



Studienarbeit

# **Stakeholder-Kostenanalyse an Flughäfen bei Einführung neuer Luftfahrzeugantriebe**

Henrieta Bohdanova

Geboren am: 28.06.1998 in Kyiv

10.12.2024

Gutachter

**Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Fricke**

Betreuer

**Dipl.-Ing. Edgar Böttcher**

---

Henrieta  
Bohdanova



# Thesen zur Arbeit

1. These 1: Betriebskosten
2. These 2: Die Verteilung alternativen Antrieben einer Flotte kann einen großen Einfluss auf die Infrastrukturkosten eines Flughafens haben.
3. These 3: Die Infrastrukturkosten eines Flughafenbetreibers bleiben über die Jahre konstant, da die einmaligen Investitionen über die Abschreibungsdauer verteilt werden, jedoch keine signifikanten Schwankungen in den Betriebskosten auftreten.
4. These 4: Die Infrastrukturkosten sind schwer vorherzusagen, da unerwartete Reparaturen
5. Am Ende der Abschreibungsperiode müssen erhebliche Investitionen getätigt werden, um die Infrastruktur zu erneuern, was zu einem sprunghaften Anstieg der Infrastrukturkosten nach der Abschreibung führt.



# 1 Abkürzungen, Einheiten und Symbole

## Abkürzungen

CORSIA	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation
DOC	Direct Operating Costs
EU	Europäische Union
IOC	Indirect Operating Costs
TOC	Total Operating Costs
ETS	Total Operating Costs
ICAO	Total Operating Costs
IATA	Total Operating Costs
SAF	Sustainable Aviation Fuel
HEFA	Hydroprocessed Esters and Fatty Acids
BA	Batterie-Antrieb

## Einheiten

<i>bar</i>	Bar
<i>km</i>	Kilometer
<i>EUR</i>	Euro
<i>USD</i>	Euro
<i>m<sup>3</sup></i>	Kubikmeter
<i>t</i>	Tonnen
<i>kg</i>	Kilogramm

## Symbole

<i>CO<sub>2</sub></i>	Kohlenstoffdioxid
<i>LH<sub>2</sub></i>	flüssiger Wasserstoff
<i>O<sub>2</sub></i>	Ozon

## 2 Einleitung

Laut Verordnung (EU) 2021 soll die EU zum Jahr 2050 klimaneutral sein, aber auch zum Jahr 2030 sollen die Treibhauseffekte um mindestens 55% im Vergleich zum Jahr 1990 reduziert werden. Ob nachhaltige Alternativen die Emissionswerte mindern oder vermeiden können, ist derzeit ein begehrtes Thema.

Diese Arbeit widmet sich dem Thema nachhaltige Antriebe, nämlich im Fokus stehen nachhaltige Kraftstoffe (SAF), Wassertreibstoff und batterieelektrische Antriebe.

Im Jahr 2023 ermittelte Umweltbundesamt, dass die Treibhausgase im Vergleich zum Vorjahr um mehr als zehn Prozent gesunken sind. Nichtsdestotrotz wurden allein in Deutschland im Jahr 2023 673 Mio. Tonnen Treibhausgase freigesetzt [1].

CO<sub>2</sub> Emissionen sind eine Ursache für den Klimawandel. Luftverkehr hat auch seine Rolle in diesen Auswirkungen. Etwa 2,5% von ganzen anthropogenen CO<sub>2</sub> Emissionen weltweit werden vom Luftverkehr durch die Treibstoffverbrennung verursacht [2].

Wenn die Emissionen weiter mit der Wachstumsrate (2002-2022) von ca.1,8% (Daten aus: Worldatabank <https://data.worldbank.org/indicator/EN.GHG.ALL.MT.CE.AR5>) jährlich erhöhen werden, erreichen die Treibhausgase im Jahr 2050 den Wert von 88 Gt ohne Berücksichtigung von Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft. (64% Steigung?)

Neben dem Kohlendioxid CO<sub>2</sub> und Wasserstoff H<sub>2</sub>O entstehen bei der Verbrennung des Treibstoffs andere Nebenprodukte, die das Klima beeinflussen, wie Stickoxide NO<sub>x</sub>, die für Ozonbildung in der Stratosphäre verantwortlich sind [2].

Durch die neuartigen Konfigurationen und alternative Kraftstoffe und Antriebe existiert die Möglichkeit die unnötigen Emissionen zu vermeiden.

Innovative Antriebe, wie Batterie, Wassertreibstoff oder Sustainable Aviation Fuel (SAF), versprechen unter nachhaltiger Produktion und Logistik geringere Einfluss auf die Umwelt und somit die Reduktion der Emissionen.

Eine zusammenfassende Berechnung der Kosten für die alle drei Alternativen durch die Einführung dieser Antriebe und den Betrieb entstehen, wurde bislang noch nicht systematisch untersucht. In der wissenschaftlichen Arbeiten sind die bereits getrennte Kostenberechnungen für die einzelne Alternative, meistens für elektrische oder wasserstoffbetriebene Flugzeuge, zu finden. Die Interesse für das Thema im Vergleich zu ... deutlich gestiegen. Neue Erkenntnisse und Vorschläge.

Dafür interessant anzuschauen, wie sich konventionelle Kraftstoff-Flugzeugen und innovativen Antriebe unterscheiden und welche Veränderungen der Betrieb-, Infrastruktur- und Ausbildungskosten dadurch entstehen.

Dieses Thema ist für die Praxis relevant, weil alle Fluggesellschaften bestimmten Kriterien unterliegen. Geprägt von strengeren und wachsenden Maßnahmen in Bezug auf die Treibhausgase, brauchen die Betriebsunternehmen neue Technologien, um die höhere CO<sub>2</sub>-Emissionen und damit verbundene höheren Kosten zu vermeiden. Es soll untersucht werden, ob die nachhaltigen Antriebe eine Möglichkeit haben kostengünstig im Markt zu gelangen und Wettbewerb durchstehen oder sogar als Ersatz für die konventionellen Kraftstoffe, wie Kerosin, dienen können.

Im Rahmen dieser Studienarbeit werden folgende Themen berührt. Kapitel 2 stellt die relevanten Grundlagen zur weiteren Forschung dar, wie Stakeholder am Flughafen und deren Teil an der Abfertigung eines Flugzeugs, die Betriebskosten, gesetzliche Einflüsse auf der Luftverkehr sowie die zukünftigen Flugzeugkonfigurationen mit neuer Antriebstechnologien. Darauf aufbauend werden im Kapitel 3 die Methodik für die Kostenberechnung und betriebliche Szenarien für einen Flughafen definiert, als auch die getroffenen Annahmen erörtert. Kapitel 4 begeben sich um die Auswertung der Kostenanalyse für den Betrieb und aufgestellten Betriebsszenarien, dazugehörige Sensitivitätsanalyse und kritische Auseinandersetzung mit den Ergebnissen. Zusätzlich werden in diesem Kapitel die vorgeschlagene Hypothesen bestätigt oder widerlegt.

Kapitel 5 enthält eine abschließende Zusammenfassung und erdenkliche Richtung für die weiterführende Forschungsarbeiten.



## 3 Relevante Grundlagen und Überblick über alternative Antriebe

Für die Analyse der Forschungsfrage es ist wichtig die zentralen theoretischen Begriffe zu definieren. Das Kapitel 3.2 stellt die Grundlagen der Flugzeugabfertigung und die beteiligten Stakeholder am Flughafen dar. Zunächst beschäftigt sich das Kapitel ?? mit den bedeutenden Informationen zu Kosten am Flughafen und Emissions-Regulierungsinitiativen. Anschließend werden im Teil 3.3 die neuartigen alternativen Antriebe und dadurch betriebene Konzepte und Flugzeugmodelle vorgestellt.

### 3.1 Stakeholder am Flughafen

Am Flughafen ist eine Vielzahl an Stakeholdern beschäftigt, die miteinander agieren. Durch die neuen Luftfahrzeugantriebe steht diesen Akteuren eine schwierige Aufgabe vor.

#### Flughafen

Einer der Stakeholder am Flughafen ist der Flughafenbetreiber selbst. Der Flughafen stellt der Fluggerät- und Passagierabfertigung Infrastruktur wie bspw. Terminals oder Start- und Landebahnen zur Verfügung (das gilt als Kernfunktion), wofür Nutzungsgebühren erhoben werden [2].

Zum Flughafen gehören außer Start- und Landebahnen unter anderem Rollwege, Vorfeld, Flugsteige, sowie die Infrastruktur für die Gepäckabfertigung.

Darüber hinaus stellen Flughäfen eine intermodale Verknüpfung dar [2]. Direkte Nutzer von Flughäfen sind die Im- und Exporteure von Dienstleistungen und Waren [3].

Flughäfen sind ein großer Teil der regionalen Wirtschaft [3] und sorgen für eine Vielzahl an Arbeitsstellen. Dennoch verursachen sie ein Ausmaß an Lärm und Umweltbelastungen, die durch die Emissionen der Flugzeuge entstehen. Demnach verlangt der Flughafen hierfür ebenfalls Entgelte.

Für die Entwicklung der Infrastruktur und Begleichung der Betriebskosten müssen Flughäfen manchmal finanzielle Unterstützung aus anderen Quellen, wie staatlicher Finanzierung, in Anspruch nehmen [3].

Die Europäische Kommission besagt, dass Flughäfen mit einem Passagieraufkommen von über 3 Millionen Menschen p.a. in der Lage sind, ihre Betriebskosten selbst durch Gewinn zu decken.

Eine Kategorisierung der Flughäfen basiert immer auf der Passagiermenge. Aufgrund dieser Kategorisierung für das Jahr 2023 gab es in Deutschland sieben große Gemeinschaftsflughäfen, einschließlich 2 Hubs, und 16 Regionalflughäfen (kleine und große).<sup>1</sup>

Der Europäischen Kommission nach werden die Flughäfen nach jährlichem Passagieraufkommen folgend unterteilt:

- große Gemeinschaftsflughäfen > 10 Mio. Passagieren;
- nationale Flüge mit 5 bis 10 Mio. Passagieren;
- große Regionalflughäfen mit 1 bis 5 Mio. Passagieren;
- kleine Regionalflughäfen < 1 Mio. Passagieren.

„große Gemeinschaftsflughäfen“ mit über 10 Mio. Passagieren jährlich;

#### **Fluggesellschaft**

Fluggesellschaften sind Dienstleister, welche die Infrastruktur eines Flughafens

---

<sup>1</sup>Die Daten stammen aus dem Statistischem Bericht, Luftverkehr auf Hauptverkehrsflughäfen 2023

für die Abfertigung von Passagieren und Fracht nutzen. Sie sind gewinnorientiert und haben das Ziel wettbewerbsfähig zu bleiben. Für eine Fluggesellschaft ist von Relevanz, wie hoch die Betriebskosten (Erträge) sind, die der Flughafen verlangt [3]. Die Erträge unterscheiden sich in Flughafengröße und Flugzeugtyp.

Fluggesellschaften und Treibstoff-Firmen sind für die sichere Betankung verantwortlich. Quelle: Annex 14 (Doc 9137 Teil 8)

#### **Bodenverkehrsdienste**

Bodenverkehrsdienste sind für die Abfertigung der Flugzeuge auf dem Boden zuständig. Nach Conrady [2] gehört zu ihren Tätigkeiten außerdem: die Fluggastabfertigung, administrative Abfertigung sowie Transportdienste. Sie sind auf Infrastruktureinrichtungen wie Gepäckförderanlagen und Betankungsanlagen angewiesen. Die Abfertigung kann entweder von einer Fluggesellschaft, einem Flughafen oder einem unabhängigen Dienstleister durchgeführt werden. Meistens werden die Bodenverkehrsdienste in Deutschland von den Flughäfen übernommen.

Bodenverkehrsdienste sind auch für den Transport von Fracht, Post und Gepäck bis zum Flugzeug zuständig [4].

OPS 1.1150 "Handling agent. An agency which performs on behalf of the operator some or all of the latter's functions including receiving, loading, unloading, transferring or other processing of passengers or cargo;"

Zu den Systempartnern am Flughafen zählen ebenfalls Luftfahrzeughersteller, Flugsicherungen, Reiseveranstalter, staatliche Institutionen [5], sowie Beteiligte wie Passagiere, Arbeitskräfte und Passagierdienstleister. Sie nehmen nicht direkt an der Flugzeugabfertigung bzw. an Betrieb am Vorfeld teil, deswegen werden sie nicht weiter betrachtet. Analog hierzu wird die Flugsicherung aufgrund unveränderter Umstände durch alternative Antriebe nicht betrachtet. Die Arbeit wird sich auf die Betriebskosten einer Fluggesellschaft und Infrastrukturkosten des Flughafens fokussieren.

#### **Vorfelddienste**

Betankungsdienste führen nicht nur die Be- und Entladung und Lagerung durch, sondern auch für andere Flüssigkeiten (wie z.B. Öl) zuständig. Wartungsdienste führen die routinemäßige Kontrolle den Flugzeugen vor den Flügen (line Maintenance). Die Reinigungsdienste und der Flugzeugservice sind Reinigung von Innen und Außen eines Flugzeugs verantwortlich, Wasserservice, Klimaanlage in der Kabine und Enteisung.

Auf die Kosten eingehen: Laut OPS 1.175 Anzahl der benötigten Bodenmitarbeiter ist von dem Maßstab der Operationen am Flughafen anhängig.

Gute Zusammenarbeit der Akteure/Stakeholder fördert die Pünktlichkeit der Abfertigung und hilft die Verspätungen zu vermeiden [6].

„Betriebskosten“: die mit der Erbringung von Flughafendienstleistungen verbundenen Kosten eines Flughafens; dazu gehören Kostenkategorien wie Personalkosten, Kosten für fremdvergebene Dienstleistungen, Kommunikation, Abfallentsorgung, Energie, Instandhaltung, Mieten und Verwaltung, jedoch weder Kapitalkosten, Marketingunterstützung bzw. andere Anreize, die der Flughafen den Luftverkehrsgesellschaften bietet, noch Kosten für Aufgaben mit hoheitlichem Bezug;

## 3.2 Bodenabfertigungen eines Luftfahrzeugs

Für die Veranschaulichung welche Änderungen an der Infrastruktur der Flughafen durch neuartigen Antrieben vorgenommen werden müssen, es ist notwendig wichtige Begriffe einer Abfertigung des konventionellen Flugzeugs zu hervorheben (definieren). Unter konventionellen Luftfahrzeugen sind die zu verstehen, die mit fossilen Treibstoffen, wie Kerosin, betrieben werden. Der Fokus wird auf die gewerblichen Passagier-Flugzeuge gelegt, weil die Abfertigung den Passagieren besonders strengere Sicherheitsmaßnahmen erfordert.

Blockzeit setzt sich zusammen aus der Zeit vom Beginn der Bewegung von Parkposition bis Ende der Bewegung am Parkposition, einschließlich der Flugzeit.

Am Parkposition der Flughafen werden Triebwerke ausgeschaltet und der Ablauf eines Turn Around beginnt. Mensen [4] definiert die Turn Around, wie die Abfertigung

der Flüge, die zeitnah zusammen liegen. Bei einem Turn Around wird das Luftfahrzeug durch viele Akteure am Flughafen, wie Flugplatzbetreiber, Fluggesellschaft und die Dritte, für nächsten Flug vorbereitet [4]. Es muss ausgeladen, kontrolliert, gereinigt, anschließend versorgt und für den nächsten Flug beladen werden.

Die Abbildung 3.1 stellt die Abfertigung einer Maschine dar. ICAO Doc 9157: Abfertigung eines Passagierflugzeugs besteht aus Passagier-, Gepäck- und Frachtabfertigung, Sanitärservice, Wasserbetankung, Gepäckabfertigung, Betankung, Stromversorgung, Startluft?, Schleppen von Flugzeugen, Bordküchenservice, Bereitstellung von Klimaanlage und Sauerstoff, Wartungsservice. Wie ist in der Abbildung zu sehen ist.

Das Flugzeug wird an Hilfstriebwerk (auxiliary power unit - APU) angeschlossen [4]. APU liefert Strom, wenn die Haupttriebwerke nicht laufen (quelle: [Annex 14. Doc 9137 Part 8]). Parallel werden Fracht und sonstige Gepäckeinheiten mit dem Hubwagen abgeladen und mit Transporthängern zur Sortieranlage im Terminal gebracht [4]. Im Falle Parkposition direkt am Flughafen können Passagiere direkt über Treppe oder ... zum Terminalgebäude gelangen. Wenn Parkposition am Vorfeld liegt, muss auf einen Bus gegriffen werden.

Laut EU-OPS 1.305 darf aus Sicherheitsgründen das Luftfahrzeug erst betankt werden, wenn die Passagiere sich nicht am Bord befinden. Je nach Flugzeuggröße dauert die Abfertigung unterschiedlich lang. Bei einem kleineren Flugzeug ist die Dauer kürzer als bei einer größeren Maschine.

Je nach Flugdistanz und nach Flugzeuggröße kann es zu unterschiedlichen Abfertigungszeiten kommen (Quelle) In Bezug auf Transportdistanz unterscheidet man nach Kurz- (ca.2 Stunden oder bis 1000 km) und Mittelstreckenflüge (bis 3,5 Stunden oder bis 3000 km), Langstreckenflüge (ab 3,5 Stunden und ab 3000 km) [4]. Der Flughafen Frankfurt definiert jedoch die Transportdistanz anders, dieser Werte werden auch im Kapitel 3.4 benutzt.

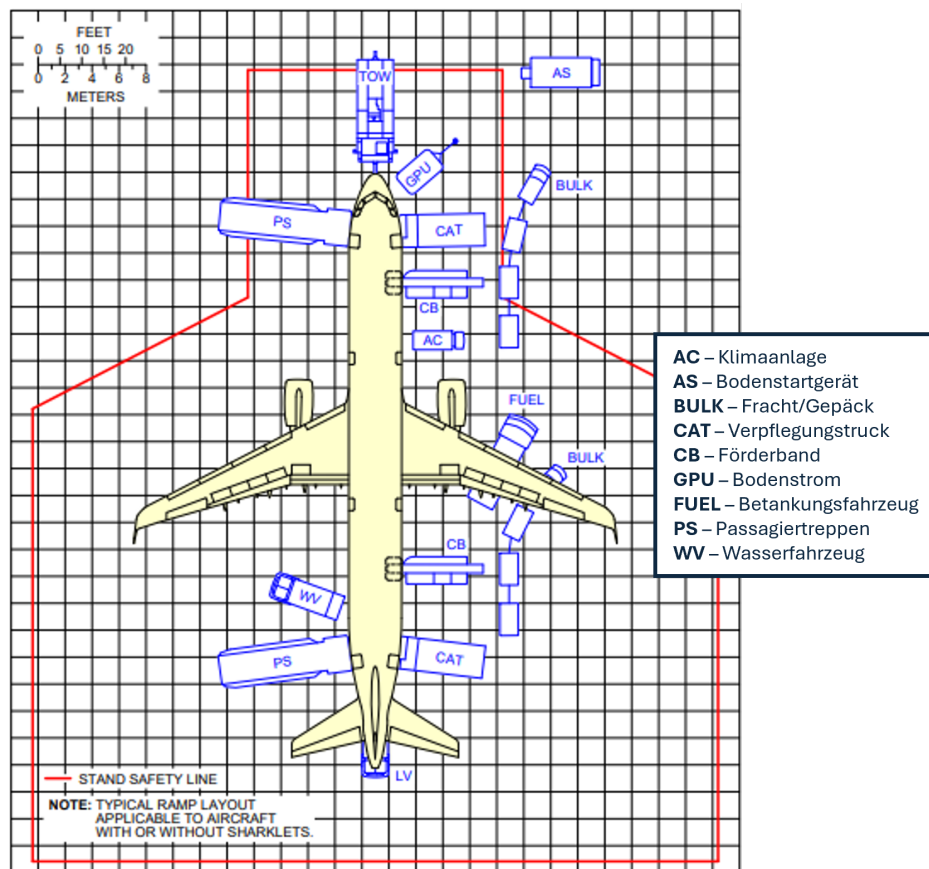


Abbildung 3.1: Abfertigung eines A321 [7] mit zusätzlichen Hinweisen

## 3.3 Neuartige Antriebe

Obwohl Kraftstoffverbrauch hat sich in der letzten 30 Jahren halbiert [4], der Auswirkungen bleiben hoch. Bei der Untersuchung der alternativen Antriebe sind bestimmte Überlegungen relevant. Dichte von Energieträger, Kosten und Verfügbarkeit des Rohstoffs, Sicherheit in Bezug auf Herstellung und Benutzung, direkte und indirekte CO<sub>2</sub> Emissionen [8].

In diesem Kapitel werden folgende vielversprechende Energieträger angeschaut und zusammengefasst: nachhaltige Kraftstoffe (SAF), Batterie-Antriebe (elektrochemische) und Wasserstoff.

### 3.3.1 Sustainable Aviation Fuel (SAF)

Sustainable Aviation Fuel oder nachhaltige Flugtreibstoff sind synthetische flüssige Biotreibstoffe oder erneuerbare nicht biogene Stoffe, die mit herkömmlichen Flugkraftstoffen und bestehenden Betankungssysteme kompatibel sind. Deswegen werden sie auch als Drop-In Treibstoffe bezeichnet [9]. Die SAFs werden zu herkömmlichen Treibstoffen beigemischt. IATA besagt, dass die zulässige Mischrate zurzeit bei max. 50 % liegt. Es existieren bis jetzt elf Verfahrenswege aus unterschiedlichen Rohstoffen für SAF-Produktion und manche werden gerade für die Nutzung bewertet [10].

Die SAFs haben ähnliche Charakteristiken, wie Kerosin, was die Energiedichte betrifft. Dennoch Großteil von SAF weisen keine Aromaten auf. Fehlende aromatische Verbindungen in den SAF kann zu Leckagen in der Dichtung führen [11]. Aus diesem Grund bis jetzt ist kein Flugzeug für das Fliegen mit reinem SAF zertifiziert [9].

Im Hinblick auf die Zukunft ist es zu erwarten, dass Reduktion von CO<sub>2</sub> mit dem reinen SAF realisiert werden kann. Ein praxisnahes Beispiel dafür ist den ersten transatlantischen Demonstrationsflug im November 2023 von der Fluggesellschaft Virgin Atlantic, welche mit 100 % SAF durchgeführt wurde [12].

Diese Arbeit wird auf reine SAF ohne Beimischung beschränkt, da nur so kann das Ziel 2050 erreicht werden.

Es gibt kein SAF-Flugtreibstoff, die Emissionen komplett vermeidet, jedoch durch bestimmte Verfahren können sie bis 95 % reduziert werden [10].

Aufgrund der kommerziellen Verfügbarkeit ist Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA) eine der wichtigsten Verfahren. Die HEFA wird aus tierischen und pflanzlichen Ölen und Fetten mittels Hydroprocessing hergestellt [13]. Die Haupteinschränkung von HEFA ist begrenzte Anzahl an Rohstoffen [13]. Der Anteil der SAF-Nutzung (HEFA) ist bei ... Vielversprechend ist auch das Verfahren Power-to-liquid (PtL). Dieser katalytische Verfahren nach Fischer-Tropsch nutzt für die Herstellung eine Kombination von Kohlenmonoxid (CO) und durch Elektrolyse produzierter Wasserstoff (H<sub>2</sub>) [13]. Das Verfahren bringt die höchste CO<sub>2</sub>-Emissionseinsparungen [14], jedoch befindet sich im früheren Stadium [13].

In Bezug auf die Infrastruktur sind manche davon überzeugt, dass es keine Änderungen im Flugzeug oder Betankungssystem notwendig sind [15] Wobei Dahal et al. [16] geht jedoch davon aus, dass neue Antriebe und Triebwerke für die Nutzung des reinen SAF entwickelt werden müssen. Das reine SAF wurde noch nicht zertifiziert, um in das Treibstofflager vom Flughafen zu gelangen [9].

Durch Produktion und Lieferung können es zu Emissionen-Ausstoß kommen, aus diesem Grund

Die Preise für nachhaltige Flugtreibstoffe sind zwei- bis zu fünfmal höher als für herkömmliche Kerosin [9]

In EU-Richtlinien sowie in CORSIA sind die Kriterien für SAF-Qualität festgelegt. Im Rahmen EU-ETS gelten SAFs als emissionsfrei und bei der richtigen Zertifizierung sind vor der Abgabe von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten befreit [10]. Die Preise für nachhaltige Flugtreibstoffe sind zwei- bis zu fünfmal höher als für herkömmliche Kerosin [9] Um Fluggesellschaften für die Nutzung der nachhaltigen Kraftstoffe zu motivieren, hat EU-ETS 20 Mio. Zertifikaten zur Verfügung gestellt [10]. In ReFuelEU sind vor allem die verpflichtete Beimischungsanteile von nachhaltigen Stoffen festgelegt.

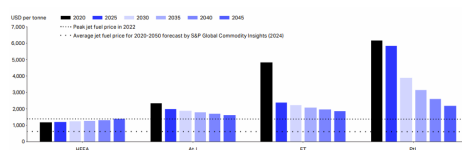


Abbildung 3.2: Durchschnittlicher IATA-Mindestverkaufspreis [10]

Die sind gleichzeitig für Kondensstreifen verantwortlich (Quelle), die klimaneutral wirken (Quelle).

Laut IATA durch Drop-In SAF können die Emissionen um 62 % reduziert werden. <https://www.iata.org/en/pressroom/2023-releases/2023-06-04-03/> As a drop-in solution, SAF is expected to deliver about 62% of carbon mitigation needed to achieve net zero by 2050"



### 3.3.2 Batterie-Antrieb

Eine andere Möglichkeit, Emissionen zu reduzieren, direkten Strom als Antrieb mittels Elektromotoren und Stromspeicher, wie Batterien oder Brennstoffzellen zu nutzen. Eine einfache Darstellung des Batterie-Antriebs (BA) in der Abbildung 3.3 gezeigt.

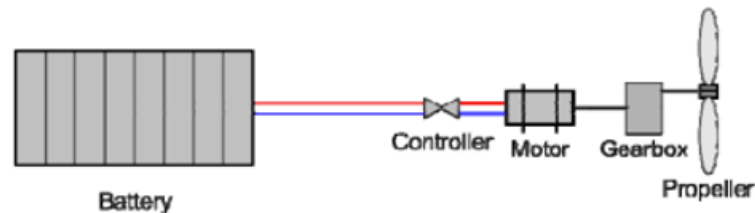


Abbildung 3.3: [17]

Es gibt drei unterschiedliche Antriebskonfigurationen von elektrischen Flugzeugen: vollelektrisch, funktioniert nur auf der Batterie oder Brennstoffzelle als Energiequelle, turboelektrisch und hybrid-elektrisch ist die Mischung von konventionellen Gasturbinenriebwerke mit Kerosin und Batterie oder Brennstoffzelle [16]. Im Weiteren wird ein vollelektrisches Antrieb beschrieben. Funktionsweise Elektromotor: Durch Potentialdifferenz und einen Stromfluss wird die elektrische Energie in die mechanische umgewandelt. Im Vergleich zum Verbrennungsmotor ist der einzige beweglicher Teil bei BA ist der Rotor [18], was schließlich die Wartungskosten verringern kann. Außerdem besteht der elektrische Antrieb aus Controller, welcher den Energiefluss steuert. Durch Controller wird festgelegt, welche Leistung soll der Motor bringen bzw. wie viel Energie soll von einer Batterie genommen werden für die gewünschte Leistung [18].

Batteriemanagementsystem in einem Flugzeug verfügt über die Information, wie State of Health (SOH), welcher der Unterschied zwischen Anfangs- und Bestandskapazität eine Batterie anzeigt, und State of Charge (SoC), welcher zeigt, wie viel Prozent der verfügbaren Kapazität geladen werden kann [18].

Durch die Umwandlung der elektrischen Energie in die chemische kann die Energie in der Batterie gespeichert werden. Im Laufe des Fluges, die Batterien verändern sein Gewicht nicht, unabhängig davon, ob sie leer oder vollgeladen sind [18]. Eine weit verbreitete in der wissenschaftlichen Literatur Batterie ist das Lithium-Ion. Die

haben eine hohe Energiedichte im Vergleich zu anderen vorhandenen Batterien. Heutige Li-ion Batterien haben Energiedichte 100-265 Wh/kg (Quelle). Werden diese Werte zu Kerosins spezifische Energiedichte von 12 kWh/kg verglichen [19], das macht Differenz ist ca. 45-mal höher als von einer Li-Ion-Batterie. Das weist darauf hin, dass Batterien viel mehr Gewicht für die gleiche Energie benötigen/haben. Somit steigt auch die Masse vom Flugzeug.

Die Batterien sind von äußerlichen Bedingungen beeinflussbar. Die kalte Umgebung kann der Wirkungsgrad reduzieren (Quelle), und die warme Umgebung kann zu einem schnelleren Auslaufen der Lebensdauer führen. Die Herstellung der Lithium-Ionen-Batterien ist durch Lithium-Produktion umweltschädlich (was viel Wasser verbraucht, Leckagen gefährlich) und kostenintensiv und Wartung [19].

In der Forschung sind weitere Batterien wie Lithium-Sulfur, Lithium-Air, als auch Solid-state Batterien klingen vielversprechend (Quelle).

Batteriewechsel ist kompatibler mit der Flugplanungen, aber benötigt mehreren Batterien für den Austausch, was die Logistik schwerer macht und die höheren Anschaffungskosten hat. Batterie sollen richtig und sicher gelagert werden. [20]

Batteriewechsel ist öfters vorkommende in der Literatur Ladung.

Ladeleistung ist für die Dauer der Ladung verantwortlich. Durch schnellere Ladungen wird Lebensdauer der Batterien reduziert. Was mit sich bringt, dass die Batterien schneller ausgetauscht werden müssen und mehr Kosten dadurch entsteht. (Quelle) Wobei die langsamen Laden ist für die Fluggesellschaften nicht rentabel sein kann, da wenn Flugzeug auf dem Boden steht verdienen Fluggesellschaften kein Geld.

Transportkapazität ist nicht so groß, wie bei konventionellen Flugzeugen und auch die Reichweite für Regionalflüge [21]. Die Energieproduktion ist nicht emissionsfrei [21], dafür muss mehr erneuerbaren Quellen hergestellt werden, wie Solar- und Windenergie.

In Bezug auf Sicherheit, das größte Gefahr bei BA ist chemische Reaktion des thermischen Durchgehens, wofür stabile Kühlungssysteme benötigt sind [18]. Thermisches Durchgehen verursacht einen starken Anstieg der Innentemperatur von Batterie, was zu kompletten Ausfall der Batterie oder Freisetzung der brennbaren Gase führen kann [22].

### 3.3.3 Wasserstoff-Antrieb

In vielen Forschungsarbeiten wird der Wasserstoff als die Lösung für umweltfreundliche Luftfahrt dargestellt. Diese Alternative ist jedoch von Kosten, Sicherheit und öffentliche Akzeptanz behindert [8]. Durch Nutzung von Wasserstoff werden keine CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht, jedoch es können andere Abgase wie Stickoxid NO<sub>x</sub> bei der Verbrennung in Wasserstoffturbinen oder Wasserdampf emittiert werden, was zur Bildung der Kondensstreifen führt (Quelle).

Zündungstemperatur?

**Tabelle 3.1:** Vergleich von unkomprimiertem Wasserstoffgas hinsichtlich energiebezogenen Eigenschaften mit anderen marktüblichen Treibstoffen bei 26 Celsius!

	volumetrische Energiedichte in kWh/l	gravimetrische Energiedichte in kWh/kg
Wasserstoff	2,6 [23]	37,0 [23]
Kerosin	9,5 [23]	11.9 [23]

In der Tabelle 3.1 sind die Vergleichswerte für Kerosin und Wasserstoff im flüssigen Zustand dargestellt. Der LH<sub>2</sub> zwar hat bessere Gewichtsverhältnisse als Kerosin, jedoch für die gleiche Menge Energie werden 3,5-mal so viel Platz gebraucht.

Für die Flugzeuge ist die Tankisolierung von großer Bedeutung. Der LH<sub>2</sub> muss bei -253 °C Grad gelagert werden, ansonsten wird es zur gasförmigen Form [23]. In dieser Form muss den Wasserstoff in einem Speicher bei einem Druck von 350 oder 700 bar gelagert werden [23]. Es existieren unterschiedliche Wege für Wasserstoff-Produktion. Die gängigsten Herstellungsverfahren sind die Steam Methane Reforming (SMR) und Elektrolyse. Bei SMR trifft der Wasserdampf in der Reaktion zusammen mit Methan aus Erdgas, infolgedessen entstehen der Wasserstoff H<sub>2</sub> und Kohlenmonoxid bzw. -dioxid [24]. Bei der Elektrolyse wird das Wasser mithilfe von Elektrizität in Wasserstoff und Sauerstoff O<sub>2</sub> gespalten [24]. Durch dieser Herstellungsweg können CO<sub>2</sub>-Emissionen vollständig vermieden werden [19].

Die Nachhaltigkeit der Elektrolyse ist außerdem von der Stromquelle abhängig. Wenn für die Produktion vom Wasserstoff sind die erneuerbaren Energiequellen (wie Solar- und Windanlagen) benutzt worden, dann wird als grüner Wasserstoff bezeichnet [24]. Wird der Strom aus fossilen Energieträger erzeugt, kommt es zu indirekten Kohlenstoffemissionen. Durch Elektrolyse produzierte grüner Wasserstoff

ist kostenintensiv [19] und von der Stromkosten abhängig. Bei der anderen Herstellungswege (grauer und blauer Wasserstoff) kommt es hingegen zum Ausstoß von Kohlenstoff, wobei bei blauem Wasserstoff werden die  $\text{CO}_2$  gesammelt und gespeichert [24].

Wasserstoff kann in zwei unterschiedlichen Weisen als Antrieb benutzt werden: erstens als Treibstoff für die Verbrennung in  $\text{H}_2$ -Verbrennungsmotor, zweitens als Brennstoffzelle, um den elektrischen Motor anzutreiben [15].

"Die Wasserstofftriebwerke werden in ihrer Architektur den bestehenden Düsen-triebwerken ähneln, jedoch mit einigen Ergänzungen, wie z. B. Kraftstoffpumpen und -steuergeräten, Brennkammern und einem zusätzlichen Wärmetauscher zur Verdampfung von flüssigem Wasserstoff ( $\text{LH}_2$ )" [23] Colpan et al. [23] ist der Meinung, dass die Wasserstofftriebwerke ähnlich zu konventionellen Triebweerken werden. Allerdings werden Komponente, wie Kraftstoffpumpen,

#### Flüssiger Wasserstoff

Flüssiger Wasserstoff entsteht durch die Verflüssigung des Wasserstoffs.

Senkt man die Temperatur von Wasserstoff bis  $-253\text{ }^\circ\text{C}$  [23], entsteht flüssiger Treibstoff .

Nutzung von Wassertreibstoff ist für größere Flugzeuge geeignet und somit für längere Stecken. Das vorhergeht von Gewichtsanteil von  $\text{LH}_2$  Tank in Anhängigkeit von der gelagerten Menge. Große Flugzeuge liefern bessere Speichereffizienz und Wasserstoffmenge-Verhältnis. "(da niedrige Tankgewichte erforderlich sind, um den hohen spezifischen Energievorteil von Wasserstoffkraftstoff voll auszuschöpfen)" [8]

#### Gasförmige Wasserstoff/ Brennstoffzellentechnologie

Eine andere Methode, um Wasserstoff in der Luftfahrt zu benutzen ist der Wasserstoff im gasförmigen Zustand. Diese Technologie wird noch Brennstoffzellen-technologie genannt. Durch chemische Reaktion aus gasförmige Wasserstoff  $\text{H}_2$  und Sauerstoff  $\text{O}_2$  wird Strom produziert [19] und dadurch der Propeller von dem Flugzeug angetrieben. Brennstoffzellen (wie Polymerelektrolytbrennstoffzelle) haben größere Energiedichte (als was?) und können somit für die Mittel- oder Langstrecken

benutzt werden [19]. Um mehr Energiedichte speichern zu können, muss  $H_2$  stark komprimiert werden.

hydrogen-Electric Antrieb

Sobald die Brennstoffzellen in das Flugzeug integriert sind, werden Generatoren/Generatoren das Auxiliary Power Unit (APU)-System des Flugzeugs mit Strom versorgen. Zum Einsatz kommen Brennstoffzellen mit Protonenaustauschmembran, deren Strom die Motoren antreibt. Die Motoren werden über Propeller verfügen, die dann dem Flugzeug Schub verleihen, da sie sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten im Verhältnis zur Drosselklappe drehen.[19]

Wasserstoff kann in einer chemischen Verbindung gebunden werden, wie Ammoniak und Methanol, und somit auch transportiert.

not sure:

[16] In der Dahal et al. Studie wurde ein Konzept vorgeschlagen, wo die Tanks auf dem Fuselage sich befinden. "Die kryogenen Kraftstofftanks erfordern eine angemessene Isolierung sowie die Verwendung von Materialien, die gegen Versprödung und zyklische Belastungen schützen, die durch die thermische Ausdehnung und Kontraktion beim Nachfüllen und den Kraftstoffverbrauch verursacht werden"

Die zusätzliche Ausbildung für Wartungsmitarbeiter und die Schulungen für Bodenabfertigen werden benötigt, weil die Charakteristiken von Wasserstoff sich von herkömmlichen Treibstoffen stark unterscheiden. [24]?

Betriebsleergewicht bleibt konstant, im Betracht Startbruttogewicht um 30 %, jedoch wegen großen Wasserstofftank

## 3.4 Betriebsszenarien

Betriebsszenarien helfen die vorher beschriebene Kosten in Anwendung zu bringen und zeigen eine mögliche Entwicklung im Jahr 2050. Für die Betriebsszenarien wurde der Flughafen Frankfurt gewählt. Das ist der größte Verkehrsflughafen Deutschlands und fungiert als bedeutendes Luftverkehrsdrehkreuz. Bei einem größeren Flughafen

werden die Betriebsdifferenzen deutlicher, da das Verkehrsaufkommen wesentlich höher ist. Der Fraport meldete im Jahr 2023 insgesamt 423764 gewerbliche Flugbewegungen, das sind im Durchschnitt 1160 Flugbewegungen pro Tag. Es wird angenommen, dass die Hälfte davon Abflüge sind, also müssen 580 Flugzeuge am Tag abgefertigt werden.

Die Gesamtbewegungen teilen sich nach Entfernungen folgend auf:

- Kurzstrecken (bis 2500 km) sind bei 72,8 %;
- Mittelstrecken (bis 6000 km) sind 9,3 %;
- Langstrecken (ab 6000 km) die restlichen 17,9 %.

Diese Verteilung wird auch für die Betriebsszenarien einer Flotte genutzt. Aufgrund der Flugeinschränkungen in der Nacht wird es angenommen, dass die Flüge von 6 bis 24 Uhr gleichmäßig stattfinden. Das entspricht 18 Betriebsstunden. Wie bereits diskutiert wurde, können Kurzstrecken-Flüge durch den Einsatz von batteriebetriebenen Flugzeugen ersetzt werden. Es ist nennenswert, dass die Nachfrage des Kurzstrecken-Bedarfs zwar dadurch nicht gedeckt werden kann. In Betrachtung des tatsächlichen Flugplans sind die Spitzenstunden im Laufe des Tages zu finden, wo der Verkehrsfluss stärker als im Durchschnitt ist. In diesem Fall werden höhere Infrastruktur- und Betriebskosten zu erwarten. Indessen um die Interpretation zu erleichtern, wird in dieser Arbeit angenommen, dass stündlich die gleiche Anzahl an Flugzeugen am Flughafen abgewickelt werden.

Für die Kurzstrecken wird zwischen Batterie-Antrieb und SAF unterschieden, die Mittel- und Langstrecken werden durch Flugzeuge mit Wasserstoffturbine und SAF versorgt/erfüllt.

#### **3.4.1 Betriebsszenario I**

In dem ersten Betriebsszenario wird angenommen, dass die Kurzstrecken durch die BA komplett ersetzt werden. Die Mittelstrecken werden vollkommen durch WA und die Langstrecken durch die SAF bedient.

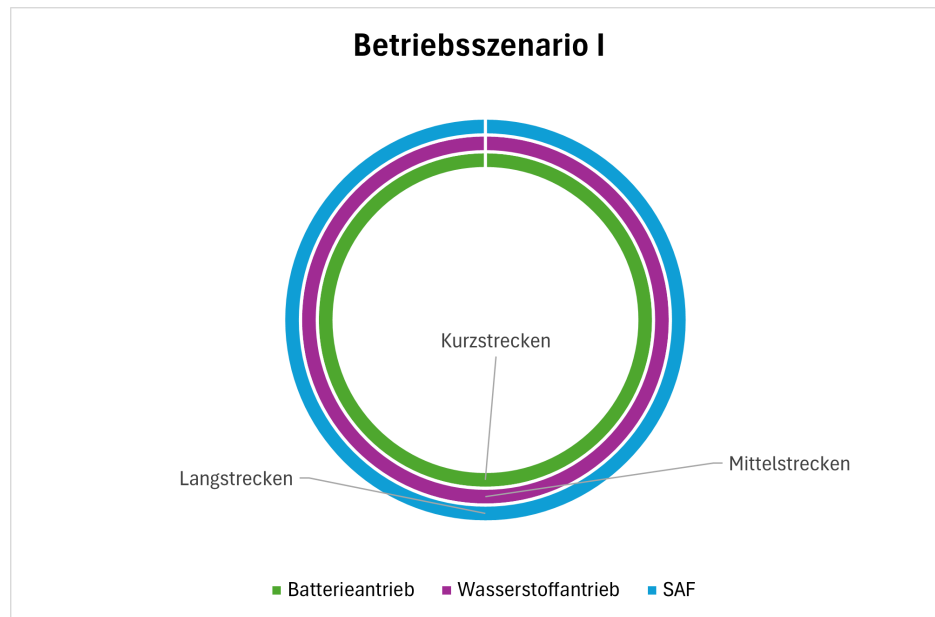


Abbildung 3.4: Aufteilung der Flugzeugflotte nach Antriebsart

### 3.4.2 Betriebsszenario II

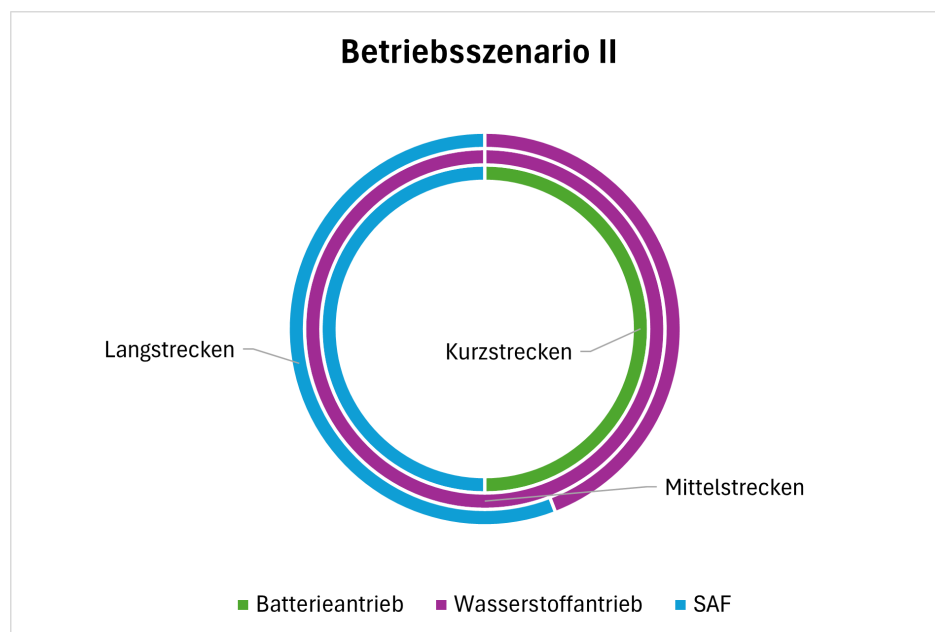


Abbildung 3.5: Aufteilung der Flugzeugflotte nach Antriebsart

Das zweite Betriebsszenario schlägt folgende Aufteilung vor: Die Hälfte der Kurzstrecken wird durch BA versorgt und die andere Hälfte durch SAF; die Mittelstrecken

werden genauso, wie im ersten Szenario komplett durch die Wasserstoffflugzeuge bedient und bei Langstrecken sind 10 % SAF und den restlichen Anteil Wasserstoff.

#### 3.4.3 Betriebsszenario III

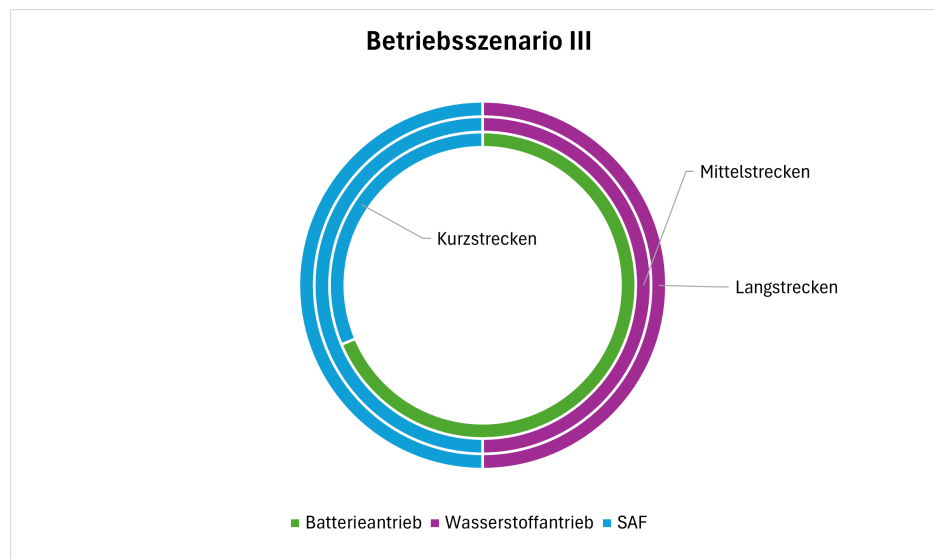


Abbildung 3.6: Aufteilung der Flugzeugflotte nach Antriebsart

50 % der Kurzstrecken sind von Batterie-Antrieb, die restlichen 22,8 % sind mit SAF betrieben. Mittelstrecken: die Hälfte der Mittelstrecken sind mit WA und die andere Hälfte mit SAF Langstrecken: die Hälfte der Mittelstrecken sind mit WA und die andere Hälfte mit SAF



# Literatur

- [1] Die Bundesregierung. *Klimaziel: Deutschland reduziert Emissionen um 37 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente*. Zugriff am 20. November, 2024. Apr. 2024. URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/treibhausgasbilanz-2023-2265440>.
- [2] R. Conrady, F. Fichert und R. Sterzenbach. *Luftverkehr: Betriebswirtschaftliches Lehr- und Handbuch*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2019.
- [3] D. Schaar und L. Sherry. „Analysis of airport stakeholders“. In: *2010 Integrated Communications, Navigation, and Surveillance Conference Proceedings*. IEEE. 2010, J4–1.
- [4] H. Mensen. *Handbuch der Luftfahrt*. Springer-Verlag, 2013.
- [5] S. Maertens und K. Fromen. „Neue EASA-Anforderungen an Bodenverkehrsdienstleister– Chancen und Risiken für die Systempartner im Luftverkehr“. In: *Die Verwaltung* 4 (2023), S. 517–537.
- [6] M. Schmidt, A. Paul, M. Cole u. a. „Challenges for ground operations arising from aircraft concepts using alternative energy“. In: *Journal of Air Transport Management* 56 (2016), S. 107–117.
- [7] Airbus. *Airbus A321 Aircraft Characteristics: Airport and Maintenance Planning*. Revision 1. Original Issue: September 30, 1992. März 2022.
- [8] P. J. Ansell. „Review of sustainable energy carriers for aviation: Benefits, challenges, and future viability“. In: *Progress in Aerospace Sciences* 141 (2023), S. 100919.
- [9] International Air Transport Association (IATA). *IATA SAF Handbook*. Zugriff am 27. Dezember 2024. 2024.

- [10] International Civil Aviation Organization (ICAO). *Sustainable Aviation Fuel (SAF) Conversion Processes*. Zugriff am 28. Dezember 2024. 2024. URL: <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Conversion-processes.aspx>.
- [11] J.-B. Jarin, J.-L. Champion-Réaud, R. Sallinen u. a. „Emissions Comparison of 100% SAF With Bio-Aromatics and Conventional (Fossil) Jet Fuel“. In: *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. Bd. 87936. American Society of Mechanical Engineers. 2024, V002T03A012.
- [12] Virgin Atlantic. *Virgin Atlantic operates world's first 100% SAF transatlantic flight*. Zugriff am 27. Dezember 2024. 2023. URL: <https://corporate.virginatlantic.com/gb/en/media/press-releases/worlds-first-sustainable-aviation-fuel-flight.html>.
- [13] A. Bauen, N. Bitossi, L. German u. a. „Sustainable Aviation Fuels: Status, challenges and prospects of drop-in liquid fuels, hydrogen and electrification in aviation“. In: *Johnson Matthey Technology Review* 64.3 (2020), S. 263–278.
- [14] S. De Jong, K. Antonissen, R. Hoefnagels u. a. „Life-cycle analysis of greenhouse gas emissions from renewable jet fuel production“. In: *Biotechnology for biofuels* 10 (2017), S. 1–18.
- [15] C. Sky u. a. „Hydrogen-powered aviation: a fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050“. In: (2020).
- [16] K. Dahal, S. Brynolf, C. Xisto u. a. „Techno-economic review of alternative fuels and propulsion systems for the aviation sector“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 151 (2021), S. 111564.
- [17] M. Hepperle. „Electric flight-potential and limitations“. In: (2012).
- [18] S. Donckers, K. Stamoulis und A. Apostolidis. „Electric flight operations for interisland mobility“. In: *Journal of Physics: Conference Series*. Bd. 2716. 1. IOP Publishing. 2024, S. 012009.
- [19] T. Dalmia, D. N. Doken, A. Kumar u. a. „Powering the Future of Electric Aviation“. In: (2022).
- [20] F. Salucci, C. E. Riboldi, L. Trainelli u. a. „Optimal recharging infrastructure sizing and operations for a regional airport“. In: *1st Aerospace Europe Conference (AEC 2020)*. 2020, S. 1–8.

- 
- [21] I. Abrantes, A. F. Ferreira, L. B. Magalhães u. a. „The impact of revolutionary aircraft designs on global aviation emissions“. In: *Renewable Energy* 223 (2024), S. 119937.
- [22] S. Shahid und M. Agelin-Chaab. „A review of thermal runaway prevention and mitigation strategies for lithium-ion batteries“. In: *Energy Conversion and Management: X* 16 (2022), S. 100310.
- [23] C. O. Colpan und A. Kovač. *Fuel Cell and Hydrogen Technologies in Aviation*. Springer, 2022.
- [24] M. Mulder, P. L. Perey und J. L. Moraga. „Outlook for a Dutch hydrogen market: economic conditions and scenarios“. In: (2019).
- [25] L. Martinez-Valencia, M. Garcia-Perez und M. P. Wolcott. „Supply chain configuration of sustainable aviation fuel: Review, challenges, and pathways for including environmental and social benefits“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 152 (2021), S. 111680.
- [26] M. A. Camilleri und M. A. Camilleri. *Aircraft operating costs and profitability*. Springer, 2018.
- [27] J. Wang. „Research on civil aircraft direct maintenance cost analysis and optimization based on data mining“. In: *Journal of Physics: Conference Series*. Bd. 1992. 4. IOP Publishing. 2021.
- [28] Umweltbundesamt. *Aviation in the EU ETS and CORSIA in the Fit for 55 package – Factsheet*. Zugriff am 23. Dezember 2024. Sep. 2023.
- [29] International Air Transport Association (IATA). *SAF Procurement: Pricing Options for Different Strategies*. Zugriff am 28. Dezember 2024. 2024.
- [30] M. Watson, P. Machado, A. da Silva u. a. „Sustainable aviation fuel technologies, costs, emissions, policies, and markets: a critical review“. In: *Journal of Cleaner Production* 449 (2024).
- [31] M. A. Anker, C. Hartmann und J. K. Nøland. „Feasibility of Battery-Powered Propulsion Systems for All-Electric Short-Haul Commuter Aircraft“. In: *Authorea Preprints* (2023).
- [32] Embraer S.A. *Embraer presents the Energia Family – Four New Aircraft Concepts Using Renewable Energy Propulsion Technologies*. Zugriff am 03. Januar 2025. 2021.

- [33] Wright Electric. *Wright Electric - Ultra-Lightweight Motors, Generators, and Batteries for Aerospace and Defense*. Zugriff am 9. Februar, 2025. 2025. URL: <https://www.weflywright.com/>.
- [34] K. Goodge und P. Withey. „An Analysis of Direct Operating Costs for the Wright Spirit Electric Aircraft“. In: *Aerospace* 11.12 (2024), S. 1007.
- [35] D. Scholz. *Aircraft Design / DOC*. Lecture Notes, Hamburg University of Applied Sciences (HAW Hamburg). Zugriff am 5. Januar, 2025. 2015.
- [36] P. B. Wangsness, I. M. Ydersbond, K. Veisten u. a. „Fremskyndet innfasing av elfly i Norge: mulige“. In: *Environmental and Resource Economics* 37.1 (2021), S. 181–210.
- [37] R. H. Liebeck, D. A. Andrastek, J. Chau u. a. *Advanced subsonic airplane design and economic studies*. Techn. Ber. 1995.
- [38] D. F. GmbH. *Flugsicherungsgebühren*. Zugriff am 11. Januar 2025.
- [39] International Energy Agency (IEA). *Fossil jet and biojet fuel production cost ranges (2010-2030)*. Zugriff am 03. Januar 2025. 2021.
- [40] International Air Transport Association (IATA). *Industry Statistics*. Report. Updated: June 2024. Juni 2024.
- [41] European Central Bank (ECB). *Euro Reference Exchange Rate: USD*. Online Resource. Zugriff am 14. Januar 2025.
- [42] Airbus. *Airbus unveils Zero-Emission Aircraft (ZEA) concepts*. Online PDF. Zugriff am 16. Januar, 2025. 2020.
- [43] European Union Aviation Safety Agency (EASA). *Type-Certificate Data Sheet: PT6A-67 Series Engines*. Techn. Ber. EASA.IM.E.008. Issue 06. European Union Aviation Safety Agency (EASA), Feb. 2022.
- [44] Fraport AG. *Flughafenentgelte nach § 19b LuftVG: Entgelte für Zentrale Bodenverkehrsdienst Infrastruktureinrichtungen (gültig ab 01. Januar 2025)*. Zugriff am 17. Januar 2025. Jan. 2025.
- [45] Eurostat. *Energy Prices: Household and Industrial Consumers*. Zugriff am 20. Januar, 2025. 2025. URL: [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg\\_pc\\_205/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_pc_205/default/table?lang=en).

- 
- [46] N. Avogadro und R. Redondi. „Demystifying electric aircraft’s role in aviation decarbonization: Are first-generation electric aircraft cost-effective?“ In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 130 (2024), S. 104191.
- [47] LET Aircraft Industries. *L410 NG*. Archivierte Version vom 18. August 2021, Zugriff am [09. Januar, 2025]. 2021. URL: <https://web.archive.org/web/20210818120608/http://www.let.cz/en/l410ng>.
- [48] Heart Aerospace. *Heart Aerospace partners with Aernnova to design and develop the structure for the ES-19 electric airplane*. Zugriff am 20. Januar, 2025. 2021. URL: <https://heartaerospace.com/newsroom/heart-aerospace-partners-with-aernnova-to-design-and-develop-the-structure-for-the-es-19-electric-airplane/>.
- [49] Discover Airlines. *Karriere als Cabin Crew – Bewerbungsbedingungen*. Zugriff am 29. Januar, 2025. 2025. URL: [https://www.discover-airlines.com/de/de/about-us/career/cabin#terms\\_conditions](https://www.discover-airlines.com/de/de/about-us/career/cabin#terms_conditions).
- [50] Airbus. *A321neo*. Zugriff am 03. Februar, 2025. URL: <https://aircraft.airbus.com/en/aircraft/a320-family/a321neo>.
- [51] D. Fonseca. *Direct Operating Costs, Fuel Consumption, and Cabin Layout of the Airbus A321LR*. Zugriff am 03. Februar, 2025. Feb. 2022.
- [52] LET Aircraft Industries. *L 410 UVP-E20 Brochure*. Zugriff am 2. Februar, 2025. 2016.
- [53] AeroTELEGRAPH. *Die Listenpreise 2018 von Airbus*. Zugriff am 14. Januar, 2025. 2018. URL: <https://www.aerotelegraph.com/die-listenpreise-2018-von-airbus>.
- [54] Y. Gu, M. Wiedemann, T. Ryley u. a. „Hydrogen-Powered Aircraft at Airports: A Review of the Infrastructure Requirements and Planning Challenges“. In: *Sustainability* 15.21 (2023), S. 15539.
- [55] Aerospace Technology Institute (ATI). *Airports, Airlines, Airspace Operations and Hydrogen Infrastructure*. Techn. Ber. Zugriff am 16. Januar, 2025. Aerospace Technology Institute (ATI), März 2022.
- [56] C. H. J. Undertaking. „Strategic research and innovation agenda 2021–2027“. In: *Agenda 2021* (2022), S. 179.

- [57] F. Schenke, J. Hoelzen, D. Bredemeier u. a. „LH2 supply for the initial development phase of H2-powered aviation“. In: *Energy Conversion and Management: X* 24 (2024).
- [58] J. Hoelzen, L. Koenemann, L. Kistner u. a. „H2-powered aviation–Design and economics of green LH2 supply for airports“. In: *Energy Conversion and Management: X* 20 (2023).
- [59] J. E. Fesmire und A. Swanger. *New LH2 Sphere Presentation*. Presentation at DOE/NASA Advances in Liquid Hydrogen Storage Workshop. Zugriff am 16. Januar, 2025. Aug. 2021.
- [60] J. Hoelzen, M. Flohr, D. Silberhorn u. a. „H2-powered aviation at airports–Design and economics of LH2 refueling systems“. In: *Energy Conversion and Management: X* 14 (2022).
- [61] Z. Guo, X. Zhang, N. Balta-Ozkan u. a. „Aviation to grid: Airport charging infrastructure for electric aircraft“. In: International Conference on Applied Energy. 2020.
- [62] J. O. Reimers. „Introduction of electric aviation in Norway“. In: *Green Future: Norway* (2018).
- [63] Z. Guo, B. Li, G. Taylor u. a. „Infrastructure planning for airport microgrid integrated with electric aircraft and parking lot electric vehicles“. In: *Etransportation* 17 (2023), S. 100257.
- [64] M. Marksel und A. Prapotnik Brdnik. „Comparative Analysis of Direct Operating Costs: Conventional vs. Hydrogen Fuel Cell 19-Seat Aircraft“. In: *Sustainability* 15.14 (2023), S. 11271.
- [65] M. M. M. Monjon und C. M. Freire. „Conceptual design and operating costs evaluation of a 19-seat all-electric aircraft for regional aviation“. In: *2020 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS)*. IEEE. 2020, S. 1–16.
- [66] N. Brüge und F. Kranich. „Wartungskosten von Passagierflugzeugen bei verschiedener Triebwerksanzahl berechnet nach DOC-Methoden“. In: (2018).