



Studienarbeit

Stakeholder-Kostenanalyse an Flughäfen bei Einführung neuer Luftfahrzeugantriebe

Henrieta Bohdanova

Geboren am: 28.06.1998 in Kyiv

04.03.2025

Gutachter

Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Fricke

Betreuer

Dipl.-Ing. Edgar Böttcher

Henrieta
Bohdanova

Thesen zur Arbeit

1. Die Einführung innovativer Antriebe führt zu höheren Betriebskosten einer Fluggesellschaft im Vergleich zu herkömmlichen Jettriebwerken, da andere technische Anforderungen und zusätzlich neue Abfertigungsprozesse notwendig sind.
2. Die Wahl der Flottenzusammensetzung mit innovativen Antriebstechnologien in verschiedenen Betriebsstrategien beeinflusst die Betriebskosten von Fluggesellschaften, wobei Szenarien mit höheren Betriebskosten geringere Infrastrukturkosten erfordern.
3. Die Abschreibungsmethode bewirkt, dass trotz hoher Investitionskosten die jährlichen Kosten belastbarer und niedriger sind, während bei geringeren Anschaffungskosten eine ineffiziente Kostenverteilung zu höheren jährlichen Belastungen führen kann.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen, Einheiten und Symbole	XIII
Abbildungsverzeichnis	XIV
Tabellenverzeichnis	XV
Formelverzeichnis	XIX
1 Motivation	1
2 Relevante Grundlagen und Überblick über alternative Antriebe	3
2.1 Stakeholder am Flughafen	3
2.2 Bodenabfertigung eines Luftfahrzeugs	6
2.3 Betriebs-, Infrastruktur- und Ausbildungskosten	8
2.3.1 Betriebskosten einer Fluggesellschaft	8
2.3.2 Infrastrukturkosten	10
2.3.3 Ausbildungskosten	11
2.4 Klimapolitische Maßnahmen	12
2.5 Neuartige Antriebe	13
2.5.1 Sustainable Aviation Fuel (SAF)	14
2.5.2 Batterieantrieb	16
2.5.3 Wasserstoffantrieb	18
2.5.4 Bestehende Konzepte und zukünftige Flugzeugmodelle . . .	21

3	Änderungen durch neue Antriebe, Annahmen und Methodik	25
3.1	Änderungen an der Betrieb/Infrastruktur und dazugehörige Kosten von alternativen Antrieben	25
3.1.1	SAF am Flughafen	26
3.1.2	Batterieantrieb am Flughafen	26
3.1.3	Wasserstoffantrieb am Flughafen	28
3.2	Flugzeugcharakteristika und zugrunde gelegte Annahmen	31
3.3	Aufstellung der Formeln für Kosten	33
3.3.1	Betriebskosten einer Fluggesellschaft	34
3.3.2	Infrastrukturkosten	38
3.4	Betriebsszenarien	41
4	Auswertung der Ergebnisse und kritische Auseinandersetzung	45
4.1	Vergleich von Referenzflugzeugen und neuen Antrieben	45
4.2	Ergebnisse der Betriebsszenarien	48
4.3	Sensitivitätsanalyse	50
4.4	Bewertung der Ergebnisse	52
5	Fazit	55
	Literaturverzeichnis	XXIII
	Anlagen	XXXI

Aufgabenstellung

PLATZHALTER AUFGABENSTELLUNG

Aufgabenstellung

PLATZHALTER AUFGABENSTELLUNG

Aufgabenstellung

PLATZHALTER AUFGABENSTELLUNG

Aufgabenstellung

PLATZHALTER AUFGABENSTELLUNG

Bibliografischer Nachweis

Name, Vorname: Bohdanova, Henrieta

Studienarbeit

Titel der Studienarbeit: Stakeholder-Kostenanalyse an Flughäfen bei Einführung neuer Luftfahrzeugantriebe

Technische Universität Dresden

Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“

Institut für Luftfahrt und Logistik

Studiengang Verkehrsingenieurwesen

55 Seiten, 13 Bilder, 8 Tabellen, 14 Formeln, 92 Quellenangaben

Autorenreferat

Innovative Luftfahrzeugantriebe können dazu beitragen, das Netto-Null-Ziel der EU zu erreichen und die CO₂-Neutralität im Luftverkehr voranzutreiben. In Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, welche Änderung in den Betriebs- und Infrastrukturkosten bei der Einführung neuen Antrieben für Stakeholder am Flughafen entsteht, als auch welche zusätzlichen Ausbildungen benötigt werden. Durch eine umfassende Recherche wurde ein Überblick über mögliche alternative Antriebe geschaffen, aus dem die Grundlagen für Kostenberechnungen abgeleitet wurden. Es zeigt sich, dass innovative Antriebe zu höheren Betriebskosten führen, während sich die Infrastrukturkosten je nach Antriebstechnologie unterschiedlich entwickeln. Obwohl neue Antriebskonzepte mit höheren Kosten verbunden sind, könnten sie sich aufgrund ihrer Umweltvorteile langfristig dennoch als eine sinnvolle Investition erweisen.

Abkürzungen, Einheiten und Symbole

Abkürzungen

BA	Batterieantrieb
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	Emissions Trading System
ICAO	International Civil Aviation Organization
IATA	International Air Transport Association
SAF	Sustainable Aviation Fuel
HEFA	Hydroprocessed Esters and Fatty Acids

Einheiten

<i>bar</i>	Bar
<i>km</i>	Kilometer
<i>EUR</i>	Euro
<i>USD</i>	Dollar
<i>m³</i>	Kubikmeter
<i>t</i>	Tonne
<i>kg</i>	Kilogramm

Symbole

<i>CO</i>	Kohlenstoffmonoxid
<i>CO₂</i>	Kohlenstoffdioxid
<i>LH₂</i>	flüssiger Wasserstoff
<i>H₂O</i>	Wasser
<i>O₂</i>	Ozon
<i>NO_x</i>	Stickstoffoxide
<i>C</i>	Kostenfaktor
<i>P</i>	Preisfaktor
<i>N</i>	Anzahlfaktor
<i>CAPEX</i>	Kapitalkosten

Abbildungsverzeichnis

2.1	Relevante Stakeholder am Flughafen	3
2.2	Abfertigung eines Flugzeugs an der Parkposition	7
2.3	Kostenstruktur einer Fluggesellschaft	9
2.4	Durchschnittlicher IATA-Mindestverkaufspreis (MSP) der wichtigsten SAF-Pfade über den Zeitraum 2020 bis 2050	15
2.5	Einfaches Modell eines Batterieantriebs	16
2.6	Konzeptflugzeug mit Blended Wing Body N3-X	24
3.1	Lieferkette von flüssigem Wasserstoff mit externer Herstellung und interner Lagerung bzw. die Betankung	30
3.2	Betriebsszenarien	43
4.1	Betriebskosten	46
4.2	Betriebskosten	47
4.3	Betriebskosten in Abhängigkeit von Szenarien mit Gesamtkostentrend	49
4.4	Vergleich der einmaligen Infrastrukturausgaben zwischen den Be- triebsszenarien	50
4.5	Vergleich der jährlichen Infrastrukturausgaben zwischen den Be- triebsszenarien	51

Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich von flüssigem Wasserstoff energiebezogenen Eigenschaften mit anderen konventionellen Treibstoffen	20
3.1	Bewertete Flugzeuge: Werte und Annahmen	33
3.2	Flugzeugpreise für Referenzflugzeuge	33
3.3	Werte und Annahmen der BA-Infrastruktur	39
3.4	Werte und Annahmen der Wasserstoffinfrastruktur	41
3.5	Flugzeugzahlen in den Szenarien nach Antriebsart	44
4.1	Infrastrukturwerte für Wasser- und Batterieantrieb für alle Szenarien	49
4.2	Sensitivitätsanalyse mit dem Parameter Treibstoffpreis	52

Formelverzeichnis

(3.1) Betriebskosten	34
(3.2) Blockzeit	35
(3.3) Treibstoffkosten	35
(3.4) Wartungskosten	35
(3.5) Flugsicherungsgebühr	36
(3.6) Kosten für Besatzung	37
(3.7) Anschaffungspreis für Flugzeug mit Batterieantrieb	37
(3.8) Auslastung eines Flugzeugs	38
(3.9) Kapitalbezogene Kosten	38
(3.10) Infrastrukturkosten für Batterieantrieb	38
(3.11) Kosten Batterien und Ladesystemen	39
(3.12) Anzahl Batterien und Ladesystemen	40
(3.13) Infrastrukturkosten für Wasserstoffantrieb	40
(3.14) Anzahl Betankungsfahrzeuge und Kryopumpe	41

1 Motivation

Laut Verordnung (EU) 2021/1119 soll die EU zum Jahr 2050 klimaneutral sein. Bereits im Jahr 2030 sollen die Treibhauseffekte um mindestens 55 % verglichen mit dem Jahr 1990 reduziert und die Klimaerwärmung auf 1,5 °C gegenüber des vorindustriellen Niveaus begrenzt werden. Treibhausgase haben Auswirkungen auf das Wetter und führen zu globaler Erderwärmung, was letztlich die menschliche Gesundheit bedroht. Obwohl das Umweltbundesamt im Jahr 2023 ermittelte, dass die Treibhausgase im Vergleich zum Vorjahr um mehr als zehn Prozent gesunken sind, wurden in dem Jahr allein in Deutschland 673 Mio. Tonnen Treibhausgase freigesetzt [1]. Vor allem durch ihre Langlebigkeit [2] spielen CO₂-Emissionen eine zentrale Rolle unter den Treibhausgasen. Auch der Luftverkehr trägt Verantwortung für diesen Einfluss. Etwa 2,5 % der gesamten anthropogenen CO₂-Emissionen weltweit werden vom Luftverkehr durch die Treibstoffverbrennung verursacht [3].

Neben dem Kohlendioxid CO₂ und Wasserstoff H₂O entstehen bei der Verbrennung des Treibstoffs andere Nebenprodukte und Rußpartikel, wie Stickoxide NO_x, die das Klima beeinflussen und für die Ozonbildung in der Stratosphäre verantwortlich sind [3].

Die internationale Gesellschaft sucht nach Lösungen, um die Klimakrise zu bewältigen. Ob nachhaltige Alternativen durch den Luftverkehr verursachte Emissionswerte mindern können, ist derzeit ein weit verbreitetes Thema. Durch neuartige Konfigurationen und alternative Kraftstoffe und Antriebe besteht die Möglichkeit Emissionen zu vermeiden. Innovative Energieträger, wie Batterie, Wasserstoff oder Sustainable Aviation Fuel (SAF), versprechen unter nachhaltiger Produktion und Logistik eine Reduktion der Emissionen zu erwirken und somit geringen Einfluss auf die Umwelt

zu haben. Allein durch den Einsatz von Elektro- und Wasserstoffantrieben könnten 17 % des Netto-Null-Ziels erreicht werden [4].

Ein zusammenfassender Unterschied der Kosten für alle drei Alternativen durch die Einführung dieser Antriebe wurde bislang noch nicht systematisch untersucht. Forscher haben bereits getrennte Kostenberechnungen für einzelne neuartige Antriebe durchgeführt, mit dem Fokus auf elektrische oder wasserstoffbetriebene Flugzeuge.

Geprägt von wachsend strengeren Maßnahmen in Bezug auf die Treibhausgase, brauchen Betreiber neue Technologien um höhere CO₂-Emissionen und damit verbundene höhere Kosten zu vermeiden. Im Rahmen dieser Arbeit soll untersucht werden, ob nachhaltige Antriebe eine Möglichkeit haben, kostengünstig in den Markt zu gelangen und den Wettbewerb zu überstehen oder sogar als Ersatz für konventionelle Kraftstoffe, wie Kerosin, dienen zu können. Daraus ergeben sich die Fragestellungen, welchen Einfluss die Einführung neuartiger Antriebe auf Stakeholder und den Markt hat, und welche Betriebs-, Infrastruktur- und Ausbildungsdifferenzen dadurch entstehen.

Im Rahmen dieser Studienarbeit werden folgende Themen berührt: Kapitel 2 stellt die relevanten Grundlagen zur weiteren Forschung dar, wie Stakeholder am Flughafen und deren Einfluss auf die Abfertigung eines Flugzeugs, die Betriebskosten, gesetzliche Einflüsse auf den Luftverkehr sowie die zukünftigen Flugzeugkonfigurationen mit neuen Antriebstechnologien. Darauf aufbauend wird im Kapitel 3 anhand Recherche die Methodik für die Kostenberechnung und betriebliche Szenarien für einen Flughafen definiert, sowie getroffene Annahmen erörtert. Kapitel 4 bearbeitet die Auswertung der Kostenanalyse für den Betrieb und aufgestellter Betriebsszenarien, die dazugehörige Sensitivitätsanalyse und eine kritische Auseinandersetzung mit den Ergebnissen. Zusätzlich werden in diesem Kapitel die aufgestellten Hypothesen diskutiert. Kapitel 5 enthält eine abschließende Zusammenfassung und zeigt mögliche Richtungen für weiterführende Forschungsarbeiten. Im Anhang sind zusätzliche Informationen zu den einzelnen Kapiteln aufgeführt, auf die in der Arbeit Bezug genommen wird.

2 Relevante Grundlagen und Überblick über alternative Antriebe

Für die Analyse der Forschungsfrage es ist wichtig die zentralen theoretischen Begriffe zu definieren. Das Kapitel 2.2 stellt die Grundlagen der Flugzeugabfertigung und Definition der beteiligten Stakeholder am Flughafen dar. Zunächst beschäftigt sich das Kapitel 2.3 mit bedeutenden Informationen zu Kosten am Flughafen, gefolgt von Emission-Regulierungsinitiativen im Kapitel 2.4. Anschließend werden im Teil 2.5 die neuartigen alternativen Antriebe und Konzepte, sowie Flugzeugmodelle mit diesen Antrieben vorgestellt.

2.1 Stakeholder am Flughafen

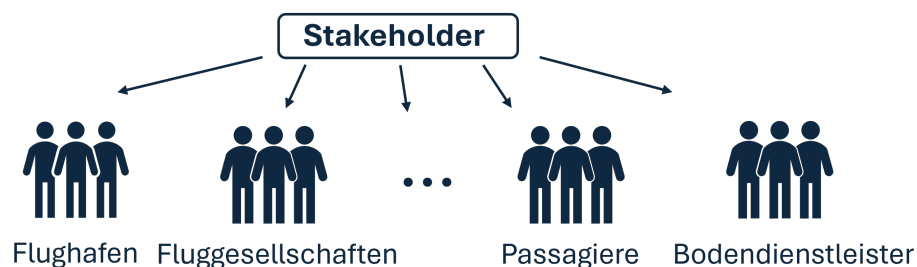


Abbildung 2.1: Relevante Stakeholder am Flughafen

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

Aufgabe bevor. Gute Zusammenarbeit der Stakeholder fördert die Pünktlichkeit der Abfertigung und hilft Verspätungen zu vermeiden [5].

Flughafenbetreiber

Einer der Stakeholder am Flughafen ist der Flughafenbetreiber selbst. Der Flughafen stellt die Fluggerät- und Passagierabfertigungs-Infrastruktur wie bspw. Terminals oder Start- und Landebahnen zur Verfügung (welche als Kernfunktionen gelten), wofür Nutzungsgebühren erhoben werden [3].

Zum Flughafen gehören außer Start- und Landebahnen unter anderem Rollwege, Vorfeld, sowie die Infrastruktur für Gepäckabfertigung. Größere Flughäfen verfügen über eine Tankfarm am Flughafenstandort. Zu dieser Tankfarm gehören mehrere Anlagen, die mit der Betankung verbunden sind, darunter Treibstofftanks [6]. Darüber hinaus stellen Flughäfen eine intermodale Verknüpfung dar [3]. Direkte Nutzer von Flughäfen sind Im- und Exporteure von Dienstleistungen und Waren [7].

Flughäfen sind ein großer Teil der regionalen Wirtschaft [7] und sorgen für eine Vielzahl von Arbeitsstellen. Andererseits verursachen sie ein Ausmaß an Lärm und Umweltbelastungen, welche durch die Emissionen der Flugzeuge entstehen. Zur Kompensation verlangt der Flughafen hierfür ebenfalls Entgelte.

Für die Entwicklung der Infrastruktur und Begleichung der Betriebskosten müssen Flughäfen gelegentlich finanzielle Unterstützung aus anderen Quellen, wie staatlicher Subventionen, in Anspruch nehmen [7].

Flughäfen in Deutschland sind überwiegend in öffentlicher Hand [3]. Die Europäische Kommission besagt, dass Flughäfen mit einem Passagieraufkommen von über 3 Millionen Passagieren jährlich in der Lage sind, ihre Betriebskosten selbst durch Gewinn zu decken. ¹ Eine Kategorisierung der Flughäfen basiert auf der Passagiermenge. Der Europäischen Kommission nach werden die Flughäfen nach jährlichem Passagieraufkommen folgend unterteilt:

- große Gemeinschaftsflughäfen > 10 Mio. Passagieren;

¹ „Leitlinien für staatliche Beihilfe für Flughäfen und Luftverkehrsgesellschaften“ 2014/C 99/03

- nationale Flughäfen mit 5 bis 10 Mio. Passagieren;
- große Regionalflughäfen mit 1 bis 5 Mio. Passagieren;
- kleine Regionalflughäfen < 1 Mio. Passagieren.

Aufgrund dieser Kategorisierung in dem Jahr 2023 gab es in Deutschland sieben große Gemeinschaftsflughäfen, einschließlich zwei Hubs, und 16 Regionalflughäfen [8]. Ein Hub zeichnet sich durch einen großen Flughafen mit hohem Anteil an Umsteigeverkehr aus.

Fluggesellschaft

Fluggesellschaften sind Dienstleister, welche die Infrastruktur eines Flughafens 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 Beträge sind, die der Flughafen verlangt [7]. Die Beträge unterscheiden sich sowohl je nach Flughafengröße und -strategie, als auch im Flugzeugtyp.

Bodenverkehrsdienste

Bodenverkehrsdienste sind für die Abfertigung der Flugzeuge auf dem Boden zuständig. Nach Conrady [3] gehört zu ihren Tätigkeiten außerdem: die Fluggastabfertigung, administrative Abfertigung sowie Transportdienste von Fracht, Post und Gepäck bis zum Flugzeug [9]. Sie sind auf Infrastruktureinrichtungen wie Gepäckförderanlagen und Betankungsanlagen sowie weitere Grundausstattung am Vorfeld 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.

Zu weiteren Vorfelddiensten gehören Betankungs-, Reinigungs- und Wartungsdienste. Wartungsdienste führen die routinemäßige Kontrolle der Flugzeuge vor den Flügen durch. Reinigungsdienste und der Flugzeugservice sind für die Reinigung eines Flugzeugs von Innen und Außen, Wasserservice, die Klimaanlage in der Kabine und die Enteisierung verantwortlich. Zu den Stakeholdern am Flughafen zählen ebenfalls Luftfahrzeughersteller, Flugsicherungen, Reiseveranstalter, staatliche Institutionen

[10], sowie Beteiligte wie Passagiere und Arbeitskräfte. Sie nehmen nicht direkt an der Flugzeugabfertigung bzw. am Betrieb am Vorfeld teil, deswegen stehen sie nicht im Fokus dieser Arbeit. 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.

2.2 Bodenabfertigung eines Luftfahrzeugs

Zur Veranschaulichung der Änderungen an der Infrastruktur am Flughafen, welche durch neuartige Antriebe vorgenommen werden müssen, ist es notwendig wichtige Begriffe einer Abfertigung des konventionellen Flugzeugs hervorzuheben. Unter konventionellen Luftfahrzeugen sind die zu verstehen, die mit fossilen Treibstoffen, wie erdölbasiertes Kerosin, betrieben werden. Der Fokus wird auf die gewerblichen Passagierflugzeuge gelegt, da sie einen erheblichen Teil am zivilen Luftverkehr ausmachen.

Die Blockzeit setzt sich aus der Zeit vom Beginn der Bewegung von der Parkposition bis zum Ende der Bewegung zur Parkposition, einschließlich der Flugzeit, zusammen. An der Parkposition des Flughafens werden die Triebwerke ausgeschaltet und der Ablauf eines Turnarounds beginnt. Mensen [9] definiert den Turnaround, wie die Abfertigung der Flüge, die zeitnah zusammen liegen. Bei einem Turnaround wird das Luftfahrzeug durch viele Akteure am Flughafen, wie Flugplatzbetreiber, Fluggesellschaft und Dritte, für den nächsten Flug vorbereitet. Es muss ausgeladen, kontrolliert, gereinigt, anschließend mit Treibstoff und Wasser versorgt und für den nächsten Flug beladen werden.

Die Abbildung 2.2 stellt die Abfertigung eines Flugzeugs an der Parkposition dar. Nach ICAO Doc 9157 besteht Abfertigung eines Passagierflugzeugs insgesamt aus Passagier-, Gepäck- und Frachtabfertigung, Sanitärservice, Wasserbetankung, Gepäckabfertigung, Betankung, Stromversorgung, Startluft, Flugzeugschleppen, Bordküchenservice, Wartungsservice sowie Bereitstellung einer Klimaanlage und Sauerstoff, wie in der Abbildung dargestellt. Durch neuartige Antriebe kann es

aufgrund anderer technischer Grundlagen zu Änderungen in diesen Prozessen kommen. Der Betankungsvorgang ist ein wesentlicher Teil der Flugzeugabfertigung. Zurzeit werden für Lufttransport die Treibstoffe auf Basis fossiler Stoffe, wie Erdöl, genutzt. Laut EU-OPS 1.305 darf das Luftfahrzeug aus Sicherheitsgründen erst mit dem konventionellen Treibstoff betankt werden, wenn sich keine Passagiere an Bord befinden. Je nach Flugdistanz und Flugzeuggröße kann das zu unterschiedlichen

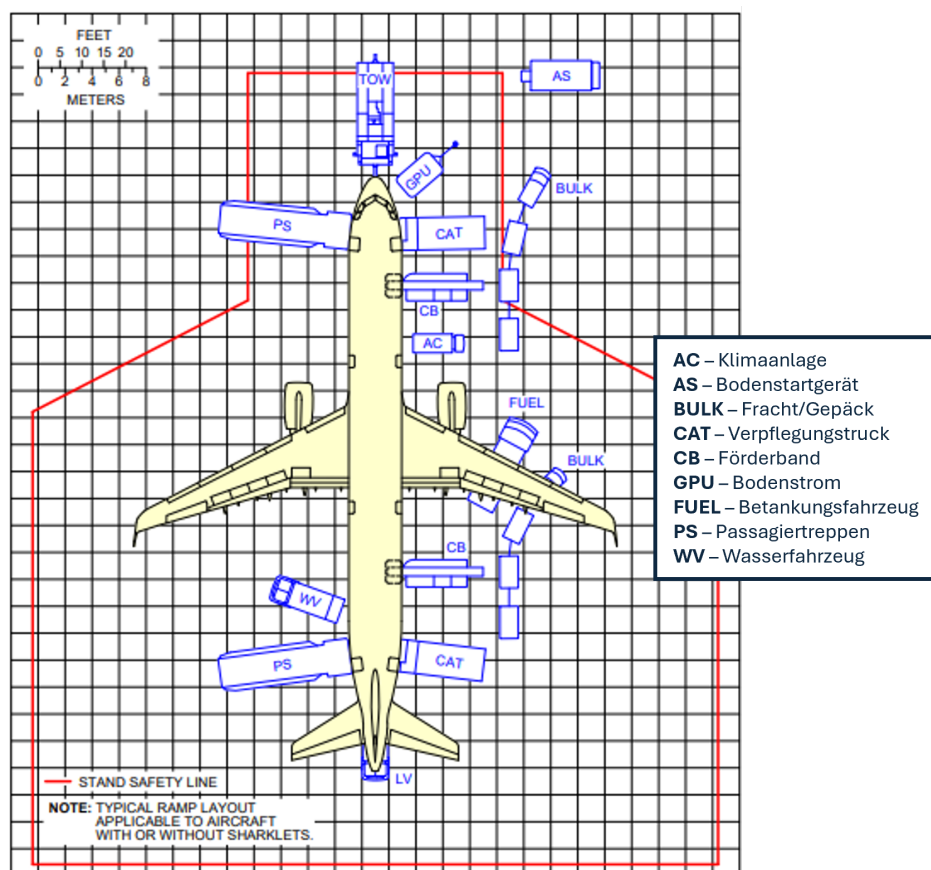


Abbildung 2.2: Abfertigung eines A321 [11] mit eigenem Hinweis

Abfertigungszeiten führen. Bei kleineren Flugzeugen ist die Abfertigungszeit kürzer, als die eines größeren Luftfahrzeugs. In Bezug auf die Transportdistanz wird nach Kurz- (ca. 2 Stunden oder bis 1000 km) und Mittelstreckenflügen (bis 3,5 Stunden oder bis 3000 km) und Langstreckenflügen (ab 3,5 Stunden und ab 3000 km) unterschieden [9]. Die Definition von Distanzen variiert teils erheblich, z.B. definiert der Flughafen Frankfurt Langstrecken ab 6000 km.

Größere Flughäfen haben eine Tankfarm am Flughafenstandort. Zur dieser Tankfarm gehören mehrere Anlagen, die mit der Betankung verbunden sind, ein davon sind

Treibstofftanks.

2.3 Betriebs-, Infrastruktur- und Ausbildungskosten

In diesem Unterkapitel werden die Kostenstrukturen vorgestellt, wobei bei Betriebskosten auf die Kosten der Fluggesellschaft eingegangen wird und bei der Infrastruktur, aufgrund der dazugehörigen Kapitalkosten, auf die Flughäfen.

2.3.1 Betriebskosten einer Fluggesellschaft

Die Betriebskosten einer Flugzeugabfertigung werden auf Direct Operating Costs (*DOC*) und Indirect Operating Costs (*IOC*) aufgeteilt, welche auch Einzel- und Gemeinkosten genannt werden [3]. Nach Mensen [9] können *DOC* einem bestimmten Flugzeug oder einer Strecke zugeordnet werden und normalerweise als *DOC* pro Flugstunde, pro Kilometer, pro Passagierkilometer oder pro Blockstunde berechnet werden. *IOC* werden nicht direkt einem Flug zugewiesen, sondern fallen für den gesamten Betrieb an, z.B. für zeitabhängige Instandhaltungs-, Verwaltungs- und Infrastrukturkosten. Nach der Beschäftigungsabhängigkeit werden die Kosten auf fixe und variable Kosten aufgeteilt. Fixe Kosten stehen unabhängig zu dem Betrieb (z.B. Kapitalkosten, Versicherung, Personalkosten), die variablen Kosten hingegen ändern sich Bezug auf die Beschäftigung. Die Kostenstruktur einer Fluggesellschaft kann mit der Abbildung 2.3 veranschaulicht werden. Betriebskosten sind von dem Flugzeugtyp abhängig, deswegen ist es für den Betreiber wichtig vor der Anschaffung zu untersuchen, ob ein Flugzeug mit einem alternativen Antrieb rentabel ist. Die neuen Regularien der CO₂-Reduktion können einen Anreiz oder sogar eine Verpflichtung für die Fluggesellschaften schaffen, um eine bestmögliche Lösung für eine Flotte zu finden. Weitere Aspekte politischer Anreize werden im folgenden Unterkapitel 2.4 betrachtet. Es gibt verschiedene bereits vorgestellte Formeln für die Berechnung der *DOC* [12]. Die meisten davon schließen die gleichen Kostenfaktoren ein, unterscheiden sich jedoch in der Rechnungsweise für einzelne Kosten. Einberechnet werden Treibstoffkosten, Crewkosten, Wartungskosten, kapitalbezogene Kosten,



Abbildung 2.3: Kostenstruktur einer Fluggesellschaft [9]

sowie Entgelte und Gebühren.

Treibstoffkosten sind ein erheblicher Teil der Betriebskosten. In den USA sind ein Drittel aller Gesamtkosten (TOC) aller Fluggesellschaften die Kosten für Treibstoff und Öl, in Korrelation dazu beträgt die Abfertigung am Flughafen ein Sechstel [3]. Im Jahr 2023 wurden etwa 92 Milliarden Gallonen Kraftstoff durch der Luftfahrtindustrie verbraucht und somit betrug die Treibstoffrechnung fast 32 % aller Betriebskosten der Luftfahrt [13]. Die jährlichen Steigerungen der Preise für fossile Rohstoffe können die nachhaltige Initiative fördern.

Crewkosten sind auch ein Bestandteil der direkten Betriebskosten. Zu einer Crew gehören Piloten und Kabinen-Besatzung. Nach Conrady [3] bestehen die Besatzungskosten aus Gehältern, Reise- und Schulungskosten. Es gibt jedoch nur wenige Quellen, die bei der Berechnung der Betriebskosten die Ausbildungskosten erwähnen.

Wartungskosten eines Flugzeugs fassen die Arbeitskosten für Beschäftigte und benötigten Materialien für die Wartung zusammen. Außerdem werden die Kosten in Wartung der Zelle und den Triebwerken unterteilt [14]. Am Vorfeld bei der Luftfahrzeugabfertigung findet eine *Line Maintenance* statt, dabei wird der Reifendruck und Ölstände überprüft [3]. Darüber hinaus finden eine Reihe anderer regelmäßiger

Kontrollen statt. Wartungskosten hängen von der Auslastung eines Flugzeugs ab, je mehr sich ein Flugzeug in Betrieb befindet, desto höhere Kosten sind zu erwarten. Je nach Flotte sind Ersparnisse möglich, wenn die Fluggesellschaften mehrere Flugzeuge vom gleichen Typ anschaffen [3]. In diesem Fall sind weniger Schulungen für Techniker notwendig.

Unter **kapitalbezogenen Kosten** versteht man Kosten, die vom Flugzeuganschaffungspreis abhängig sind. Darunter sind Abschreibung, Verzinsung und Versicherung zu verzeichnen. Abschreibungskosten sind ein Teil der Kapitalkosten für das Flugzeug, die auf einen festgelegten Zeitraum, in welchem das Flugzeug genutzt wird, verteilt werden [3]. Abschreibungswerte unterscheiden sich je nach Fluggesellschaft. Die Abschreibungskosten können auch auf die Infrastruktur bezogen werden. Flugzeuge werden gegen Rumpfschäden oder andere Arten von Schäden versichert [12].

In dieser Arbeit wird der Fokus auf die direkten Betriebskosten gelegt und die indirekten Betriebskosten, wie Kosten für allgemeine Verwaltung, Marketing- und Servicekosten, werden wegen geringerer Relevanz nicht betrachtet.

2.3.2 Infrastrukturkosten

Durch den Anstieg der Nachfrage nach innovativen Antrieben sind Änderungen an der Flughafeninfrastruktur notwendig. Die Infrastruktur eines Flughafens gibt vor, über welche Kapazitäten ein Flughafen verfügt. Die Infrastrukturkosten eines Flughafens bestehen aus Kosten für luft- und landseitige Anlagen [15]. Landseitige sind die Einrichtungen, die zum Flughafen gehören, wie bspw. Terminal oder administrative Gebäude. Zur luftseitigen Infrastruktur gehören Start-/Landebahn, Rollbahn, Vorfeld, Flugsicherheitsinfrastruktur und -ausrüstung. Die Infrastruktur kann unterschiedlich finanziert werden. Flughafengebühren, wie Lande-, Lärm-, Emissions-, Abstell-, Passagier- und Frachtgebühr tragen zur Finanzierung des Flughafens bei.

Infrastrukturkosten setzen sich nicht nur aus Anschaffungs- oder Investitionskosten (Kapitalanforderungen), sondern auch durch Kosten für die Instandhaltung der Anlagen und Betriebskosten zusammen. Kapitalkosten (wie Verzinsung und Abschreibung), die mit Infrastrukturinvestitionen zusammenhängen machen einen großen

Teil der Gesamtkosten eines Flughafens aus [16]. Flughäfen müssen wirtschaftliche Analysen nutzen, um Entscheidungen über Flughafeninvestitionen treffen zu können. Investitionsbeihilfen werden durch die Passagieranzahl des Flughafens bestimmt. Mit mehr als fünf Millionen Passagieren müssen Flughäfen ihre Kapitalkosten selbst tragen können [3]. Über landseitige Anlagen finanzieren sich Flughäfen durch Mieten, Konzessionen und weitere Quellen [15]. Hat ein Flughafen regionale Bedeutung werden auch anderen Interessentengruppen an der Entwicklung teilnehmen. Die Planung der Infrastrukturerweiterung oder -neubau muss in enger Zusammenarbeit zwischen den Stakeholdern (z.B. Regulierungsbehörden, Mitarbeitern, Anteilseignern, Kreditoren) stattfinden [16]. Außerdem müssen Infrastrukturentscheidungen mit den Interessen der Gesellschaft übereinstimmen [17].

Diese Arbeit wird sich auf die Anschaffungskosten für neue Infrastruktur fokussieren und nicht mit laufenden Kosten, wie Betriebs-, Unterhalts- und Administrationskosten der Flughäfen arbeiten, da sie untergeordnete Relevanz haben.

2.3.3 Ausbildungskosten

Schulungen sind ein wichtiger Teil der Ausbildung. Nach ICAO Annex 6 muss das Schulungsprogramm eine Kompetenzschulung für alle installierten Geräte umfassen. Aufgrund zu erwartender neuer Antriebe werden ebenfalls neue Infrastruktur und Geräte benötigt, wodurch neue Gefahren im Luftverkehr entstehen können. Die erforderlichen Kenntnisse variieren je nach Einsatzbereich. Wegen unzureichender Datenlage in dem Bereich ist schwierig die Ausbildungsdauer und damit verbundene Kosten präzise zu berechnen. Aus diesem Grund wird auf eine detaillierte Analyse der Ausbildungskosten verzichtet und nur auf allgemein erforderliche Kenntnisse bei der Schulung hingewiesen. Dabei wird in dem Teil 2.5 auf die Sicherheitsaspekte und Gefahren beim Umgang mit den Antriebsarten eingegangen und die Schlussfolgerung für Ausbildungen zusammengefasst.

2.4 Klimapolitische Maßnahmen

Durch klimapolitische Initiativen kann eine Verminderung von Emissionen erreicht werden. So legt ICAO Annex 16 weltweite Grenzwerte für Umweltstandards und technische Anforderungen für Flugzeuge fest, um Emissionen zu reduzieren.

Auch die Verordnung (EU) 2018/1139² etabliert die gesetzlichen Instrumente für Sicherheit und den Umweltschutz in der Zivilluftfahrt innerhalb der EU und fixiert die Rolle der Europäischen Agentur für Flugsicherheit (EASA). Die EASA ist als Luftfahrtbehörde verpflichtet die Umweltleistung der Luftfahrt zu überwachen und zu fördern, wofür Gebühren erhoben werden. Außerdem macht die Verordnung die Zulassung von neuen Flugzeugen leichter wodurch Innovationen und Anregungen für nachhaltige Luftfahrtstechnologien gefördert werden.

Die Verordnung ermöglicht Gebührenanpassungen und Anreize für die Projekte, die ökologische Vorteile bringen und zu einem hohen Umweltschutzniveau beitragen. Die konkreten Maßnahmen dürfen auf nationaler Ebene gesteuert werden, aber die Mitgliedstaaten sind verpflichtet, die Sicherheit und den Umweltschutz zu beachten. Nach Artikel 126 kann die EASA die detaillierten Vorschriften für Gebühren bestimmen, um nachhaltige Technologien und innovative Projekte zu fördern. Solche politischen Entscheidungen können die Fluggesellschaften motivieren, Emissionen zu vermeiden und somit wirtschaftliche Einsparungen zu erzielen.

Ab dem Jahr 2012 wurde in der Europäischen Union (EU) EU-Emissionsrecht (EU ETS) für den Luftverkehr eingeführt. Dabei können Zertifikate erworben werden, um eine bestimmte Anzahl an Emissionen freisetzen zu dürfen. Ein Großteil der Zertifikate wird den Fluggesellschaften unentgeltlich zugeteilt, der Rest wird versteigert. Das Ziel ist die begrenzten Zertifikate unter Gesellschaften zu verteilen und somit die Treibhauseffekte zu senken. Einnahmen der Versteigerung werden für die

²Verordnung (EU) 2018/1139 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2018 zur Festlegung gemeinsamer Vorschriften für die Zivilluftfahrt und zur Errichtung einer Agentur der Europäischen Union für Flugsicherheit sowie zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 2111/2005, (EG) Nr. 1008/2008, (EU) Nr. 996/2010, (EU) Nr. 376/2014 und der Richtlinien 2014/30/EU und 2014/53/EU.

Bekämpfung von Umwelteinflüssen eingesetzt [3]. Die Internationale Zivilluftfahrtorganisation (ICAO) hat im Jahr 2016 die Resolution A39-3³ veröffentlicht, in welcher das Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA) als globale Maßnahme für den Markt vorgestellt wurde. Werden die Emissionen des Jahres 2020 überschritten, müssen Beteiligte in anderen Bereichen die Kohlenstoffdioxide ausgleichen, z.B. durch Aufforstung oder andere Klimainitiativen. Die Einführung erfolgt in 3 Phasen: bis zum Jahr 2023 verlief die Pilotphase; ab dem Jahr 2024 bis 2026 verläuft die Erste Phase und schließlich die Zweite Phase, in welcher die Mitglieder verpflichtet sind, teilzunehmen [3].

Ab dem Jahr 2027 werden alle Betreiber aus dem Europäischen Wirtschaftsraum entweder CORSIA oder EU ETS unterliegen [18]. Im Europäischen Wirtschaftsraum gilt EU ETS und hat anspruchsvollere Klimaschutzmaßnahmen als CORSIA [18]. CORSIA-Regeln gelten hingegen für internationale Flüge außerhalb des Europäischen Wirtschaftsraums.

Mit dem Gesetzgebungspaket „Fit to 55“ will die EU bis zum Jahr 2030 die Emissionen, unter anderem die des Luftverkehrs, um mindestens 55 % senken. Die Verordnung RefuelEU legt fest, welchen Anteil nachhaltige Kraftstoffe (SAF) am Verbrauch haben müssen, und enthält zudem Verpflichtungen für Kraftstofflieferanten, Flughäfen und Luftfahrzeugbetreiber.

2.5 Neuartige Antriebe

Obwohl sich der Kraftstoffverbrauch in der letzten 30 Jahren durch technische Entwicklungen halbiert [9] hat, bleiben die Auswirkungen immens. Um Schub bei etablierten Antrieben zu erzeugen, wird der Treibstoff in der Gasturbine verbrannt, wodurch mechanische Leistung erzeugt wird und über eine Welle den Propeller oder das Strahltriebwerk antreibt. Die zukünftigen Antriebe werden von den bisherigen abweichen. Bei der Untersuchung von alternativen Antrieben sind bestimmte Überlegungen relevant. Die Dichte des Energieträgers, Kosten und Verfügbarkeit

³Resolution A39-3. ICAO zur „Consolidated Statement of Continuing ICAO Policies and Practices Related to Environmental Protection – Global Market-based Measure (MBM) Scheme“, 2016.

des Rohstoffs, Sicherheit in Bezug auf Herstellung und Nutzung sowie direkte und indirekte CO₂ Emissionen [19].

In diesem Kapitel werden folgende vielversprechende Energieträger betrachtet und zusammengefasst: nachhaltige Kraftstoffe (SAF), Batterieantriebe (elektrochemische) und Wasserstoff.

2.5.1 Sustainable Aviation Fuel (SAF)

Sustainable Aviation Fuel oder nachhaltige Flugtreibstoffe sind synthetische flüssige Biotreibstoffe oder erneuerbare nicht biogene Stoffe, die mit herkömmlichen Flugkraftstoffen und bestehenden Betankungssystemen kompatibel sind. Deswegen werden sie auch als Drop-In Treibstoffe bezeichnet [20]. Die SAFs werden herkömmlichen Treibstoffen beigemischt. IATA besagt, dass die zulässige Mischrate zurzeit bei max. 50 % liegt. Es existieren bis jetzt elf Verfahrenswege aus unterschiedlichen Rohstoffen für die SAF-Produktion, manche werden aktuell für die Nutzung bewertet [21].

Die SAFs haben ähnliche Charakteristiken wie Kerosin, was bspw. die Energiedichte betrifft. Dennoch weist ein Großteil des SAF keine Aromaten auf. Fehlende aromatische Verbindungen im SAF können zu Leckagen in der Dichtung führen [22]. Aus diesem Grund ist bis jetzt kein Flugzeug für das Fliegen mit reinem SAF zertifiziert [20].

Im Hinblick auf die Zukunft ist zu erwarten, dass die CO₂-Reduktion mit reinem SAF realisiert werden kann. Ein praxisnahes Beispiel dafür war der erste transatlantische Demonstrationsflug im November 2023, durchgeführt von der Fluggesellschaft Virgin Atlantic, welcher mit 100 % SAF durchgeführt wurde [23]. Die SAF Produktion erreichte im Jahr 2024 1 Million Tonnen [24]. Der Verbrauch des Luftverkehrs, wie oben beschrieben, erreichte im Jahr 2023 92 Milliarden Gallonen, was bedeutet, dass SAF nur 0,8 % des Gesamtverbrauchs decken würde.

Es gibt keinen SAF-Flugtreibstoff, der Emissionen komplett vermeidet. Laut IATA können die Emissionen durch Drop-In SAF um 62 % reduziert werden. Jedoch können sie durch bestimmte Verfahren bis zu 95 % reduziert werden [21].

Aufgrund der kommerziellen Verfügbarkeit ist Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA) eines der wichtigsten Verfahren. Die HEFA wird aus tierischen und pflanzlichen Ölen und Fetten mittels Hydroprocessing hergestellt [25]. Die Haupteinschränkung von HEFA ist die begrenzte Anzahl an Rohstoffen [25]. Power-to-liquid (PtL) ist ein weiteres potenzialreiches Verfahren. Dieses katalytische Verfahren, nach Fischer-Tropsch, nutzt zur Herstellung eine Kombination aus Kohlenmonoxid CO und durch Elektrolyse produzierten Wasserstoff H₂ [25]. Das Verfahren erzeugt die höchsten CO₂-Emissionseinsparungen [26], befindet sich jedoch noch in einem früheren Stadium [25]. Eine zusätzliche Beschränkung besteht durch die Preise für SAF. In der Abbildung 2.4 sind preisliche Vergleichswerte für verschiedene SAF, unter anderem HEFA und PtL, als auch Alcohol-to-Jet (AtJ) und Fischer-Tropsch (FT), und konventionelle Treibstoffe sowie Vorhersagewerte dargestellt. Dabei hat die HEFA die günstigsten Preise im Vergleich zu den Alternativen, das nachhaltigere PtL hingegen wird den Preis von marktüblichen Treibstoffen deutlich übersteigen.

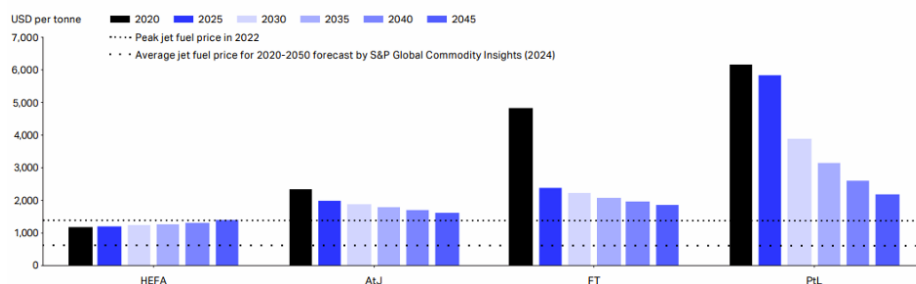


Abbildung 2.4: Durchschnittlicher IATA-Mindestverkaufspreis [21]

In Bezug auf die Infrastruktur sind manche davon überzeugt, dass keine Änderungen im Flugzeug oder am Betankungssystem notwendig sind [27]. Wobei Dahal et al. [28] jedoch davon ausgeht, dass für die Nutzung von reinem SAF neue Antriebe und Triebwerke entwickelt werden müssen. Das reine SAF wurde noch nicht zertifiziert, um in das Treibstofflager von Flughäfen zu gelangen [20].

In EU-Richtlinien sowie in CORSIA sind die Kriterien der SAF-Qualität festgelegt. Im Rahmen EU-ETS gelten SAF als emissionsfrei und bei der richtigen Zertifizierung sind diese von der Abgabe von CO₂-Zertifikaten befreit [21]. Die Preise für nachhaltige Flugtreibstoffe sind zwei- bis zu fünfmal höher als die des herkömmlichen Kerosins [20]. Um Fluggesellschaften für die Nutzung der nachhaltigen Kraftstoffe zu motivieren, hat EU-ETS 20 Mio. Zertifikate zur Verfügung gestellt [21]. In ReFuelEU sind vor allem die verpflichteten Beimischungsanteile nachhaltiger Stoffe festgelegt.

2.5.2 Batterieantrieb

Eine andere Möglichkeit, Emissionen zu reduzieren, ist direkten Strom als Antrieb mittels Elektromotoren und Stromspeicher, wie Batterien oder Brennstoffzellen, zu nutzen. Eine einfache Darstellung des Batterieantriebs (BA) ist in der Abbildung 2.5 gezeigt. Getriebe werden genutzt, um den Fan des Motors zu entkoppeln und somit den Wirkungsgrad zu erhöhen [29].

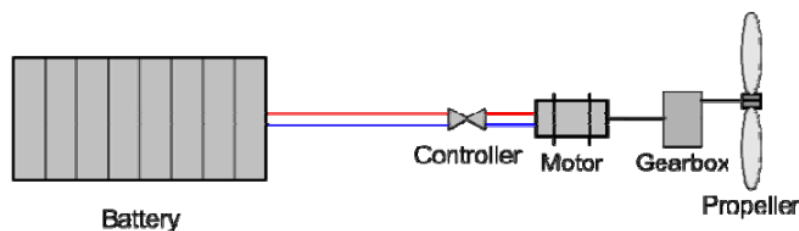


Abbildung 2.5: Einfaches Modell eines Batterieantriebs [29]

Antriebskonfigurationen von elektrischen Flugzeugen werden nach drei Arten unterschieden: vollelektrisch, funktioniert nur mit Batterie oder Brennstoffzelle als Energiequelle, turboelektrisch und hybrid-elektrisch. Hybrid-elektrisch ist eine Mischung von konventionellen Gasturbinentriebwerken mit Kerosin und Batterie oder Brennstoffzellen [28]. Der turboelektrische Antrieb verfügt über keinen elektrischen Energiespeicher an Bord, also wird mechanische Energie über eine Turbine erzeugt, welche vom Generator in elektrische Energie umgewandelt wird und somit den elektrischen Motor antreibt.

Im Folgenden wird ein vollelektrischer Antrieb behandelt. Bei diesem Antrieb wird durch Potenzialdifferenz und einem Stromfluss die elektrische Energie in mechanische umgewandelt. Im Vergleich zum Verbrennungsmotor ist das einzige bewegliche Teil des Batterieantriebs der Rotor [30]. Das hat das Potenzial die Wartungskosten im Vergleich zu Gasturbinen zu reduzieren. Außerdem besteht der elektrische Antrieb aus einem Controller, welcher den Energiefluss steuert. Durch den Controller wird festgelegt, welche Leistung der Motor erzeugen bzw. wie viel Energie von einer Batterie genutzt werden soll, um die gewünschte Leistung zu erzeugen [30]. Die elektrischen Antriebe können effizienter als konventionelle Antriebe wirken [29].

Durch die Umwandlung der elektrischen Energie in chemische kann diese in einer Batterie gespeichert werden. Das Batteriemanagementsystem in einem Flugzeug verfügt über Informationen wie State of Health (SOH), welche den Unterschied zwischen Anfangs- und Bestandskapazität einer Batterie angibt, und State of Charge (SoC), welche zeigt, wie viel Prozent der verfügbaren Kapazität geladen werden kann [30]. Im Laufe des Fluges verändern die Batterien ihr Gewicht nicht, unabhängig davon, ob sie leer oder vollständig geladen sind [30]. Eine in der wissenschaftlichen Literatur weit verbreitete Batterie ist die Lithium-Ion-Batterie. Li-Ion übersteigt die spezifische Energie und Energiedichte anderer vorhandener Batterien [31]. Heutige Li-Ion Batterien haben eine gravimetrische Energiedichte von 150 - 300 Wh/kg [32]. Werden diese Werte mit der spezifischen Energiedichte von 12 kWh/kg von Kerosin verglichen [33], ergibt sich eine ca. 40-fache Differenz gegenüber einer Li-Ion-Batterie. Das weist darauf hin, dass Batterien ein viel höheres Gewicht bei gleicher Energie aufweisen. Somit steigt auch die Masse des Flugzeugs, was schließlich die Transportkapazität einschränken kann. Aus diesem Grund gehen manche Arbeiten davon aus, dass dieser Antrieb nur für die Reichweite von Regionalflügen geeignet ist [34]. Preise für Batterien sind von der Qualität der Batterie und anderen spezifischen Anforderungen abhängig [31].

Batterien sind von äußerlichen Bedingungen beeinflussbar. Kalte Umgebungen können den Wirkungsgrad einer Batterie reduzieren, da die Zellen reduzierte Leistungsfähigkeit haben [31], warme Umgebungen können zu einem schnelleren Auslaufen der Lebensdauer führen [30] oder zur Überhitzung. Die Herstellung einer Lithium-Ionen-Batterie ist durch die Lithium-Produktion umweltschädlich und kostenintensiv in der Wartung [33]. Weitere vielversprechende Arten von Batterien wie Lithium-Sulfur, Lithium-Air, sowie Festkörperbatterien werden derzeit erforscht [35].

Das Wartungsverfahren hierbei unterscheidet sich stark von konventionellen Flugzeugen. Es ist zu erwarten, dass die Wartungskosten durch weniger bewegende Teile in dem Antrieb niedriger sein können [33]. Die elektrischen Motoren werden keine Kontrollen des Gasturbinentriebwerks benötigen, jedoch können Schäden durch Fremdpartikel, die in den Motor gelangen, verursacht werden [35]. Außerdem muss bei einem Defekt der gesamte Motor ausgetauscht werden [33], was ungeplante Wartungen und zusätzliche Kosten herbeiführt.

Für die Nachhaltigkeit des Batterieantriebs sind Energiequellen von Bedeutung. Der Strom aus dem Stromnetz kann seinen Ursprung in den Kraftwerken und Verteilerzentren haben [33], was dazu führt, dass fossile Brennstoffe für die Verbrennung genutzt werden und dadurch Emissionen erzeugen. Als Alternative wäre die Nutzung erneuerbarer Energiequellen, wie Wind- oder Solarenergie möglich. In Bezug auf die Sicherheit ist die größte Gefahr des Batterieantriebs eine chemische Reaktion des thermischen Durchgehens, wofür stabile Kühlungssysteme benötigt werden [30]. Thermisches Durchgehen verursacht einen starken Anstieg der Innentemperatur der Batterie, was zum kompletten Ausfall der Batterie oder Freisetzung brennbarer Gase führen kann [36]. Aus diesem Grund sind umfassende Schulungen für das Bodenabfertigungspersonal erforderlich, um Batterien fachgerecht handzuhaben. Ebenso müssen Besatzung und Piloten darauf vorbereitet werden, potenzielle Gefahren während des Fluges zu erkennen und angemessen darauf zu reagieren. Entsprechende Handlungsstrategien müssen erarbeitet werden.

2.5.3 Wasserstoffantrieb

In vielen Forschungsarbeiten wird Wasserstoff als die Lösung für umweltfreundliche Luftfahrt dargestellt. Dieses Energiemedium wird jedoch von Kosten, Sicherheit und öffentlicher Akzeptanz behindert [19]. Durch die Nutzung von Wasserstoff werden keine CO₂-Emissionen verursacht, jedoch können andere Abgase wie Stickstoffoxid NO_x bei der Verbrennung in Wasserstoffturbinen oder Wasserdampf emittiert werden, was zur Bildung von Kondensstreifen führt [29].

Herstellung

Es existieren verschiedene Wege zur Herstellung von Wasserstoff. Die gängigsten sind Dampfreformierung (Steam Methane Reforming - SMR) und die Elektrolyse. Bei SMR trifft Wasserdampf in der Reaktion zusammen mit Methan aus Erdgas, infolgedessen entsteht Wasserstoff H₂ und Kohlenmonoxid CO bzw. -dioxid [37]. Bei der Elektrolyse wird das Wasser mithilfe von Elektrizität in Wasserstoff H₂ und

Sauerstoff O_2 gespalten [37]. Durch diesen Herstellungsweg können CO_2 -Emissionen vollständig vermieden werden [33]. Mulder et al. [37] schätzt die Investitionskosten für die Produktion des Wasserstoffs durch Elektrolyse deutlich günstiger ein, als ein Kohlekraftwerk. Die Nachhaltigkeit der Elektrolyse ist außerdem, genau wie bei dem Batterieantrieb, von der Stromquelle abhängig. Wenn für die Produktion von Wasserstoff erneuerbare Energiequellen (wie Solar- und Windanlagen) genutzt wurden, wird dieser als grüner Wasserstoff bezeichnet [37]. Durch Elektrolyse produzierter grüner Wasserstoff ist kostenintensiv [33]. Wird der genutzte Strom aus fossilen Energieträgern erzeugt, kommt es zu indirekten Emissionen. Bei anderen Herstellungswegen (bspw. grauer und blauer Wasserstoff) kommt es hingegen zum Ausstoß von Kohlenstoff, wobei bei blauem Wasserstoff das CO_2 gesammelt und gespeichert wird [37].

Zustände

Wasserstoff kann in mehreren Zuständen genutzt werden. Die in der Verkehrsbranche am weitesten verbreiteten sind einerseits der gasförmige GH_2 , und andererseits der kryogene flüssige Wasserstoff LH_2 . Um mehr Energie speichern zu können und dabei weniger Platz zu verbrauchen, muss das gasförmige H_2 stark komprimiert und bei einem Druck von 350 oder 700 bar gespeichert werden [32]. Allerdings hat gasförmiger Wasserstoff auch bei einem Druck von 700 Bar eine geringere Energiedichte als flüssiger Wasserstoff [38]. Flüssiger Wasserstoff wird durch das Abkühlen und Verdichten von gasförmigem Wasserstoff gewonnen. In der Tabelle 2.1 sind die Vergleichswerte für Kerosin und Wasserstoff im flüssigen Zustand dargestellt. Die Gravimetrische Energiedichte bei flüssigem Wasserstoff ist deutlich höher als bei Kerosin, jedoch ist die volumetrische Energiedichte E_V wesentlich geringer. Das bedeutet, dass LH_2 zwar bessere Gewichtsverhältnisse als Kerosin hat, für die gleiche Menge Energie wird allerdings 3,5-mal so viel Platz benötigt. Aufgrund seiner Eigenschaften ist der Wasserstoff für die Nutzung auf längeren Flugdistanzen geeignet. Flüssiger kryogener Wasserstoff ist wesentlich besser als gasförmiger für den Transport per LKW geeignet, dafür benötigt er aber einen höheren Energieaufwand [32].

Tabelle 2.1: Vergleich von flüssigem Wasserstoff energiebezogenen Eigenschaften mit anderen konventionellen Treibstoffen

	E_V in [kWh/l]	E_G in [kWh/kg]	Dichte [kg/m ³]
Wasserstoff LH2 [32]	2,6	37,0	65
Kerosin [32] [39]	9,5	11,9	775.0 – 840.0 (bei 15 °C)

Die Konzepte schlagen verschiedene Platzierungen des Wasserstofftanks vor, unter anderem in Form von halbkugelförmigen Endkappen auf dem Flugzeugrumpf [28] oder am Ende des Flugzeugrumpfes zwischen der Fracht und den hinteren Notausgängen [40]. Bei Flugzeugen, welche mit Wasserstoff betrieben werden, ist die Tankisolierung von großer Bedeutung. Das flüssige LH₂ muss bei -253 °C gelagert werden [32] und zusätzlich kann die Nutzung zu Versprödung der Materialien führen [28]. Durch Wärme verdampft der Wasserstoff, was zum Anstieg des Drucks und der Temperatur im Tank führt. Heutige Tankanlagen haben tägliche Abdampfverluste in Höhe von 0,3 % bis 3 % [38].

Antrieb

Wasserstoff kann in zwei Ansätzen als Antrieb genutzt werden: einerseits als Treibstoff für die Verbrennung im H₂-Verbrennungsmotor, andererseits in der Brennstoffzelle, um den elektrischen Motor anzutreiben [27]. Zudem gibt es einen hybriden Antrieb, bei welchem die Brennstoffzelle zusammen mit einer Batterie genutzt wird. Brennstoffzellen haben ein hohes Gewicht [29] und benötigen den gasförmigen Wasserstoff als Antrieb [32]. Dabei wird durch die chemische Reaktion aus gasförmigem Wasserstoff H₂ und Sauerstoff O₂ Strom produziert [33], wodurch der Propeller des Flugzeugs angetrieben wird. Aufgrund der besseren Speicherung in flüssiger Form muss bedacht werden, wann der Wasserstoff in den Gaszustand überführt wird. Brennstoffzellen haben, ebenso wie Batterieantrieb, weniger bewegende Teile als konventionelle Antriebe [33] was weniger Wartungskosten verursachen könnte, allerdings könnte der technisch anspruchsvolle Wasserstofftank häufigere Wartungszyklen erfordern. Für die Verbrennung des Wasserstoffs sind Änderungen in der Brennkammer benötigt, um höhere Temperaturen zu vermeiden [41]. Colpan et al. [32] ist jedoch der Meinung, dass sich die Wasserstofftriebwerke

konventionellen Düsentriebwerken ähneln werden. Allerdings werden zusätzliche Komponenten wie Kraftstoffpumpen und Wärmetauscher für den flüssigen Wasserstoff benötigt.

Wasserstoff wird als hochentzündlich beschrieben [33]. Aufgrund seiner Natur breitet sich die Flamme eher vertikal aus und die Brenndauer von LH_2 ist kürzer als die des Kerosins [32]. Der Wasserstoff hat eine hohe Flammengeschwindigkeit und es besteht die große Gefahr eines Flammenrückschlags bei der Flammenausbreitung [41]. Dennoch ist Wasserstoff innerhalb der richtigen Infrastruktur nicht gefährlicher als andere brennbare konventionelle Treibstoffe und in manchen Fällen sogar sicherer [41]. Wird der flüssige Wasserstoff verschüttet, wird er aufgrund seiner Leichtigkeit vertikal nach oben verdampfen [32]. Direkter Kontakt mit kryogenem Wasserstoff führt zu Erfrierungen. Die Forschung des Wasserstoffs muss sich mit Themen wie Explosionsgefahr, Materialgefahr, Betankung und dem Umgang in der Abfertigung auseinandersetzen.

Aufgrund des starken Unterschiedes der Charakteristiken von Wasserstoff im Vergleich zu herkömmlichen Treibstoffen werden zusätzliche Schulungen für Wartungsmitarbeiter und für Bodenabfertigungspersonal benötigt, um mögliche Gefahren zu erkennen und diese zu vermeiden. Die Ausbildung soll die allgemeinen Charakteristiken des Wasserstoffs, den Umgang mit Wasserstoff und möglichen verbundenen Gefahren, und die korrekten Reaktionen in Notfallsituationen beinhalten [40].

2.5.4 Bestehende Konzepte und zukünftige Flugzeugmodelle

In diesem Teil ist beschrieben, welche Flugzeugmodelle und -konfigurationen mit im Teil 2.5 beschriebenen Antrieben in näherer Zukunft zu erwarten sind. Vor allem sind hier die Modelle ohne hybride Nutzung fossiler Energieträger zusammengefasst.

Aufgrund ihrer Drop-In Fähigkeit werden die SAFs keine neuen Luftfahrzeugkonfigurationen brauchen. Was als Vorteil für den SAF betrachtet werden kann, angesichts der aktuell produzierten Flugzeuge welche mindestens 20 Jahre im Einsatz sein werden [42]. Kleinere Flugzeuge mit elektrischem Antrieb sind bereits jetzt im Einsatz zu finden. Mit weiterer Entwicklung des Batterieantriebs bis Jahr 2030 zu rechnen, während der Betrieb der Brennstoffzelle mit Wasserstoff ist zwischen 2030 und 2040

erwartet wird und Wasserstoffturbinen frühestens ab 2040 zum Einsatz kommen [42].

Positive Auswirkungen auf Emissions-Werte können bereits mit bestimmten Flugzeug- und Triebwerkskonfigurationen erreicht werden. Zum Beispiel *Claire Liner* vom Bauhaus Luftfahrt e. V. München bringt nicht nur aerodynamische Vorteile mit, sondern auch eine Verringerung des Kraftstoffverbrauchs und damit die Reduktion der Emissionen. Jedoch sind mehr Änderungen notwendig, um Netto null CO₂-Werte zu erreichen. Die Herstellung bereitet Schwierigkeiten, manche Firmen müssen den Geschäftsbetrieb einstellen, wie Universal Hydrogen oder Zunum Aero, oder Konzepte werden nicht weiterentwickelt.

Es wurden eine Vielzahl an elektrischen Flugzeugen mit geringer Sitzkapazität vorgestellt, einige davon wurden sogar geflogen. Das Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart entwickelte ein zweisitziges hybrid-batteriebetriebenes Segelflugzeug *e-Genius*. Das Flugzeug soll eine Reichweite von 400 km erreichen und hat eine Batteriekapazität von 40 kWh mit 1,5 Stunden Ladedauer [43]. Pipistrel Alpha Electro hat bereits im Jahr 2007 seinen ersten elektrischen Zweisitzer vorgestellt, mittlerweile wird das Modell „Velis Electro“ [44] für das Pilottraining mit einem Triebwerk mit 57.6 kW Leistung genutzt. Der Antrieb ist flüssigkeitsgekühlt und braucht ein externes Ladegerät. Das neunsitzige vollelektrische Flugzeug *Alice* von Eviation, mit 250 NM Reichweite und jeweils zwei Triebwerken von 700 kW Leistung, macht bereits Fortschritte in Zertifizierungsrichtung. Die größeren Konzepte hingegen haben aufgrund der Komplexität der Technologien und Gewicht mit der Umsetzung zu kämpfen.

Konfigurationen mit Batterieantrieb

Wie bereits erwähnt wurde, haben die zurzeit bestehenden Batterien die geringe Energiedichte. Deshalb ist zu erwarten, dass bis zum Jahr 2050 keine großen vollelektrischen Flugzeuge hergestellt werden [45], stattdessen werden die Regional- und Kurzstrecken in den Mittelpunkt gestellt.

Ein vielversprechender Prototyp war die *ES-19* von Heart Aerospace. Das Unternehmen versprach die Beförderung von 19 Passagieren über 400 km mit einem BA. Das Flugzeug war für Regionalstrecken konzipiert und somit konnte die geringe Nachfrage gedeckt werden. Außerdem wurden geringe Betriebs- und Wartungskosten erwartet [33]. Die *ES-19* wurde auf das aktuellste Modell, die *ES-30*, mit einem hybriden Wasserstoffantrieb umgerüstet.

Eines der größten Konzepte mit vollelektrischen Antrieb stellte Bauhaus Luftfahrt vor. Das Passagierflugzeug *Ce-Liner* [46] ist mit einer C-Wing-Konfiguration⁴ ausgestattet und sollte eine Reichweite von 900 NM haben und 190 Passagiere befördern. Die benötigte Batteriekapazität wurde auf 2000 Wh/kg eingeschätzt. Die Batteriemodule sollen bei Turnaround ausgewechselt werden.

Konfigurationen mit Wasserstoffantrieb

Embraer zeigte eine Reihe von nachhaltigen Flugzeugen *ENERGIA*. Die Flugzeuge sind mit unterschiedlichen Antrieben ausgestattet, unter anderem hybrid-elektrisch oder mit Brennstoffzelle und Wasserstoffturbine. Bei der Wasserstoffturbine wurde das Konzept von Dualem-Treibstoff vorgeschlagen, bei welchem entweder Jet-A/SAF oder Wasserstoff genutzt werden kann. Das Unternehmen spricht von einer Technologiebereitschaft ab dem Jahr 2030, für die Wasserstoffturbine ab dem Jahr 2035 und der Wasserstoffturbine ab dem Jahr 2040 [47]. Airbus [48] hat im Jahr 2020 drei unterschiedliche emissionsfreie *ZEROe* Konzepte vorgestellt: Turbofan, Turboprop und eins mit „Blended-wing body“-Design. In allen Konzepten ist Wasserstoff und ein Antrieb mit Gasturbinentriebwerk im Einsatz. Die Reichweite bewegt sich in einem Bereich von über 1850 - 3700 km und die Anzahl beförderter Passagiere wird von auf 100 bis 200 geschätzt. Das Unternehmen will die Technologien bis zum 2035 zur Einsatzreife bringen.

Wright Spirit [49] hat ein Konzept auf Basis des konventionellen Flugzeugs BAe 146 vorgestellt, allerdings mit einem Wasserstoffantrieb. Das Flugzeug soll mit vier Triebwerken, 2,5 MW Motoren und vorgestellter Batterie mit 800 Wh/kg eine Reichweite von 1000 km erreichen und 100 Passagiere transportieren.

⁴C-Wing-Konfiguration bezeichnet ein Flugzeugdesign, bei dem Tragflächen und integrierte Winglets in einer C-Form angeordnet sind

NASA hat das turboelektrische, mit flüssigen Wasserstoff angetriebene Konzept N3-X [50] vorgeschlagen. Das Modell ist mit *Blended Wing Body* (Abb. 2.6) konzipiert und verspricht, dass der Treibstoffverbrauch bis um 70 % reduziert werden kann.



Abbildung 2.6: Konzeptflugzeug mit Blended Wing Body N3-X [50]

ZeroAvia stellt ihre hybrid Wasserstoff-elektrischen Antriebe mit drei unterschiedlichen Leistungen und Kapazitäten vor. Der kleinste Antrieb, ZA600, hat mit einer Leistung von 600 kW, die Möglichkeit bis zu 20 Passagiere über 555 km zu befördern. Die geplante Eintrittszeit (Entry-in-System - EIS) ist im Jahr 2025. Das Luftfahrzeug wird mit gasförmigem Wasserstoff angetrieben. Abschließend lässt sich feststellen, dass aktuell zahlreiche Konzepte ausgearbeitet werden. Wie erfolgreich diese sind, ist abzuwarten bis Technologien tatsächlich auf den Markt kommen.

3 Änderungen durch neue Antriebe, Annahmen und Methodik

Konzepte mit neuen Antrieben befinden sich in der Entwicklung. Daher sollte in Erwägung gezogen werden, wie zukünftige Flughäfen gestaltet werden und welche Ausstattung für die Flugzeugabfertigung zum Einsatz kommt. Wasserstoff-Flugzeuge werden erst ab dem Jahr 2035 auf den Markt kommen, wobei die batteriebetriebenen Flugzeuge schon in den nächsten Jahren erwartet werden. Der Wechsel zu nachhaltigen Antrieben kann zu deutlichen Änderungen in der Infrastruktur und Abläufen am Vorfeld führen, welche in diesem Kapitel beschrieben werden. Außerdem werden auf Grundlage der unterschiedlichen Quellen und vernünftigen Behauptungen eine Reihe von Annahmen für diese Arbeit getroffen.

3.1 Änderungen an der Betrieb/Infrastruktur und dazugehörige Kosten von alternativen Antrieben

Infrastrukturkosten sind von der Größe des Flughafens abhängig. Größere Flughäfen können mehr Flugzeuge als Regionalflughäfen abfertigen, was dazu führt, dass mehr Abfertigungsplätze umgerüstet und versorgt, sowie mehr Arbeitskräfte geschult werden müssen. In diesem Teil wird näher auf die Änderungen der Infrastruktur durch die Einführung von neuen Antrieben eingegangen und bestimmte Szenarien ausgewählt.

3.1.1 SAF am Flughafen

SAF ist aufgrund vorhandener Emissionen zwar nicht die beste langfristige Lösung, aufgrund der Notwendigkeit weiterer Entwicklungen der alternativen nachhaltigen Antriebe stellt es aber eine gute Option dar. In naher Zukunft werden vor allem die großen Flugzeuge nicht mit Batterieantrieb entwickelt, deswegen kann SAF für Langstreckenflüge genutzt werden [33]. Diese Arbeit wird sich auf das reine SAF ohne Beimischung beschränken, da nur so das gesetzte Ziel bis zum Jahr 2050 erreicht werden kann.

SAF benötigt keine Infrastrukturänderung und darf in bestehenden Systemen und Flugzeugen genutzt werden [33]. Dadurch, dass SAF zu herkömmlichen Treibstoffen beigemischt wird, wird zurzeit ein zusätzlicher Tank für den gemischten Kraftstoff benötigt [6]. Nach intensiver Recherche wurde jedoch keine Information gefunden, die besagt, dass es verboten sein wird, reines SAF nicht als Drop-In zu nutzen. Aus diesem Grund gilt für die Arbeit, dass die Lieferung von SAF mit bestehenden Pipelines zertifiziert und genau wie bei der Betankung mit herkömmlichen Treibstoffen zugelassen wird.

3.1.2 Batterieantrieb am Flughafen

Batteriebetriebene Flugzeuge brauchen größere Veränderung am Flughafen als bei der Nutzung von SAF. Bis zum Jahr 2050 sind die Batterieantriebe auf kleinere Flugzeuge und damit auf Kurz- und Regionalverkehr beschränkt.

In der Literatur werden zwei Batterie-Lademöglichkeiten diskutiert, einerseits das Wechseln der Batterien (Swap-Methode), bei welcher diese aus dem Flugzeug herausgenommen und an einer Ladestation geladen werden, andererseits die Batterien des Flugzeugs per Ladekabel aufzuladen (Plug-In), ähnlich wie bei etablierten E-Autos. Zudem ist ein modulares System möglich, bei welchem beide Ansätze genutzt werden [51]. Bei diesem Antrieb muss beachtet werden, welche Lebensdauer eine Batterie hat und wie die Batterien geladen werden. Je länger die Ladung dauert, desto mehr Kosten werden auf dem Boden verursacht. Nichtsdestotrotz kann eine schnelle Ladung zur Reduktion der Lebensdauer einer Batterie führen [52].

Die Ladeleistung ist für die Dauer der Ladung verantwortlich. Durch schnellere Ladungen wird die Lebensdauer der Batterien reduziert, was verursacht, dass die Batterien schneller ausgetauscht werden müssen, wodurch mehr Kosten entstehen.

Die *Plug-In* Methode benötigt ein schnelles Laden, damit Flugzeuge weniger Zeit auf Boden verbringen müssen. Jedoch ist ein Anstieg der Turnaround-Zeiten aufgrund der nicht existierenden Schnellladung vorstellbar [53]. Bei Schnellladung werden außerdem Kühlsysteme benötigt [35].

Bei der *Swap-Methode* kann der Aus- und Einbau der Batterie aus und in das Flugzeug lange dauern [33]. Guo et al. [54] ist zu dem Schluss gekommen, dass Batteriewechsel effizienter und ökonomischer sind, wenn die batteriebetriebenen Flugzeuge nur einen kleinen Teil (unter 10 %) der Flotte darstellen, in anderen Fällen lohnt sich eine Plug-In-Ladung. Für Batteriewechsel müssen auch Transport und Hebezeuge gestellt werden, um die Batterien bewegen zu können [35]. Besonders an einem großen Flughafen kann die Dauer der Abfertigung von Bedeutung sein. Der Batteriewechsel bietet gleichmäßigere Deckung der Nachfrage [54] und ist kompatibler mit der Flugplanung [51], da der Austausch einer Batterie schneller ist, als die Dauer einer Plug-In Ladung. Jedoch werden mehrere Batterien benötigt, die zudem ordnungsgemäß und sicher gelagert werden müssen [51]. Außerdem ermöglicht die Swap-Methode langsames Laden und macht das Laden mit geringerer Leistung möglich [53]. Würde der Austausch der Batterien parallel zu anderen Prozessen, wie bspw. Deboarding stattfinden, könnte eine kürzere Turnaround-Zeit im Vergleich zu konventionellen Flugzeugen erreicht werden [5].

Annahmen für die Analyse

Für die weitere Betrachtung wurde sich für die Swap-Methode entschieden. Zudem wird angenommen, dass die Batterien für Flugzeuge zur Flughafen-Infrastruktur gehören. Das bedeutet, dass diese Anschaffungskosten für den Flughafen anfallen und diese in Form von Leasinggebühren für Fluggesellschaften weitergegeben werden.

Für die Ladevorgänge wird Strom benötigt. Die Strompreise und die verfügbare Leistung hängen normalerweise von den Tag- und Nachtzeiten ab [51]. Aus praktischen Gründen wird eine konstante Spitzenleistung des Batterieladesystems von 250 kW angenommen. Bei einer Batteriekapazität von 900 kWh, würde die Ladung bei einer solchen Leistung, ohne Beachtung der Verluste, 3,6 Stunden dauern.

3.1.3 Wasserstoffantrieb am Flughafen

Logistik ist ein wichtiger Teil der Produktionskette. Die Nutzung von Wasserstoff am Flughafen erfordert einen Austausch der Betankungsanlagen und Anschaffung neuer Lieferketten, um Wasserstoff als Treibstoff nutzen zu können. Diese Investitionskosten werden die Flughafenbetreiber belasten.

Transport

Die Lieferketten und die Produktion des Wasserstoffs spielen eine große Rolle in der vorhandenen Literatur. Der Transport ist durch Pipelines im gasförmigen Zustand, durch LKW und Züge sowohl im gasförmigen, als auch im flüssigen Zustand möglich. Kapitel 2.5.3 stellte die möglichen physischen Formen von Wasserstoff fest und legte am Ende dar, dass flüssiger im Vergleich zum gasförmigen Wasserstoff für den Transport vorteilhafter ist. Außerdem kann er auch in einer chemischen Verbindung, wie Ammoniak und Methanol, gebunden und somit transportiert werden. Die Effizienz der Produktion- und Lieferkosten ist geografisch determiniert. Die Lieferoptionen sind nach geografischer Position des Flughafens zu wählen. Für die Flughäfen, die nahe einer Wasserstoff-Pipeline liegen, ist es sinnvoller hiermit den Wasserstoff zu transportieren, als ihn bspw. mit einem LKW liefern zu lassen. Für Distanzen im europäischen Raum sind Wasserstoff-Pipelines günstiger als der Transport mit chemischen Verbindungen, welcher bei längeren Distanzen in Betracht gezogen wird [55]. Bei der Umwandlung von Erdgas- in Wasserstoffleitungen können Kosten gespart werden [55]. Es muss keine neue Infrastruktur gebaut, nur eine Umrüstung der Leitungen für den Transport von Wasserstoff durchgeführt werden.

Der Transfer von LH_2 mit vakuumisolierten Pipelines beschränkt sich auf kurze Distanzen aufgrund der proportionalen Skalierung der Verluste zur Leitungslänge [32]. Colpan et al. [32] ist der Meinung, dass für den Fall, dass große Mengen an Wasserstoff benötigt werden, wäre die Lieferung weder per LKW, noch per Pipeline sinnvoll. Dennoch kann lt. Schenke et al. [56] die Lieferung des flüssigen Wasserstoffs mit einem LKW bei einer hohen Anzahl an Flügen kostengünstiger als andere Lieferalternativen sein. Allerdings erfordert der Transport von LH_2 speziell konstruierte Tanks [37].

Speicherung

Gasförmiger Wasserstoff kann unterirdisch in Salzkavernen und in erschöpften Gasfeldern gespeichert werden [55], diese müssen sich in unmittelbarer Nähe des Flughafens befinden. Da diese Gegebenheit je nach Flughafenstandort variiert, wird diese Speicheroption nicht weiter behandelt. Außerdem kann für die Lagerung ein oberirdischer Druckzylinder eingesetzt werden, in welchem Wasserstoff in flüssiger oder in fester Form wie Metallhydriden gespeichert wird. Aufgrund der tiefen Temperaturen müssen diese Zylinder oder Tanks gut isoliert und kryogen sein [55]. Andernfalls verdampft flüssiger Wasserstoff bei der Lagerung, was zu Verlusten führt [55]. Die Verdampfung wird mit größeren Lagern kleiner [32]. Dennoch findet der größte Teil der Verdampfung aufgrund der Transferphase statt [55]. Somit muss der Weg zwischen der Betankung und dem Speicher kurz sein, damit Verdampfungsverluste minimiert werden [32].

Eine weitere mögliche Betankungsoption ist der Austausch des Flugzeugtanks in Form von Kapseln. Dabei werden die leeren Kapseln an die Wasserstoffproduktionsstelle zurückgegeben, bei welcher diese wieder nachgefüllt werden [32]. Diese Möglichkeit kann vor allem für kleinere Flughäfen eine Alternative darstellen, da kein Wasserstoffspeicher oder sonstige Anlagen bereitgestellt werden müssen. Für längeres Parken von Luftfahrzeugen am Flughafen werden gekühlte Tanks eine sichere Verbindung mit der Wasserstoffinfrastruktur benötigen [32].

In dem Unterkapitel 2.5.3 wurde angeführt, dass die Produktion des Wasserstoffs viel Platz und Energie benötigt und hohe Kosten verursacht. Eine Produktion und Verflüssigung des Wasserstoffs am Flughafen würde ebenfalls hohe zusätzliche

Infrastrukturkosten verursachen [33]. Deswegen wäre für die Flughäfen eine bessere Alternative, den Wasserstoff extern einzukaufen und per LKW oder Pipelines zum Flughafen liefern zu lassen [57]. Aufgrund aufwendiger und kostenintensiver Infrastrukturprozesse für die Produktion und Verflüssigung von Wasserstoff werden wahrscheinlich Flughäfen, besonders kleinere, anfangs auf die „On-Site“ Produktion verzichten.

Annahmen für die Analyse

Die Gesamtinvestitionen sind von der Wahl der Produktion, Speicherung, Lieferketten als auch der Betankungsentscheidung abhängig. Da derzeit nicht einsehbar ist, welche Technologie umgesetzt wird, fokussiert sich die Arbeit auf einen bestimmten Versorgungsweg. Die externe Produktion ist am Anfang sinnvoll [32]. Aus diesem Grund wurde angenommen, dass die Produktion des Wasserstoffs und die Verflüssigung nicht am Flughafen stattfinden, der Wasserstoff stattdessen eingekauft und per LKW zum Flughafen transportiert wird. Am Flughafen wird der Wasserstoff in kryogenen Tanks gespeichert und durch Betankungswägen werden die Flugzeuge mit Kraftstoff befüllt. Die Lieferkosten für flüssigen Wasserstoff LH₂ werden nicht explizit ausgerechnet, da diese schon in den Betriebskosten von wasserstoffbetriebenen Flugzeugen eingeschlossen sind. Die Abbildung 3.1 stellt eine Variante von Produktions- und Lieferketten für flüssigen Wasserstoff dar. Dabei werden außerhalb des Flughafens erneuerbare Energiequellen für die Produktion des Wasserstoffs durch Elektrolyse genutzt. Im Weiteren wird gasförmiger Wasserstoff verflüssigt und in einem LKW zur Tankfarm von Flughafen geliefert, wo er dann mithilfe einer Krypumpen in einen Speicher geladen wird.

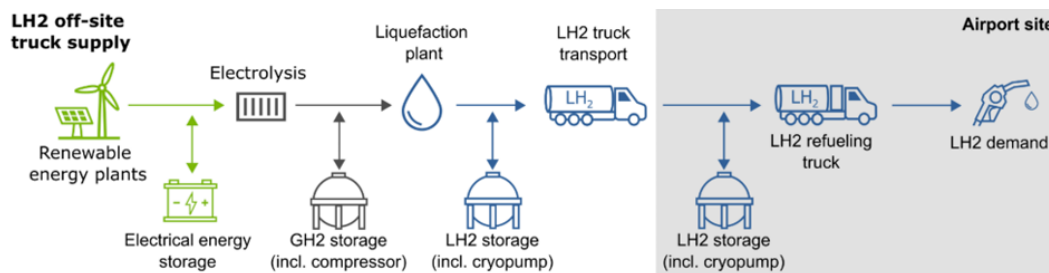


Abbildung 3.1: Lieferkette von flüssigem Wasserstoff mit externer Herstellung und interner Lagerung bzw. die Betankung [56]

3.2 Flugzeugcharakteristika und zugrunde gelegte Annahmen

Um den betrieblichen Unterschied zwischen konventionellen und neuartigen Antrieben aufzuzeigen, werden die Referenz-Flugzeuge mit neuen Konzepten verglichen. Die Wahl eines Antriebes ist von der Reichweite abhängig.

Konventionelle Flugzeuge

Für den Vergleich mit batteriebetriebenen Flugzeugen wurde eine L410 festgelegt. Die L410 ist ein Zubringer-Flugzeug mit 19 Plätzen der Firma Aircraft Industries. Die moderne Version L410NG verfügt über neue Avionik und ist mit zwei GE H85-200 Triebwerken mit einer Wellenleistung von 850 (SHP) ausgestattet [58]. Der Verbrauch einer L410 beträgt 240 kg/h [59]. Sonstige für die Methodik wichtige Flugzeugdaten wurden in der Tabelle 3.1 zusammengefasst. Unter V ist die Reisegeschwindigkeit und unter R ist die Reichweite eines Flugzeugs zu verstehen. $MTOW$ ist das Höchstabfluggewicht und EOW (Empty Operating Weight) ist die Betriebsleermasse eines Flugzeugs.

Für den Vergleich von größeren Distanzen wurde eine A321LR festgelegt. Die A321LR ist ein Schmalrumpfflugzeug von Airbus und ist eine Version der A321neo mit einer höheren Reichweite. Das Flugzeug ist mit zwei Triebwerken ausgestattet, die einen maximalen Schub (T_{TO}) von 33 kN haben [60].

Alternative Flugzeuge und Annahmen

Die ES-19 von Heart Aerospace dient als Vergleich zur L410. Das Konzept hat einen rein elektrischen, batteriebetriebenen Antrieb. Heart Aerospace hat die ES-19 zwar auf eine hybride Wasserstoffversion, die ES-30, umgerüstet, das Konzept der ES-19 wurde allerdings breit diskutiert und oft in wissenschaftlichen Arbeiten erwähnt. Das Flugzeug hat vier Triebwerke und sollte über eine Reichweite von 400 km verfügen, hierbei wird eine Reisegeschwindigkeit von 330 km/h erreicht [61], [62]. Für die

ES-19 wird eine Batterie mit einer Kapazität von 720 kWh benötigt, zuzüglich 30 % der Reserveenergie resultiert das in 900 kWh [30].

Mit der Leistung heutiger Batterien wäre es unmöglich bei diesem Gewicht und dieser Distanz zu bleiben. Deswegen wird angenommen, dass die Batterien sich positiv im Gewicht-zu-Leistungs-Verhältnis entwickeln und ein Kapazitätswert von 450 kWh/kg erreicht wird. Manche Studien gehen davon aus, dass die Einsparungen der Wartungskosten von batteriebetriebenen Flugzeugen 10-15 % erreichen können [53], [63]. Deswegen wird in dieser Arbeit eine Verminderung von 10 % zu dem Referenzflugzeug einberechnet. Da es bis jetzt nur wenig ausgearbeitete größere Konzepte für Wasserstoffantriebe gibt, wird der Betriebsvergleich auf Basis einer A321LR stattfinden. Dabei wird angenommen, dass das Flugzeug mit Wasserstoffturbine betrieben ist. Im Vergleich zu konventionellen Flugzeugen werden die Wasserstoff-Flugzeuge, welche für Mittelstrecken geeignet sind, ein 14 % höheres MTOW haben und die Kapitalkosten für das Kurzstrecken-Flugzeug um 7 % sowie Wartungskosten um 6 % steigen [27]. Diese Anteile wirken sich zwar positiv auf Mittel- und Langstrecken Flugzeuge aus, werden in dieser Arbeit dennoch angenommen. Der spezifische Treibstoffverbrauch eines Wasserstoffantriebs beträgt nur 35 % eines Kerosinstrahltriebwerks [64], dieser Wert wird für die Arbeit verwendet.

Die Änderungen in den Abfertigungsprozessen können erheblich sein [65]. Es ist zu erwarten, dass Wasserstoff-Flugzeuge länger als konventionelle Flugzeuge werden und dass die Kraftstoffsicherheitszone bei Anschließen und der Trennung der Wasserstoff-Betankung zum Jahr 2030 auf 20 Meter reduziert wird [66].

Die Flugzeit nimmt aufgrund des Wasserstofftank-Gewichts zwischen 5 und 15 % zu [27]. Deshalb wird in dieser Arbeit einen Wert von 10 % angenommen. Die Auslastung eines Flugzeugs mit Wasserstoffantrieb kann im Vergleich zu konventionellen Flugzeugen sinken, da wasserstoffbetriebene Flugzeuge wegen der Betankungsprozesse potenziell mehr Zeit auf dem Boden verbringen werden [57]. Der Vergleich zu SAF-Betriebskosten findet auch mit der A321LR statt. Es wird davon ausgegangen, dass der Unterschied nur bei den Treibstoffkosten entsteht. Für die A321LR wird die Passagieranzahl von 220 und ein Verbrauch von 1,7 kg PAXkm angenommen [67]. In der Tabelle 3.1 sind relevante charakteristische Werte und Annahmen für die Vergleichsflugzeuge zusammengefasst. Anhand dieser Daten ist die ES-19 langsamer als ein L410, das bedeutet für die gleiche

Strecke wird mehr Zeit benötigt, was am Ende die Auslastung eines Flugzeugs und somit die Betriebskosten verändern kann. Aufgrund des Batteriegewichts ist das batteriebetriebene Flugzeug schwerer als konventionelle Alternativen. Beide Flugzeuge können die gleiche Anzahl an Passagieren befördern. Obwohl sich die Reisegeschwindigkeiten bei Referenz- und BA-Flugzeugen unterscheiden werden, ergibt sich für Kurzstrecken-Flüge keine erhebliche Differenz. Deswegen wird angenommen, dass die batteriebetriebenen Flugzeuge ähnliche Auslastungen wie konventionelle Flugzeuge aufweisen. Auch eine Änderung der Lebensdauer von batteriebetriebenen Flugzeugen wird nicht erwartet [35]. Eine A321LR erreicht mit oben genannten Annahmen höhere Geschwindigkeiten und Reichweiten, sowie ein geringeres MTOW und EOW.

Tabelle 3.1: Bewertete Flugzeuge: Werte und Annahmen

	V [km/h]	R [km]	MTOW [kg]	EOW [kg]	PAX-Anzahl	Quellen
L410	417	2 570	7 000	4 120	19	[68]
ES-19	330	400	8 618	-	19	[61] [62]
A321LR	1104	7 400	97 000	52 060	max. 244	[69] [67]
WA	913	-	110 580	-	220	-

Dass die Anschaffungspreise die Betriebskosten beeinflussen, wurde bereits in 2.3 angeführt. Die Tabelle 3.2 stellt die Verkaufspreise für konventionelle Referenz-Flugzeuge dar. Da der Kaufpreis einer A321LR nicht zur Verfügung steht, wird auf den Listenpreis einer A321neo zurückgegriffen. Da sie aus einer Flugzeug-Reihe kommen, kann davon ausgegangen werden, dass die Preise ähnlich sind. Zusätzlich wird der Inflationsfaktor einbezogen.

Tabelle 3.2: Flugzeugpreise für Referenzflugzeuge

	L410	A321neo
Verkaufspreis [EUR]	6,46 Mio [70]	129,5 Mio [71]

3.3 Aufstellung der Formeln für Kosten

In dem Kapitel 2.3 sind die entstehenden Kosten beim Betrieb der Fluggesellschaft definiert. Schließlich sind in diesem Unterkapitel die dazugehörigen Formeln anhand

anderer Modelle vorgestellt und teilweise angepasst.

Es gibt eine Reihe von Methoden, um DOC zu berechnen. Diese wurden in dem Teil 2.3 erwähnt. Als Grundlage für ein Modell wurde die Association of European Airlines (AEA) 1989 gewählt, da sie häufige Anwendung in der akademischen Welt hat, sehr umfassend ist und Berechnungswerte für sowohl Kurz-, als auch Langstrecken hat. Die Formeln für AEA wurden von [72] entnommen. Falls die Quelle abweicht, wurde sie explizit angegeben.

Die Betriebskosten werden mit konstanter Reisegeschwindigkeit und Verbrauch ohne Berücksichtigung erheblicher Energieverluste während des Starts und der Landung berechnet. Die Inflationsfaktoren stammen aus dem Verbraucherpreisindex Deutschland des Statistischen Bundesamts, entsprechend eingesetzte Werte sind in der Anlage A zu finden. Alle Werte in USD werden mit dem Wechselkurs⁵ (1 EUR = 1,0245 USD) umgerechnet [73], alle Werte in Pfund mit dem Kurs (1 GBP = 1,20 EUR). Aufgrund der hohen Unsicherheit der Preisprojektionen wird der Preis für Kerosin konstant gehalten, es wird von einem Wert von 0,688 EUR pro Liter⁶ ausgegangen [13]. Stromkosten von 0,1976 € pro kWh werden ebenfalls als konstant angenommen [74]. In Anbetracht der Kostensenkung für nachhaltige Kraftstoffe in der Zukunft, wird der minimale Preis für HEFA-Treibstoff von 1,07 EUR pro Liter in den Berechnungen verwendet [75]. Wegen der starken Schwankungen des Wasserstoffpreises wird der Durchschnittspreis für elektrolytisch hergestellten Wasserstoff von 4,88 EUR/kg eingesetzt [76].

3.3.1 Betriebskosten einer Fluggesellschaft

Die Gleichung (3.1) stellt die Betriebskosten *DOC* der Flugzeugnutzung dar. Es werden sowohl variablen als auch ein Teil der Fixkosten betrachtet. Diese bestehen aus Treibstoff-/Energiekosten C_T , Wartungskosten C_W , Entgelten und Gebühren C_{EG} , Kosten für Personal C_{Crew} und kapitalgebundenen Kosten C_{KK} .

$$DOC \text{ [EUR]} = C_T + C_W + C_{Crew} + C_{KK} + C_{EG} \quad (3.1)$$

⁵Wechselkurs vom 14.01.2025

⁶Der Wert von 112,2 USD/bbl wurde verwendet, anschließend in Liter umgerechnet und mit dem aktuellen Wechselkurs angepasst.

Die Betriebskosten werden auf Basis von Blockstunden kalkuliert. Blockstunden setzen sich aus Flugzeit $t_{F,h}$ sowie der kumulierten Rollzeit t_R von und zur Parkposition t_R zusammen. Für Kurz- und Mittelstrecken beträgt t_R 0,25 h und für Langstrecken 0,42 h [12].

$$t_B [\text{h}] = t_{F,h} + t_R \quad (3.2)$$

Treibstoff-/ Energiepreise hängen vom Treibstoff- bzw. Energiepreis selbst $P_{T/E}$ und vom Verbrauch eines Flugzeugs pro Blockstunde m_V ab (vgl. (3.3)) ab.

$$C_T [\text{EUR}] = (P_{T/E} \cdot m_V \cdot t_B) \quad (3.3)$$

Die **Wartungskosten** werden nach dem Jenkinson 1999 Modell berechnet. Das Modell ermöglicht es, grob aber schnell die Wartungskosten für ein Flugzeug abzuschätzen [77]. Da dieses Modell auf konventionelle Flugzeuge ausgearbeitet wurde, berechnet man die Wartungskosten für alternative Antriebe als Prozentanteil des Referenz-Flugzeugs, die in 3.2 angeführt sind. Die Formeln stammen aus [77] und beziehen sich auf das Jahr 1994, somit muss der Inflationsfaktor k_{Infl} einkalkuliert werden. Die Berechnung liefert die Ergebnisse in USD, aus diesem Grund wird ein Wechselkursfaktor k_{WK} in die Berechnung implementiert. Wartungskosten werden normalerweise auf die Wartung der Flugzeugzelle $C_{W,Zelle,B}$ und der Triebwerke $C_{W,Triebwerk,B}$ aufgeteilt, wie in den Gleichungen (3.4) dargestellt. Die Wartungskosten der Zelle sind von dem leeren Betriebsgewicht (Operating Empty Mass m_{OE}) abhängig. Die Kosten des Triebwerks sind vom erzeugten Schub beim Start (Take-Off Thrust $T_{T/O}$) abhängig.

$$\begin{aligned} C_{W,B} [\text{EUR}] &= (C_{W,Zelle,B} + n_T \cdot C_{W,Triebwerk,B}) \cdot t_B \cdot n_{F,Jahr} \cdot k_{WK} \cdot k_{Infl} \\ C_{M,AF,b} [\text{USD}] &= \left(175 \frac{\text{USD}}{h} + 0,0041 \frac{\text{USD}}{h} \cdot m_{OE}\right) \cdot k_{Infl} \\ C_{M,E,L,b} [\text{USD}] &= \left(0,00029 \frac{\text{USD}}{h} \cdot T_{T/O}\right) \cdot k_{Infl} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Diese Formeln sind für Triebwerke mit einem Nebenstromverhältnis von 5:1 ausgelegt [77]. Trotz der höheren Nebenstromverhältnisse die bei moderneren und größeren Flugzeugen gegeben sind, wird aus Gründen der Vereinfachung diese Formel genutzt.

Zu **Entgelten und Gebühren** C_{EG} gehören Flughafenentgelte (Passagier-, Lande- und Startentgelte, Sicherheitsentgelte sowie Abfertigung am Vorfeld) und die Flugsicherungsgebühr. In der Arbeit wurden folgende Flughafen-Entgelte mitberechnet: Entgelte für Abfertigung, Passagierentgelte, Entgelt Landung und Start und zusätzliche passagierbezogene Entgelte. Die Passagierentgelte wurden im Fall Kurzstrecken angenommen, dass die Passagiere innerhalb EU reisen, für Mittel- und Langstrecken wurde angenommen, Passagiere außer EU-Rahmen reisen. Es muss beachtet werden, dass es eine Reihe anderen Entgelte an Flughäfen vorhanden, wie die sicherheits- oder emissionsabhängige Entgelte. Zur Reduktion der Komplexität in der Berechnung werden die jedoch nicht betrachtet. Die Berechnung der Kosten erfolgte unter der Annahme, dass nur Passagiere berücksichtigt wurden, während die Fracht bei der Berechnung von Entgelten und Gebühren vernachlässigt wurde.

Die Formel der Flugsicherungsgebühr (C_{FS}) für jeweils An- und Abfluggebühr stammt aus [78] und ist in der Gleichung (3.5) dargestellt. Im Jahr 2025 liegt der Wert P_{FS} bei 380,71 Euro. Der $MTOW$ bezeichnet das Höchstabfluggewicht (Maximum Take-Off Weight) eines Flugzeugs.

$$C_{FS} \text{ [EUR]} = \left(\frac{MTOW}{50}\right)^{0,7} \cdot P_{FS} \quad (3.5)$$

Die zugrunde liegenden Werte den Flughafenentgelten wurden aus den Daten von [79] entnommen. Außerdem bestehen bei alternativen Antrieben betriebliche Kosten, die durch Infrastrukturbedienung bedingt sind. So werden bei BA-Flugzeugen die Kosten für Batteriewechsel zu Flughafenentgelten einkalkuliert. Aufgrund hoher Kosten für Batterien und ausgewählten Batteriewechselsystems am Flughafen können die Fluggesellschaften die Anschaffungskosten nicht leisten. Zudem wird es schwer die Ladegeräte für unterschiedliche Batterien bereitzustellen. Aus diesem Grund wird ein Konzept vorgeschlagen, dass Fluggesellschaften die Batterie bei Flughafengesellschaft leihen. Pro 1,5 Stundenflug wird ein Wert von 250 EUR dazugerechnet, da es durch die Häufigkeit der Ladezyklen und Abschreibungsjahren (siehe Tab. 3.3)

plausibel erscheint. Dieser Wert ermöglicht für den Flughafen Anschaffungskosten zu decken und unerwartete dazukommende Kosten zu bewältigen. Pro Flugzeug wird von einem Wert in Höhe von 285 EUR ausgegangen [80].

Crewkosten setzen sich aus Lohnkosten für Piloten L_{Pilot} und Besatzung L_{crew} zusammen. Die Anzahl der Besatzungsmitglieder n_{crew} ist von der Anzahl der Passagiere abhängig. Gemäß den luftfahrtrechtlichen Bestimmungen ist pro 50 Passagiere ein Flugbegleiter notwendig [3]. Die Besatzungskosten sind mit einem Durchschnittslohn von 37 EUR für Flugbegleiter und 90 EUR für Piloten pro Blockstunde berechnet [81]. Die Werte setzen sich aus Grundgehalt und 75 Blockstunden pro Monat zusammen.

$$C_{crew} \text{ [EUR]} = (L_{Pilot} \cdot 2 + L_{crew} \cdot n_{crew}) \cdot t_B \quad (3.6)$$

Zu **kapitalbezogenen Kosten** gehören Abschreibungs-, Versicherungs- und Verzinskosten. Abschreibungskosten sind von den Anschaffungskosten bzw. dem Kaufpreis, der Abschreibungsdauer und den Blockstunden pro Jahr abhängig [3]. Die Abschreibungsdauer nach AEA beträgt jeweils 14 Jahre für Kurz- und Mittelstecken und 16 Jahre für Langstrecken [12].

Da keine öffentlich zugänglichen Marktpreise für Luftfahrzeuge mit alternativen Antriebssystemen vorliegen, wird die Kalkulation der Anschaffungskosten für elektrisch betriebene Flugzeuge nach der Methodik von [82] durchgeführt. In der Arbeit wurde das Regressionsmodell (3.7) mit Abhängigkeit von Passagieranzahl n_{PAX} anhand einer Marktanalyse für die Berechnung erstellt. In der Formel sind aufgrund der Einführung neuer Technologien 10 % höhere Anschaffungskosten mitbetrachtet. Die Studie ist aus dem Jahr 2020, Preise wurden in USD berechnet, weshalb der Inflationsfaktor k_{Infl} und der Wechselkurs k_{WK} ebenfalls betrachtet werden.

$$C_{BA,ac} \text{ [EUR]} = (407408 \cdot n_{PAX} - 2967.4) \cdot k_{WK} \cdot k_{Infl} \quad (3.7)$$

Die Formeln (3.9) für die kapitalbezogenen Kosten nach AEA stammen aus [72]. Ein weiterer wichtiger Faktor der kapitalgebundenen Kosten ist die Auslastung U eines Flugzeuges. Er wird durch die Anzahl der verfügbaren Stunden pro Jahr t_{verf} , der Block- t_B und der Turnaround-Zeit t_{TA} berechnet [72]. Die jährliche Verfügbarkeitszeit t_{verf} beträgt für Kurzstreckenflugzeuge 3750 h, während für

Mittel- und Langstreckenflugzeuge ein Wert von 4800 h eingesetzt wird [12]. Für die Kurzstrecken-Flugzeuge wurde eine Turnaround-Zeit von 1,5 h gewählt (Quelle). Aufgrund der Größe und aufwendigeren Abfertigung wird für Mittel- und Langstrecken ein Wert von 2 h gewählt.

$$U = \frac{t_{verf}}{t_B + t_{TA}} \quad (3.8)$$

Die Abschreibung DEP wird auf Grundlage der Gesamtinvestitionen TI für das Flugzeug sowie dessen Auslastung U und Abschreibungswert berechnet. Für die Verzinsungskosten INT werden Gesamtinvestitionen mit einem Zinssatz von 5 % verzinst [12]. Die Versicherungskosten werden in der Regel anhand des Herstellerpreises berechnet. Es wird angenommen, dass sich der Herstellerpreis nicht wesentlich vom Kaufpreis unterscheidet, sodass sich die Versicherungskosten INS auf die Gesamtinvestitionen für das Flugzeug beziehen. Nach AEA ist ein Versicherungsprozentanteil von 0,5 % einberechnet [12].

$$DEP = \frac{TI}{14 \cdot U}$$

$$INT = 0,05 \cdot \frac{TI}{U} \quad (3.9)$$

$$INS = 0,005 \cdot \frac{TI}{U}$$

3.3.2 Infrastrukturkosten

Batterieantrieb

Kapitalkosten der Batterieantrieb-Infrastruktur sind in folgender Formel zusammengestellt:

$$CAPEX \text{ [EUR]} = C_{Bat} + C_{BSS} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned}
C_{Bat} &= P_{Bat} \cdot N_{Bat} \\
C_{BSS} &= P_{BSS} \cdot N_{BSS}
\end{aligned}
\tag{3.11}$$

P_{Bat} stellt den Preis einer Batterie und N_{Bat} die Anzahl der Batterien dar, die benötigt werden. Dazu werden noch 20 % Reserve-Batterien einberechnet, um Einschränkungen im Betrieb zu umgehen (3.12). P_{BSS} ist der Preis des Ladegeräts der Batteriewechselstation und N_{BSS} ist der Anzahl an Ladegeräten. Stromkosten werden hier nicht betrachtet, da diese bereits in Betriebskosten pro Flug einberechnet werden und somit durch die Fluggesellschaft gedeckt werden. Für die Berechnung wird eine lineare Abschreibung genutzt. Es ist nicht auszuschließen, dass für die ordnungsgemäße Lagerung von Batterien zusätzliche Anlagen wie bspw. Lagergebäude nötig sind. In der Tabelle 3.3 sind die genutzten Werte für die batteriegebundene Infrastruktur aufgeführt. Die Anzahl der Batterien ist von der Gesamtanzahl der Abfertigungen

Tabelle 3.3: Werte und Annahmen der BA-Infrastruktur

	Werte	Quelle
P_{BSS} [EUR]	11 974	[54]
Abschreibung BSS [Jahre]	10	[51]
P_{Bat} [EUR/kWh]	125 000	[54]
Lebenszyklen c_{Bat}	5 000	[35]
Abschreibung Bat [Jahre]	2,7	-

$N_{Abfertigung}$ und Ladezyklen c_{Bat} einer Batterie abhängig. Zeitgleich ist die Anzahl der Zyklen, die eine Batterie an einem Tag geladen werden kann, von den Betriebsstunden des Flughafens und der Ladedauer der Batterie abhängig. In Zukunft ist eine Lebensdauer einer Batterie von bis zu 5000 und mehr Zyklen zu erwarten [35], weshalb ein Wert von 5000 Zyklen in der Berechnung angenommen wird. Die Ladedauer ist von der Leistung der Ladestationen und Kapazität einer Batterie abhängig. Für die Ladegeräte wurde eine konstante Spitzenleistung von 250 kW angenommen [51]. Zusätzlich wird der Puffer von 20 % für die Batterieanzahl implementiert, um mögliche Engpässe zu vermeiden. Die Anzahl der Ladegeräte N_{BSS} ist von der Gesamtzahl der Batterien und Ladezyklen abhängig.

Mit einer angenommenen Batteriekapazität von 900 kWh und Ladegeräten mit der Leistung von 250 kW, entspricht das 3,6 Stunden Ladedauer. Bei einem 18 Stunden-Betrieb resultiert das insgesamt 5 Ladezyklen pro Tag für jede Batterie. Daraus kann abgeleitet werden, dass jede Batterie 1000 Tage genutzt werden kann, bis ihre Leistung auf 80 % sinkt. Die Einbeziehung der Abschreibungswerte unterstützt die dritte Hypothese.

$$N_{Bat} = 1,2 \cdot \frac{N_{Abfertigung}}{c_{Bat}}$$
$$N_{BSS} = \frac{N_{Bat}}{c_{Bat}} \quad (3.12)$$

Wasserstoffantrieb

Für Wasserstoffantriebe wird ein oberirdischer Tank für kryogenen flüssigen Wasserstoff LH₂, eine kryogene Pumpe zum Befüllen und Entleeren des Lagers kP und ein Betankungsfahrzeug BF gebraucht (vgl. (3.13)). Die Preise und Abschreibungswerte für die Infrastruktur des Wasserstoffantriebs sind in der Tabelle 3.4 zusammengefasst. Der benötigte spezifische Energiebedarf der Infrastrukturelemente wie sowohl Betankungsfahrzeuge oder kryogener Pumpen, als auch Wirkungsgrad der Technologien, wird dabei nicht betrachtet.

$$CAPEX \text{ [EUR]} = P_{Lagertank} + P_{kP} \cdot N_{kP} + P_{BF} \cdot N_{BF} \quad (3.13)$$

Die Anzahl der Betankungsfahrzeugen N_{BF} hängt von der Anzahl der stündlichen Abfertigungen ab. Zudem wird ein Sicherheitsfaktor von 1,2 dazugerechnet, um reibungslose Prozesse sicherzustellen (siehe (3.14)). Die Gesamtzahl der Betankungsfahrzeugen bestimmt die benötigte Anzahl an Kryopumpen N_{kP} . Es wird angenommen, dass pro Fahrzeug eine Kryopumpe benötigt [66]. Der Konstante 1 beschreibt eine Kryopumpe, die permanent mit dem Wasserstoffspeicher verbunden ist. Zudem

wird zur Vereinfachung angenommen, dass pro Flugzeug ein Tankwagen benötigt wird.

$$N_{BF} = 1,2 \cdot N_{Abfertigung,h}$$

$$N_{kP} = N_{BF} + 1 \quad (3.14)$$

Tabelle 3.4: Werte und Annahmen der Wasserstoffinfrastruktur

	Werte	Einheit	Quellen
Preis Lagertank $P_{Lagertank}$	41,9	EUR/kg LH ₂	[56]
Abschreibung Lagertank	20	Jahre	[83]
Volumen Lagertank [m^3]	4 732	m^3	[84]
Preis kryogene Pumpe P_{kP}	250 171	EUR/kg/h	[66]
Abschreibung kP	10	Jahre	[83]
Preis Betankungswagen P_{BW}	87 848	EUR	[66]
Abschreibung BW	12	Jahre	[66]

Wie bereits im Grundlagen-Kapitel erläutert wurde, hat der kryogene Wasserstoff eine Dichte von ca. 65 kg/m^3 [32], also können 307,58 t in einem kugelförmigen Lagertank gespeichert werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Vorgänge der Betankung des Betankungsfahrzeugs und die folgende Betankung des Flugzeugs jeweils 30 Minuten dauern [66] und dadurch die Turnaround-Zeit nicht verlängert wird.

3.4 Betriebsszenarien

Betriebsszenarien helfen die vorher beschriebenen Betriebs- und Infrastrukturkosten in Anwendung zu bringen und eine mögliche Entwicklung in naher Zukunft aufzuzeigen. Die Größe des Flughafens beeinflusst die Infrastrukturkosten. Bei einem größeren Flughafen werden die Betriebsdifferenzen deutlicher, da das Verkehrsaufkommen wesentlich höher ist. Größere Flughäfen fertigen täglich mehr Flugzeuge als Regionalflughäfen ab, was dazu führt, dass mehr Abfertigungsplätze umgerüstet und versorgt, wodurch mehr Arbeitskräfte geschult werden müssen.

Deshalb wird der Flughafen Frankfurt für die Betriebsszenarien gewählt, welcher als bedeutendes Luftverkehrsdrehkreuz fungiert und zudem der größte Verkehrsflughafen Deutschlands ist. Der Fraport meldete im Jahr 2023 insgesamt 423764 gewerbliche Flugbewegungen, was im Durchschnitt 1160 Flugbewegungen pro Tag ausmacht. Es wird angenommen, dass die Hälfte davon Abflüge sind, also müssen 580 Flugzeuge pro Tag abgefertigt werden. Die Gesamtbewegungen teilen sich nach Entfernungen folgend auf [85]:

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

Da nicht explizit definiert wird, welche Entfernungen die Flugzeuge zurücklegen, werden die Betriebskosten anhand vorher beschriebener Distanzen berechnet. Dabei wird für Kurzstrecken eine Entfernung von 400 km und für Langstrecken eine Distanz von 6000 km angenommen. Für Mittelstrecken werden die Werte der Langstreckenflüge verwendet, jedoch mit einer Distanz von 4000 Kilometern, sodass sich der Treibstoffverbrauch pro Stunde nicht ändert.

Anhand der zugrundeliegenden Informationen wird eine Flotte mit 580 Flugzeugen aufgestellt, in welcher alternative Antriebe eingesetzt werden. Aufgrund der Flugeinschränkungen in der Nacht wird angenommen, dass die Flüge von 6 bis 24 Uhr gleichmäßig stattfinden. Durch die Betrachtung des tatsächlichen Flugplans sind die Spitzenstunden eines Tages zu ermitteln, bei welchen der Verkehrsfluss stärker ist, als im Durchschnitt. In diesem Fall werden höhere Infrastruktur- und Betriebskosten erwarten zu sein. Um die Interpretation zu erleichtern, wird in dieser Arbeit angenommen, dass stündlich die gleiche Anzahl an Flugzeugen am Flughafen abgewickelt werden. Die genaue Entwicklung der Antriebstechnologien ist noch nicht vorhersehbar und welche davon für den Betrieb bevorzugt werden. Daher wurden drei unterschiedliche Szenarien vorgeschlagen, um zu untersuchen, wie sich die Betriebskosten sowie die Infrastrukturkosten verhalten. Die Aufteilung der Antriebe für jedes Szenario ist in der Abbildung 3.2 dargestellt. Die aufgestellten Szenarien basieren auf der Reichweite der jeweiligen Antriebe, da diese einen entscheidenden Einfluss auf die Einsatzmöglichkeiten und die Wirtschaftlichkeit der Flugzeuge haben. Wie bereits diskutiert wurde, können Kurzstrecken-Flüge durch den Einsatz von batteriebetriebenen Flugzeugen ersetzt werden, wobei hier als Ersatz auf SAF

zurückgegriffen wird. Es ist nennenswert, dass nur ein Teil der tatsächlichen Nachfrage des Kurzstrecken-Bedarfs dadurch gedeckt werden kann. Aus der Recherche ergab sich, dass die Mittel- und Langstrecken von Flugzeugen mit Wasserstoffturbine und SAF durchgeführt werden. Diese Annahme gilt auch für die Szenarien.

In dem **ersten Betriebsszenario** wird angenommen, dass Kurzstrecken vollständig

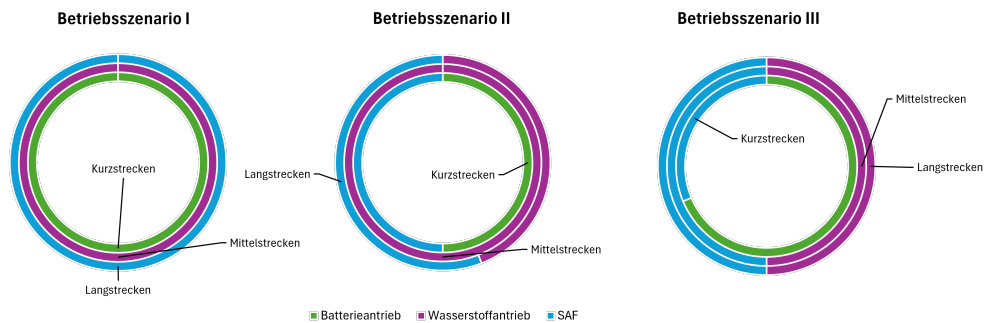


Abbildung 3.2: Aufteilung der Flugzeugflotte nach Antriebsart

von batterieelektrischen Antrieben übernommen werden, da sie keine Emissionen verursachen. Die Mittelstrecken werden aufgrund ihrer Effizienz durch Wasserstoffturbinen ersetzt. Da sich die Wasserstofftechnologie jedoch noch nicht auf Langstrecken etabliert hat, bleibt SAF in diesem Bereich die bevorzugte Option.

- Die Kurzstrecken werden vollkommen (72,8 %) durch den Batterieantrieb aufgrund der beschränkten Reichweite ersetzt;
- Die Mittelstrecken werden vollständig (9,3 %) durch Wasserstoffantriebe ersetzt, da diese Antriebsart anfangs ebenfalls durch ihre Reichweite begrenzt ist;
- Die Langstrecken werden somit vollkommen (17,9 %) durch SAF betrieben.

In dem **zweiten Betriebsszenario** wird angenommen, dass sich der Batterieantrieb in gleichem Maße wie SAF durchsetzt, beispielsweise aufgrund steigender Batteriekosten. Die Mittelstrecken werden aufgrund der verbesserten Infrastruktur und Reichweite-entwicklung hauptsächlich mit Wasserstoff betrieben. Gleichzeitig entwickelt sich der Wasserstoffantrieb auch für Langstrecken weiter, jedoch bleibt SAF hier weiterhin eine bedeutende Option. Die Aufteilung kann folgend beschrieben werden:

- Die Hälfte der Kurzstrecken werden durch BA und andere Hälfte durch SAF;
- Die Mittelstrecken werden vollkommen (9,3 %) durch Wasserstoffflugzeuge und

- 10 % der Langstrecken werden durch SAF und 7,9 % durch Wasserstoff betrieben.

In dem **dritten Szenario** wird angenommen, dass der Batterieantrieb weiter im Betrieb etabliert, während ein Teil der Kurzstrecken weiterhin mit SAF betrieben wird. Bei Mittel- und Langstrecken teilen sich Wasserstoff und SAF zu gleichen Teilen den Betrieb. Die Verteilung kann folgend zusammengefasst werden:

- 50 % der Kurzstrecken werden durch BA und 22,8 % mit SAF;
- Die Hälfte der Mittelstrecken werden mit WA und die andere Hälfte mit SAF und
- die Hälfte der Langstrecken werden mit WA und die andere Hälfte mit SAF betrieben.

Daraus ergibt sich die folgende Flottenaufteilung für die einzelnen Szenarien:

Tabelle 3.5: Flugzeugzahlen in den Szenarien nach Antriebsart

Szenario I			
	Batterieantrieb	Wasserstoffantrieb	SAF
Kurzstrecke	422	-	-
Mittelstrecke	-	54	-
Langstrecke	-	-	104
Szenario II			
Kurzstrecke	211	-	211
Mittelstrecke	-	54	-
Langstrecke	-	46	58
Szenario III			
Kurzstrecke	290	-	132
Mittelstrecke	-	27	27
Langstrecke	-	52	52

4 Auswertung der Ergebnisse und kritische Auseinandersetzung

Anhand der in dem Teil 3 vorgeschlagenen Methodik wurde in diesem Kapitel der Vergleich zwischen Referenz-Flugzeugen und alternativen Antrieben geschaffen. Außerdem werden aufgestellte Betriebsszenarien sowohl ausgewertet, schließlich diskutiert und mit anderen Arbeiten verglichenen, als auch auf die Vorschläge für andere Arbeiten eingegangen. Folgende Erkenntnisse ermöglichen Diskussion der Hypothesen. Die Ergebnisse sind nach Flugdistanzen aufgeteilt. Die detaillierten Ergebnisse sind in Anhang B zu finden.

4.1 Vergleich von Referenzflugzeugen und neuen Antrieben

Kurzstreckenvergleich

In diesen Abschnitten wird ein Kostenvergleich zwischen Batterieantrieb und SAF mit konventionellem Treibstoff zusammengefasst. In der Abbildung 4.1 sind die Ergebnisse der batteriebetriebenen ES-19 und der konventionellen L410 dargestellt. Der Vergleich wurde aufgrund der beschränkten Reichweite der ES-19 für einen 400 Kilometer Flug durchgeführt. Die Gesamtbetriebskosten der ES-19 sind ca. 25 % höher als die der konventionellen L410, wobei der Antrieb mit SAF ein nur 5 % höhere Ergebnis liefert. Entgelte und Gebühren bewirken den größten Teil der Betriebskosten aller verglichenen Antriebe, gefolgt von kapitalbezogenen

Kosten. Beim ersten ist ein signifikanter Unterschied zum konventionellen Antrieb zu erkennen, und zwar 59 %, beim zweiten sind das 22 % höhere Kosten bei Batterieantrieb. SAF unterscheidet sich von konventionellen Flugzeugen nur in den Treibstoffkosten. Treibstoff-, Crew- und Wartungskosten haben weniger Einfluss auf die Betriebskosten. Der Anteil der Treibstoff- bzw. Energiekosten ist bei Batterieantrieb und Referenz-Flugzeug am niedrigsten im Vergleich zu anderen Kosten. Die Treibstoffkosten sind bei einem konventionellen Flugzeug ca. 42 % höher und für SAF sind sie 118 % höher im Vergleich zu einem batteriebetriebenen Flugzeug.

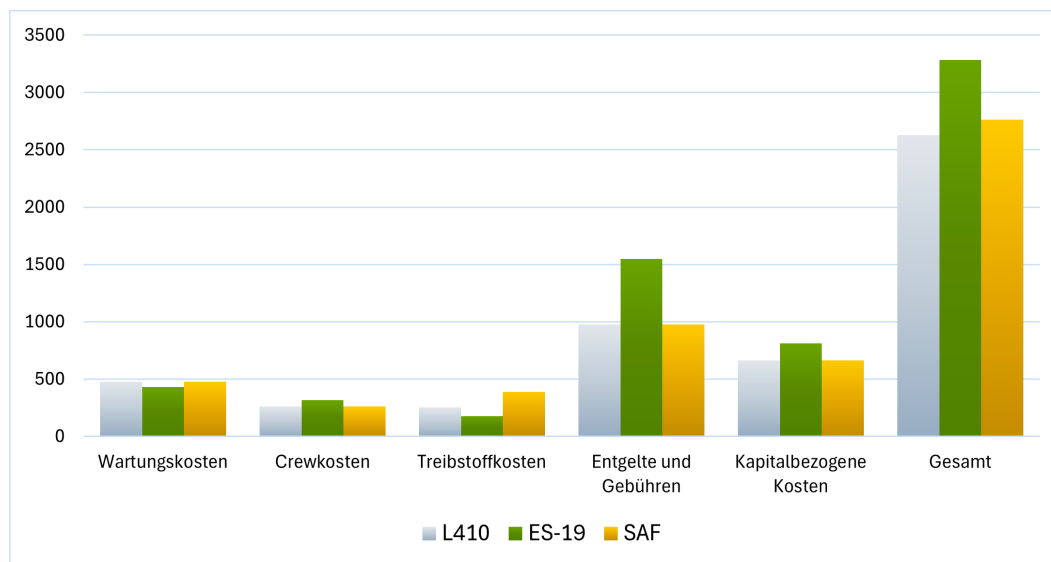


Abbildung 4.1: Vergleich der Referenz und Flugzeug mit der Batterieantrieb und SAF

Zusätzlich zu den Entgelten und Gebühren fallen weitere Abfertigungskosten an, etwa für den Batteriewechsel oder das Leasing der Batterie für den Flug, die in die Flughafenentgelte einfließen. Dieser Wert wird auch in der Sensitivitätsanalyse 4.3 überprüft. Der Einflusswert für kapitalbezogene Kosten ist der Anschaffungspreis eines Flugzeugs. Dieser Wert wurde als weiterer Parameter für die Sensitivitätsanalyse ausgewählt.

Langstreckenvergleich

In den weiteren Abschnitten wird eine Gegenüberstellung zwischen Flugzeugen mit herkömmlichen Treibstoffen, SAF und wasserstoffbetriebener Turbine für einen

6000 Kilometer-Flug durchgeführt. Aufgrund der derzeit hohen Wasserstoffpreise wurde zum Vergleich der Wasserstoffmindestpreis von 2,1 *EUR/kg* für das Jahr 2050 herangezogen [76], um die mögliche Entwicklung der Wasserstofftechnologien zu betrachten. Das Ergebnis zeigt, dass SAF- und Wasserstoffbetriebene Flugzeuge höhere Betriebskosten haben (siehe 4.2). Die Betriebskosten der Wasserstoffturbine sind rund 40 % höher, während sie bei SAF um etwa 18 % höher liegen. Treibstoff- und kapitalbezogene Kosten haben den größten Einfluss auf die Gesamtkosten, Wartungs- und Crewkosten entgegen den geringsten. Der Einfluss der Entgelte und Gebühren auf die Gesamtkosten ist ebenso nicht so hoch, wie bei den kleineren verglichenen Flugzeugen. Die Treibstoffkosten für Wasserstoffantrieb sind fast genau so hoch (ca. 97 %), wie der für herkömmliche Triebwerke. Bei SAF liegt dieser Wert nur etwa 54 % höher. Genau wie bei Kurzstrecken liegt der Unterschied bei SAF nur in den Treibstoffkosten. Die kapitalbezogenen Kosten sind bei Wasserstoffantrieb 17 % höher. Die Entgelte und Gebühren, Crew- und Wartungskosten haben einen nicht so deutlichen Unterschied verglichen mit konventionellen Antrieben. Wird die Entwicklung zukünftiger Preise für Wasserstoff mitbetrachtet, kann es sogar zu geringeren Treibstoffkosten im Vergleich zu konventionellen Antrieben (etwa 15 % geringer) führen. Die Gesamtbetriebskosten werden weiterhin höher liegen, jedoch lediglich nur etwa 3 %.

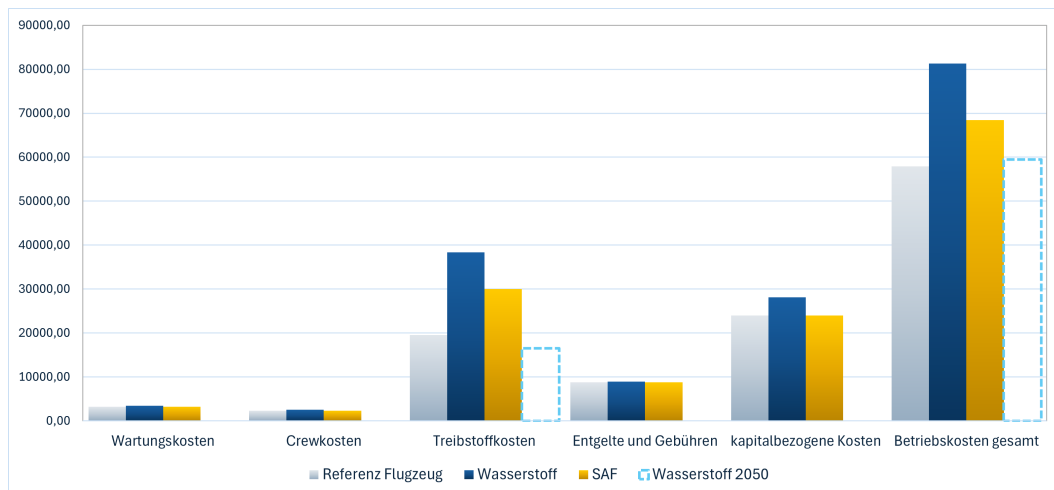


Abbildung 4.2: Vergleich der Referenz und Flugzeug mit der Wasserstoffantrieb und SAF für einen 6000 km Flug

Da die Treibstoffkosten einer der größten Teile in den Ergebnissen ausmachen, wird der bedeutsame für diese Kosten Parameter Treibstoffpreis für die Sensitivitätsanalyse ausgewählt. Werden Betriebskosten pro Passagierkilometer ausgerechnet und

verglichen, haben die großen Flugzeuge geringere Kosten als die kleinen Flugzeuge. Wie bereits ermittelt wurde, haben hier konventionelle Treibstoffe einen Vorteil sowohl gegenüber den kleinen, als auch großen Flugzeugen.

4.2 Ergebnisse der Betriebsszenarien

In dem Kapitel 3.4 wurden drei Szenarien für den Vergleich aufgestellt, in diesem Abschnitt werden sie ausgewertet und miteinander verglichen. Erstens werden die Betriebskosten unter sich verglichen, zweitens die benötigten Infrastrukturkosten für jedes Szenario und schließlich werden die Szenarien unter Berücksichtigung beider Aspekte betrachtet. Die detaillierten Ergebnisse für die Betriebsszenarien sind in Anhang B1.2 zu finden.

Betriebskosten

Obwohl der Unterschied der Betriebskosten gleichmäßig ist, hat unter allen Betriebsszenarien das zweite die höchsten Gesamtbetriebskosten (siehe Abb. 4.3). Das Erste hat die geringsten Kosten und ist nur etwa 4 % geringer als das Zweite. Erkennbar ist auch, dass die Betriebskosten, die durch Batterieantrieb verursacht werden, am geringsten unter allen Szenarien sind. In dem **zweiten Szenario** entsteht Großteil (57 %) der Kosten durch wasserstoffbetriebene-Flugzeuge. Weitere 38 % verursacht das SAF. **Erstes Szenario** hat den niedrigsten Betriebswert. Der Betrieb mit SAF verursacht in diesem Szenario die meisten Kosten, nämlich 61 %. Etwa ein Drittel der Kosten sind mit dem Betrieb durch Wasserstoff verbunden. Batteriebetriebene Flugzeuge haben in diesem Szenario die geringsten verbundenen Betriebskosten (12 %). Das **dritte Szenario** hat 1 % geringere Kosten als das zweite und somit keine signifikante Differenz aufweist. Der stärkste Einfluss in diesem Fall geht, ebenso wie im ersten Szenario, vom Betrieb mit Wasserstoff aus (48 %), gefolgt von SAF (44 %).

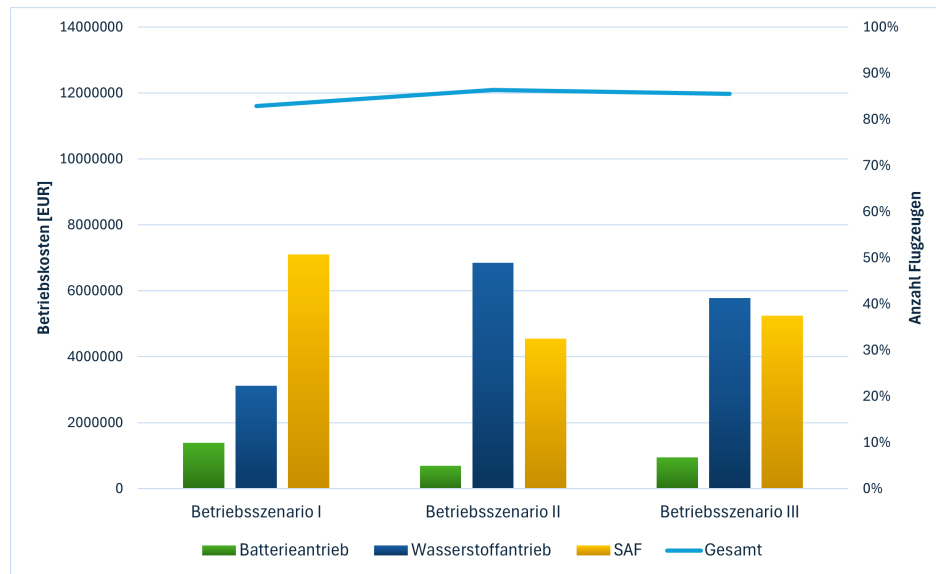


Abbildung 4.3: Betriebskosten in Abhängigkeit von Szenarien mit Gesamtkostentrend

Infrastrukturkosten

In der Tabelle 4.1 sind die benötigten Infrastrukturanschaffungswerte für jedes Szenario zusammengefasst. Die Werte wurden anhand der vorgeschlagenen Methodik ermittelt.

Tabelle 4.1: Infrastrukturwerte für Wasser- und Batterieantrieb für alle Szenarien

	Szenario I	Szenario II	Szenario III
Anzahl Ladestationen n_{BSS}	20	10	14
Anzahl Batterien n_{Bat}	101	51	70
Anzahl Betankungswagen n_{BW}	4	7	5
Anzahl Pumpen n_{kP}	5	8	6

Nennenswert ist, dass in der Berechnung von allen Betriebsszenarien erstmal nur einmalige Infrastrukturausgaben ohne jährliche Abschreibungen ausgerechnet sind (siehe Abb. 4.4). Das erste Szenario hat die geringsten Ausgaben, wobei das zweite Szenario die höchsten (27 % höher als das Erste) hat. Die Gesamtkosten für das zweite Szenario liegen bei über 35 Tausend Euro. Im ersten Szenario zeigt sich, dass die Preisaufteilung für Batterie- und Wasserstoffinfrastruktur nahezu gleiche Anteile aufweist. In den anderen Szenarien führen die Kosten für die

Wasserstoffinfrastruktur.

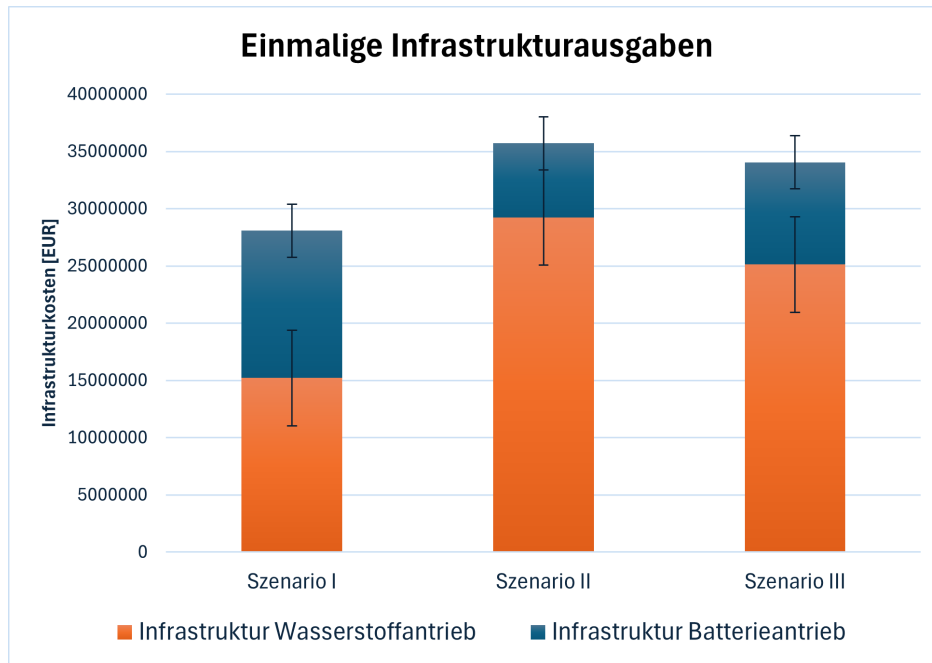


Abbildung 4.4: Vergleich der einmaligen Infrastrukturausgaben zwischen den Betriebsszenarien. Die schwarzen Linien zeichnen minimale und maximale Reduzierungen basierend auf den aufgestellten Szenarien

Wird die lineare jährliche Abschreibung mitbetrachtet, zeigen die Ergebnisse eine andere Entwicklung (siehe Tab. 4.5]. Die erheblichsten Kosten bei den Abschreibungswerten entstehen im ersten Szenario, wobei dieses Szenario bei einmaligen Ausgaben das beste Ergebnis erzeugt. Die geringsten jährlichen Abschreibungskosten würde das zweite Szenario liefern, obwohl es die höchsten einmaligen Ausgaben hat. Demnach kann eine ungünstige Wahl der Abschreibungsverteilung die anfangs günstigeren Ausgaben im Vergleich zu anderen Szenarien steigen lassen, womit die dritte Hypothese bewiesen wurde.

4.3 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse ermöglicht die Robustheit einer Berechnung zu überprüfen und die Parameter mit dem größten Einfluss zu ermitteln. Dafür wurden die Teile

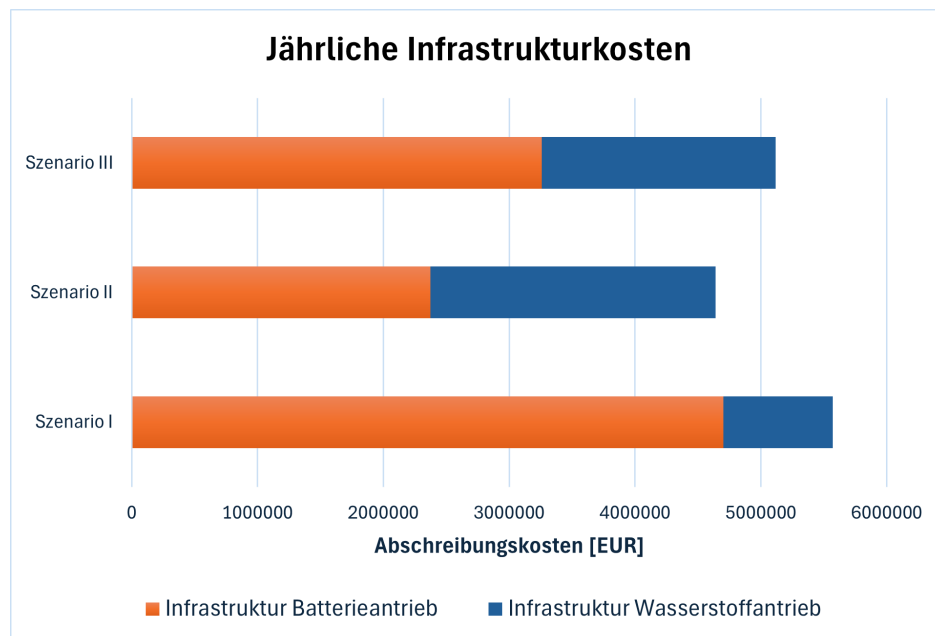


Abbildung 4.5: Vergleich der jährlichen Infrastrukturausgaben zwischen den Betriebsszenarien

der Kosten aus 4.1 gewählt, die den größten Einfluss auf die Gesamtkosten haben. Bei dem Vergleich von Batterie, SAF und herkömmlichen Treibstoff machen die Entgelte und Gebühren, als auch kapitalbezogene Kosten den größten Anteil der Betriebskosten aus.

Dafür wurden folgende Parameter für BA ausgesucht: der Preis für das Leasing einer Batterie und der Anschaffungspreis für das Flugzeug. Der erste Wert kann je nach Leistung der Batterie und Häufigkeit der Nutzung unterschiedlich ausfallen, deswegen wäre es wichtig, zu betrachten, welcher Unterschied in den Betriebskosten entsteht, wenn der Preis für das Leasing 10 % teurer wäre. Die Preise für neue Flugzeugantriebe werden durch die steigende Nachfrage mit der Zeit sinken, aus diesem Grund wurde ein Rückgang in Höhe von 10 % der Anschaffungspreise betrachtet. Werden Entgelte um 10 % erhöht, erhöhen sich die Betriebskosten moderat ($S = 0,15$), auch die Senkung der Anschaffungspreise um 10 % hat geringen Einfluss auf das Gesamtsystem ($S = 0,28$).

Beim Vergleich von Wasserstoff- und SAF-Antrieben mit konventionellen Antrieben entsteht der größte Unterschied zwischen den Kosten für Treibstoff. Deswegen wurde der Parameter „Treibstoffpreis“ für die Sensitivitätsanalyse ausgewählt. Der Preis für alternative Antriebe und Treibstoffe soll in Zukunft sinken und der Preis für

herkömmliche Treibstoffe aufgrund des Anstiegs von Erdölpreisen wachsen. Hierfür wird ein Wert von 10 % festgelegt (siehe Tab. 4.2). Der Wasserstoffantrieb reagiert

Tabelle 4.2: Sensitivitätsanalyse mit dem Parameter Treibstoffpreis

Antriebe	Referenz	Wasserstoff	SAF
Ausgang <i>EUR</i>	57882,9	81285,6	68396,1
Preis Szenario (+/- 10 %)	59832,9	77452,9	65394,7
Abweichung %	3,4	-4,7	-4,4
<i>S</i>	0,34	0,47	0,44

der Preisänderung ($S = 0,49$) gegenüber am stärksten. Das System reagiert relativ empfindlich auf die Preisänderung von Wasserstoff, die Preise für Kerosin und SAF sind weniger sensibel.

4.4 Bewertung der Ergebnisse

Interpretation der Ergebnisse

Die Ergebnisse dieser Studie liefern wichtige Erkenntnisse für den Betrieb mit alternativen Antrieben. Aus der Analyse der Betriebskosten, in der die konventionellen Flugzeuge mit neuen Antrieben verglichen wurden, lässt sich zusammenfassen, dass neuartige Antriebe zu höheren Betriebskosten für eine Fluggesellschaft führen werden. Demzufolge kann die Hypothese, dass die Einführung innovativer Antriebe zu höheren Betriebskosten einer Fluggesellschaft im Vergleich zu herkömmlichen Jettriebwerken führt, bestätigt werden. Das liegt vor allem an den technischen Anforderungen und neuen zusätzlichen Abfertigungsprozessen, die mit neuartigen Kraftstoffen eingeführt werden müssen. Avogadro et al. [53] kommt ebenfalls zu dem Ergebnis, dass batteriebetriebene Flugzeuge in näherer Zukunft höhere Betriebskosten aufweisen werden. Marksel et al. [70] geht in ihrem Vergleich vom konventionellen Flugzeug und der Wasserstoffbrennzelle davon aus, dass die Betriebskosten sogar unter den marktüblichen Kerosin-Jets vordringen werden. Jedoch ist das nicht in den nächsten zehn Jahren zu erwarten. Die Entwicklung der Ölpreise ist hier von Bedeutung, da dadurch die Attraktivität der neuen Technologien beeinflusst werden kann. Höhere Kosten für elektrische Flugzeuge sind vor allem von

Anschaffungspreisen für die Flugzeuge abhängig. Die Sensitivitätsanalyse zu diesem Parameter zeigte, dass das Modell den Änderungen gegenüber robust reagiert. In der Arbeit wurde das Konzept des Batterie-Leasings am Flughafen vorgeschlagen. Unter realen Bedingungen ist es möglich, dass die Batteriemodule bei Anschaffung der Flugzeuge ebenfalls erworben werden müssen, was letztendlich die Betriebskosten der Fluggesellschaften steigern könnte.

Die Analyse der Betriebskosten in unterschiedlichen Betriebsszenarien vermittelt, dass sich die Verteilung der Betriebskosten je nach ausgewähltem Antrieb unterscheidet. Sollte man die Flottengröße oder die Zusammensetzung modifizieren, würden unterschiedliche Ergebnisse zum Vorschein kommen. Darauf basiert die zweite Hypothese.

Während Full-Service-Carrier eher eine heterogene Flotte zusammenstellen, setzen Low-Cost-Carrier eher auf eine homogene Flotte. Somit werden sich die Kosten je nach Strategie verschieben. Werden die Betriebskosten zusammen mit Infrastrukturkosten für jedes Szenario betrachtet, fällt auf, dass sich die Infrastrukturkosten proportional zu den Betriebskosten verhalten. Für beide hat das zweite Szenario die höchsten Kosten und das erste die geringsten. Die Betriebskosten unterscheiden sich prozentual um 3,5 %, während die Infrastrukturkosten 27 % höher ausfallen. Obwohl kein direkter Zusammenhang zwischen Betriebs- und Infrastrukturkosten besteht, kann die Auswahl der eingesetzten Technologien seitens der Flughafenbetreiber einen Einfluss darauf haben, welche Antriebsarten von Fluggesellschaften gewählt werden. Somit wurde die zweite Hypothese widerlegt. Die Batterieantriebe verursachen in den Szenarien zwar die geringsten Kosten, jedoch ist nicht zu vernachlässigen, dass der Antrieb ungenügendes Sitzangebot bietet und die Batterien eingeschränkte Reichweite haben, womit die Nachfrage nach Kurzstrecken nicht vollständig gedeckt werden kann.

Wie bereits in den Ergebnissen ausgewertet wurde, sind im zweiten Szenario die größten einmaligen Infrastrukturkosten zu erwarten. Das liegt daran, dass dieses Szenario die größten Anschaffungseinheiten für den Wasserstoffantrieb hat. Das erste Szenario liefert hingegen das kleinste Ergebnis, dabei ist die Kostenverteilung zwischen Batterieantrieb und Wasserstoffantrieb etwa gleich groß. Wird die lineare Abschreibung zusätzlich betrachtet, ist eine Differenz in den Ergebnissen zu sehen. Die jährlichen Abschreibungskosten sind in dem ersten Szenario am höchsten und

bezogen auf die Gesamtinfrastrukturkosten verursacht das Zweite die geringsten jährlichen Infrastrukturkosten. Das ist bedingt durch eine für das erste Szenario ungünstige Abschreibungsstruktur. In diesem Fall muss beobachtet werden, ob sich die anderen Abschreibungsmethoden optimaler entwickeln. Folglich ist eine weitere Hypothese, dass die Abschreibungsmethode bewirkt, dass die jährlichen Kosten trotz hoher Investitionskosten belastbarer und niedriger sind, während sich bewiesen hat, dass eine ineffiziente Kostenverteilung bei geringeren Anschaffungskosten zu höheren jährlichen Belastungen führen kann.

Trotz der Ergebnisse unterliegt diese Arbeit einigen Beschränkungen. Diese Arbeit hat sich nur auf Betriebskosten der Fluggesellschaften und Anschaffungskosten für die Infrastruktur, jedoch nicht auf die Betriebskosten der Infrastruktur konzentriert. Außerdem sind am Flughafen zahlreiche weitere Stakeholder beschäftigt, was insbesondere für Bodendienstleister zusätzliche Herausforderungen mit sich bringt.

Die Komplexität der Technologien des realen Systems wurde durch vereinfachte Annahmen reduziert, um eine fokussierte Analyse zu ermöglichen. Wegen nicht vorhandener Daten in der technologischen Entwicklung von neuen Antrieben wurden einige Annahmen getroffen. Zudem hat diese Arbeit in begrenztem Untersuchungszeitraum stattgefunden, wodurch manche Variablen vernachlässigt werden mussten. Angesichts des Mangels an relevanten Daten war es unmöglich die Ausbildungskosten bei der Einführung neuer Antriebe zu berechnen. Es lässt sich eindeutig feststellen, dass hier eine Forschungslücke vorhanden ist, welche noch zu erkunden ist. Trotz gesendeter Anfragen zu diesem Thema an einige bedeutende Unternehmen blieb eine Antwort bislang aus.

Um die Ergebnisse zu vertiefen und die Arbeit detaillierter zu erforschen, können die Kosten für jede Entfernung berechnet werden. Das ermöglicht, die Berechnungen auf eine tatsächliche Flotte zu übertragen und Preisanstiege nach Entfernung zu ermitteln. Als weiteren Aspekt für die Vertiefung wäre interessant zu betrachten, welche konkreten Unterschiede in Emissionen durch alternative Antriebe entstehen, welcher Unterschied sich in Flughafen-Entgelten bildet und welche Kosten dadurch für Luftfahrzeugbetreiber ergeben. Insbesondere bei Betrachtung möglicher zukünftiger politischer Entscheidungen.

5 Fazit

Innovative Antriebe und Kraftstoffe, wie SAF, Wasserstoff und der Batterieantrieb tragen dazu bei, die Auswirkungen des Luftverkehrs auf die Umwelt zu verringern. Deren Wirtschaftlichkeit ist jedoch diskussionswürdig. Diese Arbeit hat sich mit dem Thema Implementierung neuartiger Antriebe am Flughafen auseinandergesetzt. Dabei wurden anhand von Recherche sowohl die Antriebe als auch die Infrastruktur und Versorgungswege untersucht. Schließlich wurden sowohl die erwarteten Betriebskosten für Fluggesellschaften, als auch Infrastrukturkosten für Flughäfen berechnet.

Zwar werden die Betriebskosten bei alternativen Antrieben im Vergleich zu herkömmlichen Luftfahrzeugen steigen, jedoch sind die Kosten gegenüber den Auswirkungen auf die Umwelt gerechtfertigt, sodass sie in Kauf genommen werden müssen. Zudem wurden die Betriebskosten und Infrastrukturkosten anhand drei Szenarien berechnet. Die Infrastrukturkosten am Flughafen drehten sich um die Swap-Methode für Batterieantriebe und die Nutzung von kryogenem Wasserstoff. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass eine vermehrte Nutzung von Wasserstoffantrieben zu höheren Infrastrukturkosten führen kann. Jedoch macht die Nutzung der Abschreibungsmethode ein Unterschied zwischen den Szenarien aus. Dies beantwortet die eingangs gestellte Forschungsfrage, welcher Einfluss von der Einführung alternativer Antriebe ausgeht.

Diese Arbeit bietet eine Übersicht zu wirtschaftlichen Zusammenhängen mit Bezug auf neue Antriebsverfahren. Um das Potenzial von neuen Technologien jedoch vollständig auszuschöpfen, müssen weitere Untersuchungen mit tiefen Einblicken in die Infrastruktur, Ausbildung und Technologien in den Luftfahrzeugen selbst erfolgen.

Literatur

- [1] Die Bundesregierung. *Klimaziel: Deutschland reduziert Emissionen um 37 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente*. Zugriff am 20. November, 2024. Apr. 2024. URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/treibhausgasbilanz-2023-2265440>.
- [2] M. Filonchyk u. a. „Greenhouse gases emissions and global climate change: Examining the influence of CO₂, CH₄, and N₂O“. In: *Science of The Total Environment* (2024).
- [3] R. Conrady, F. Fichert und R. Sterzenbach. *Luftverkehr: Betriebswirtschaftliches Lehr- und Handbuch*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2019.
- [4] Y. Gao u. a. „Hydrogen-Powered Aircraft: Hydrogen–electric hybrid propulsion for aviation“. In: *IEEE Electrification Magazine* 10.2 (2022), S. 17–26.
- [5] M. Schmidt u. a. „Challenges for ground operations arising from aircraft concepts using alternative energy“. In: *Journal of Air Transport Management* 56 (2016), S. 107–117.
- [6] K. Moriarty und R. McCormick. *Sustainable Aviation Fuel Blending and Logistics*. Techn. Ber. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (United States), 2024.
- [7] D. Schaar und L. Sherry. „Analysis of airport stakeholders“. In: *2010 Integrated Communications, Navigation, and Surveillance Conference Proceedings*. IEEE. 2010, J4–1.
- [8] S. B. (Destatis). *Statistischer Bericht - Luftverkehr auf Hauptverkehrsflughäfen - 2023*. Zugriff am 21. Dezember 2024. Feb. 2024.
- [9] H. Mensen. *Handbuch der Luftfahrt*. Springer-Verlag, 2013.

- [10] 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.
- [11] Airbus. *Airbus A321 Aircraft Characteristics: Airport and Maintenance Planning*. Revision 1. Original Issue: September 30, 1992. März 2022.
- [12] D. Scholz. *Aircraft Design / DOC*. Lecture Notes, Hamburg University of Applied Sciences (HAW Hamburg). Zugriff am 5. Januar, 2025. 2015.
- [13] International Air Transport Association (IATA). *Industry Statistics*. Report. Updated: June 2024. Juni 2024.
- [14] 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.
- [15] B. für Raumentwicklung und B.-B. für Zivilluftfahrt. „Infrastrukturkosten Luftverkehr“. In: *Ergebnisse Pilotrechnung. Schlussbericht*. Zürich (2003).
- [16] A. Wittmer, T. Bieger und R. Müller. *Aviation systems: management of the integrated aviation value chain*. Springer, 2011.
- [17] B. u. S. Wissenschaftlicher Beirat beim Bundesministerium für Verkehr. *Handlungsbedarf für Planung und Nutzung der Flughafeninfrastruktur in Deutschland*. 2011.
- [18] Umweltbundesamt. *Aviation in the EU ETS and CORSIA in the Fit for 55 package – Factsheet*. Zugriff am 23. Dezember 2024. Sep. 2023.
- [19] P. J. Ansell. „Review of sustainable energy carriers for aviation: Benefits, challenges, and future viability“. In: *Progress in Aerospace Sciences* 141 (2023).
- [20] International Air Transport Association (IATA). *IATA SAF Handbook*. Zugriff am 27. Dezember 2024. 2024.
- [21] 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>.
- [22] J.-B. Jarin 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.

-
- [23] 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>.
- [24] I. A. T. A. (IATA). *IATA Press Release – 10 December 2024*. Zugang am 17. Februar 2025. 2024.
- [25] A. Bauen 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.
- [26] S. De Jong u. a. „Life-cycle analysis of greenhouse gas emissions from renewable jet fuel production“. In: *Biotechnology for biofuels* 10 (2017), S. 1–18.
- [27] Clean Sky u. a. „Hydrogen-powered aviation: a fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050“. In: (2020).
- [28] K. Dahal u. a. „Techno-economic review of alternative fuels and propulsion systems for the aviation sector“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 151 (2021).
- [29] M. Hepperle. „Electric flight-potential and limitations“. In: (2012).
- [30] 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.
- [31] H. Budde-Meiwes u. a. „A review of current automotive battery technology and future prospects“. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 227.5 (2013), S. 761–776.
- [32] C. O. Colpan und A. Kovač. *Fuel Cell and Hydrogen Technologies in Aviation*. Springer, 2022.
- [33] T. Dalmia u. a. „Powering the Future of Electric Aviation“. In: (2022).
- [34] I. Abrantes u. a. „The impact of revolutionary aircraft designs on global aviation emissions“. In: *Renewable Energy* 223 (2024).
- [35] J. O. Reimers. „Introduction of electric aviation in Norway“. In: *Green Future: Norway* (2018).

- [36] 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).
- [37] M. Mulder, P. L. Perey und J. L. Moraga. „Outlook for a Dutch hydrogen market: economic conditions and scenarios“. In: (2019).
- [38] H. Eichlseder und M. Klell. „Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Erzeugung, Speicherung, Anwendung“. In: (2012).
- [39] ICAO. *Sustainable Aviation Fuels Guide*. 2018.
- [40] B. Rietdijk und M. Selier. „Architecture design for a commercially viable hydrogen-electric powered retrofitted regional aircraft“. In: *Proceedings of the ICAS conference, Florence, Italy*. 2024, S. 9–13.
- [41] B. Khandelwal u. a. „Hydrogen powered aircraft: The future of air transport“. In: *Progress in Aerospace Sciences* 60 (2013), S. 45–59.
- [42] BMK (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie). *Austrian Hydrogen Aviation Study (AH2AS)*. Zugriff am 16. Februar, 2025. 2022.
- [43] Institute of Aircraft Design, University of Stuttgart. *e-Genius: Electric Aircraft Research Project*. Zugriff am 19. Februar, 2025.
- [44] Pipistrel Aircraft. *Velis Electro*. Zugriff am 10. Februar, 2025.
- [45] J. Mukhopadhyaya und B. Graver. „Performance analysis of regional electric aircraft“. In: *International Council of Clean Transportation white paper* (2022).
- [46] Bauhaus Luftfahrt. *CE-Liner: A Concept for Universally Electric Air Transport*. Zugriff am 9. Februar, 2025. 2011.
- [47] Embraer S.A. *Embraer presents the Energia Family – Four New Aircraft Concepts Using Renewable Energy Propulsion Technologies*. Zugriff am 03. Januar 2025. 2021.
- [48] Airbus. *Airbus unveils Zero-Emission Aircraft (ZEA) concepts*. Online PDF. Zugriff am 16. Januar, 2025. 2020.
- [49] 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/>.

-
- [50] NASA Glenn Research Center. *N3-X Airplane Concept*. Zugriff am 9. Februar, 2025.
- [51] F. Salucci u. a. „Optimal recharging infrastructure sizing and operations for a regional airport“. In: *1st Aerospace Europe Conference (AEC 2020)*. 2020, S. 1–8.
- [52] M. Shirk und J. Wishart. *Effects of electric vehicle fast charging on battery life and vehicle performance*. Techn. Ber. Idaho National Lab.(INL), Idaho Falls, ID (United States), 2015.
- [53] 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).
- [54] Z. Guo u. a. „Aviation to grid: Airport charging infrastructure for electric aircraft“. In: *International Conference on Applied Energy*. 2020.
- [55] C. H. J. Undertaking. „Strategic research and innovation agenda 2021–2027“. In: *Agenda 2021* (2022), S. 179.
- [56] F. Schenke u. a. „LH2 supply for the initial development phase of H2-powered aviation“. In: *Energy Conversion and Management: X* 24 (2024).
- [57] Y. Gu u. a. „Hydrogen-Powered Aircraft at Airports: A Review of the Infrastructure Requirements and Planning Challenges“. In: *Sustainability* 15.21 (2023).
- [58] GE Aerospace. *GE Aviation’s H85-200 Engine Certified on L-410 NG*. Zugriff am 09. Januar, 2025. 2017.
- [59] LET Aircraft Industries. *L 410 UVP-E20 Brochure*. Zugriff am 2. Februar, 2025. 2016.
- [60] EUROCONTROL. *Aircraft Performance Database: Airbus A321*. Zugriff am 14. Januar, 2025. URL: <https://contentzone.eurocontrol.int/aircraftperformance/details.aspx?ICAO=A321>.
- [61] 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).

- [62] 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/>.
- [63] P. B. Wangsness u. a. „Fremskyndet innfasing av elfly i Norge: mulige“. In: *Environmental and Resource Economics* 37.1 (2021), S. 181–210.
- [64] D. Scholz. *Parameter Selection for Liquid Hydrogen Aircraft*. Zugriff am 18. Januar, 2025. 2021.
- [65] Aerospace Technology Institute (ATI). *Airports, Airlines, Airspace Operations and Hydrogen Infrastructure*. Techn. Ber. Zugriff am 16. Januar, 2025. Aerospace Technology Institute (ATI), März 2022.
- [66] J. Hoelzen u. a. „H₂-powered aviation at airports–Design and economics of LH₂ refueling systems“. In: *Energy Conversion and Management: X* 14 (2022).
- [67] D. Fonseca. *Direct Operating Costs, Fuel Consumption, and Cabin Layout of the Airbus A321LR*. Zugriff am 03. Februar, 2025. Feb. 2022.
- [68] 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>.
- [69] Airbus. *A321neo*. Zugriff am 03. Februar, 2025. URL: <https://aircraft.airbus.com/en/aircraft/a320-family/a321neo>.
- [70] 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.
- [71] AeroTELEGRAPH. *Die Listenpreise 2018 von Airbus*. Zugriff am 14. Januar, 2025. 2018. URL: <https://www.aerotelegraph.com/die-listenpreise-2018-von-airbus>.
- [72] L. Minwoo, K. Larry und S. Wenbin. „Analysis of direct operating cost of wide-body passenger aircraft: A parametric study based on Hong Kong“. In: *Chinese Journal of Aeronautics* 32.5 (2019), S. 1222–1243.
- [73] European Central Bank (ECB). *Euro Reference Exchange Rate: USD*. Online Resource. Zugriff am 14. Januar 2025.

-
- [74] 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.
- [75] M. Watson u. a. „Sustainable aviation fuel technologies, costs, emissions, policies, and markets: a critical review“. In: *Journal of Cleaner Production* 449 (2024).
- [76] J. Hoelzen u. a. „Hydrogen-powered aviation and its reliance on green hydrogen infrastructure–Review and research gaps“. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 47.5 (2022), S. 3108–3130.
- [77] N. Brüge und F. Kranich. „Wartungskosten von Passagierflugzeugen bei verschiedener Triebwerksanzahl berechnet nach DOC-Methoden“. In: (2018).
- [78] D. F. GmbH. *Flugsicherungsgebühren*. Zugriff am 11. Januar 2025.
- [79] Fraport AG. *Flughafenentgelte nach § 19b LuftVG: Entgelte für Zentrale Bodenverkehrsdiens Infrastruktureinrichtungen (gültig ab 01. Januar 2025)*. Zugriff am 17. Januar 2025. Jan. 2025.
- [80] Z. Guo u. a. „Infrastructure planning for airport microgrid integrated with electric aircraft and parking lot electric vehicles“. In: *Etransportation* 17 (2023), S. 100257.
- [81] 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.
- [82] 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.
- [83] J. Hoelzen u. a. „H₂-powered aviation–Design and economics of green LH₂ supply for airports“. In: *Energy Conversion and Management: X* 20 (2023).
- [84] 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.
- [85] Fraport, AG. „Frankfurt Airport Luftverkehrsstatistik 2023“. In: *Frankfurt am Main* (2024).

- [86] 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).
- [87] S. B. (Destatis). *GENESIS-Online Datenbank: Tabelle 61111-0001*. Zugriff am 12. Januar 2024. 2025.
- [88] M. A. Camilleri und M. A. Camilleri. *Aircraft operating costs and profitability*. Springer, 2018.
- [89] International Air Transport Association (IATA). *SAF Procurement: Pricing Options for Different Strategies*. Zugriff am 28. Dezember 2024. 2024.
- [90] K. Goodge und P. Withey. „An Analysis of Direct Operating Costs for the Wright Spirit Electric Aircraft“. In: *Aerospace* 11.12 (2024), S. 1007.
- [91] International Energy Agency (IEA). *Fossil jet and biojet fuel production cost ranges (2010-2030)*. Zugriff am 03. Januar 2025. 2021.
- [92] 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.

Anhang und Anlagen

Anlage A: Ergänzende Formeln und Berechnungsgrundlagen

Anlage B: Detaillierte Ergebnisse

Anlage C: Berechnungen und Diagramme