Produktion, Qualitätssicherung und Logistik am Beispiel der MiRO. Ziel ist die zur Standortsicherung notwendige Verschiebung des Produktportfolios der MiRO auf erneuerbares Kerosin für die Luftfahrt, erneuerbarem Diesel für den Schiffsverkehr und erneuerbaren Olefinen für die chemische Industrie.

Das Projekt "Konzept klimaneutralerer Luftverkehr" des Ministeriums für Verkehr Baden-Württemberg zielt darauf ab, die ambitionierten Klimaziele des Landes durch einen innovativen Ansatz zu unterstützen. In Planung ist eine Industrieallianz, die regionale Akteure mobilisieren soll, um freiwillige SAF-Abnahmekoten zu fördern, die über die EU-Vorgaben hinausgehen. Der konzeptionelle Ansatz sieht vor, durch Kampagnen und transparente Kommunikation das Bewusstsein für die Vorteile von SAF zu stärken und die CO₂-Bilanz des Luftverkehrs langfristig zu verbessern.

Der Transport von SAF ist unkompliziert, sollte aber die Emissionseinsparungen von SAF verglichen mit fossilem Kerosin nicht ausgleichen oder gar übersteigen

Grundsätzlich müssen für den Transport von SAF keine neuen Voraussetzungen geschaffen werden als für den Transport von fossilem Kerosin. Da es weniger SAF-Produktionsstandorte gibt, sind jedoch je nach Standort meist längere Transportwege notwendig, die die klimaschonende Wirkung reduzieren, insbesondere wenn der Transport per Tanklastwagen mit Antrieb durch fossile Kraftstoffe stattfindet.



Für den Transport von Kraftstoff in der EU gibt es verschiedene Möglichkeiten, die von der Lage der einzelnen Flughäfen abhängen. So wird z. B. der Kraftstoff für den Flughafen auf der Insel Malta, auf der es keine Raffinerie für Kerosin gibt, per Schiff zur Insel und anschließend per Pipeline zum Flughafen transportiert. Das Lager des Flughafen Wien wird per Pipeline von einer Raffinerie versorgt. Zu dieser können andere Produzenten ihren Kraftstoff mit dem Zug anliefern, sodass anschließend ebenfalls die Pipeline zum Flughafen genutzt werden kann. Bei einem gut angebundenen Flughafen wie Amsterdam werden nur kleine Mengen per Lastkraftwagen zum Tanklager des Flughafens geliefert. Größere Mengen Kraftstoff können per Pipeline aus Lagern am Hafen Amsterdam oder Rotterdam geliefert werden, die wiederum direkt von einer Raffinerie beliefert werden. Aus Rotterdam erfolgt die Anbindung mittels des Central Europe Pipeline Systems (CEPS). Am Flughafen selbst erfolgt der Transport vom Lager zur Betankung am Flughafen mittels Tankwagen oder über ein lokales Pipeline System. [91]

SAF kann auch über das bestehende CEPS (gemischt mit fossilem Kerosin) transportiert werden. Das CEPS ist ein grenzüberschreitendes Kraftstoff-Pipelinennetz in Belgien, Frankreich, Deutschland, Luxemburg und den Niederlanden, das zur Versorgung von Flughäfen mit Flugkraftstoff genutzt wird. Es verbindet For-sur-Mer und Istres in Südfrankreich mit Städten und Flughäfen in Nord-Ost-Frankreich und in den Niederlanden wie Rotterdam und dem Flughafen Schiphol bis nach Bremen, sowie weitere Städte in West- und Süddeutschland wie z. B. Köln und Frankfurt. Das System geht über Luxemburg bis nach München in Deutschland. Das CEPS stellt den sichersten, kostengünstigsten und nachhaltigsten Transportweg für SAF dar. Für dieses System gelten die Massenbilanzregeln der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED), und künftig soll CEPS in die Unionsdatenbank (UDB) eingebunden werden, um den Einsatz von SAF im Rahmen der RED und der ReFuelEU Aviation Verordnung nachvollziehbar zu machen [91]. Allerdings sind die Flughäfen und -plätze Baden-Württembergs nicht mit dem Pipeline System verbunden und werden mittels Lastkraftwagen beliefert. [1] [92]

Kraftstofflagerung und Betankung sind an Flughäfen in BW unterschiedlich organisiert

Die Flughäfen Friedrichshafen und Karlsruhe / Baden-Baden arbeiten in Bezug auf die Betankung als Agentur von Air bp. Die Airlines schließen Verträge für die Lieferung von Kraftstoff mit Air bp. Die Betankung wird von den Flughäfen im Auftrag von Air bp durchgeführt. Der



Kraftstoff wird von Air bp per Lastkraftwagen geliefert und am Flughafen gelagert. Am Flughafen Stuttgart sind die Unternehmen Skytanking und Menzies für die Betankung der Flugzeuge zuständig. Die Airlines können bei unterschiedlichen Kraftstoffanbietern bestellen und schließen die Einkaufsverträge mit diesen ab. Im Jahr 2019 wurden die Pläne zur Anbindung des Flughafens Stuttgart an das CEPS vorerst eingestellt [93]. Hauptgrund war das Scheitern, die notwendigen Durchleitungsrechte für die geplante Pipeline-Trasse zu sichern [93]. Der Flughafen Stuttgart hatte beabsichtigt, eine etwa 19 Kilometer lange unterirdische Leitung vom CEPS-Anschluss bei Oberboihingen zum Flughafen zu verlegen [93]. Die Kraftstoffversorgung des Flughafen Stuttgarts findet nun weiterhin mit Lastkraftwagen statt.

Die Flughäfen im Land sind also nur sehr begrenzt und in unterschiedlicher Weise für die Beschaffung, Lagerung und Vertankung von SAF zuständig. Unterstützungsmaßnahmen können dennoch auch lokal realisierbar sein (vgl. Kapitel 7.3), erfordern dann aber je nach Gestaltung eine engere Abstimmung zwischen dem Flughafen und ihren Partnern für die Kraftstoffbeschaffung und -vertankung.

Wenn höhere als die vorgeschriebenen SAF-Quoten an den Flughäfen vertankt werden sollen, sind nach Einschätzung der Flughäfen dafür eigene Tanks erforderlich, die neu installiert werden müssten.

6.2. H₂-Produktion und Lieferkette

Langfristig sollte in der Luftfahrt grüner Wasserstoff verwendet werden, um die geringsten Emissionen zu erreichen, auch wenn in einer Übergangsphase die Verwendung anderer Wasserstoffe sinnvoll sein kann. Die Herstellung von grünem Wasserstoff hängt entscheidend von der Verfügbarkeit nachhaltiger Stromquellen und geeigneter Elektrolyseure ab. Für den Transport des gasförmigen Wasserstoffs soll zukünftig ein Pipeline-System aufgebaut und genutzt werden. Flüssiger Wasserstoff hingegen eignet sich nicht für den Transport über längere Strecken in Pipelines und muss daher per Schiff, Lastkraftwagen oder Bahn transportiert werden.

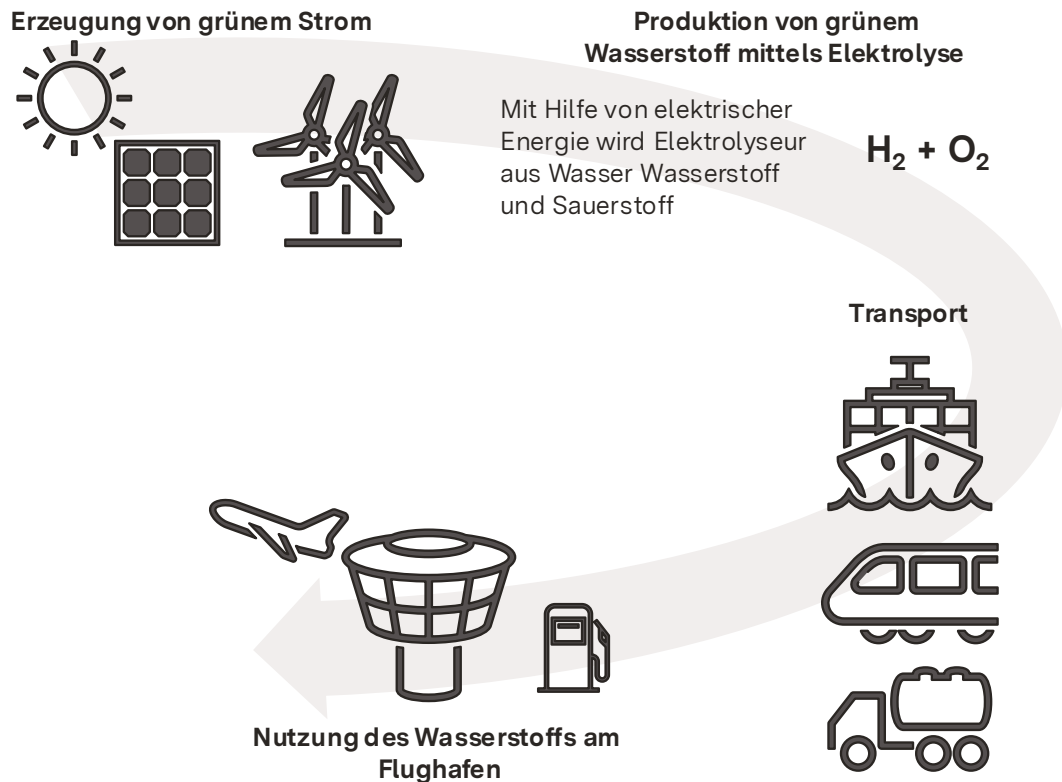


Abbildung 28: Die Herstellung grünen Wasserstoffs beginnt mit der Erzeugung von grünem Strom. Dieser wird in der Elektrolyse von Wasser benötigt, um so Wasserstoff herzustellen. Anschließend findet der Transport mittels Schiffs, Lastkraftwagen und Bahn zum Flughafen statt. Darstellung nach [163]

Die Produktion von grünem Wasserstoff unterliegt keinen Rohstofflimitierungen; entscheidend ist die Verfügbarkeit von grünem Strom und Elektrolyseuren

Die Herstellung von grünem Wasserstoff mittels Elektrolyse aus Wasser erfordert große Mengen erneuerbarer, elektrischer Energie. Für ein Kilogramm Wasserstoff werden –je nach Effizienz der verwendeten Technologie – etwa 40 bis 80 kWh (Kilo Wattstunden) benötigt [94]. Die Kosten für erneuerbaren Strom sind in den letzten Jahren gesunken und es wird erwartet, dass sich dieser Trend fortsetzt. Dennoch ist die Wasserstoffherzeugung dort am kosteneffizientesten, wo ein Überfluss an erneuerbarem Strom zur Verfügung steht. In Europa ist dies insbesondere in Gebieten nahe der Nordsee durch die Nutzung von Windenergie der Fall sowie



in südlichen Regionen durch die Nutzung von Solarenergie. Hierbei ist die Produktion in Nordafrika sogar noch günstiger als in Südeuropa [86]. Das Land Baden-Württemberg arbeitet mit Andalusien zusammen, um die Produktion von grünem Wasserstoff und regenerativen Kraftstoffen zu fördern [95]. Neben der Verfügbarkeit von grünem Strom ist auch die Elektrolysekapazität entscheidend. Diese wächst schnell. So ist im März 2025 in Ludwigshafen einer der größten Elektrolyseure in Deutschland in Betrieb genommen worden, der mit einer Kapazität von 54 MW (Mega Watt) bis zu 8.000 t Wasserstoff im Jahr produzieren kann [96]. Dabei ist jedoch zu beachten, dass der Luftverkehr mit der Industrie oder dem Straßenverkehr um Wasserstoff konkurrieren wird. Der Elektrolyseur in Ludwigshafen gehört BASF und der gewonnene Wasserstoff wird zur Herstellung von chemischen Produkten verwendet werden [96]. In Deutschland sollen bis 2030 Elektrolyseure mit einer Kapazität von insgesamt 10.000 MW zur Verfügung stehen. Darüber hinaus werden im Rahmen der Wasserstoffstrategie des Bundes verschiedene Importmöglichkeiten thematisiert. Baden-Württemberg verfolgt mit der Wasserstoff-Roadmap aus dem Jahr 2020, das Ziel die Wasserstoffverfügbarkeit im Land zu fördern. 2023 wurde der erste Fortschrittsbericht dazu veröffentlicht. [55] [86] [97] [98]

LH₂ Transport nur per Lastkraftwagen, Bahn oder Schiff – GH₂ kann auch in Pipelines transportiert werden

Wasserstoff kann sowohl in flüssiger als auch gasförmiger Form transportiert werden. Für den längeren Transport in Pipelines eignet sich ausschließlich GH₂. Hintergrund ist, dass die Kühlung, die für LH₂ erforderlich ist, in einem längeren Pipeline-System nicht effizient umgesetzt werden kann. Über kurze Strecken bis etwa 30 km kann LH₂ hingegen auch in Leitungen transportiert werden [99]. Für längere Strecken ist der Transport in Schiffen und Lastkraftwagen oder per Bahn notwendig. Aufgrund des geringeren Volumens, das durch die Verflüssigung erzielt wird, ist LH₂ häufig für den Transport in Schiffen vorteilhaft gegenüber GH₂. Da für die Verflüssigung jedoch ein Energieaufwand von bis zu 14 MJ/kg notwendig ist [100], muss für Transportstrecken im Einzelfall betrachtet werden, ob LH₂ tatsächlich dem GH₂ vorzuziehen ist. Eine Alternative kann häufig der Transport von verdichtetem GH₂ bei höherem Druck sein. [55] [86] [101]



GH₂ soll voraussichtlich ab 2030 über eine Pipeline in der Region Stuttgart zur Verfügung stehen – die Verfügbarkeit von LH₂ ist dadurch nicht garantiert

Da in den meisten Industrien anders als im Luftverkehr ohnehin GH₂ benötigt wird, ist der Ausbau eines Pipeline-Systems sinnvoll. Die European Hydrogen Backbone Initiative (EHB) hat das Ziel, eine nachhaltige Wasserstoffinfrastruktur in Europa aufzubauen. Mitglieder sind 33 europäische Netzbetreiber, deren Infrastruktur weite Teile Europas abdeckt. In verschiedenen Projekten wird so ein Pipeline-Netzwerk über Europa aufgebaut, dabei werden sowohl neue Pipelines gebaut als auch bestehende Erdgasleitungen wiederverwendet. Die Wiederverwendung bestehender Pipelines ermöglicht deutliche Kostenvorteile von etwa 70 Prozent. Das Pipeline-System verbindet die meisten westeuropäischen Länder, sowie Zentral- Nord- und Osteuropa. Es soll auch eine Anbindung an Nordafrika geben, um den Import aus diesen Ländern zu ermöglichen. [102]

In Baden-Württemberg plant der Netzbetreiber terranets bw den Ausbau eines Wasserstoffnetzwerks mit Anknüpfungspunkten an das EHB-System. So soll bereits ab 2030 Wasserstoff im Großraum Stuttgart, im Rhein-Neckar Gebiet und in der Oberrhein-Ebene zur Verfügung stehen. Bis 2040 soll das Pipeline-System der terranets bw Baden-Württemberg nahezu vollständig abdecken. [103]

6.3. H₂ an Flughäfen

Im Luftverkehr ist der Einsatz von flüssigem Wasserstoff erforderlich, da er sich aufgrund seiner hohen Energiedichte besser für die Nutzung in Flugzeugen eignet als das gasförmige Pendant (vgl. Kapitel 3.1).

Entscheidung zwischen GH₂- und LH₂- Anlieferung hängt vom Bedarf, Platz und Zugang zu klimaneutraler Energie ab

Es gibt mehrere Möglichkeiten, wie dieser Wasserstoff bereitgestellt und bis zur Vertankung am Flughafen gelagert werden kann:



1. **Lokale Produktion, Verflüssigung und Speicherung bis zur Vertankung am Flughafen:** Diese Option würde eine vollständige Infrastruktur erfordern, um Wasserstoff direkt am Flughafen zu produzieren, zu verflüssigen und bis zur Nutzung zu speichern.
2. **GH₂-Anlieferung per Pipeline, Verflüssigung und Speicherung bis zur Vertankung am Flughafen:** Hierbei wird gasförmiger Wasserstoff über Pipelines zum Flughafen transportiert, dort in flüssige Form umgewandelt und bis zur Vertankung gelagert. Diese Variante ist realistisch für größere Flughäfen, die einen hohen Wasserstoffbedarf haben und entsprechende Infrastruktur bereitstellen können.
3. **LH₂-Anlieferung per LKW oder Zug und Speicherung bis zur Vertankung am Flughafen:** Bei dieser Möglichkeit wird flüssiger Wasserstoff mit Lastkraftwagen zum Flughafen geliefert und dort bis zur Nutzung gespeichert. Diese Option ist praktisch für kleinere Flughäfen oder solche mit einem geringeren Wasserstoffbedarf, da sie weniger infrastrukturelle Anforderungen stellt.

Aufgrund der hohen Investitions- und Infrastrukturanforderungen, der hohen Standortkosten sowie der begrenzten Platzverhältnisse an vielen Flughäfen ist die erste Option meist nicht realisierbar. Die zweite Variante eignet sich für größere Flughäfen mit hohem Wasserstoffbedarf und Platzverfügbarkeit, da sie die erforderliche Infrastruktur bereitstellen können und der hohe Wasserstoffverbrauch die Anzahl der notwendigen LKW-Lieferungen ineffizient machen könnte. Dies wird dadurch verstärkt, dass die Lieferung von LH₂ ein etwa viermal größeres Volumen für den Transport erfordert als eine Lieferung fossilen Kerosins mit demselben Energiegehalt (vgl. Kapitel 3.1). Darüber hinaus muss berücksichtigt werden, dass für eine Anlage zur Verflüssigung von Wasserstoff am Flughafen die entsprechende Fläche und zum Betrieb benötigte erneuerbare Energie zur Verfügung stehen muss. Kleinere Flughäfen oder solche mit einem geringeren Bedarf oder wenig Platz profitieren eher von der Lieferung von LH₂ per Lastkraftwagen. Grundsätzlich ist auch der Transport von flüssigem Wasserstoff per Zug denkbar [104], das bestätigt auch der Flughafen München [105]. Die technische und operationelle Machbarkeit des Gefahrgut-Transports per Zug müsste in Stuttgart aufgrund der Tunnelanbindung geprüft werden und wird eher als unwahrscheinlich angesehen [55] [86]



Flughäfen, die Wasserstoff anbieten, benötigen mindestens einen Tank und die entsprechende Betankungsinfrastruktur für LH₂

Wenn Flughäfen Wasserstoff anbieten, müssen diese mindestens einen Speicher für flüssigen Wasserstoff und eine Betankungsinfrastruktur zur Verfügung stellen. Flüssiger Wasserstoff muss in speziellen isolierten Tanks bei -253 Grad Celsius gelagert werden (vgl. Kapitel 3.1). Die effizienteste Form für diese Tanks ist eine Kugel, was allerdings mehr Platz benötigt als ein zylindrischer Tank, wie er für konventionellen Kraftstoff und SAF üblich ist. Auch bei korrekter Speicherung werden kleinere Teile des flüssigen Wasserstoffs verdampfen und müssen aus dem Tank abgelassen werden. Nach aktuellem technischem Stand können diese Verdampfungsraten auf weniger als 1 Prozent pro Tag reduziert werden. [55] [99]

Zur Betankung der Flugzeuge mit herkömmlichem Kerosin werden aktuell entweder Tankkraftwagen verwendet oder die Stellplätze der Flugzeuge sind mit Leitungen und einem Verteilersystem ausgestattet. Am Flughafen Stuttgart werden Tankwagen eingesetzt. Diese können für Wasserstoff nicht verwendet werden, sodass entweder eigene kurze Pipelines am Flughafen gebaut werden müssen oder spezielle Tankkraftwagen für Wasserstoff verwendet werden müssen. Die Betankung über spezielle Tankkraftwagen ermöglicht hohe Flexibilität und geringere Investitionskosten. Ein LH₂-Pipeline System am Flughafen kann vorteilhaft sein, wenn große Mengen Wasserstoff ab etwa 125.000 t pro Jahr am Flughafen vertankt werden, während ein Verflüssigungsanlage schon ab etwa 80.000 t pro Jahr wirtschaftlich sinnvoll sein kann [106]. [55] [99]

Weitere Anwendungen von Wasserstoff bzw. Brennstoffzellen mit Wasserstoff am Flughafen, z. B. in Vorfeldfahrzeugen, im Logistik-Bereich oder außerhalb des Flughafengeländes zum Vertrieb an öffentlich zugänglichen Tankstellen, werden in dieser Studie nicht genauer betrachtet, da dort gasförmiger und nicht flüssiger Wasserstoff verwendet werden würde.

6.4. Marktübersicht H₂

Während der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur für die Industrie durch Initiativen wie dem European Hydrogen Backbone bereits in Planung ist, wird der Umgang mit Wasserstoff an Flughäfen noch untersucht. Parallel verfolgt das Land Baden-Württemberg auch eigene Bemühungen, ausreichend Wasserstoff für Wirtschaft und Verkehr zur Verfügung zu stellen.



Wasserstoffverfügbarkeit an Flughäfen wird in verschiedenen Projekten gefördert

Die Verfügbarkeit von Wasserstoff an Flughäfen ist Voraussetzung für die Markteinführung von Wasserstoffflugzeugen. Airbus möchte mit seinem Programm „Hydrogen Hubs at Airports“ (deutsch: „Wasserstoffzentren an Flughäfen“) das notwendige Ökosystem aus Flughäfen, Fluggesellschaften, Wasserstoffproduzenten und -lieferanten stärken, um so die Nutzung von Wasserstoffflugzeugen zu ermöglichen. Es sind mittlerweile über 220 Flughäfen Teil der Initiative. [107] [108]

In Deutschland ist der Hamburger Flughafen Vorreiter und verfolgt Einsatzmöglichkeiten für Wasserstoff. Durch die Nähe zum Hamburger Hafen, der eine wichtige Rolle beim notwendigen Wasserstoffimport spielen wird, wird die Wasserstoffversorgung des Flughafens logistisch erleichtert. Am Flughafen wird im sogenannten „Hydrogen Aviation Lab“ ein ausgemustertes Airbus A320 der Lufthansa mit einem Tank für LH₂, Brennstoffzelle und Testsystemen ausgestattet. So sollen die Betankung, notwendige Kühlung, Sicherheit und der Umgang mit Gasleckagen untersucht werden. Das Projekt wird gemeinsam von Lufthansa Technik, dem DLR, dem ZAL (Zentrum für angewandte Luftfahrtforschung) und dem Hamburger Flughafen durchgeführt. [109]

Der Flughafen Hamburg und das DLR haben eine Roadmap zur Einführung von Wasserstoff an mittelgroßen Flughäfen entwickelt. Nach dieser ist ab den 2030er Jahren die Anlieferung von LH₂ per Lastkraftwagen notwendig und ab den 2040er Jahren wird ein Tanklager am Flughafen benötigt. Etwas später erfolgt der Anschluss für GH₂ per Pipeline analog mit dem Bau einer Verflüssigungsanlage. Zu beachten ist, dass diese Roadmap vor der angekündigten Verschiebung der Airbus Wasserstoffflugzeuge (vgl. Kapitel 3.2) entwickelt wurde. Es wurde dabei geschätzt, dass im Jahr 2050 der Anteil von Wasserstoffflügen bei bis zu 60 Prozent liegt. Schon eine Schätzung aus dem Jahr 2022 zeigt einen Wasserstoffbedarf in Hamburg, der mit dem 1,5- bis 2-fachen deutlich höher ist als in Stuttgart. Vergleicht man diese Schätzungen mit den Ergebnissen aus 5.2.1, die darunter liegen, wird deutlich, dass sich die Wasserstoffnutzung in Baden-Württemberg deutlich langsamer entwickelt als bei der Roadmap des Hamburger Flughafens. [110] [111]



Baden-Württemberg und Stuttgart verfolgen in eigenen Projekten das Ziel, Wasserstoff auch für die Luftfahrt und weitere Sektoren im Land zu ermöglichen

Mit der Plattform H2BW verfolgt das Land das Ziel, die Wasserstoffwirtschaft in Baden-Württemberg voranzutreiben. Ihr Fokus liegt sowohl auf der Anwendung von Wasserstoff als auch auf dessen Erzeugung, Speicherung und Verteilung. Zu ihren Aufgaben gehört es, über aktuelle Projekte zu informieren und Interessierte bei der Koordination von Ausschreibungen und Fördermöglichkeiten zu unterstützen. Ihre Aktivitäten sind sektorübergreifend. [112]

Das Land Baden-Württemberg kooperiert u.a. mit Andalusien und Katalonien im Bereich Klimaschutz und Energiesicherheit. Bei den verschiedenen Projekten soll es insbesondere um nachhaltige Kraftstoffe und die Produktion und Lieferung von grünem Wasserstoff gehen. [113]

Am Stuttgarter Hafen soll ab Ende 2026 grüner Wasserstoff hergestellt werden. Dazu ist mit dem Bau von drei Elektrolyseuren begonnen worden. Insgesamt sollen so bis zu 1.000 t Wasserstoff pro Jahr produziert werden können, die mit Lastkraftwagen oder per Pipeline zu den Abnehmern transportiert werden sollen. [114]

Der Flughafen Stuttgart beteiligt sich im Projekt GOLIAT, was sich auf die Handhabung von Wasserstoff am Boden konzentriert (vgl. Kapitel 3.2). Hier liegt der Fokus insbesondere auf der schnellen Betankung mit großen Mengen von LH2. Das Projekt wird für vier Jahre mit insgesamt 10,8 Millionen Euro aus dem EU-Programm Horizon Europe finanziert. Das Gesamtbudget beträgt rund 15,2 Millionen Euro [115]. Im Rahmen von GOLIAT wird eng mit dem AL-RIGH2T Projekt zusammengearbeitet, das die Entwicklung wirtschaftlicher und skalierbarer Methoden zur Nutzung von Wasserstoff am Flughafen zum Ziel hat. Der Fokus liegt hier auf der Lagerung und dem Transport. [116] [50]

6.5. Rahmenbedingungen an den Flughäfen und -plätzen in Baden-Württemberg

Grundsätzlich besteht in Baden-Württemberg und insbesondere in Stuttgart unter Betrachtung der Flugstrecken das Potential für die Nutzung von Wasserstoff (vgl. Kapitel 4, [99]). Die



Herausforderung besteht in dem Bereitstellen von flüssigem Wasserstoff und der zur Betankung notwendigen Infrastruktur. Der Umgang mit Wasserstoff am Flughafen und die schnelle Betankung des Flugzeuges werden in Projekten wie GOLIAT in Stuttgart oder dem Hydrogen Aviation Lab in Hamburg? untersucht und Standards entwickelt.

Die Nutzung von SAF ist im Vergleich deutlich einfacher und wird von den Flughäfen und -plätzen im Land weitestgehend als unkritisch hinsichtlich des Platzbedarfes und der Tankinfrastruktur eingeschätzt. Hier besteht zudem noch die Frage, ob mit einem Book-and-Claim-System (vgl. Kapitel 3.1) überhaupt ein physisches Angebot vor Ort erforderlich sein wird.

Insbesondere kleinere Flughäfen wie z. B. in Karlsruhe / Baden-Baden stehen vor der Herausforderung hoher Investitionskosten der Wasserstoffinfrastruktur, sowie aktuell noch häufig unklarer Bedarfe.

Bei einem Bedarf von 80.000 t bzw. 400.000 t Wasserstoff im Jahr werden die Investitionskosten einer Verflüssigungsanlage auf 341 Millionen US-Dollar bzw. 1.018 Millionen US-Dollar geschätzt [106]. Für die benötigten zehn bzw. 49 Lastkraftwagen werden 7 Millionen US-Dollar bzw. 32 Millionen US-Dollar angenommen [106].

LH₂-Lieferungen in die Region Stuttgart mittels Lastkraftwagen sind aktuell die praktikabelste Option

Während zukünftig die Versorgung mit GH₂ entlang des Wasserstoff-Kernetzes in Baden-Württemberg möglich sein wird (vgl. Kapitel 6.2) werden konkrete Importrouten für flüssigen Wasserstoff in die Region Stuttgart in [117] ausführlich untersucht. Der Import von flüssigem Wasserstoff könnte aus Rotterdam per Lastkraftwagen, Güterzug oder Schiff möglich sein. Der Energiebedarf wird per Zug am geringsten sein, allerdings werden beim Transport per Lastkraftwagen aufgrund der kürzeren Transportzeit weniger Container benötigt. Dieser wird bereits durchgeführt. Für den Transport von flüssigem Wasserstoff in Containern mit Schiffen und Güterzügen ist ein sicheres System im Umgang mit verdampfendem Wasserstoff Voraussetzung. Alternativ zu der Anlieferung von flüssigem Wasserstoff, ist auch die Lieferung gasförmigen Wasserstoffes und die anschließende Verflüssigung möglich. Der Transport von gasförmigem Wasserstoff ist aufgrund der Temperaturanforderungen einfacher, es wird dann allerdings eine Verflüssigungsanlage am Flughafen benötigt. [117]



LH₂-Lager und Betankungs-LKWs für Flughäfen im Land sind die kosteneffizienteste Lösung – zu Beginn ist die Lagerung in den Transport- und Betankungs-LKWs ausreichend

Unter Betrachtung der in den Szenarien ermittelten Bedarfe (vgl. Kapitel 5.2.1) ist auch im ambitionierten „Technologiemix“-Szenario die Errichtung einer eigenen Verflüssigungsanlage mit Betrieb im Jahr 2050 nicht wirtschaftlich. Dies gilt sogar, wenn alle Bedarfe in Baden-Württemberg zusammengerechnet werden und nicht die einzelnen Flughäfen und -plätze betrachtet werden. Eine Ausnahme könnte bestehen, wenn mit der Verflüssigungsanlage auch Bedarfe aus dem Umland gedeckt werden und ausreichend erneuerbare Energie zur Verfügung steht. Aktuell scheint dieses Szenario in Stuttgart aufgrund der Platzrestriktionen unrealistisch. Zudem sind keine großen Bedarfe an LH₂ von weiteren Stakeholdern in der Region bekannt. Die geplante GH₂-Pipeline-Anbindung könnte demnach zur Bedarfsdeckung in der Region (ausgenommen Flughafen STR) ausreichen, da GH₂ in den meisten Anwendungen genutzt werden kann. Um eine Verflüssigungsanlage in der Region Stuttgart im Jahr 2050 wirtschaftlich betreiben zu können, ist es notwendig, dass es weitere LH₂-Abnehmer gibt.

In Friedrichshafen gibt es noch keine konkreten Pläne, aber die Wasserstoffherzeugung wird in ersten Überlegungen mit berücksichtigt [118]. Die Anschaffung eines Pipeline-Verteilungssystems für LH₂ am Flughafen ist an keinem der Flughäfen einem Wasserstoffbetankungssystem mit Tankkraftwagen vorzuziehen.

Für kleine Regionalflugplätze und zu Beginn der Hochlaufphase, kann es sinnvoll sein, ein eigenes LH₂-Tanklager zu umgehen und den Wasserstoff bis zur Vertankung in das Flugzeug in dem Tanklaster zu lagern. So entspricht der Bedarf im Jahr 2050 im konventionellen Szenario etwa 121 Lieferungen von einem Container mit einer Kapazität von 4.000 kg. In diesem Fall wird es bis zum Jahr 2050 nicht notwendig sein, Wasserstofflager an den Flughäfen zu bauen, da die Lagerung in den zur Lieferung und Betankung verwendeten Lastkraftwagen ausreichend ist. Im „SAF-Fokus“-Szenario entspricht der Gesamtbedarf im Jahr 2045 noch etwa zwei Lieferungen pro Tag, im Jahr 2050 sind es schon vier. Unter Berücksichtigung der notwendigen Vorratshaltung von Kraftstoff an Flughäfen, könnte es für den größten Flughafen im Land, Stuttgart, in diesem Szenario ab 2050 sinnvoll sein, ein LH₂-Tanklager am Flughafen zu nutzen. Im ambitionierten Szenario kann die Nutzung eines Lagers bereits etwas früher ab 2045 zumindest für den Flughafen Stuttgart sinnvoll sein. Es werden dann im Land insgesamt etwa acht und fünf Jahre später dreizehn Lieferungen pro Tag benötigt. Bei einer angenommenen Planungs- und Bauzeit von fünf Jahren, ist der Beginn der konkreten Planungen eines




Tanklagers nicht vor 2040 notwendig. An den anderen Flughäfen und -plätzen in Baden-Württemberg ist der Bau eines Wasserstofflagers basierend auf den Ergebnissen der Szenarien bis 2050 nicht notwendig.



7. Handlungsempfehlungen

Es gibt verschiedene Handlungsfelder, um den Einsatz von SAF und die Etablierung von Wasserstoff in der Luftfahrt zu fördern und somit zum Klimaschutz in der Luftfahrt beizutragen. Dazu zählen Maßnahmen zur Sicherstellung der lokalen SAF- und Wasserstoffverfügbarkeit, da SAF nach Stand der aktuellen Regulatorik spätestens mit dem Ende des Flexibilitätsmechanismus der ReFuelEU Aviation Verordnung im Jahr 2035 auch physisch in Baden-Württemberg vertankt werden muss. Zusätzlich kann der Einsatz durch unterstützende lokale Maßnahmen an Flughäfen gefördert werden. Die Nutzung von SAF und Wasserstoff wird durch die EU-Regulierung, insbesondere die ReFuelEU Aviation Verordnung, und nationale Gesetze entscheidend beeinflusst. Aus diesem Grund ist die Ausgestaltung dieser von besonderer Bedeutung. Eine Überprüfung der ReFuelEU Aviation durch die Europäische Kommission ist nach Artikel 17 im Jahr 2027 und danach alle vier Jahre vorgesehen, und bietet damit regelmäßige Möglichkeiten zur Anpassung auf EU-Ebene, auf welche der Bund und somit auch die Länder einwirken können.

 Sicherstellung der lokalen SAF- und Wasserstoffverfügbarkeiten	
SAF	<ul style="list-style-type: none"> • [S-PROD1] Abfederung der First-Mover-Nachteile (Bundesebene) • [S-PROD2] Bestandsschutz innovativer Erstanlagen zur Minimierung regulatorischer Risiken (EU-Ebene)
SAF & H ₂	<ul style="list-style-type: none"> • [SH-PROD1] Verwendung der Einnahmen aus der Luftverkehrssteuer und dem ETS-Handel der Luftfahrt zur Unterstützung des SAF-Hochlaufs (Bundesebene) • [SH-PROD2] Reduktion bürokratischer Aufwände und Unterstützung bei der Antragstellung von Förderungen (Bundesebene) • [SH-PROD3] Praxisnahe Regelungen für den Übergang für Grünstromkriterien für die Produktion strombasierter Kraftstoffe inkl. Wasserstoff (EU-Ebene)
H ₂	<ul style="list-style-type: none"> • [H-PROD1] Sektorübergreifende Abstimmung der Bedarfe als Entscheidungsgrundlage für die Schaffung von Produktionsanlagen, Importmöglichkeiten und Verteilungsinfrastruktur (Landes- und Bundesebene) • [H-PROD2] Planung der Bedarfsdeckung im Luftverkehr durch Unterstützung lokaler Projekte (Landesebene) • [H-PROD3] Prüfung von Importmöglichkeiten für Wasserstoff für die Luftfahrt (Landesebene) • [H-PROD4] Förderung von kohlenstoffarmem Wasserstoff (Landes- und Bundesebene)



 Einwirkung auf nationale Gesetze und Regulierung der EU	
SAF	<ul style="list-style-type: none"> • [S-REG1] Klarstellung von Importmöglichkeiten (EU-Ebene) • [S-REG2] Abschluss der Novelle der Energiesteuerrichtlinie (EU-Ebene)
SAF & H₂	<ul style="list-style-type: none"> • [SH-REG1] Revision der Quotenentwicklung in der ReFuelEU Aviation Verordnung (EU-Ebene) • [SH-REG2] Verlängerung der Zuteilung von Zertifikaten (EU-Ebene)
H₂	<ul style="list-style-type: none"> • [H-REG1] Überarbeitung der Energiesteuer für eine einheitliche Regelung zur Besteuerung von Wasserstoff unabhängig von der Nutzung in Brennstoffzellen oder zur direkten Verbrennung (Bundesebene) • [H-REG2] „Tankering“ für Wasserstoff kann in einer Übergangsphase den Anschluss weiterer Flughäfen ermöglichen (EU-Ebene) • [H-REG3] Überprüfung, ob Wasserstoff auf die PtL-Quote angerechnet werden sollte (EU-Ebene) • [H-REG4] Anpassung der Ermittlung der Flugsicherungsgebühren, um Wasserstoffflugzeuge durch ein höheres Gewicht nicht zu benachteiligen (Bundesebene)
 Lokale Maßnahmen in Baden-Württemberg	
SAF	<ul style="list-style-type: none"> • [S-LOK] Lokale Anreize am Flughafen Stuttgart für SAF schaffen (Landes- und Bundesebene)
H₂	<ul style="list-style-type: none"> • [H-LOK1] Erarbeitung von Konzepten zur Lieferung, Lagerung und Betankung von Wasserstoffflugzeugen an allen Flughäfen im Land (Landesebene) • [H-LOK2] Vernetzung von Flughäfen und -plätzen (Landes- und Bundesebene)

Abbildung 29: Überblick der Handlungsoptionen. Optionen, die sich in erster Linie auf SAF beziehen sind mit einem S gekennzeichnet. Optionen, die sich vor allem auf Wasserstoff beziehen, sind mit H gekennzeichnet.

7.1. Sicherstellung der lokalen SAF- und Wasserstoffverfügbarkeit

Die Verfügbarkeit von SAF und Wasserstoff für die Luftfahrt ist eine Herausforderung. Um die SAF-Bedarfe entsprechend den Quoten der ReFuelEU Aviation Verordnung zu decken, sind eine Ausweitung der SAF-Produktionsanlagen und Importe notwendig. Darüber hinaus kann auch die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff und insbesondere von flüssigem grünem



Wasserstoff noch nicht sichergestellt werden, sodass auch hier noch Handlungsbedarf besteht.

[S-PROD1] Abfederung der First-Mover-Nachteile (Bundesebene)

Handlungsoption nach [1]

Finanzielle Absicherung für First Mover.

Das nationale Förderprogramm H2Global zielt darauf ab, First Mover durch Abnahmeverträge finanziell zu unterstützen. Eine erste Auktion fand bereits statt, blieb jedoch erfolglos. Laut Bundeswirtschaftsministerium war unter anderem die strenge EU-Regulierung ein Hindernis. Nach einer Analyse der Gründe für den Rückzug aller Angebote wurden wichtige Erkenntnisse gewonnen, darunter die Notwendigkeit längerer Vertragslaufzeiten und die Übernahme von Risiken für Produzenten aufgrund von Verzögerungen. Diese sollen nun in einer zukünftigen Auktion umgesetzt werden. [1]

[S-PROD2] Bestandsschutz innovativer Erstanlagen zur Minimierung regulatorischer Risiken (EU-Ebene)

Handlungsoption nach [1]

Investitionen in neue Anlagen erfordern Sicherheit, dass die erzeugten Kraftstoffe auch in Zukunft als erneuerbar anerkannt werden.

Da SAF-Produktionsanlagen bis zu 20 Jahre benötigen, um sich finanziell zu amortisieren, ist es für Investoren wichtig, dass Sie langfristig Einnahmen aus der SAF-Produktion in ihrer Anlage erwarten können. Ein Bestandsschutz für Erstanlagen, der eine langfristige Anerkennung der Kraftstoffe als nachhaltig garantiert, kann also Investoren mehr Sicherheit geben und so zwei Problematiken in Bezug auf die Investitionssicherheit lösen. Zum einen ist das Vertrauen in die Stabilität der Gesetzgebung zu synthetischen Kraftstoffen gering und Produzenten sehen ein erhebliches regulatorisches Risiko hinsichtlich der zukünftigen Anerkennung bestimmter Kraftstoffe als nachhaltig. Zum anderen ist bereits in der bestehenden Regulierung die Anrechenbarkeit von bestimmten Kohlenstoffdioxidquellen zeitlich begrenzt, was dazu führt, dass entsprechende Anlagen zur Nutzung bestehender und aktuell unvermeidbarer Kohlenstoffdioxidemissionen nicht gebaut werden. In Baden-Württemberg besteht diese Problematik hinsichtlich der Nutzung von Kohlenstoffdioxid aus der Zementerzeugung zur SAF-Produktion, da das genutzte Kohlenstoffdioxid nur noch bis 2040 für die SAF-Produktion



angerechnet werden darf (vgl. Aktionsplan ReFuels). Hier wäre auch eine Anpassung der Verordnung (EU) 2023/1185 als Lösung erforderlich. [119] [1]

[SH-PROD1] Verwendung der Einnahmen aus der Luftverkehrssteuer und dem ETS-Handel der Luftfahrt zur Unterstützung des SAF-Hochlaufs (Bundesebene):

Handlungsoption nach [1]

Verwendung von Einnahmen aus der Luftfahrt für Förderung von SAF wie im Koalitionsvertrag vorgesehen

Laut dem Koalitionsvertrag von 2025 soll die Hälfte der nationalen Einnahmen aus dem europäischen Emissionshandel im Luftverkehr für die Förderung der Markteinführung von SAF eingesetzt werden [76]. Darüber hinaus könnten auch die Einnahmen aus der Luftverkehrssteuer ebenfalls für diesen Zweck verwendet werden, auch wenn diese Steuer laut dem Koalitionsvertrag reduziert werden soll. Diese Maßnahmen sollen die Entwicklung und Nutzung nachhaltiger Kraftstoffe im Luftfahrtsektor unterstützen und beschleunigen. [1]

[SH-PROD2] Reduktion bürokratischer Aufwände und Unterstützung bei der Antragstellung von Förderungen (Bundesebene)

Handlungsoption nach [1]

Erhöhte bürokratische Aufwände für die Förderung von Produktionsanlagen führen zu Planungsunsicherheit und zu einer Verlangsamung des Markthochlaufs.

Eine Zusammenführung der Finanzierungs- und Fördermöglichkeiten auf nationaler Ebene könnte hilfreich sein. Dies sollte mit einer zentralen Anlaufstelle verbunden sein, die umfassend über alle verfügbaren Fördermittel im Bereich erneuerbare Kraftstoffe informiert und Produzenten sowohl bei der Antragstellung als auch während des gesamten Genehmigungsverfahrens unterstützt. [1]

[SH-PROD3] Praxisnahe Regelungen für den Übergang für Grünstromkriterien für die Produktion strombasierter Kraftstoffe inkl. Wasserstoff (EU-Ebene)

Restriktive Regelungen für die Stromproduktion bei der Produktion von strombasierten Kraftstoffen und Wasserstoff erschweren eine wirtschaftliche Produktion



Die im Rahmen des delegierten Rechtsakts zur RED II definierten Vorgaben für die Stromproduktion zur Herstellung strombasierter Kraftstoffe sind streng und vor allem für Erstanalgen wirtschaftlich nur schwierig umzusetzen. Um Anlagenbau und Weiterentwicklung der Produktionstechnologie zu ermöglichen, sind praktische Übergangsregelungen oder zumindest verlängerte Übergangsfristen erforderlich. Dies würde den Produktionshochlauf fördern und somit auch eine zukünftige Preissenkung von Wasserstoff und PtL-SAF begünstigen.

[H-PROD1] Sektorübergreifende Abstimmung der Bedarfe als Entscheidungsgrundlage für die Schaffung von Produktionsanlagen, Importmöglichkeiten und Verteilungsinfrastruktur (Landes- und Bundesebene)

Die Bedarfe der Luftfahrt sollten in den Planungen der Infrastruktur und Verfügbarkeit von Wasserstoff berücksichtigt werden.

Dass Wasserstoff in der Luftfahrt zukünftig benötigt wird, wird in den Planungen des Landes z. B. in der Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg, der Wasserstoff- und Brennstoffzellenstrategie für die Region Stuttgart oder dem Forschungsbericht zu den Sektorzielen 2030 und einem klimaneutralen Baden-Württemberg 2040 grundsätzlich berücksichtigt, bis jetzt allerdings ohne die Nennung konkreter Bedarfe. Um die Verfügbarkeit von Wasserstoff für die Luftfahrt sicherzustellen, sollten Planungen zur Infrastruktur und zur Produktion bzw. Import sektorübergreifend stattfinden. Die Berücksichtigung der Luftfahrt ist für diese notwendig, auch wenn deren Bedarfe basierend auf den ermittelten Szenarien (vgl. Kapitel 5) insbesondere 2030 im Verhältnis zu den Bedarfen anderer Sektoren noch verschwindend gering sind. Dies könnte sich ab den späten 2040er Jahren ändern.

[H-PROD2] Planung der Bedarfsdeckung im Luftverkehr durch Unterstützung lokaler Projekte (Landesebene)

Produktionsmöglichkeiten speziell für den Luftverkehr können geprüft werden, die höhere Wasserstoffnachfrage aus anderen Sektoren macht diese für lokale Produktionsanlagen attraktiver.

Gemäß der Wasserstoff-Roadmap für Baden-Württemberg wird lokal die Produktion von nachhaltigem Wasserstoff gefördert. Dazu gehört z. B. das Projekt am Stuttgarter Hafen. Der dort hergestellte Wasserstoff ist allerdings für die Industrie und als Kraftstoff für Busse, Last-



kraftwagen und Schiffe bestimmt und kommt nicht im Flugverkehr zum Einsatz [114]. Die Bedarfsdeckung für den Luftverkehr ist vorerst nicht durch regionale Produktion möglich. Grund dafür ist, dass der Fokus auch aufgrund der verhältnismäßig geringen Nachfrage im Luftverkehr vermehrt auf anderen Sektoren liegt. Lokale Produktionsmöglichkeiten können geprüft werden, der Import von Wasserstoff als Flugzeugkraftstoff bleibt allerdings wahrscheinlicher.

[H-PROD3] Prüfung von Importmöglichkeiten für Wasserstoff für die Luftfahrt (Landesebene)

Wasserstoffimport werden langfristig notwendig sein und sollten daher für die Luftfahrt geprüft werden.

Die Wasserstoffnachfrage wird auch langfristig nicht von der nationalen Produktion gedeckt werden können, daher sind Importe notwendig. Zur Sicherung der Importmöglichkeiten sind Energiepartnerschaften, wie die des Landes mit Andalusien sinnvoll. Hier steht flüssiger Wasserstoff für die Luftfahrt allerdings nicht im Fokus. Da andere Sektoren in Baden-Württemberg vor allem gasförmigen Wasserstoff benötigen, kann für die Luftfahrt der Import von flüssigem Wasserstoff z. B. aus Rotterdam eine sinnvolle Option sein, die weiter geprüft werden sollte.

[H-PROD4] Einbeziehung von kohlenstoffarmem Wasserstoff (Bundes- und Landesebene)

Die Berücksichtigung von kohlenstoffarmem Wasserstoff neben grünem Wasserstoff kann initial helfen, den Wasserstoffbedarf zu decken und Emissionen einzusparen, wenn dafür auf fossile Energie verzichtet wird.

Die Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg legt einen deutlichen Schwerpunkt auf grünen Wasserstoff, der aus erneuerbaren Energien gewonnen wird. Die Wasserstoffstrategie des Bundes umfasst auch die Verwendung von kohlenstoffarmem Wasserstoff, der durch wenig emissionsintensive Verfahren erzeugt wird. In einer Übergangsphase könnte der Einsatz von kohlenstoffarmem Wasserstoff verstärkt berücksichtigt werden, um den Infrastrukturausbau zu ermöglichen, kurzfristig die Energiebedarfe zu decken und den Übergang zu vollständig grünen Wasserstofflösungen zu unterstützen. Außerdem kann so vor Ort die Technik und die Abwicklung erprobt werden.



7.2. Einwirkung auf nationale Gesetze und Regulierung der EU

Auf Bundes- und EU-Ebene gibt es verschiedene Möglichkeiten, den Einsatz von SAF und Wasserstoff in der Luftfahrt zu erleichtern und zu fördern.

[S-REG1] Klarstellung von Importmöglichkeiten (EU-Ebene)

Handlungsoption nach [1]

Um die langfristige Versorgungssicherheit in Europa mit erneuerbaren Kraftstoffen zu gewährleisten, sollten spezifische, flexible und pragmatische Regelungen für die Produktion in Nicht-EU-Ländern entwickelt werden, um Nachhaltigkeit zu sichern und den internationalen Handel sowie Produktionsaufbau zu fördern.

Die in der Delegierten Verordnung (EU) 2023/1185 verankerten Kriterien zu „Gebotszonen“ und „Zusätzlichkeit“ gelten sowohl für in der EU produzierte als auch für importiertes strombasiertes SAF. „Gebotszonen“ sind geografische Regionen innerhalb des europäischen Strommarkts, in denen Stromangebot und -nachfrage koordiniert und optimiert werden, um Netzengpässe zu verhindern. Das Kriterium der „Zusätzlichkeit“ garantiert, dass der Strom zur Herstellung erneuerbarer Kraftstoffe aus neuen und ergänzenden erneuerbaren Energiequellen stammt.

Bei der Anwendung auf Drittstaaten entstehen jedoch erhebliche rechtliche Unsicherheiten, da diese oft über abweichende Energiemärkte und regulatorische Rahmenbedingungen verfügen. Darüber hinaus muss CO₂ aus industriellen Quellen wie z. B. Zementanlagen in einem wirksamen Bepreisungssystem, wie z. B. dem Emissionshandelssystem der EU, der Schweiz und des Vereinigten Königreiches, berücksichtigt werden, bevor es zur Herstellung von anrechnungsfähigem SAF verwendet wird [120] [121]. Für Kraftstoffe aus weiteren Drittländern ist die Anrechenbarkeit, wenn CO₂ aus industriellen Quellen gewonnen wird, also nicht sicher [121]. Um Investitionssicherheit zu gewährleisten und die Anrechenbarkeit von Importen praktikabel zu gestalten, ist eine präzise und verbindliche Übertragung der EU-Vorgaben auf nicht-europäische Kontexte erforderlich. Die EU-Kommission sollte hierzu zeitnah Klarstellungen vorlegen, insbesondere zur Definition äquivalenter Bedingungen bei Stromherkunft, Netzstruktur, industriellen CO₂-Quellen und regulatorischer Aufsicht. [1] [119]



[S-REG2] Abschluss der Novelle der Energiesteuerrichtlinie (EU-Ebene)

Handlungsoption nach [1]

Für den SAF-Markthochlauf ist regulatorische Klarheit und Zukunftssicherheit essenziell.

Die derzeitige Fassung der Energiesteuerrichtlinie (2003/96/EG) legt Mindeststeuersätze primär auf Basis des Energiegehalts der Energieträger fest – damit werden diese gleich und unabhängig von ihrer CO₂-Bilanz bewertet. Im Einklang mit den verschärften Klimazielen der EU ist vorgeschlagen, klimaschonende Alternativen bevorzugt zu besteuern. Der Reformprozess wird seit Jahren verhandelt, stagniert jedoch insbesondere aufgrund kontroverser Debatten über die Einführung einer Energiesteuer auf fossiles Kerosin, das derzeit EU-weit von der Steuer befreit ist. Flugkraftstoff ist aktuell generell von der Energiesteuer befreit. Um nachhaltige Kraftstoffe in der Luftfahrt gegenüber fossilem Kraftstoff steuerlich zu bevorzugen, müsste also zunächst eine Steuer auf fossiles Kerosin eingeführt werden. 2024 entstanden mehrere Kompromissvorschläge, die unter anderem verlängerte Übergangsfristen und steuerliche Ausnahmen für bestimmte Sektoren vorschlugen. [1, 122]

[SH-REG1] Revision der Quotenentwicklung in der ReFuelEU Aviation Verordnung (EU-Ebene)

Handlungsoption nach [1]

Prüfung eines lineareren Hochlaufs der Mandate für mehr Planungssicherheit im Markt.

Die ReFuelEU Aviation Verordnung sieht verbindliche Mindestquoten für den Einsatz von SAF im Luftverkehr vor, die über die Zeit stufenweise ansteigen sollen. Die SAF-Quoten setzen ab 2025 ein und werden in Abständen von fünf Jahren angepasst. Nach einem zunächst moderaten Anstieg bis 2030, sind von 2030 bis 2035 und erneut von 2035 bis 2040 jeweils deutliche Anhebungen um 14 Prozent vorgesehen. Der flache Anstieg zu Beginn wird teilweise sogar als hemmend für den SAF-Markt bewertet, während bei den höheren Anstiegen die produzierten Mengen nicht zur Deckung der Quoten ausreichen könnte. Ein linearerer Verlauf der Beimischungsquoten sollte insbesondere in der initialen Marktphase erwogen werden, um den Markthochlauf zu unterstützen. Dies würde jedoch eine zeitnahe Änderung auf EU-Ebene erfordern. Die erste Überprüfung der Anwendung nach Artikel 17 im Jahr 2027 bietet sich dafür an., sollte jedoch vorgezogen werden [1]



[SH-REG2] Verlängerung der Zuteilung von Zertifikaten (EU-Ebene)

Der Hochlauf von strombasierten Kraftstoffen und Wasserstoff könnte durch die Zuteilung von Emissionszertifikaten auch nach 2030 profitieren.

Zur Unterstützung nachhaltiger Kraftstoffe werden im Rahmen des Emissionshandelssystems Emissionszertifikate auf Basis der tatsächlichen Nutzung von SAF zugeteilt, um den Preisunterschied zwischen nachhaltigen Kraftstoffen und fossilem Kerosin zu reduzieren. Eine aktuelle Initiative thematisiert die Berechnung dieses Preisunterschiedes. So werden Fluggesellschaften dabei unterstützt, mehr SAF zu vertanken, da die zusätzlichen Kosten durch die Zuteilung der Emissionszertifikate ausgeglichen werden. Diese Zuteilung endet 2030. Zur Unterstützung von SAF und Wasserstoff in der Luftfahrt kann es sinnvoll sein, diese Zuteilung auch nach 2030 weiterzuführen, insbesondere für SAF, das über die vorgeschriebenen ReFuelEU Quoten hinaus eingesetzt wird. Eine Evaluierung des bestehenden Prozesses findet bis Januar 2028 statt. Über eine Verlängerung der Zuteilung bis 2034 wird bereits seitens der Europäischen Kommission nachgedacht [123]. [124]

[H-REG1] Überarbeitung der Energiesteuer für eine einheitliche Regelung zur Besteuerung von Wasserstoff unabhängig von der Nutzung in Brennstoffzellen oder zur direkten Verbrennung (Bundesebene)

Die Besteuerung von Wasserstoff bei der direkten Verbrennung, während konventionelle Kraftstoffe und Wasserstoff verwendet in Brennstoffzellen steuerfrei sind, sollte beendet werden.

Konventionelle Flugkraftstoffe sind von der Energiesteuer befreit (§27 EnergieStG). Dasselbe gilt für Wasserstoff, der in Brennstoffzellen verwendet wird [125] [126]. Wenn Wasserstoff zur Verbrennung in einem Motor oder einer Gasturbine eingesetzt wird, unterliegt dieser gemäß dem Ähnlichkeitsprinzip (§2 Abs. 4 EnergieStG) der Energiesteuer [126]. Die Berücksichtigung dieses Unterschiedes in der Besteuerung ist mit einem erheblichen bürokratischen Aufwand verbunden, da nachvollzogen werden muss, in welchem Flugzeug der Wasserstoff in welcher Menge zum Einsatz kommt. Zusätzlich widerspricht die Besteuerung von klimafreundlichem Wasserstoff, während fossile Kraftstoffe steuerfrei sind, den Bemühungen die Emissionen der Luftfahrt zu reduzieren.



[H-REG2] Treibstoffmitnahme für Weiterflug bei Wasserstoff kann in einer Übergangsphase den Anschluss weiterer Flughäfen ermöglichen (EU-Ebene)

„Tankering“, also die Treibstoffmitnahme für den Weiterflug, ermöglicht das Anfliegen weiterer Ziele und kann so den Einsatz von Wasserstoffflugzeuge attraktiver machen.

„Tankering“ bezeichnet das bewusste Mitführen von mehr Kraftstoff, als für einen Flugabschnitt notwendig wäre, um auf Zwischen- oder Zielstationen weniger oder nicht tanken zu müssen. Dies erfolgt typischerweise, um Kosten an Flughäfen mit höheren Kraftstoffpreisen zu vermeiden oder Umschlagszeit zu reduzieren. „Tankering“ soll mit der aktuellen ReFuelEU Aviation Verordnung verhindert werden, um sicherzustellen, dass SAF an Flughäfen innerhalb der EU gemäß den vorgeschriebenen Quoten getankt wird. Zudem sollen die durch zusätzliches Gewicht verursachten Emissionen minimiert werden.

Zu Beginn der Hochlaufphase von Wasserstoffflugzeugen dagegen stehen Wasserstoff und Tankinfrastruktur voraussichtlich noch nicht an sämtlichen Flughäfen zur Verfügung. Um mehr Ziele anfliegen zu können, Flugbetreibern mehr Flexibilität zu ermöglichen und so die Nutzung von Wasserstoffflugzeugen attraktiver zu gestalten, kann „Tankering“ von Wasserstoff eine sinnvolle Möglichkeit sein. Hinzu kommt, dass Wasserstoff deutlich leichter ist und Wasserstoffflugzeuge nahezu keine Treibhausgase emittieren, sodass die negativen Folgen von „Tankering“ deutlich abgeschwächt sind.

[H-REG3] Überprüfung, ob Wasserstoff auf die PtL-Quote angerechnet werden sollte (EU-Ebene)

Die Anrechnung von Wasserstoff auf die Subquote für strombasiertes SAF birgt das Risiko, dass dieses durch Wasserstoff verdrängt wird, was vermieden werden sollte, solange biogenes SAF genutzt wird.

Der Einsatz von Wasserstoff kann nach der ReFuelEU Aviation Verordnung auf die allgemeine SAF-Quote sowie die Subquote für strombasiertes SAF angerechnet werden. Es entsteht so ein finanzieller Anreiz zur Nutzung von Wasserstoff gegenüber PtL, der dazu führen könnte, dass, sobald Wasserstoffflugzeuge den Markt durchdringen, weniger PtL nachgefragt wird und sich Wasserstoff und biogenes SAF zu den dominierenden Kraftstoffen entwickeln, obwohl die Rohstoffe von biogenem SAF begrenzt sind. Zwar ist Wasserstoff effizienter in der Herstellung als strombasiertes SAF, strombasiertes SAF ist jedoch unter Berücksichtigung der

Emissionen und der Rohstoffe biogenem SAF vorzuziehen. Die Anrechnung von Wasserstoff auf die Quote von strombasiertem SAF ist kurzfristig sinnvoll. Die Regelungen sollten jedoch so ausgestaltet werden, dass langfristig nicht strombasierte SAF durch Wasserstoff verdrängt werden, sondern stattdessen biogenes SAF schrittweise ersetzt wird. Eine Überprüfung der Anrechnungsregelung ist laut Verordnung im Jahr 2027 vorgesehen – dabei sollte insbesondere bewertet werden, welche kraftstoffspezifischen Subquoten für PtL und Wasserstoff notwendig sind.

[H-REG4] Anpassung der Ermittlung der Flugsicherungsgebühren, um Wasserstoffflugzeuge durch ein höheres Gewicht nicht zu benachteiligen (Bundesebene)

Höhere Flugsicherungsgebühren von Wasserstoffflugzeugen, die durch das höhere Gewicht, insbesondere in Bezug auf deren Ladekapazität, entstehen, sollten ausgeglichen werden.

Gebühren zur Flugsicherung teilen sich in die An- bzw. Abfluggebühr, die einmalig beim Start berechnet wird, und die Streckengebühr auf. Beide Gebühren sind von dem Gewicht des Flugzeuges (MTOW, Maximum Takeoff Weight; deutsch: Höchstabfluggewicht) abhängig. Dieses System benachteiligt Wasserstoffflugzeuge, die konstruktionsbedingt ein höheres MTOW aufweisen. Zwar ist Wasserstoff leichter als Kerosin oder SAF, die notwendigen Tanksysteme sind allerdings deutlich schwerer und benötigen mehr Platz (vgl. Kapitel 3.1). In einem optimistischen Szenario könnte der Unterschied im Höchstabfluggewicht zwar weniger als 10 Prozent betragen [127], dabei ist aber auch zu berücksichtigen, dass die Passagierkapazität von Wasserstoffflugzeugen durch den höheren Platzbedarf der Technologie geringer ist. Um Wasserstoffflugzeuge bei der Gebührenberechnung nicht zu benachteiligen, könnte ein Korrekturfaktor zur Berechnung verwendet werden, sodass keine höheren Flugsicherungsgebühren als bei einem konventionellen Flugzeug mit vergleichbarer Kapazität und fossilen Kraftstoffen entstehen.

7.3. Lokale Maßnahmen

Lokale Anreize können die Nutzung von SAF als Flugkraftstoff fördern. Um Wasserstoff in der Luftfahrt einsetzen zu können, sind Infrastrukturanpassungen an Flughäfen notwendig. Es gibt verschiedene Optionen, diesen Prozess zu unterstützen.



[S-LOK] Lokale Anreize am Flughafen Stuttgart für SAF schaffen (Landes- und Bundesebene)

Handlungsoption nach [1]

Finanzielle Anreizsysteme an Flughäfen können die SAF-Nutzung an diesen fördern.

Der Flughafen Stuttgart bietet ein Anreizsystem durch eine finanzielle Förderung an, ähnlich einem Ansatz, der auch am Flughafen Schiphol verfolgt wird, jedoch mit einer geringeren Förderung und einer Volumendeckelung. Am Flughafen Stuttgart wird derzeit kein SAF eingesetzt, was nur teilweise auf die geringere Unterstützung zurückzuführen ist. Ausschlaggebend ist die bessere infrastrukturelle Anbindung von Schiphol über Pipelines und die vorteilhafteren logistischen Bedingungen in den Niederlanden. Zudem spielen nationale Regelungen in den Niederlanden eine Rolle. Eine Opt-in Möglichkeit für SAF wird für Deutschland im Rahmen der nationalen Umsetzung der RED III (Renewable Energy Directive) vom Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft (BDL) vorgeschlagen. Damit ist gemeint, dass der zusätzliche freiwillige Einsatz von SAF über die ReFuelEU Quoten hinaus auf die nationale Treibhausgasquote angerechnet werden soll. [128] [1] Dies könnte auch bei der vom Land Baden-Württemberg geförderten Konzeption für einen klimaneutraleren Luftverkehr ein Anreiz sein.

[H-LOK1] Erarbeitung von Konzepten zur Lieferung, Lagerung und Betankung von Wasserstoffflugzeugen an allen Flughäfen im Land (Landesebene)

Flughäfen im Land benötigen Konzepte zum Umgang mit Wasserstoff, dabei können die Erkenntnisse des Flughafen Stuttgarts genutzt werden.

Die Verfügbarkeit von Wasserstoff an den Flughäfen im Land ist entscheidend, um den Einsatz von Wasserstoffflugzeugen zu fördern. Da es sich um einen neuen Kraftstoff handelt, müssen vollständig neue Infrastrukturen zur Beschaffung, Lagerung und Betankung geschaffen werden. Die Flughäfen im Land sollten daher frühzeitig mit der Planung zur Lieferung und Lagerung beginnen. Am Flughafen Stuttgart gibt es dazu bereits das GOLIAAT Projekt, von dessen Erkenntnissen auch die anderen Flughäfen profitieren können. Unter Berücksichtigung der in den Szenarien ermittelten Bedarfe, sind eigene Verflüssigungsanlagen an den Flughäfen und -plätzen im Land absehbar nicht wirtschaftlich und die Anlieferung per Lastkraftwagen ist am wirtschaftlichsten. Zur Betankung sollten spezielle Tankwagen verwendet werden und kein Pipelinesystem am Flughafen gebaut werden. Während der Hochlaufphase von Wasserstoff kann auch auf ein eigenes Tanklager am Flughafen verzichtet werden. Es



können stattdessen die Tankwagen verwendet werden. Bei einer Kapazität von 4.000 kg Wasserstoff pro Wagen werden mit den ermittelten Bedarfen im Jahr 2050 etwa 4 Lieferungen pro Tag im „SAF-Fokus“ Szenario, aber schon 13 Lieferungen pro Tag im „Technologiemix“ Szenario benötigt. Dabei ist zu beachten, dass diese Liefermengen den Bedarf an allen Flughäfen in Baden-Württemberg decken und somit an den einzelnen Standorten geringere Liefermengen erwartet werden können. Am Flughafen Stuttgart kann ein Wasserstofflager in den späten 2040er Jahren sinnvoll sein, wenn die Bedarfe des „Technologiemix“-Szenarios erreicht werden. Bei einer angenommenen Planungs- und Bauzeit von 5 Jahren muss mit der konkreten Planung nicht vor 2040 begonnen werden.

[H-LOK2] Vernetzung von Flughäfen und -plätzen (Landes- und Bundesebene)

Der Austausch unter Flughäfen und Flugplätzen im Land und Bund kann deren Vorbereitungen auf den Umgang mit Wasserstoff an ihrem Flughafen bzw. -platz unterstützen.

Die Vernetzung von Flughäfen, Infrastrukturinitiativen, Netzbetreibern und Wasserstofflieferanten im Land fördert den Wissensaufbau sowie eine koordinierte Planung und Entwicklung übergreifender Konzepte. Der Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur ist stark von überregionalen Abhängigkeiten beeinflusst. Erfolgreiche Modelle wie das GOLIAT-Projekt und bilaterale Partnerschaften, beispielsweise der Austausch zwischen den Flughäfen Stuttgart und Frankfurt, bieten wertvolle Orientierung. Ein derartiges Netzwerk, bei dem vielversprechende Partnerschaften in Europa identifiziert werden, könnte als Ausgangspunkt für ein Wasserstoffnetzwerk der Vorreiterflughäfen dienen, um die Nutzung von Wasserstoff im Luftverkehr zu ermöglichen und den Prozess dorthin effektiver zu gestalten.



8. Fazit

Zusammenfassend zeigt die Bedarfsanalyse, dass sowohl der Einsatz von SAF als auch Wasserstoff bedeutende Potentiale zur Emissionsreduzierung im Luftverkehr generell und insbesondere auch in Baden-Württemberg bieten.

SAF bleibt mittel- bis langfristig die wichtigste Option zur THG-Minderung in der Luftfahrt im Land, grüner Wasserstoff kann ab den 2030er Jahren unterstützen

Bis 2050 wird jedoch der Einsatz von biogenem und strombasiertem SAF aufgrund dessen Drop-in-Fähigkeit und der Nutzung bestehender Transportinfrastruktur eine Schlüsselrolle spielen, insbesondere für die kurz- bis mittelfristigen Klimaziele in Baden-Württemberg. Der Einsatz von Wasserstoff erfordert dagegen umfassende technologische Entwicklungen und infrastrukturelle Anpassungen, sowohl bei den Flugzeugen als auch am Flughafen. In einem ambitionierten Szenario kann Wasserstoff etwa 15 Prozent zur Emissionsreduktion bis 2050 beitragen, wenn die Herausforderungen in Produktion und Markteinführung überwunden werden.

Die lokale Verfügbarkeit von SAF und grünem Wasserstoff muss sichergestellt werden, insbesondere durch sektorübergreifende Abstimmung der Bedarfe

Die Ergebnisse zeigen, dass SAF-Quoten (wie unter ReFuelEU Aviation) wichtig sind und zudem eine strategische Planung zur Integration von Wasserstoff in die Luftfahrt relevant ist. Um die Infrastruktur anzupassen, sind finanzielle und regulatorische Maßnahmen auf Landes-, Bundes- und EU-Ebene notwendig. Das Land Baden-Württemberg kann hier vor allem lokale Maßnahmen, insbesondere die Sicherstellung der lokalen Verfügbarkeit von SAF und grünem Wasserstoff und die Entwicklung von infrastrukturellen und operativen Konzepten zur SAF- und Wasserstoffnutzung unterstützen. Hierbei sollten die Erkenntnisse aus Forschungsprojekten wie insbesondere dem GOLIAT-Projekt am Flughafen Stuttgart übergreifend innerhalb des Landes verwertet werden.



Planungen für Wasserstofftanklager sind vor 2040 an Flughäfen in BW nicht notwendig, Tankwagen sind zunächst ausreichend

Aufgrund der voraussichtlich geringen Wasserstoffbedarfe bis 2050 reichen zunächst Wasserstofftankwagen an den Flughäfen in Baden-Württemberg als Lager aus, insbesondere wird eine Verflüssigungsanlage für Wasserstoff an Flughäfen bis 2050 nicht effizient und wirtschaftlich sein. Bei einer angenommenen Planungs- und Bauzeit von fünf Jahren, ist der Beginn der konkreten Planungen eines Tanklagers am Flughafen Stuttgart nicht vor 2040 notwendig. An den anderen Flughäfen und -plätzen in Baden-Württemberg ist der Bau eines Wasserstofflagers basierend auf den Ergebnissen der Szenarien bis 2050 nicht notwendig.

Baden-Württemberg kann auf unterstützende Gesetzgebung auf nationaler und EU-Ebene einwirken

Das Land Baden-Württemberg sollte sich für einen unterstützenden rechtlichen Rahmen auf nationaler und EU-Ebene einsetzen, u. a. für die Novelle der Energiesteuerrichtlinie, klare Importregelungen für SAF, eine lineare Quotenentwicklung zur Förderung der SAF-Produktion, die Verlängerung von Zertifikatszuteilungen, eine Überprüfung der Tankering-Regelungen und die Anrechenbarkeit von Wasserstoff unter ReFuelEU Aviation. Auf Bundesebene sollte das Land eine einheitliche Wasserstoffbesteuerung unabhängig von Technologien und eine angepasste Berechnung der Flugsicherungsgebühren für Wasserstoffflugzeuge mit höherem Gewicht anstreben. Finanzielle Prioritätensetzungen mit Mitteln aus der Luftverkehrssteuer oder dem EU ETS und regulatorische Sicherheit (z. B. Bestandsschutz für Erstanlagen, Prüfung und Ermöglichung von Importen) fördern Investitionen und den Ausbau der SAF-Produktion. Der Bedarf an grünem Wasserstoff in der Luftfahrt muss in die sektorübergreifende Infrastrukturplanung integriert werden. Dessen Förderung sollte mit der Landes-Wasserstoff-Roadmap abgestimmt sein. Ein CO₂-Preis für fossiles Kerosin kann SAF und Wasserstoff wirtschaftlich attraktiver machen.

Eine nationale und europäische Zusammenarbeit ist zentral, um effektive Liefer- und Produktionsnetzwerke für Wasserstoff und SAF zu gewährleisten. Eine gemeinsame Strategie zur Förderung von SAF und Wasserstoff ist entscheidend für die langfristige Erreichung der Emissionsziele und des technologischen Fortschritts im Luftverkehr, auch wenn wasserstoffbetriebene Flüge bis 2050 voraussichtlich noch eine Nischenanwendung bleiben.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Der Emissionswert (oder Lebenszyklusemissionen) zeigt, wie viel CO₂ (Kohlenstoffdioxid) und andere Treibhausgase ein Kraftstoff verursacht. Die Einheit, gemessen in Gramm pro Megajoule (gCO₂eq/MJ), zeigt die Klimawirkung verschiedener Gase in Bezug auf CO₂. Emissionen aus veränderter Landnutzung zum Anbau von Rohstoffen vor allem für biogenes SAF werden in dem dargestellten Wert nicht berücksichtigt. Die Emissionswerte von fossilem Kerosin und biogenem SAF sind konsistent mit den nach CORSIA anrechenbaren Werten. Der gestrichelte Bereich zeigt die Spannweite der Emissionen durch die Verwendung unterschiedlicher Rohstoffe. Es werden die Emissionen durch den Rohstoffanbau inklusive des Abbaus, die Weiterverarbeitungen bis zum Kraftstoff und den Transport bis zur Nutzung im Flugzeug berücksichtigt (Well-to-Wing). Für Wasserstoff werden zusätzlich Emissionen durch den Aufbau der Produktionsanlagen berücksichtigt. Der gestrichelte Bereich für strombasiertes SAF spiegelt unterschiedliche Energiebedarfe der einzelnen Prozessschritte sowie die Nachhaltigkeit des verwendeten Stroms wider. Die Spannweite umfasst vollständig aus erneuerbaren Quellen gewonnenen Strom bis hin zu einem europäischen Strommix aus fossilen und erneuerbaren Quellen. [133] [29] [138] [160] [144] 14

Abbildung 2: Wirkungsgrade verschiedener Kraftstoffe in unterschiedlichen Antriebskonzepten. Die schwarzen Linien markieren mögliche Schwankungen. Elektrischer Strom wird dabei als Referenz mit einem Wirkungsgrad von 100 Prozent angenommen. [139] [140] [141] [142] [24] [143] [144] [145] [20] [23] 19

Abbildung 3: Energiedichten verschiedener Kraftstoffe [130] [129] [23] 21

Abbildung 4: Energiebedarf pro belegten Sitzplatz und Kilometer (RPK) für ein konventionelles Flugzeug und simuliert für ein Flugzeug mit LH₂-Verbrennung und LH₂ bzw. GH₂ Brennstoffzellen mit 50 bis 78 Sitzplätzen bei einer Reiselänge von 400 km [24]. Zur tatsächlichen Erreichung dieser Effizienzen in echten Wasserstoffflugzeugen ist weitere Forschung und Entwicklung notwendig. Insbesondere die Effizienz der Brennstoffzelle wird optimistisch eingeschätzt – in der Praxis sind diese Werte noch nicht erreicht. Für die angegebenen Werte wurde eine Auslastung von 85 Prozent angenommen [135]. [24] 22

Abbildung 5: Energiebedarf und Emissionen pro belegten Sitzplatz und Kilometer (RPK) für einen A320neo und ein ähnliches Flugzeug mit einem LH₂-Verbrennungsantrieb für Kurz- und Mittelstrecken. 1.500 km ist der Median der Strecken des A320neos. 90 Prozent der Strecken sind kürzer als 3.180 km. Zur Berechnung der Emissionen wurden die maximalen Werte für



grünen Wasserstoff (inkl. Bau der Produktionsanlage) und strombasiertes SAF verwendet [29].....	24
Abbildung 6: Streckenabdeckung verschiedener Antriebe und Kraftstoffe. Kombinationen zu Hybridantrieben sind möglich [136]	25
Abbildung 7: Auswahl verschiedener Flugzeuge dargestellt nach maximaler Reichweite und (voraussichtlichem) Markteintritt. Insbesondere die Markteintritte der Flugzeuge mit alternativen Antrieben können sich zeitlich verschieben und beruhen zum Teil auf eigenen Schätzungen basierend auf den Veröffentlichungen von Herstellern [147] [148] [149] [150] [33] [151] [152] [153] [154] [155] [156] [157] [158].....	28
Abbildung 8: Die Verteilung der Flugbewegungen in Baden-Württemberg aufgeteilt nach Startflughafen zeigt die Bedeutung des Flughafens Stuttgart und den beiden weiteren Verkehrsflughäfen in Friedrichshafen und Karlsruhe / Baden-Baden im Zeitraum November 2023 bis Oktober 2024. Unter Sonstiges werden weitere Flugbewegungen aus Baden-Württemberg angegeben, die nicht einem Flughafen oder Flugplatz zugeordnet werden konnten. Eigene Darstellung nach [159]	34
Abbildung 9: Verteilung der Flugbewegungen nach Streckenlängen. Flüge, deren Start- und Zielflughafen 800 km oder weniger auseinander liegen, gelten als Regionalverkehr. Kurzstrecken sind Flugdistanzen zwischen 800 km und 1.500 km. Mittelstrecken liegen zwischen 1.500 km und 3.500 km. Alle längeren Strecken sind Langstrecken. Rundflüge haben denselben Start- und Zielflughafen. Es werden die Starts von November 2023 bis Oktober 2024 gezeigt. Eigene Darstellung nach [159]	35
Abbildung 10: Verteilung der Flugbewegungen in Baden-Württemberg mit Kennzeichnung des Anteils von Maschinen mit einem Gewicht bis zu 14 t an Verkehrs- und Regionalflughäfen bzw. -plätzen. „Rest“ enthält alle Flugbewegungen, die nicht als Regionalverkehr klassifiziert werden oder die mit schwereren Flugzeugen durchgeführt worden sind. Es werden die Flugbewegungen aus November 2023 bis Oktober 2024 gezeigt. Eigene Darstellung nach [159].....	36
Abbildung 11: Verteilung der genutzten Flugzeugtypen an den Verkehrsflughäfen Stuttgart, Friedrichshafen und Karlsruhe / Baden-Baden. Es werden Daten zu Flugzeugbewegungen aus dem Jahr 2024 dargestellt. Eigene Darstellung nach [131].....	37
Abbildung 12: Verteilung der Flugbewegungen in Baden-Württemberg von November 2023 bis Oktober 2024 nach Flugtyp. Die Anteile von Langstrecken und Rundflügen im planmäßigen Linienflugverkehr liegen unter 0,5 Prozent und sind deswegen nicht in der Abbildung erkennbar. Eigene Darstellung nach [159].....	39



Abbildung 13: Streckenziele, die von den Flughäfen STR, FKB und FDH im Jahr 2024 angefliegen wurden. Die Anzahl der Flüge wird in der Größe der Markierungen widergespiegelt. Eigene Darstellung nach [131].....	40
Abbildung 14: Darstellung des Alters der in Deutschland registrierten und in 2024 bewegten Flugzeuge an den Flughäfen STR, FKB, FDH und MHG. Eigene Darstellung nach [52].	42
Abbildung 15: Darstellung des Luftverkehrsaufkommen in Baden-Württemberg von 2015 bis 2024 sowie der Prognos ab 2025 bis 2050. In den kommenden Jahren wird als Ausgleich der Folgen der Covid Pandemie zunächst ein stärkeres Wachstum erwartet. Dieses schwächt sich in den folgenden Jahrzehnten ab. Die Zahlen von 2015 bis 2023 berücksichtigen nur die drei Hauptverkehrsflughäfen im Land [172] [171] [170] [169] [168] [167] [166] [165] [164].....	47
Abbildung 16: Es werden die Kraftstoffe fossiles Kerosin, SAF (biogen und strombasiert) und Wasserstoff berücksichtigt. Unter Berücksichtigung verschiedener Einflussfaktoren werden drei Szenarien abgeleitet, in denen die Nutzung von SAF und Wasserstoff unterschiedlich ausgeprägt ist.....	48
Abbildung 17: Verteilung der Flugbewegungen aus Stuttgart und gesamt Baden-Württemberg nach Zielort und Flugdistanz zur Darstellung des Potentials für den Einsatz von Wasserstoff. Die Größe der Flugzeuge ist dabei noch nicht berücksichtigt. Baden-Württemberg umfasst die drei Verkehrsflughäfen und weitere Regionalflughäfen und -plätze. Eigene Darstellung nach [159].....	51
Abbildung 18: Darstellung der Verteilung der Flugbewegungen (Starts) ab Stuttgart bzw. Baden-Württemberg insgesamt nach Flugzeuggröße und Distanz bzw. Ziel zur Darstellung des Potentials für Wasserstoffantriebe. Kleine Flugzeuge haben ein Gewicht bis 7 t, größere ein Gewicht bis 80 t. Für kleine Flugzeuge (Markteintritt ca. 2030) wird eine Reichweite von 1100 km mit einer „Tankering“-Distanz von 500 km angenommen. Zum Markteintritt von größeren Flugzeugen (ca. 2040) wird eine Reichweite von 3000 km und eine „Tankering“-Distanz von 1400 km angenommen. Baden-Württemberg umfasst die Flughäfen STR, FKB, FDH und MHG (Mannheim). Eigene Darstellung nach [52]	52
Abbildung 19: Preisentwicklung verschiedener Kraftstoffe. Es wurde ein CO ₂ Preis von 50 € pro t bis 180 € pro t angenommen. Für Wasserstoff wird sowohl der Standardpreis pro MJ dargestellt (gelb – durchgehend) als auch der um den höheren Energiebedarf) korrigierte Preis (gelb – gestrichelt) dargestellt. Darstellung nach [82].....	54
Abbildung 20: Energiebedarf nach verschiedenen Energieträgern in Millionen MJ im Szenario „Konventionelle Technologien“.....	59



Abbildung 21: Energiebedarf nach verschiedenen Energieträgern in Millionen MJ im Szenario „SAF-Fokus“	60
Abbildung 22: Energiebedarf nach verschiedenen Energieträgern in Millionen MJ im Szenario „Technologiemix“	61
Abbildung 23: Gegenüberstellung der Kraftstoffverteilung in den drei Szenarien in den Jahren 2030 und 2050.....	62
Abbildung 24: Emissionen aus den verschiedenen Energieträgern in Millionen MJ im Szenario „Konventionelle Technologien“	64
Abbildung 25: Emissionen aus den verschiedenen Energieträgern in Millionen MJ im Szenario „SAF-Fokus“	66
Abbildung 26: Emissionen aus den verschiedenen Energieträgern in Millionen MJ im Szenario „Technologiemix“	67
Abbildung 27: Emissionswerte in Tonnen des CO ₂ -Äquivalents der verschiedenen Szenarien für die Jahre 2040 bis 2050. Entsprechend der Anteile der verschiedenen Energieträger (fossiles Kerosin, SAF und Wasserstoff) am gesamten Energiebedarf, wurden ein Emissionswert (CO ₂ -Äquivalent) pro MJ berechnet. Zum Vergleich: Der Emissionswert von rein fossilem Kerosin beträgt 89 gCO ₂ eq/MJ.	68
Abbildung 28: Die Herstellung grünen Wasserstoffs beginnt mit der Erzeugung von grünem Strom. Dieser wird in der Elektrolyse von Wasser benötigt, um so Wasserstoff herzustellen. Anschließend findet der Transport mittels Schiffs, Lastkraftwagen und Bahn zum Flughafen statt. Darstellung nach [163]	75
Abbildung 29: Überblick der Handlungsoptionen. Optionen, die sich in erster Linie auf SAF beziehen sind mit einem S gekennzeichnet. Optionen, die sich vor allem auf Wasserstoff beziehen, sind mit H gekennzeichnet.....	86



Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auflistung der konsultierten Stakeholder und Themenschwerpunkte.....	12
Tabelle 2: Definition und Vergleich einer Auswahl der insgesamt 8 nach ASTM Spezifikation D7566-24B zugelassenen Herstellungspfade für synthetische Mischkomponenten. [4].....	16
Tabelle 3: Übersicht verschiedener Annahmen in den drei Szenarien „Konventionelle Technologien“, „SAF-Fokus“ und „Technologiemix“. Vgl. Anlage I für weitere Details.	57
Tabelle 4: Übersicht der Annahmen der Bedarfsanalyse.....	134



Abkürzungsverzeichnis

ADV. Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen	GH ₂ . gasförmiger Wasserstoff
AtJ. Alcohol-to-Jet	GOLIAT. Ground Operations of Liquid Hydrogen Aircraft
AtJ-SKA. Alkohol-zu-Jet synthetisches Paraffinisches Kerosin mit Aromaten	HC-HEFA-SPK. Synthetisiertes paraffinisches Kerosin aus hydroverarbeiteten Kohlenwasserstoffen, Estern und Fettsäuren
AtJ-SPK. Alkohol-zu-Jet Synthetisches Paraffinisches Kerosin	HEFA. Hydroprozessierte Ester und Fettsäure
BDL. Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft	HEFA-SPK. Synthetisiertes paraffinisches Kerosin aus hydroverarbeiteten Estern und Fettsäuren
CEPS. Central Europe Pipeline System	KIT. Karlsruher Institut für Technologie
CO ₂ . Kohlenstoffdioxid	kWh. Kilo Wattstunden
CORSIA. Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation	LH ₂ . flüssiger Wasserstoff
DAC. Direct Air Capturing	MHG. Flugplatz Mannheim
DFS. Deutsche Flugsicherung	MiRO. Mineralölraffinerie Oberrhein
DLR. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt	MW. Mega Watt
EASA. European Union Aviation Safety Agency	PEM. Proton Exchange Membran
eSAF. strombasiertes SAF	PtL. Power-to-Liquid
EU. Europäische Union	RED. Renewable Energy Directive
FDH. Flughafen Friedrichshafen	RPK. Revenue Passenger Kilometer / verkaufter Sitzplatz und Kilometer
FKB. Flughafen Karlsruhe / Baden-Baden	SAF. Sustainable Aviation Fuel
FT-SPK. Fischer-Tropsch hydroprozessiertes synthetisiertes paraffinisches Kerosin	STR. Flughafen Stuttgart
	ZAL. Zentrum für angewandte Luftfahrtforschung



Anlagenverzeichnis

- Anlage 1: Übersicht weiterer Annahmen und Parameter der Bedarfsanalyse



Literatur

- [1] Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg, „Vorreiter unter ReFuelEU Aviation – Was ist für Baden-Württemberg möglich?“, Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg, Stuttgart, 2025.

- [2] Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg; Ministerium für Wissenschaft, Kunst und Forschung Baden-Württemberg; Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg, „THE aerospace LÄND - On to new horizons - Luft- und Raumfahrtstrategie Baden-Württemberg“, Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg; Ministerium für Wissenschaft, Kunst und Forschung Baden-Württemberg; Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg, Stuttgart, 2023.

- [3] Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg, „Klimaneutrale Landespolizei Baden-Württemberg - Machbarkeitsstudie zum Einsatz von synthetischem Kerosin in der Hubschrauberflotte“, Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg, Stuttgart, 2025.

- [4] B. Dietrich, L. Lauer, S. Leiser, M. Meder Manns, J. Stenmanns und A. Zschocke, „CENA SAF-Outlook 2024-2030 - Eine Analyse von Mengen, Technologien und Produktionsstandorten für nachhaltige Flugtreibstoffe“, CENA Hessen - Kompetenzzentrum für Klima- und Lärmschutz im Luftverkehr, Frankfurt am Main, 2024.

- [5] N. Bullerdiek, J. Buse, N. Dögnitz, A. Feige, A.-M. Halling, S. Hauschild, P. Hawighorst, M. Kaltschmitt, T. Kuchling, S. Kureti, S. Majer, C. Marquardt, F. Müller-Langer, U. Neuling, K. Oehmichen, J. Pechstein, D. Posselt, S. Scheuermann, T. Schripp, H. Stein und A. Zschocke, „Einsatz von Multiblend JET A-1: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Modellvorhaben der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie“, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Leipzig, 2019.



- [6] ASTM International, D7566 Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons, West Conshohocken, PA, 2024.
- [7] U. M. Pfeiffer und M. Spöttle, „PtL-Roadmap - Nachhaltige strombasierte Kraftstoffe für den Luftverkehr in Deutschland,“ Bundesministerien für: Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit | Verkehr und digitale Infrastruktur | Wirtschaft und Energie | wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung; Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft e.V., Berlin, 2021.
- [8] O. Tatarenko, A. Pandey, C. Gamage, P. Molloy, A. Chen, N. Janzow, Q. Homann, C. Emerson, M. Dyson, J. Ningthoujam, Z. Wang, D. Mullaney und H. Sheerazi, „The Five Dimensions of Hydrogen,“ RMI, 14 Juni 2024. [Online]. Available: <https://rmi.org/the-five-dimensions-of-hydrogen/#:~:text=Biofuel%2Dbased%20SAF%20produced%20today,per%20gallon%20of%20SAF%20production.> [Zugriff am 19 Februar 2025].
- [9] DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, „Strombasierte Kraftstoffe - technologieplattform PtL - Blick in die Zukunft,“ DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 16 Oktober 2023. [Online]. Available: <https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2023/04/technologieplattform-ptl-blick-in-die-zukunft.> [Zugriff am 04 März 2025].
- [10] Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, Verordnung (EU) 2023/2405 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Oktober 2023 zur Gewährleistung gleicher Wettbewerbsbedingungen für einen nachhaltigen Luftverkehr (Initiative "ReFuelEU Aviation"), ABl. L, 2023/2405, 31. Oktober 2023.
- [11] Klimaschutz Portal, „EASA veröffentlicht Report über den europäischen SAF-Markt,“ Klimaschutz Portal, 16 Dezember 2024. [Online]. Available: [https://www.klimaschutz-portal.aero/meldung/easa-veroeffentlicht-saf-report/.](https://www.klimaschutz-portal.aero/meldung/easa-veroeffentlicht-saf-report/) [Zugriff am 04 März 2025].



- [12] EASA - European Union Aviation Safety Agency, „EASA 2024 Report - State of the EU SAF market in 2023,“ EASA - European Union Aviation Safety Agency, 2024.
- [13] DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, „Weltweit erste Flugzeugmesungen hinter einem großen Verkehrsflugzeug - Fliegen mit 100 Prozent nachhaltigem Kraftstoff senkt auch Nicht-CO₂-Effekte signifikant,“ DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 06 Juni 2024. [Online]. Available: <https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2024/fliegen-mit-100-prozent-nachhaltigem-kraftstoff-senkt-auch-nicht-co2-effekte-signifikant>. [Zugriff am 28 Februar 2025].
- [14] K. Dahmann, S. Matthes, M. Plohr, M. Niklaß, J. D. Scheelhaase und F. Wozny, „Klimawirkung des Luftverkehrs - Wissenschaftlicher Kenntnisstand, Entwicklungen und Maßnahmen,“ Umweltbundesamt - Fachgebiet I 2.7 Kraftstoffe und Energie im Verkehr, Dessau-Roßlau, 2023.
- [15] IATA - International Air Transport Association, Fact Sheet 7: Liquid hydrogen as a potential low-carbon fuel for aviation, IATA - International Air Transport Association, 2019.
- [16] DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, „CO₂-Fußabdruck und Klimawirkung von Kondensstreifen senken,“ DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, [Online]. Available: <https://www.dlr.de/de/forschung-und-transfer/themen/klimavertraegliches-fliegen/co2-fussabdruck-und-klimawirkung-von-kondensstreifen-senken>. [Zugriff am 03 März 2025].
- [17] hm.edu, „News - Klimaforschung am fliegenden Objekt: Was synthetische Kraftstoffe in der Luftfahrt bewirken können,“ hm.edu, 08 Mai 2025. [Online]. Available: https://me.hm.edu/aktuelles/newsdetail/news_detailseite_445632.de.html. [Zugriff am 27 Mai 2025].



- [18] DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, „Kondensstreifen der Zukunft auf der Spur,“ DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 20 Juli 2022. [Online]. Available: https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2022/03/20220720_kondensstreifen-der-zukunft-auf-der-spur. [Zugriff am 04 März 2025].
- [19] Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, „Interview mit Björn Nagel vom DLR - Luftfahrt ist in grundlegender Architektur neu zu gestalten,“ bundesregierung, 22 Juni 2022. [Online]. Available: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/gruenes-fliegen-2054386>. [Zugriff am 04 Februar 2025].
- [20] J. Begli und G. Atanasov, „Wie gelingt die Energiewende in der Luftfahrt? - Ideen für elektrische Flugzeugantriebe von morgen,“ 04 Februar 2025. [Online]. Available: <https://www.dlr.de/de/forschung-und-transfer/themen/klimavertraegliches-fliegen/wie-gelingt-die-energiewende-in-der-luftfahrt-ideen-fuer-elektrische-flugzeugantriebe-von-morgen>.
- [21] W. Bube, „Grundwissen - Brennstoffzelle,“ LEIFlphysik, [Online]. Available: <https://www.leiflphysik.de/uebergreifend/fossile-energieversorgung/grundwissen/brennstoffzelle>. [Zugriff am 04 Februar 2025].
- [22] D. Dilba, „Wie Wasserstoffantriebe ins Flugzeug kommen - Die Entwicklung und Optimierung von Brennstoffzellen und Wasserstofftanks ist eine Herausforderung – eine andere: Wie integriert man die Komponenten bestmöglich ins Flugzeug?,“ AEROPRT Das Luftfahrtmagazin der MTU Aero ENgines, Januar 2021. [Online]. Available: <https://aeroreport.de/de/innovation/wie-wasserstoffantriebe-ins-flugzeug-kommen>. [Zugriff am 04 Februar 2025].
- [23] Bundesamt für Zivilluftfahrt BAZL - Luftfahrtentwicklung / Umwelt, „Faktenmaterial Elektrisches Fliegen,“ Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, 2020.



- [24] J. Mukhopadhaya, „Performance Analysis of Fuel Cell Retrofit Aircraft,“ ICCT - International Council on Clean Transportation, 2023.
- [25] D. Debney, „Zero-Carbon Emission Aircraft Concepts,“ FlyZero, 2022.
- [26] B. Rakhshani, A. Stan und T. Leslis, „A Steady-State Model-Based Evaluation of Performance Characteristics and Feasibility Analysis of Retrofit Hydrogen-Powered aircraft Configurations,“ International Journal of sustainable Aviation, Bd. 10, Nr. 2, pp. 99-191, 2024.
- [27] M. Schmeicher und J. Häßy, „hydrogen Fuel Cell for Aviation? A potential Analysis comapring different Thrus Categories,“ DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Köln, 2022.
- [28] E. J. Adler und J. R. Martins, „Hydrogen-powered aircraft: Fundamental concepts, key technologies, and environmental impacts,“ Progress in Aerospace Sciences, Bd. 141, Nr. 100922, 2023.
- [29] J. Mukhopadhaya und D. Rutherford, „Performance Analysis of evolutionary Hydrogen-powered Aircraft,“ ICCT - The International Council on Clean Transportation, 2022.
- [30] neste, „Pressemitteilung - Neste und Airbus schließen sich zusammen, um die Nutzung von 100 Prozent nachhaltigem Flugzeugtreibstoff als wichtige Lösung zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen in der Luftfahrt voranzutreiben,“ neste, 30 November 2022. [Online]. Available: <https://www.neste.com/de-de/news/neste-und-airbus-schliessen-sich-zusammen-um-die-nutzung-von-100-prozent-nachhaltigem-flugzeugtreibstoff-als-wichtige-loesung-zur-reduzierung-von-treibhausgasemissionen-in-der-luftfahrt-voranzutreiben>. [Zugriff am 03 März 2025].



- [31] IATA - International Air Transport Association, „Our Commitment to Fly Net Zero by 2050,“ IATA - International Air Transport Association, [Online]. Available: <https://www.iata.org/en/programs/sustainability/flynetzero/>. [Zugriff am 11 März 2025].
- [32] ZeroAvia, „Truly Clean Flight,“ ZeroAvia, [Online]. Available: <https://zeroavia.com/about-us/>. [Zugriff am 12 März 2025].
- [33] J. Flottau, „Die Klimaziele für die Luftfahrt waren immer unrealistisch - Kommentar,“ Süddeutsche Zeitung, 10 Februar 2025. [Online]. Available: <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/luftfahrt-airbus-boeing-klimaschutz-li.3199523>. [Zugriff am 26 Februar 2025].
- [34] shuttle flug, „Jet oder Turboprop: Was ist der Unterschied?,“ shuttle flug, [Online]. Available: https://www.shuttle-flug.de/blog/jet-oder-turboprop-was-ist-der-unterschied_7646.html. [Zugriff am 28 Februar 2025].
- [35] Aviation Direct, „Fliegen mit Propeller: Wie funktioniert eigentlich ein Turboproptriebwerk?,“ Aviation Direct, 02 März 2023. [Online]. Available: <https://aviation.direct/fliegen-mit-propeller-wie-funktioniert-eigentlich-ein-turboproptriebwerk>. [Zugriff am 28 Februar 2025].
- [36] Airbus, „ZEROe,“ Airbus, [Online]. Available: <https://www.airbus.com/en/innovation/energy-transition/hydrogen/zeroe>. [Zugriff am 05 Februar 2025].
- [37] Airbus, „Exploring hydrogen - The impact, challenges and options,“ FAST magazine, September 2021.
- [38] Airbus, „ZEROe: Our Hydrogen-powered Aircraft - Developing our First Hydrogen-powered Commercial Aircraft,“ Airbus, 2025. [Online]. Available:



<https://www.airbus.com/en/innovation/energy-transition/hydrogen/zeroe-our-hydrogen-powered-aircraft>. [Zugriff am 27 Mai 2025].

- [39] Airbus, „Hybrid and electric Flight - Laying the Groundwork for Decarbonising Aviation,“ Airbus, 2025. [Online]. Available: <https://www.airbus.com/en/innovation/energy-transition/hybrid-and-electric-flight>. [Zugriff am 26 Februar 2025].
- [40] Boeing, „Fact Sheet - Hydrogen and Sustainable Aviation,“ 2024.
- [41] MTU Aero Engines, „Technologie-Agenda Claire,“ MTU Aero Engines, [Online]. Available: <https://www.mtu.de/de/technologie/clean-air-engine/>. [Zugriff am 06 Februar 2025].
- [42] MTU Aero Engines, „Flying Fuel Cell,“ MTU Aero Engines, [Online]. Available: <https://www.mtu.de/de/technologie/clean-air-engine/flying-fuel-cell/>. [Zugriff am 06 Februar 2025].
- [43] Rolls-Royce, „Hydrogen Power - Fuelling a Cleaner Tomorrow,“ Rolls-Royce, [Online]. Available: <https://www.rolls-royce.com/innovation/alternative-fuels/hydrogen.aspx>. [Zugriff am 06 Februar 2025].
- [44] Rolls-Royce, „Rolls-Royce Wasserstoff-Forschungsprojekt erreicht wichtigen Meilenstein,“ Rolls-Royce, 26 September 2023. [Online]. Available: <https://www.rolls-royce.com/country-sites/deutschland/nachrichten-und-geschichten/nachrichten/2023/pr-26-09-2023.aspx>. [Zugriff am 06 Februar 2025].
- [45] Flying 523 Miles, Emissions-Free: Joby#s Hydrogen-Electric Demonstrator. [Film]. Joby Aviation, 2024.



- [46] H2FLY, „Emission-free Aviation: German Federal Ministry for Digital and Transport Funds Project to Advance Hydrogen Fuel Cell Technology,“ H2FLY, 06 Mai 2024. [Online]. Available: <https://www.h2fly.de/2024/05/06/emission-free-aviation-german-federal-ministry-for-digital-and-transport-funds-project-to-further-develop-hydrogen-fuel-cell-technology/#:~:text=H2FLY%20was%20founded%20by%20five%20engineers%20from%20the,market%20the%20firs>. [Zugriff am 03 März 2025].
- [47] H2FLY, „Company,“ H2FLY, [Online]. Available: <https://www.h2fly.de/company/>. [Zugriff am 06 Februar 2025].
- [48] flyv, „flyv - The World’s First on Demand Air Mobility Provider,“ flyv, 2025. [Online]. Available: <https://www.flyvbird.com/>. [Zugriff am 03 März 2025].
- [49] Jens Lindenmüller, „Neue Airline im Anflug auf den Bodensee-Airport,“ schwäbische, 22 März 2024. [Online]. Available: <https://www.schwaebische.de/regional/bodensee/friedrichshafen/neue-airline-im-anflug-auf-den-bodensee-airport-2364811>. [Zugriff am 03 März 2025].
- [50] Flughafen Stuttgart, „Auftakt für ein innovatives flüssig-Wasserstoff projekt in der Luftfahrt,“ 16 Mai 2024. [Online]. Available: https://www.flughafen-stuttgart.de/media/310236/final-goliat-press-release_de_14052024.pdf. [Zugriff am 10 März 2025].
- [51] Universität Stuttgart, „LinkedIn - Universität Stuttgart,“ LinkedIn, Januar 2025. [Online]. Available: https://www.linkedin.com/posts/universit%C3%A4t-stuttgart_unistuttgart-haemhenpraesfstand-luftfahrt-activity-7287740948036345856-teRk?utm_source=share&utm_medium=member_desktop&rcm=ACoAAC-3VcBzAOU_setrBg6TPV22fHa_aC9_SE. [Zugriff am 03 März 2025].



- [52] Deutsche Flugsicherung GmbH, Flugzeugbewegungen an den Flughäfen STR, FKB, FDH und MHG aus dem Jahr 2024, Deutsche Flugsicherung GmbH, 2025.
- [53] Sprint Air, „Saab340 PAX,“ Sprint Air, [Online]. Available: <https://sprintair.eu/en/saab340-pax/>. [Zugriff am 12 März 2025].
- [54] Cessna, „Citation CJ3 Gen3 - Elevate your Pursuits,“ 2024. [Online]. Available: https://cessna.txtav.com/-/media/cessna/files/product-cards/citation/citation_cj3_gen3_product_card.ashx. [Zugriff am 13 März 2025].
- [55] Europäische Kommission, „Market Uptake and Impact of Key Green Aviation Technologies,“ Europäische Kommission, Brüssel, 2022.
- [56] EASA - European Union Aviation Safety Agency, „Nachhaltigkeit in der Phase am Ende der Lebensdauer von Luftfahrzeugen,“ EASA - European Union Aviation Safety Agency, [Online]. Available: <https://www.easa.europa.eu/de/light/topics/sustainability-end-life-phase-aircraft#:~:text=Luftfahrzeuge%20werden%20aus%20zwei%20Hauptgr%C3%BCnden,30%2D40%20Jahren%20f%C3%BCr%20Frachtflugzeuge>. [Zugriff am 17 März 2025].
- [57] Eurowings, „Eurowings vor größter Flottenmodernisierung ihrer Geschichte,“ Eurowings, 20 Januar 2025. [Online]. Available: <https://newscloud.eurowings.com/eurowings-vor-groesster-flottenmodernisierung-ihrer-geschichte/#:~:text=Die%20Auslieferung%20der%20ersten%20Boeing,Modelle%20des%20Typs%20Airbus%20A320>. [Zugriff am 19 März 2025].
- [58] Eurowings, „Über uns - Das ist Eurowings,“ Eurowings, [Online]. Available: <https://www.eurowings.com/de/informieren/ueber->



[uns/unternehmen.html#:~:text=139%20Flugzeuge,und%20die%20angrenzenden%20Nachbarl%C3%A4nder%20spezialisiert.](#) [Zugriff am 19 März 2025].

- [59] Eurowings, „Erste Eurowings A320neo in Nordrhein-Westfalen gelandet,“ Eurowings, 05 April 2022. [Online]. Available: <https://newscloud.eurowings.com/erste-eurowings-a320neo-in-nordrhein-westfalen-gelandet/>. [Zugriff am 19 März 2025].
- [60] Lufthansa Group, „Flottenmodernisierung,“ Lufthansa Group, [Online]. Available: <https://www.lufthansagroup.com/de/verantwortung/klima-umwelt/flottenmodernisierung.html>. [Zugriff am 02 April 2025].
- [61] airliners, „Sun Express plant mit Flotte von 166 Jets bis 2035,“ airliners, 24 November 2023. [Online]. Available: <https://www.airliners.de/sun-express-plant-flotte-166-jets-2035/71733>. [Zugriff am 19 März 2025].
- [62] Condor, „Erste werksneue Condor A320neo landet in Frankfurt,“ Condor, 24 April 2024. [Online]. Available: <https://condor-newsroom.condor.com/de/de/news-artikel/erste-werksneue-condor-a320neo-landet-in-frankfurt/>. [Zugriff am 19 März 2025].
- [63] Ryanair, „Q3 results - Jan 2025,“ Ryanair, 2025.
- [64] WIZZ Air Holdings PLC, „Q3 F25 Results,“ WIZZ Air Holdings PLC, 2025.
- [65] Energy PR, Jet Zero, „Zero-Emissions Aviation Technology - Public Perception Report,“ Innovate UK Business Connect, 2024.
- [66] Bauhaus Luftfahrt - The Aviation Think Tank, „Passagierakzeptanz von hybrid-elektrischen Flugzeugen in Deutschland,“ Bauhaus Luftfahrt - The Aviation Think Tank, [Online]. Available: <https://www.bauhaus->



luftfahrt.net/de/forschungsbereiche/urban-regional-air-mobility/passagierakzeptanz-von-hybrid-elektrischen-flugzeugen-in-deutschland. [Zugriff am 31 März 2025].

- [67] A. Leipold und e. al, „DEPA 2050 - Development Pathways for Aviation up to 2050,“ DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2021.
- [68] ATAG - Air Transport Action Group, „Waypoint 2050 - An Air Transport Action group Project,“ ATAG - Air Transport Action Group, 2021.
- [69] EASA - European Union Aviation Safety Agency, „European aviation Environmental Report 2025,“ EASA - European Union Aviation Safety Agency, Köln, 2025.
- [70] EUROCONTROL, „EUROCONTROL Aviation Long-Term Outlook: Flights and CO2 Emissions Forecast,“ EUROCONTROL, 2024.
- [71] BDL - Bundesverband der deutschen Luftverkehrswirtschaft, „Bericht zur Lage der Branche,“ BDL - Bundesverband der deutschen Luftverkehrswirtschaft, 2025. [Online]. Available: <https://www.bdl.aero/themen/wirtschaft-wettbewerb/branchenreport/jahreszahlen/>. [Zugriff am 20 März 2025].
- [72] BDL - Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft, „Entwicklung des Luftverkehrs im ersten Halbjahr 2024,“ BDL - Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft, 07 August 2024. [Online]. Available: https://www.bdl.aero/wp-content/uploads/2024/08/20240807_Produkt-BDL-Halbjahreszahlen-2024_final.pdf. [Zugriff am 20 März 2025].
- [73] Statistisches Bundesamt (Destatis), „Statistischer Bericht - Luftverkehr auf Hauptverkehrsflughäfen 2024,“ Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2025.
- [74] BDL - Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft, „Vorausschau auf das Luftverkehrsangebot,“ BDL - Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft,



- [Online]. Available: <https://www.bdl.aero/themen/wirtschaft-wettbewerb/branchenreport/vorausschau/>. [Zugriff am 20 März 2025].
- [75] EUROCONTROL, „EUROCONTROL Aviation Long-Term Outlook: Flights and CO2 Emissions Forecast 2024 - 2050,“ EUROCONTROL, 2024.
- [76] CDU - Christlich Demokratische Union, CSU - Christlich-Soziale Union, SPD - Sozialdemokratische Partei Deutschland, Verantwortung für Deutschland - Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD - 21. Legislaturperiode, CDU - Christlich Demokratische Union, CSU - Christlich-Soziale Union, SPD - Sozialdemokratische Partei Deutschland, 2025.
- [77] Europäische Kommission, „Frequently Asked Questions on the interpretation of certain provisions of Regulation (EU) 2023/2405 on ensuring a level playing field for sustainable air transport,“ Europäische Kommission, [Online]. Available: https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/environment/refuelev-aviation/faq-refuelev-aviation_en. [Zugriff am 09 Mai 2025].
- [78] Europäische Kommission, „Renewable Energy Targets,“ Europäische Kommission, [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-targets_en. [Zugriff am 07 Mai 2025].
- [79] L. Sander, „Strommix Deutschland: Wie hoch ist der Anteil erneuerbarer Energien?,“ NDR, 07 Mai 2025. [Online]. Available: <https://www.ndr.de/nachrichten/info/Strommix-Deutschland-Wie-ist-der-Anteil-erneuerbarer-Energien,strommix102.html>. [Zugriff am 07 Mai 2025].
- [80] Die Bundesregierung, „Importstrategie für Wasserstoff - Für eine klimaneutrale Wirtschaft,“ Die Bundesregierung, 24 Juli 2024. [Online]. Available:



<https://www.bundesregierung.de/breg-de/service/archiv/faq-wasserstoffimportstrategie-2300536#tar-3>. [Zugriff am 09 Mai 2025].

- [81] Flughafen Stuttgart, Verteilung der Kosten eines Fluges mit einem Passagierjet von und nach Deutschland im Jahr 2019, Statista, 2025.
- [82] Peter Wiener; Rob Quincey; Harry Clarke; Clémence Routaboul; Wolfgang Grimme; Sven Maertens; Axel Classen, „Market Uptake and Impact of Key Green Aviation Technologies - Final Report,“ Europäische Kommission, Brüssel, 2023.
- [83] Europäisches Parlament; Europäischer Rat, Richtlinie (EU) 2023/958 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 10. Mai 2023 zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG, Straßburg: Europäisches Parlament; Europäischer Rat, 2023.
- [84] Europäische Kommission, „Aviation fuels & emissions trading – calculating the price difference between eligible fuels and kerosene (detailed rules),“ Europäische Kommission, Januar 2025. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/14020-Aviation-fuels-emissions-trading-calculating-the-price-difference-between-eligible-fuels-and-kerosene-detailed-rules_en. [Zugriff am 25 April 2025].
- [85] Europäische Kommission, Richtlinie 2003/96/EG des Rates vom 27. Oktober 2003 zur Restrukturierung der gemeinschaftlichen Rahmenvorschriften zur Besteuerung von Energieerzeugnissen und elektrischem Strom (Text von Bedeutung für den EWR), Luxemburg: Europäische Union, 2003.
- [86] Steer, „Analysing the Costs of Hydrogen Aircraft,“ Steer , London / Brussel, 2023.



- [87] B. Graver, X. S. Zheng, D. Rutherford, J. Mukhopadhaya und E. Pronk, „Vision 2050 - Aligning Aviation with the Paris Agreement,“ ICCT - The International Council on Clean Transportation, Washington, 2022.
- [88] Boeing - Cascade, „Cascade,“ Boeing - Cascade, [Online]. Available: <https://app.cascade.boeing.com/>.
- [89] M. Schwarz, „Wasserstoff trifft CO2: 350 Millionen Euro für E-Kerosin aus Brandenburg,“ H2 News, 20 Dezember 2025. [Online]. Available: <https://h2-news.de/wirtschaft-unternehmen/wasserstoff-trifft-co2-350-millionen-euro-fuer-e-kerosin-aus-brandenburg/>. [Zugriff am 27 Mai 2025].
- [90] DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, „DLR Prescreening® of new fuel candidates,“ DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, [Online]. Available: <https://www.dlr.de/en/vt/research-transfer/research-services/dlr-prescreening-of-new-fuel-candidates>. [Zugriff am 30 Mai 2025].
- [91] G. Ho, S. Pernot, G. Toop und J. Hoffmann, „Assessment of the production and Supply of SAF in Union Airports and Study on the Feasibility of the Creation of a System of Tradability of SAF in the EU,“ Europäische Kommission, Brüssel, 2025.
- [92] CIM and CCMP, „The CEPS network,“ [Online]. Available: <https://www.cim-ccmp.com/en/operations.php#ceps-network>. [Zugriff am 16 Dezember 2024].
- [93] Stuttgart Airport, „Kerosinpipeline zum Flughafen wird vorerst nicht gebaut - Versorgungssicherheit mit LKW-Transport garantiert,“ Stuttgart Airport, 11 April 2019. [Online]. Available: <https://www.flughafen-stuttgart.de/newsroom/pressebereich/pressemittelungen/2019/kerosinpipeline-zum-flughafen-wird-vorerst-nicht-gebaut-versorgungssicherheit-mit-lkw-transporten-garantiert/>. [Zugriff am 27 Mai 2025].



- [94] H2.B - Zentrum Wasserstoff.Bayern, „Wasserstoff - FAQs,“ H2.B - Zentrum Wasserstoff.Bayern, [Online]. Available: <https://h2.bayern/infothek/faqs/#:~:text=Wie%20viel%20Strom%20wird%20ben%C3%B6tigt,Wirkungsgrad%20von%2080%20%E2%80%93%2040%20%25..> [Zugriff am 16 Mai 2025].
- [95] Baden-Württemberg, „Land vertieft Energie- und Klimapartnerschaft mit Andalusien,“ Baden-Württemberg, 23 Januar 2025. [Online]. Available: <https://www.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/land-vertieft-energie-und-klimapartnerschaft-mit-andalusien>. [Zugriff am 28 Mai 2025].
- [96] BASF, „BASF nimmt 54-Megawatt-Wasserelektrolyseur in Betrieb,“ BASF, 17 März 2025. [Online]. Available: <https://www.basf.com/global/de/media/news-releases/2025/03/p-25-046>. [Zugriff am 16 Mai 2025].
- [97] Flahship Project TransHyDE, „European Hydrogen Infrastructure Planning - Insights from the TransHyDE Project System Analysis,“ Flahship Project TransHyDE, 2024.
- [98] Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, „Erster Fortschrittsbericht zur Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg,“ Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2023.
- [99] C. Fruhstorfer, J. Bienefeld und F. Schenke, „Status Quo Analysis of German Airports Regarding Fuel Infrastructure and Hydrogen Development Opportunities,“ HyNeat, Hannover, 2024.
- [100] A. A. e. al., „Wasserstoff-Verflüssigung, Speicherung, Transport und Anwendung von flüssigem Wasserstoff,“ TranHyDE, 2023.
- [101] NPROXX, „Warum unter hohem Druck gespeichertes Gas besser ist als Flüssigwasserstoff,“ NPROXX, 11 März 2022. [Online]. Available:



<https://www.nprox.com/de/warum-unter-hohem-druck-gespeichertes-gas-besser-ist-als-fluessigwasserstoff/>. [Zugriff am 16 Mai 2025].

- [102] European Hydrogen Backbone - EHB, „Hydrogen Hydrogen Backbone - Implementation Roadmap - Cross Border Projects and Costs Update,“ European Hydrogen Backbone - EHB, 2023.
- [103] Wasserstoff für Baden-Württemberg - Eine Initiative der terranets bw, „Vision zur Transformation und Versorgung für Baden-Württemberg bis zur Klimaneutralität 2040: Cluster für das neue Wasserstoffnetz,“ Wasserstoff für Baden-Württemberg - Eine Initiative der terranets bw, [Online]. Available: <https://www.h2-fuer-bw.de/#c267>. [Zugriff am 16 Mai 2025].
- [104] DB Cargo, „Wasserstoff trifft auf Schiene - Ein Schritt in Richtung Zukunft: DB Cargo wird Wasserstofftransporteur,“ DB Cargo, [Online]. Available: <https://www.dbcargo.com/rail-de-de/logistik-news/wasserstoff-trifft-auf-schiene-8819494>. [Zugriff am 16 Mai 2025].
- [105] Munich Airport International, „Climate friendly propulsion technologies - Part 2,“ Munich Airport International, [Online]. Available: <https://www.munich-airport.com/international/climate-friendly-propulsion>. [Zugriff am 28 Mai 2025].
- [106] J. Hoelzen, M. Flohr, D. Silberhorn, J. Mangold, A. Bensmann und R. Hanke-Rauschenbach, „H₂-powered aviation at airports – Design and economics of LH₂ refueling systems,“ Energy Conversion and Management: X, Bd. 14, 2022.
- [107] Airbus, „Hydrogen Hubs at Airports - Bringing Hydrogen Stakeholders together,“ Airbus, [Online]. Available: <https://www.airbus.com/en/innovation/energy-transition/hydrogen/hydrogen-hubs-at-airports>. [Zugriff am 19 Mai 2025].



- [108] Airbus, „Developing a global ecosystem to support hydrogen-powered flight - Preparations on the ground to bring ZEROe to the skies,“ Airbus, 02 September 2024. [Online]. Available: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2024-09-developing-a-global-ecosystem-to-support-hydrogen-powered-flight>. [Zugriff am 19 Mai 2025].
- [109] Lufthansa Technik, „Hydrogen Aviation Lab,“ Lufthansa Technik, [Online]. Available: <https://www.lufthansa-technik.com/en/hydro-lab>. [Zugriff am 19 Mai 2025].
- [110] DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, „Roadmap für die Einführung von Wasserstoff an mittelgroßen Flughäfen,“ DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 04 2023. [Online]. Available: <https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2023/04/roadmap-zur-nutzung-von-wasserstoff-am-flughafen-hamburg-vorgestellt/roadmap-fuer-die-einfuehrung-von-wasserstoff-an-mittelgrossen-flughaefen>. [Zugriff am 19 Mai 2025].
- [111] W. Grimme, Luftverkehrsszenarien in BEniVer - Statuskonferenz, Berlin: DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2022.
- [112] Plattform H2BW, „Aufgaben der Plattform H2BW,“ Plattform H2BW, [Online]. Available: <https://www.plattform-h2bw.de/ueber-die-plattform-h2bw/aufgabe-und-funktion>. [Zugriff am 28 Mai 2025].
- [113] Plattform H2BW, „Stärkung der Energiepartnerschaft mit Andalusien,“ Plattform H2BW, 29 01 2025. [Online]. Available: <https://www.plattform-h2bw.de/service/aktuelle-meldungen/meldungen-detail/staerkung-der-energiepartnerschaft-mit-andalusien>. [Zugriff am 19 05 2025].
- [114] Stadtwerke Stuttgart, „Elektrolyse in Stuttgart: Startschuss für Projekt am Hafen,“ Plattform H2BW, 30 April 2025. [Online]. Available: <https://www.plattform->



[h2bw.de/service/aktuelle-meldungen/meldungen-detail/elektrolyse-in-stuttgart-startschuss-fuer-projekt-am-hafen](https://www.h2bw.de/service/aktuelle-meldungen/meldungen-detail/elektrolyse-in-stuttgart-startschuss-fuer-projekt-am-hafen). [Zugriff am 20 Mai 2025].

- [115] Europäische Kommission, „Cordis - EU Research Results - Ground Operations of Liquid hydrogen Aircraft,“ Europäische Kommission, 19 April 2024. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/101138379>. [Zugriff am 20 Mai 2025].
- [116] ALRIGH2T, „The ALRIGH2T and GOLIAT projects will collaborate closely to accelerate the development of liquid hydrogen groundrefuelling technologies for more sustainable aviation,“ ALRIGH2T, [Online]. Available: <https://alrigh2t.eu/the-alrigh2t-and-goliat-projects-collaboration/>. [Zugriff am 20 05 2025].
- [117] J. R. e. al., „Mögliche zukünftige Importrouten für grünen Wasserstoff in die Region Stuttgart - Untersuchung und Bewertung,“ Wirtschaftsförderung Region Stuttgart GmbH, 2023.
- [118] Bodensee-Airport Friedrichshafen, „Energiepark am See,“ Bodensee-Airport Friedrichshafen, 12 Oktober 2023. [Online]. Available: <https://www.bodensee-airport.eu/press/energiepark-am-see/>. [Zugriff am 20 Mai 2025].
- [119] Europäische Kommission, „Delegierten Verordnung (EU) 2023/1185 der Kommission,“ 10 Februar 2023. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32023R1185>.
- [120] Europäische Kommission, „Q&A Implementation of Hydrogen Delegated Acts,“ Europäische Kommission, 2024.
- [121] ISCC - International Sustainability & Carbon Certification, „ISCC EU 205-1 Renewable Fuels of Non-Biological Origin (RFNBO) and Recycled Carbon Fuels (RCF)“



Greenhouse Gas Emissions,“ ISCC - International Sustainability & Carbon Certification System GmbH, 2024.

- [122] Legislative Train Schedule - European Parliament, „Revision of the energy taxation directive (ETD),“ 21 5 2025. [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/theme-a-european-green-deal/file-revision-of-the-energy-taxation-directive>.
- [123] Europäische Kommission, „ETS Allowances for SAF,“ November 2023. [Online]. Available: https://climate.ec.europa.eu/document/download/9a82627a-8a5c-4419-93de-e5ed2d6248eb_en?filename=policy_ets_allowances_for_saf_en.pdf. [Zugriff am 22 Mai 2025].
- [124] Umwelt Bundesamt, Luftverkehr im EU-ETS und CORSIA im „Fit for 55“ - Paket, Umwelt Bundesamt, 2023.
- [125] Bundesministerium der Finanzen, „Verbrauchssteuern / Dienstvorschrift Energiesteuer N 09 2014 Nr. 29,“ 31 Januar 2014. [Online]. Available: https://www.bhkw-infozentrum.de/download/DV-Energieerzeugung_N_09_2014-Nr29_20140131.pdf. [Zugriff am 22 Mai 2025].
- [126] Bundesministerium der Justiz, „Energiesteuergesetz (EnergieStG),“ [Online]. Available: https://www.gesetze-im-internet.de/energiestg/inhalts_bersicht.html. [Zugriff am 22 Mai 2025].
- [127] M. C. M. e. al., „Potential and technical challenges of on-board hydrogen storage technologies coupled with fuel cell systems for aircraft electrification,“ Journal of Power Sources, Bd. 555, 2023.



- [128] BDL - Bundesverband der deutschen Luftverkehrswirtschaft, Umsetzung der RED II Revision ("RED III"), Berlin: BDL - Bundesverband der deutschen Luftverkehrswirtschaft, 2024.
- [129] J. Holladay, Z. Abdullah und J. Heyne, „Sustainable Aviation Fuel - Review of Technical Pathways,“ U.S. Department of Energy - Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2020.
- [130] Plattform H2BW, „Basiswissen Wasserstoff,“ Plattform H2BW, [Online]. Available: <https://www.plattform-h2bw.de/qualifizierung/wasserstoff-faq/basiswissen-wasserstoff>. [Zugriff am 28 Februar 2025].
- [131] Statistisches Bundesamt (Destatis), Verkehrsleistungsstatistik im Luftverkehr - Starts und Landungen auf den Hauptverkehrsflughäfen Stuttgart, Friedrichshafen und Karlsruhe/Baden-Baden im Berichtsjahr 2024, Statistisches Bundesamt (Destatis), 2025.
- [132] EUROCONTROL, Eurocontrol Set Emission Calculator, EUROCONTROL, 2024.
- [133] ICAO - International Civil Aviation Organization, „CORSA Approved Sustainability Certification Schemes,“ ICAO, 2024.
- [134] To70 Aviation; DLR; Aerlabs, Deutscher Wetterdienst, Europäische Kommission, „MRV non-CO2 data collection Guidance for Aircraft Operators,“ 2025.
- [135] Statista, „Passagierauslastung im internationalen Flugverkehr 2024,“ Statista, 11 februar 2025. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/234481/umfrage/passagierauslastung-im-internationalen-flugverkehr/>. [Zugriff am 19 Februar 2025].



- [136] McKinsey & Company; Clean Sky 2 JU; Fuel Cell and Hydrogen 2 JU, „Hydrogen-powered aviation - A fact-based Study of Hydrogen Technology Economics, and Climate Impact by 2050,“ Clean Sky 2 JU; Fuel Cell and Hydrogen 2 JU, 2020.
- [137] M. S. Ortuno, F. Yin, A. G. Rao, R. Vos und P. Proesmans, „Climate Assessment of Hydrogen Combustion Aircraft: Towards a Green Aviation Sector,“ AIAA SciTech Forum 2023 , pp. Article AIAA 2023-2513, 2023.
- [138] Hydrogen Council, „Hydrogen Decarboization Pathways - A Life-cycle Assessment,“ Hydrogen Council, 2021.
- [139] M. Glowak, J. Wojcik, P. Boberski, T. Bialecki, B. Gawron, M. Skolniak und T. Suchocki, „Sustainable Aviation Fuel - Comprehensive Study on Highly Selective Isomerization Route towards HEFA Based Bioadditives,“ Renewable Energy, Bd. 220, p. 119696, 2024.
- [140] P. R. Schmidt, „Sustainable Aviation Fuels (SAF) - Intro into Power-to-Liquid,“ 06 Februar 2024. [Online]. Available: https://lbst.de/wp-content/uploads/2024/02/LBST-PatrickSchmidt_SAF-PtL-Lecture_UnivSurrey_06FEB2024_web.pdf. [Zugriff am 28 Februar 2025].
- [141] HAW Hamburg, „Luftransport mit Wasserstoff - Online-Vorträge an der HAW Hamburg,“ HAW Hamburg, [Online]. Available: <https://www.haw-hamburg.de/detail/news/news/show/luftransport-mit-wasserstoff/>. [Zugriff am 28 Februar 2025].
- [142] M. F. Shahriar und A. Khanal, „The Current techno-Economic, Environmental, and Policy Status of Sustainable Aviation Fuel (SAF),“ Fuel, Bd. 325, p. 124905, 2022.



- [143] J. H. Boilley, A. Berrady, H. B. Shahrel, E. Gürbüz und F. Gallucci, „Energy Analysis of a Power-to-Jet-Fuel Plant,“ International Journal of Hydrogen Energy, Bd. 58, pp. 1160-1176, 2024.
- [144] M. F. Rojas-Michaga, S. Michailos, E. Cardozo, M. Akram, K. J. Hughes und D. I. M. Pourkashanian, „Sustainable Aviation Fuel (SAF) Production through Power-to-Liquid (PtL): A combined Techno-Economic and Life Cycle Assessment,“ Energy Conversion and Management, Bd. 292, p. 117427, 2023.
- [145] H. Mahfouz, „Vergleich des Kraftstoffverbrauchsvon Strahltriebwerken und Propellertriebwerken,“ HAW Hamburg, Hamburg, 2023.
- [146] Baden-Württemberg Staatsministerim, „Luftverkehr - Zentrum für Wasserstoff entsteht am Flughafen Stuttgart,“ Baden-Württemberg Staatsministerium, 30 Januar 2023. [Online]. Available: <https://stm.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/zentrum-fuer-wasserstoff-entsteht-am-flughafen-stuttgart>. [Zugriff am 03 März 2025].
- [147] Airbus Aircraft, „A319neo - The Performance Winner,“ Airbus Aircraft, [Online]. Available: <https://aircraft.airbus.com/en/aircraft/a320-family/a319neo>. [Zugriff am 06 März 2025].
- [148] Condor, „Airbus A320neo & A321neo,“ Condor, [Online]. Available: <https://www.condor.com/de/fliegen-geniessen/condor-partner/unsere-flotte/airbus-a320neo-a321neo.jsp>. [Zugriff am 06 März 2025].
- [149] S. Eiselin, „Erster A320 Neo fliegt schon am Sonntag regulär,“ Aero Telegraph, 20 Januar 2016. [Online]. Available: <https://www.aerotelegraph.com/erster-a320-neo-fliegt-am-sonntag-uebergeben-an-lufthansa>. [Zugriff am 06 März 2025].



- [150] T. Nowack, „Erster Airbus A321 Neo von Condor kommt im Juni,“ Aero telegraph, 24 April 2024. [Online]. Available: https://www.aerotelegraph.com/condor-erwartet-ersten-airbus-a321-neo-im-juni#google_vignette. [Zugriff am 06 März 2025].
- [151] Electra, „Electra Reveals Design for EL9 Ultra Short Hybrid-Electric Aircraft,“ Electra, 13 November 2024. [Online]. Available: <https://www.electra.aero/news/electra-reveals-design-for-el9-ultra-short-hybrid-electric-aircraft>. [Zugriff am 06 März 2025].
- [152] Eviation, „Alice - The All-Electric Game Changer,“ Eviation, [Online]. Available: <https://www.eviation.com/aircraft/>. [Zugriff am 06 März 2025].
- [153] Deutsche Aircraft, „Deutsche Aircraft and H2FLY Join Forces to Explore Hydrogen Powered Flight,“ Deutsche Aircraft, 06 Juli 2021. [Online]. Available: <https://www.deutscheaircraft.com/news/deutsche-aircraft-and-h2fly-join-forces-to-explore-hydrogen-powered-flight>. [Zugriff am 06 März 2025].
- [154] Süddeutsche Zeitung, „Nach Flugzeugabstürzen - Boeing wusste schon 2017 von Problem bei "737 Max",“ Süddeutsche Zeitung, 06 Mai 2019. [Online]. Available: <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/boeing-737-max-software-2017-1.4434111>. [Zugriff am 06 März 2025].
- [155] Boeing, „737 MAX,“ Boeing, [Online]. Available: <https://www.boeing.com/commercial/737max#overview>. [Zugriff am 06 März 2025].
- [156] R. Ewing, „United "More Bullish" on 737 MAX 10,“ Airline Geeks, 23 Januar 2025. [Online]. Available: <https://airlinegeeks.com/2025/01/23/united-more-bullish-on-737-max-10/>. [Zugriff am 06 März 2025].



- [157] Fokker Next Gen, „We are building a new type of aircraft from scratch,“ Fokker Next Gen, [Online]. Available: <https://www.fokkernextgen.com/the-aircraft>. [Zugriff am 11 März 2025].
- [158] Aero Buzz, „ASL Aviation ist nun im Beirat von Fokker Next Gen,“ Aero Buzz, 20 September 2024. [Online]. Available: <https://aerobuzz.de/industrie-news/asl-aviation-ist-nun-im-beirat-von-fokker-next-gen/>. [Zugriff am 11 März 2025].
- [159] FIPLAN: Achat, 2025: FIPLAN: Achat.
- [160] EASA - European Aviation Safety Agency, „Sustainable Aviation Fuels - Figures and Table - Figure 6.3,“ EASA - European Aviation Safety Agency, [Online]. Available: <https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/eaer/sustainable-aviation-fuels/figures-and-tables>. [Zugriff am 03 März 2025].
- [161] Europäische Kommission, Durchführungsverordnung (EU) 2024/2493 der Kommission vom 23. September 2024 zur Änderung der Durchführungsverordnung (EU) 2018/2066, Brüssel: Europäische Union, 2024.
- [162] P. Messad, „Nachhaltige Kraftstoffe: Branche drängt auf Trennung der Energiebesteuerungsrichtlinie,“ EURACTIV, 26 September 2024. [Online]. Available: <https://www.euractiv.de/section/verkehr/news/nachhaltige-kraftstoffe-branche-draengt-auf-trennung-der-energiebesteuerungsrichtlinie/>. [Zugriff am 22 Mai 2025].
- [163] D. Dilba, „Hydrogen’s journey to an aircraft fuel tank,“ MTU Aero Engines | AEROREPORT - The Aviation Magazine of MTU Aero Engines, 05 Mai 2021. [Online]. Available: <https://aeroreport.de/en/innovation/hydrogen-s-journey-to-an-aircraft-fuel-tank>. [Zugriff am 30 Mai 2025].



- [164] Statistisches Bundesamt (Destatis), Statistischer Bericht - Luftverkehr auf Hauptverkehrsflughäfen 2023, Statistisches Bundesamt (Destatis), 2024.
- [165] Statistisches Bundesamt (Destatis), Luftverkehr auf Hauptverkehrsflughäfen 2022, Statistisches Bundesamt (Destatis), 2023.
- [166] Statistisches Bundesamt (Destatis), Luftverkehr auf Hauptverkehrsflughäfen 2021, Statistisches Bundesamt (Destatis), 2022.
- [167] Statistisches Bundesamt (Destatis), Luftverkehr auf Hauptverkehrsflughäfen 2020, Statistisches Bundesamt (Destatis), 2021.
- [168] Statistisches Bundesamt (Destatis), Luftverkehr auf Hauptverkehrsflughäfen 2019, Statistisches Bundesamt (Destatis), 2020.
- [169] Statistisches Bundesamt (Destatis), Luftverkehr auf Hauptverkehrsflughäfen 2018, Statistisches Bundesamt (Destatis), 2019.
- [170] Statistisches Bundesamt (Destatis), Luftverkehr auf Hauptverkehrsflughäfen 2017, Statistisches Bundesamt (Destatis), 2018.
- [171] Statistisches Bundesamt (Destatis), Luftverkehr auf Hauptverkehrsflughäfen 2016, Statistisches Bundesamt (Destatis), 2017.
- [172] Statistisches Bundesamt (Destatis), Luftverkehr auf Hauptverkehrsflughäfen 2015, Statistisches Bundesamt (Destatis), 2016.



Anlage I

Annahmen und Parameter der Bedarfsanalyse

Es wurden drei Szenarien entwickelt und die Bedarfe und Emissionen von fossilem Kerosin, biogenem SAF, strombasierten SAF und Wasserstoff in den Szenarien ermittelt. Details und Hintergründe zur Ableitung der Szenarien sind in Kapitel 5 erläutert. Unter anderem gelten folgende Annahmen:

1. Die Nutzung von H₂-Flugzeugen ab dem Markteintritt wächst linear zu den Zielwerten im Jahr 2050.
2. Wasserstoff steht in ausreichender Menge zur Deckung der ermittelten Bedarfe zur Verfügung.
3. Fossiles Kerosin ist in allen Szenarien bis 2050 der günstigste Kraftstoff.
4. Im Szenario "Konventionelle Technologien" wird SAF erst mit Ablauf des Book-and-Claim-Verfahrens genutzt.
5. Das CO₂-Äquivalent für Wasserstoff setzt sich aus dem für grünen und grauen Wasserstoff zusammen. Es wird angenommen, dass diese Teile entsprechend dem Anteil erneuerbarer Energien am Strommix der EU verwendet werden. Es wird der Strommix der EU und nicht der deutsche verwendet, da davon ausgegangen wird, dass H₂ importiert werden muss.
6. Zukünftige Flugzeuge werden effizienter, sodass der Kraftstoffbedarf sinkt. Es wird zunächst ein geringerer Effizienzgewinn angenommen und ab 2035 ein etwas größerer, da zu diesem Zeitpunkt eine neue Flugzeuggeneration dominiert, die einen Effizienzsprung aufweist.



Außerdem wurden folgende weitere Annahmen getroffen und Parameter gewählt:

Parameter	Einheit	konventionelle Technologien	SAF-Fokus	Technologiemix	Kommentar	Quelle
Energiedichte SAF und fossiles Kerosin	MJ/kg	42,8	42,8	42,8	-	[129]
Energiedichte Wasserstoff	MJ/kg	119,99	119,99	119,99	-	[130]
Durchschnittlicher Kerosinbedarf pro Flug	kg	4.417	4.417	4.417	Der durchschnittliche Kraftstoffbedarf wurde auf Basis von 42.287 von 53.731 Flügen ab den Flughäfen STR, FKB und FDH im Jahr 2024 ermittelt. Annahme: Sowohl das Verhältnis der Flüge pro Kurz- / Mittel- / Langdistanz als auch der eingesetzten Flugzeugtypen bleibt konstant.	[131] [132]
Markteintritt Wasserstoff-Regionalflugzeuge	Jahr	2035	2030	2030	-	Einschätzung nach vgl. Kapitel 3.2, Abbildung 7
Markteintritt Wasserstoff - klassische Passagiermaschinen	Jahr	2047	2043	2038	-	Einschätzung nach vgl. Kapitel 3.2, Abbildung 7
Anteil Wasserstoff Regionalflugzeuge (2050)	Prozent	5	12	30	Anteil der tatsächlich mit H2-Flugzeugen durchgeführten Flüge von allen theoretisch mit Wasserstoff durchführbaren Flüge (maximaler Anteil Wasserstoff - Regionalflugzeuge, kürzere Strecken)	Einschätzung nach: [86] [55] [88] [75]
Anteil Wasserstoff Passagiermaschinen (2050)	Prozent	2	12	25	Anteil der tatsächlich mit H2-Flugzeugen durchgeführten Flüge von allen theoretisch mit Wasserstoff durchführbaren Flüge (maximaler Anteil Wasserstoff - große Flugzeug und längere Strecken für kleinere Flugzeuge)	Einschätzung nach: [86] [55] [88] [75]
Maximaler Anteil Wasserstoff - Regionalflugzeuge, kürzere Strecken	Prozent	2	7	12	Schätzung basiert auf der Auswertung der Flüge aus Baden-Württemberg bzgl Zielort, Streckenlänge und Flugzeuggewicht Technologiemix: Anteil der Flüge zu Vorreiterflughäfen und in "Tankering-Distanzen" Konventionell: Anteil der Flüge zu Vorreiterflughäfen	vgl. Kapitel 5.1



Maximaler Anteil Wasserstoff - große Flugzeug und längere Strecken für kleinere Flugzeuge	Prozent	24	42	60	Schätzung basiert auf der Auswertung der Flüge aus Baden-Württemberg bzgl Zielort, Streckenlänge und Flugzeuggewicht Technologiemix: Anteil der Flüge zu Vorreiterflughäfen und in "Tankering-Distanzen" Konventionell: Anteil der Flüge zu Vorreiterflughäfen	vgl. Kapitel 5.1
CO₂-Äquivalent fossiles Kerosin	gCO ₂ e q/MJ	89	89	89	-	vgl. Kapitel 3.1
CO₂-Äquivalent biogenes SAF	gCO ₂ e q/MJ	24,5	24,5	24,5	-	vgl. Kapitel 3.1
CO₂-Äquivalent strombasiertes SAF	gCO ₂ e q/MJ	10,63	10,63	10,63	-	vgl. Kapitel 3.1
CO₂-Äquivalent Wasserstoff (grün)	gCO ₂ e q/MJ	4,39	4,39	4,39	-	vgl. Kapitel 3.1
CO₂-Äquivalent Wasserstoff (grau)	gCO ₂ e q/MJ	84,17	84,17	84,17	-	vgl. Kapitel 3.1
Erfüllungsquote der ReFuelEU PtL Vorgabe	Prozent	80	100	100	Die PtL-Quote kann nicht in jedem Szenario erreicht werden.	-
Energiebedarf von H₂-Flugzeugen	Prozent	110	110	110	LH ₂ -Flugzeuge benötigen etwas mehr Energie als konventionelle Flugzeuge.	-
Wachstum des Luftverkehrsaufkommen	-	niedrig	moderat	stark	-	Vgl. Kapitel 4.2

Tabelle 4: Übersicht der Annahmen der Bedarfsanalyse.