



Studienarbeit

Stakeholder-Kostenanalyse an Flughäfen bei Einführung neuer Luftfahrzeugantriebe

Henrieta Bohdanova

Geboren am: 28.06.1998 in Kyiv

10.12.2024

Gutachter

Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Fricke

Betreuer

Dipl.-Ing. Edgar Böttcher

Henrieta
Bohdanova

Thesen zur Arbeit

1. 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

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	Betrieb-, 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	14
2.5.1	Sustainable Aviation Fuel (SAF)	14
2.5.2	Batterie-Antrieb	16
2.5.3	Wasserstoff-Antrieb	18
2.5.4	Bestehende Konzepte und zukünftige Flugzeugmodelle	21
3	Änderungen durch neue Antriebe, Annahmen und Methodik	25
3.1	Änderungen an der Abfertigung und dazugehörige Kosten von alternativen Antrieben	25
3.1.1	SAF	26
3.1.2	Batterie-Antrieb	26
3.1.3	Wasserstoff	28
3.2	Flugzeuge und Annahmen	31
3.2.1	Verglichene Flugzeuge und relevante Flugzeugdaten	31
3.3	Aufstellung der Formeln für Kosten	33
3.3.1	Betriebskosten einer Fluggesellschaft	34

3.3.2	Infrastrukturkosten	37
3.4	Betriebsszenarien	39
4	Auswertung den Ergebnissen und kritische Auseinandersetzung . . .	43
4.1	Vergleich von Referenzflugzeugen und neuen Antrieben	43
4.2	Ergebnisse der Betriebsszenarien	46
4.3	Sensitivitätsanalyse	48
4.4	Bewertung der Ergebnisse	49
5	Fazit	53
	Literaturverzeichnis	XXIII

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 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 in 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 populäres Thema. Durch neuartige Konfigurationen und alternative Kraftstoffe und Antriebe besteht die Möglichkeit die unnötigen Emissionen zu vermeiden. Innovative Antriebe, wie Batterie, Wassertreibstoff oder Sustainable Aviation Fuel (SAF), versprechen unter nachhaltiger Produktion und Logistik geringen Einfluss auf die Umwelt und somit die Reduktion der Emissionen

zu haben. Allein durch den Einsatz von Elektro- und Wasserstoffantrieben könnte 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 Fokus auf elektrische oder wasserstoffbetriebene Flugzeuge.

Geprägt von wachsend strengeren Maßnahmen in Bezug auf die Treibhausgase, brauchen Betriebsunternehmen neue Technologien um höhere CO₂-Emissionen und damit verbundene höhere Kosten zu vermeiden. Es 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 hat die Einführung neuartiger Antriebe auf Stakeholder und auf den Markt, und welche Betriebs-, Infrastruktur- und Ausbildungsdifferenzen entstehen dadurch.

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.

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 den bedeutenden Informationen zu Kosten und Emissions-Regulierungsinitiativen am Flughafen. Anschließend werden im Teil 2.5 die neuartigen alternativen Antriebe und Konzepte und Flugzeugmodelle mit diesen Antrieben vorgestellt.

2.1 Stakeholder am Flughafen

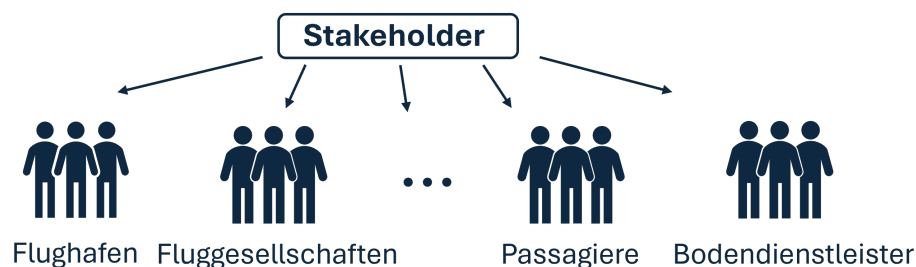


Abbildung 2.1: Relevante Stakeholder am Flughafen

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]. **Flughafen**

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, Flugsteige, sowie die Infrastruktur für Gepäckabfertigung. Darüber hinaus stellen Flughäfen eine intermodale Verknüpfung dar [3]. Direkte Nutzer von Flughäfen sind Im- und Exporteure von Dienstleistungen und Waren [6].

Flughäfen sind ein großer Teil der regionalen Wirtschaft [6] und sorgen für eine Vielzahl von Arbeitsstellen. Dennoch verursachen sie ein Ausmaß an Lärm und Umweltbelastungen, welche durch die Emissionen der Flugzeuge entstehen. Demnach 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 [6]. Die Europäische Kommission besagt, dass Flughäfen mit einem Passagieraufkommen von über 3 Millionen Passagiere 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;
- nationale Flüge 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.² Ein Hub ausmacht ein großer Flughafen mit mächtigem Anteil an Umsteigeverkehr.

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

²Die Daten stammen aus dem Statistischem Bericht, "Luftverkehr auf Hauptverkehrsflughäfen 2023"

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 Betriebskosten (Erträge) sind, die der Flughafen verlangt [6]. Die Erträge 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. Sie sind auf Infrastruktureinrichtungen wie Gepäckförderanlagen und Betankungsanlagen und 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.

Bodenverkehrsdienste sind auch für den Transport von Fracht, Post und Gepäck bis zum Flugzeug zuständig [7].

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

Zu den Systempartnern (Stakeholdern) am Flughafen zählen ebenfalls Luftfahrzeughersteller, Flugsicherungen, Reiseveranstalter, staatliche Institutionen [8] sowie Beteiligte wie Passagiere, Arbeitskräfte und Passagierdienstleister. 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 (Bedingungen) 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 Kerosin auf Ölbasis, betrieben werden. Der Fokus wird auf die gewerblichen Passagierflugzeuge gelegt, da die Abfertigung von Passagieren besonders strenge Sicherheitsmaßnahmen erfordert.

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 [7] 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 [7]. Es muss ausgeladen, kontrolliert, gereinigt, anschließend 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. Laut EU-OPS 1.305 darf das Luftfahrzeug aus Sicherheitsgründen erst betankt werden, wenn sich keine Passagiere an Bord befinden.

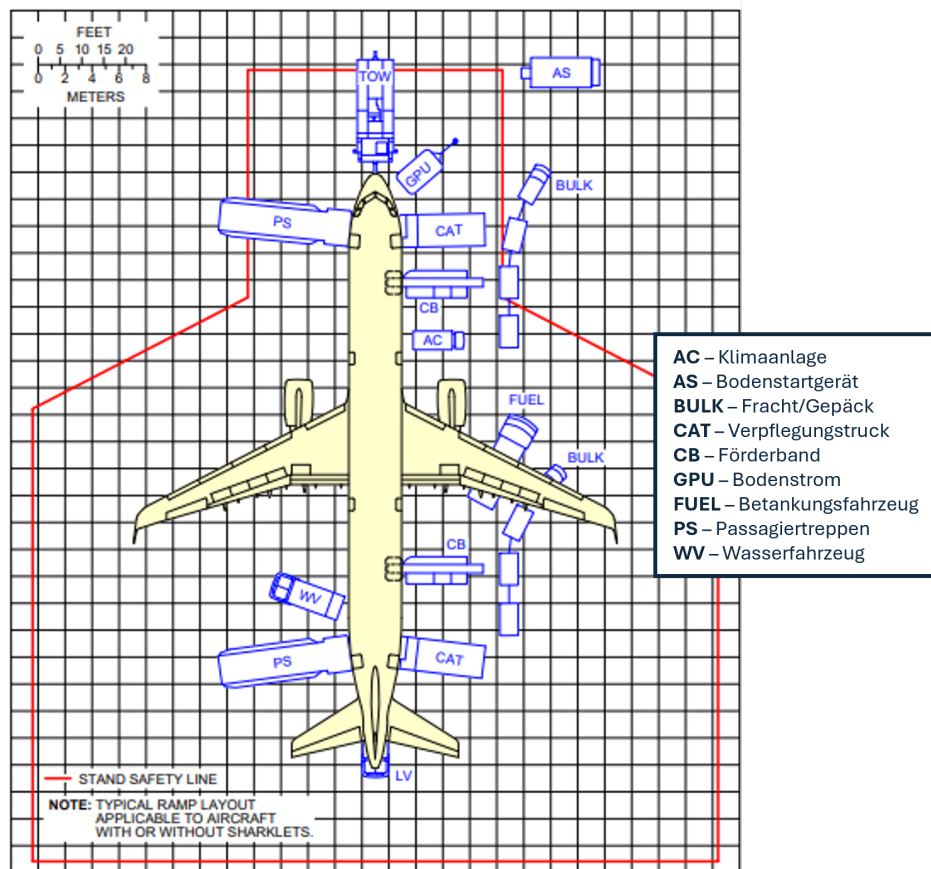


Abbildung 2.2: Abfertigung eines A321 [9] mit eigenem Hinweis

Je nach Flugdistanz und Flugzeuggröße kann es zu unterschiedlichen Abfertigungszeiten kommen. Bei kleineren Flugzeugen ist die Abfertigungszeit kürzer, als die einer größeren Maschine. 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 [7]. Die Definition von Distanzen variiert teils erheblich, z.B. definiert der Flughafen Frankfurt Langstrecken ab 6000 km.

Konventionelle Treibstoffe

Zur Zeit werden Treibstoffe auf Basis fossiler Energie, wie Öl, genutzt. Die Ölpreise sind sehr instabil. Um Schub zu erzeugen, wird der Treibstoff in der Gasturbine verbrannt, wodurch mechanische Leistung erzeugt wird und über eine Welle den Propeller oder das Strahltriebwerk antreibt. Durch die Verbrennung des Treibstoffs entstehen Abgase, wie auf der Abbildung

whereas biofuels produced at stand-alone facilities are moved by rail or barge/tanker (large volumes) or truck (small volumes) <https://www.osti.gov/servlets/purl/2440801>

A tank farm comprises multiple interconnected pieces of equipment designed to safely receive, store, and dispense fuel to a hydrant system or truck delivery to aircraft. Although not an all-inclusive list, a tank farm consists of tanks; pipeline interconnection; equipment to control the flow of fuel and vapors; meters to measure the volume of fuels into the tank farm and out to aircraft; filters to remove contaminants; pumps to move fuel throughout the system; safety equipment to prevent, detect, and contain leaks throughout the system; off-loading racks to fill fuel trucks; and hydrant systems—underground pipes and hydrants

2.3 Betrieb-, 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 [7] 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 zum dem Betrieb (z.B. Kapitalkosten, Versicherung, Personalkosten), die variablen Kosten hingegen sich in Bezug auf Beschäftigung ändern. Die Kostenstruktur einer Fluggesellschaft kann mit der Abbildung 2.3 veranschaulicht werden.

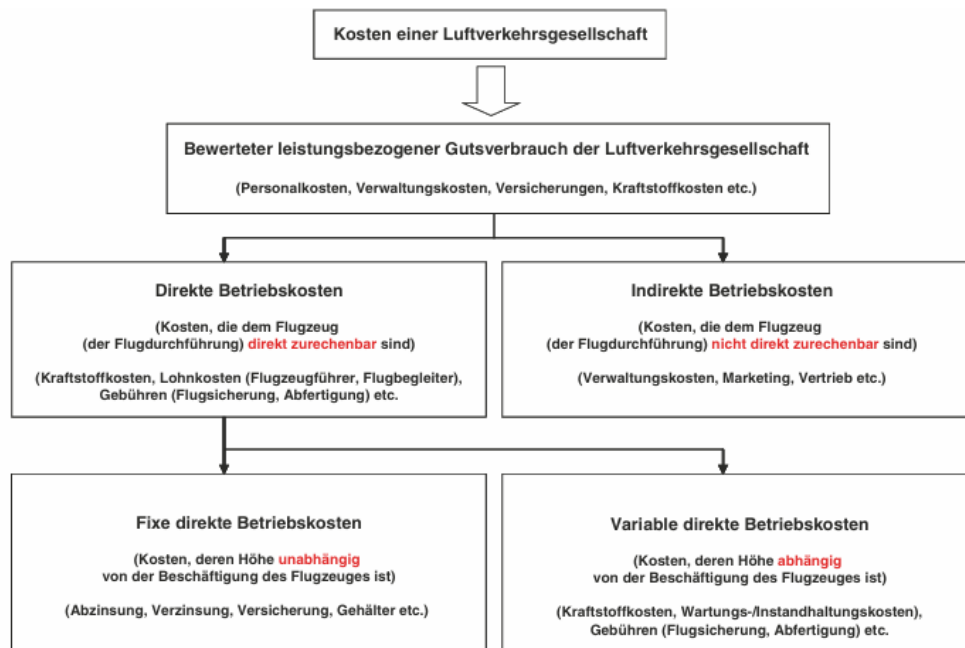


Abbildung 2.3: Kostenstruktur einer Fluggesellschaft [7]

Betriebskosten sind von dem Flugzeugtyp abhängig, deswegen ist es 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 [10]. Die meisten davon schließen die gleichen Kostenfaktoren ein, unterscheiden sich jedoch in der Rechnungsweise für einzelne Kosten.

Einberechnet werden Treibstoffkosten, Crewkosten, Wartungskosten, kapitalbezogene Kosten, 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 [11]. Die jährlichen Steigerungen der Preise für fossile Rohstoffe kann 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 Arbeiten, 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 einer Zelle und den Triebwerken unterteilt [12]. Meistens werden diese Komponenten von unterschiedlichen Unternehmen hergestellt (Quelle). 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 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 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 [10].

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 einen Flughafen verfügt. Die Infrastrukturkosten eines Flughafens bestehen aus Kosten für luft- und landseitige Anlagen [13]. 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-/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 [14]. 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]. Flughäfen in Deutschland sind überwiegend in öffentlicher Hand [3]. Über landseitige Anlagen finanzieren sich Flughäfen durch Mieten, Konzessionen und weitere Quellen [13]. 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 (Regulierungsbehörden, Mitarbeitern, Anteilseignern, Kreditoren usw.) stattfinden [14]. Außerdem müssen Infrastrukturentscheidungen mit den Interessen der Gesellschaft übereinstimmen [15].

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 hinweisen. Dabei wird in dem Teil 2.5 auf die Sicherheitsaspekte und Gefahren beim Umgang mit den Antriebsarten eingegangen und die Schlussfolgerung für Ausbildungen zusammengefasst.

Die Ausbildung soll die allgemeinen Charakteristiken des Wasserstoffs, den Umgang mit Wasserstoff und möglichen verbundenen Gefahren, und die korrekten Reaktionen in Notfallsituationen beinhalten. Die Schulungen sollten für alle Beteiligten an der Luftfahrzeugabfertigung gemacht werden.

2.4 Klimapolitische Maßnahmen

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

Auch die Verordnung (EU) 2018/1139³ 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 Luftfahrttechnologien 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 betrachten. Nach Artikel 126 kann die EASA die detaillierten Vorschriften für Gebühren bestimmen, um nachhaltige Technologien und innovative Projekte

³Verordnung (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.

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-Emissionsrechthandel (EU ETS) für den Luftverkehr eingeführt. Dabei können Zertifikate erworben werden, um eine bestimmte Anzahl an Emissionen freisetzen zu können. Ein Großteil der Zertifikate wird unentgeltlich den Fluggesellschaften zugeteilt, den Rest wird versteigert. Das Ziel ist die begrenzte Zertifikate unter Gesellschaften zu verteilen und somit die Treibhauseffekte zu senken. Einnahmen der Versteigerung werden für die Bekämpfung von Einflüssen eingesetzt [3]. Die Internationale Zivilluftfahrtorganisation (ICAO) hat im Jahr 2016 die Resolution A39-3⁴ 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 anderen Klimainitiativen. Die Einführung erfolgt in 3 Phasen: bis zum Jahr 2023 verlief die Pilotphase; ab Jahr 2024 bis 2026 verläuft die Erste Phase und schließlich die Zweite Phase, in der die Mitglieder verpflichtet sind, teilzunehmen [3].

Ab dem Jahr 2027 werden alle Betreiber aus dem Europäischen Wirtschaftsraum entweder CORSIA oder EU ETS unterliegen [16]. Im Europäischen Wirtschaftsraum gilt EU ETS und hat anspruchsvollere Klimaschutzmaßnahmen als CORSIA [16]. 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 in der Union sowie Luftfahrzeugbetreiber.

⁴Resolution A39-3. ICAO zur „Consolidated Statement of Continuing ICAO Policies and Practices Related to Environmental Protection – Global Market-based Measure (MBM) Scheme“, 2016.

2.5 Neuartige Antriebe

Obwohl sich der Kraftstoffverbrauch in der letzten 30 Jahren halbiert [7] hat, bleiben die Auswirkungen hoch. Bei der Untersuchung von alternativen Antrieben sind bestimmte Überlegungen relevant. Die Dichte des Energieträgers, Kosten und Verfügbarkeit des Rohstoffs, Sicherheit in Bezug auf Herstellung und Nutzung sowie direkte und indirekte CO₂ Emissionen [17].

In diesem Kapitel werden folgende vielversprechende Energieträger betrachtet und zusammengefasst: nachhaltige Kraftstoffe (SAF), Batterie-Antriebe (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 [18]. 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 [19].

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 [20]. Aus diesem Grund ist bis jetzt kein Flugzeug für das Fliegen mit reinem SAF zertifiziert [18].

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 [21]. Die SAF Produktion erreichte im Jahr 2024 1 Million Tonnen [22]. Der Verbrauch des Luftverkehrs, wie

oben beschrieben, erreichte im Jahr 2023 92 Milliarden Gallonen, was bedeutet, dass SAF nur 0,8 % der Gesamtverbrauch 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 [19].

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 [23]. Die Haupteinschränkung von HEFA ist die begrenzte Anzahl an Rohstoffen [23]. 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 [23]. Das Verfahren erzeugt die höchsten CO₂-Emissionseinsparungen [24], befindet sich jedoch noch in einem früheren Stadium [23]. Eine zusätzliche Beschränkung besteht durch die Preise für SAF. In der Abbildung 2.4 sind Vergleichswerte für verschiedene SAF 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.

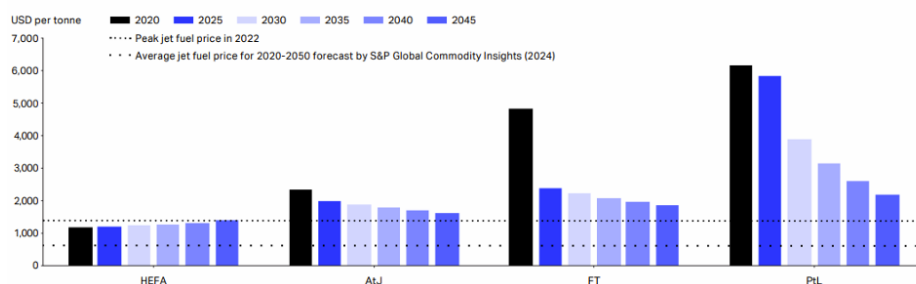


Abbildung 2.4: Durchschnittlicher IATA-Mindestverkaufspreis [19]

In Bezug auf die Infrastruktur sind manche davon überzeugt, dass keine Änderungen im Flugzeug oder am Betankungssystem notwendig sind [25]. Wobei Dahal et al. [26] 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 vom Flughafen zu gelangen [18].

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 [19]. Die Preise für nachhaltige Flugtreibstoffe sind zwei- bis zu fünfmal höher als die des herkömmlichen Kerosins [18]. Um Fluggesellschaften für die Nutzung der nachhaltigen Kraftstoffe zu motivieren, hat EU-ETS 20 Mio. Zertifikate zur Verfügung gestellt [19]. In ReFuelEU sind vor allem die verpflichteten Beimischungsanteile nachhaltiger Stoffe festgelegt.

2.5.2 Batterie-Antrieb

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 [27].

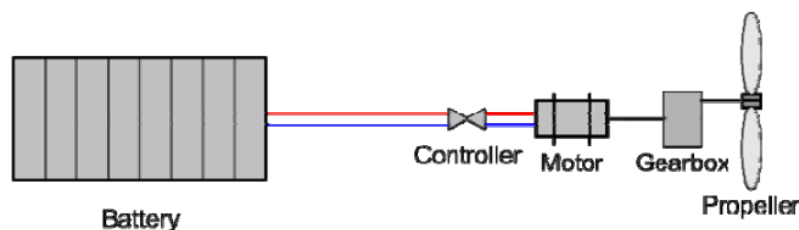


Abbildung 2.5: Einfaches Modell eines Batterieantriebs [27]

Antriebskonfigurationen von elektrischen Flugzeugen werden nach drei Arten unterschieden: vollelektrisch, funktioniert nur auf der Batterie oder Brennstoffzelle als Energiequelle, turboelektrisch und hybrid-elektrisch. Hybrid-elektrisch ist eine Mischung von konventionellen Gasturbinentriebwerken mit Kerosin und Batterie oder Brennstoffzellen [26]. Der Turboelektrische Antrieb verfügt über keinen 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 beschrieben.

Funktionsweise Elektromotor:

Durch die Umwandlung der elektrischen Energie in chemische, kann diese in der Batterie gespeichert werden. Die Batterie ermöglicht irreversible chemische

Reaktionen der aktiven Materialien (Energiefluss von Anode zur Kathode, wobei die Elektrolyten über den äußeren Stromkreis fließen).

Bei diesem Antrieb wird durch Potenzialdifferenz und einem Stromfluss die elektrische Energie in mechanische umgewandelt.

Im Vergleich zum Verbrennungsmotor ist das einzige bewegliche Teil bei BA der Rotor [28], was die Wartungskosten im Vergleich zu Gasturbinen verringern kann. 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 [28]. Die elektrischen Antriebe können effizienter als konventionelle Antriebe wirken [27].

Dieser Antrieb wird Wärmemanagementsysteme benötigen.

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 [28]. Im Laufe des Fluges verändern die Batterien ihr Gewicht nicht, unabhängig davon, ob sie leer oder vollständig geladen sind [28]. Eine in der wissenschaftlichen Literatur weit verbreitete Batterie ist die Lithium-Ion-Batterie. Diese verfügen über eine hohe Energiedichte im Vergleich zu anderen vorhandenen Batterien. Heutige Li-Ion Batterien haben eine gravimetrische Energiedichte von 150 - 300 Wh/kg [29]. Werden diese Werte mit der spezifischen Energiedichte von 12 kWh/kg von Kerosin verglichen [30], 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 [31] ist.

Li-Ion übersteigt spezifisch Energie und Energiedichte anderer bekannter Batterien.

Batterien sind von äußerlichen Bedingungen beeinflussbar. Kalte Umgebungen können den Wirkungsgrad reduzieren (Quelle), warme Umgebungen können zu einem

schnelleren Auslaufen der Lebensdauer führen. Die Herstellung einer Lithium-Ionen-Batterie ist durch Lithium-Produktion umweltschädlich (hoher Wasserverbrauch, gefährliche Leckagen) und kostenintensiv in der Wartung [30].

Es befinden sich weitere vielversprechende Arten von Batterien wie Lithium-Sulfur, Lithium-Air, sowie Festkörperbatterien in Forschung(Quelle).

In Bezug auf die Sicherheit ist die größte Gefahr des BA eine chemische Reaktion des thermischen Durchgehens, wofür stabile Kühlungssysteme benötigt werden [28]. Thermisches Durchgehen verursacht einen starken Anstieg der Innentemperatur von Batterie, was zum kompletten Ausfall der Batterie oder Freisetzung brennbarer Gase führen kann [32].

Die Energieproduktion ist nicht emissionsfrei [31], es müssen mehr erneuerbare Quellen hergestellt werden, wie Solar- und Windenergie.

Das Wartungsverfahren hierbei unterscheidet sich stark von konventionellen Flugzeugen. Es ist zu erwarten, dass die Wartungskosten niedriger sein können durch weniger bewegende Teile in dem Antrieb [30]. Die elektrischen Motoren werden keine Kontrollen des Gasturbinentriebwerks (Hot-Section Inspection) benötigen, jedoch müssen Teile wie Lager ausgetauscht werden und es werden mögliche Schäden durch Fremdpartikel, die in den Motor gelangen, verursacht [33]. Weiterhin muss bei einem Fehler der ganze Motor ausgetauscht werden [30], was ungeplante Wartungen und zusätzliche Kosten verursacht.

2.5.3 Wasserstoff-Antrieb

In vielen Forschungsarbeiten wird Wasserstoff als die Lösung für umweltfreundliche Luftfahrt dargestellt. Dieses Energiemedium wird jedoch von Kosten, Sicherheit und öffentlicher Akzeptanz behindert [17]. 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 [27].

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 H_2 und Kohlenmonoxid CO bzw. -dioxid [34]. Bei der Elektrolyse wird das Wasser mithilfe von Elektrizität in Wasserstoff H_2O und Sauerstoff O_2 gespalten [34]. Durch diesen Herstellungsweg können CO_2 -Emissionen vollständig vermieden werden [30]. Mulder et al. [34] schätzt die Investitionskosten für Produktion des Wasserstoffs durch Elektrolyse deutlich günstiger als ein Kohlekraftwerk. Die Nachhaltigkeit der Elektrolyse ist außerdem, genau wie bei dem BA, von der Stromquelle abhängig. Wenn für die Produktion von Wasserstoff erneuerbare Energiequellen (wie Solar- und Windanlagen) genutzt wurden, wird dieser als grüner Wasserstoff bezeichnet [34]. Durch Elektrolyse produzierter grüner Wasserstoff ist kostenintensiv [30]. 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 [34].

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 werden, bei einem Druck von 350 oder 700 bar gespeichert werden [29]. Allerdings hat gasförmiger Wasserstoff auch bei einem Druck von 700 bar geringere Energiedichte als flüssiger Wasserstoff [35]. 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. Gravimetrische Energiedichte bei flüssigem Wasserstoff ist deutlich höher als bei Kerosin, aber volumetrische Energiedichte E_V ist viel geringer. Das bedeutet, dass LH_2 zwar bessere Gewichtsverhältnisse als Kerosin hat, jedoch wird für die gleiche Menge Energie 3,5-mal so viel Platz gebraucht. Aufgrund seiner Stoffeigenschaft 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 [29].

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

	E_V in [kWh/l]	E_G in [kWh/kg]	Dichte [kg/m ³]
Wasserstoff LH ₂	2,6 [29]	37,0 [29]	70,8 [35]
Kerosin	9,5 [29]	11.9 [29]	

Die Konzepte schlagen eine Platzierung des Wasserstofftanks in Form von halbkugelförmigen Endkappen auf [26] oder am Ende des Flugzeugrumpfes zwischen der Fracht und den hinteren Notausgängen vor [36]. Bei Flugzeugen welche mit Wasserstoff betrieben werden, ist die Tankisolierung von großer Bedeutung. Das flüssige LH₂ muss bei -253 °C gelagert werden [29]. 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 % [35].

Wasserstoff führt schnell zu Versprödung [26] zyklische Belastungen, die durch die Wärmeausdehnung und -kontraktion beim Nachfüllen, sowie durch den Kraftstoffverbrauch verursacht werden"Antrieb

Wasserstoff kann in zwei Ansätzen als Antrieb genutzt werden: erstens als Treibstoff für die Verbrennung im H₂-Verbrennungsmotor, zweitens in der Brennstoffzelle, um den elektrischen Motor anzutreiben [25]. Zudem gibt es einen hybriden Antrieb, bei welchem die Brennstoffzelle zusammen mit einer Batterie genutzt wird. Eine andere Methode, um Wasserstoff in der Luftfahrt zu nutzen, ist die Brennstoffzellentechnologie. Brennstoffzellen sind haben ein hohes Gewicht [27] und benötigen den gasförmigen Wasserstoff als Antrieb [29]. Dabei wird durch die chemische Reaktion aus gasförmigem Wasserstoff H₂ und Sauerstoff O₂ Strom produziert [30], wodurch der Propeller des Flugzeugs angetrieben wird. Aufgrund der besseren Speicherung in flüssiger Form muss ermittelt werden, wann der Wasserstoff in den Gaszustand überführt wird.

Für die Verbrennung des Wasserstoffs sind Änderungen in der Brennkammer benötigt, um höhere Temperaturen zu vermeiden [37]. Colpan et al. [29] ist jedoch der Meinung, dass sich die Wasserstofftriebwerke mit konventionellen Düsentriebwerken ähneln werden. Allerdings werden zusätzliche Komponenten wie Kraftstoffpumpen und Wärmetauscher für den flüssigen Wasserstoff benötigt.

Sicherheit beim Umgang mit Wasserstoff

Wasserstoff wird als hochentzündlich skaliert [30]. Aufgrund seiner Natur breitet sich die Flamme eher vertikal aus und die Brenndauer von LH_2 ist kürzer als die des Kerosins [29]. Der Wasserstoff hat eine hohe Flammgeschwindigkeit und es besteht die große Gefahr eines Flammenrückschlags bei der Flammenausbreitung [37]. Dennoch ist Wasserstoff innerhalb der richtigen Infrastruktur nicht gefährlicher als andere brennbare konventionelle Treibstoffe und in manchen Fällen sogar sicherer [37]. Wird der flüssige Wasserstoff verschüttet, wird er aufgrund seiner Leichtigkeit vertikal nach oben verdampfen [29]. Direkter Kontakt mit kryogenem Wasserstoff führt zu Erfrierungen. Die Forschung des Wasserstoff muss sich mit Themen wie Explosionsgefahr, Materialgefahr, Betankung und dem Umgang in der Abfertigung auseinandersetzen.

Zusätzliche Ausbildungen für Wartungsmitarbeiter und Schulungen für Bodenabfertigungspersonal werden benötigt, weil sich die Charakteristiken von Wasserstoff von herkömmlichen Treibstoffen stark unterscheiden. [34]?

Brennstoffzelle erzeugen viel Wärme, die Leistung aufrechtzuerhalten werden Kühlsysteme benötigt werden. Brennstoffzellen haben auch weniger bewegende Teile als die konventionelle Antriebe [30] was weniger Wartungskosten verursacht, allerdings der benötigte Wasserstofftank braucht öfteren Wartung (Quelle).

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, die mindestens 20 Jahr im Einsatz sein werden (Quelle). Die Abbildung stellt Eintrittsjahre für alternative Antriebe dar. Kleinere Flugzeuge mit sowohl elektrischem Antrieb, als auch der Brennstoffzelle sind bereits jetzt im Einsatz zu finden. Positive Auswirkungen auf die Emissions-Werte können bereits mit bestimmten Flugzeug- und Triebwerkskonfigurationen erreicht werden.



Abbildung 2.6: NASA

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. Pipistrel Alpha Electro hat bereits im Jahr 2007 sein ersten elektrischen Zweisitzer vorgestellt, mittlerweile wird das Modell "Velis Electro"[38] für das Pilottraining mit einem Triebwerk mit 57.6 kW Leistung genutzt. Der Antrieb ist flüssigkeitsgekühlt und braucht ein externes Ladegerät. Die größeren Konzepte hingegen haben aufgrund der Komplexität der Technologien und Gewicht mit der Umsetzung zu kämpfen.

Konfigurationen mit Batterie-Antrieb 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, 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 die Regionalstrecken konzipiert und somit konnte die geringe Nachfrage gedeckt werden. Außerdem wurden geringe Betriebs- und Wartungskosten erwartet (Quelle). Das aktuellste Modell ES-30 wurde jedoch auf einen hybriden Antrieb umgerüstet.

Eines der größten Konzepte mit vollelektrischen Antrieb stellte Bauhaus Luftfahrt vor. Das Passagierflugzeug *Ce-Liner* [39] ist mit einer C-Wing-Konfiguration 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 Wasserstoff-Antrieb

Embraer zeigte eine Reihe von nachhaltigen Flugzeugen *ENERGIA*. Die Flugzeuge sind mit unterschiedlichen Antrieben ausgestattet, unter anderem hybrid-elektrisch oder mit Wasserbrennstoffzelle 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. [40] Airbus [41] hat im Jahr 2020 drei unterschiedliche emissionsfreie *ZEROe* Konzepte vorgestellt: Turbofan, Turboprop und eins mit „Blended-wing body“-Design. In allen Konzepten ist Wasserstoff im Einsatz und Antrieb mit Gasturbinentriebwerk. Die Reichweite bewegt sich in einem Bereich von über 1.850 - 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 [42] hat ein Konzept auf Basis des konventionellen Flugzeugs BAe 146 vorgestellt, allerdings mit einem Wasserstoff-Antrieb. Das Flugzeug soll mit 4 Triebwerken, 2,5 MW Motoren und vorgestellter Batterie mit 800 Wh/kg eine Reichweite von 1000 km erreichen und 100 Passagiere transportieren.

NASA hat das turboelektrische, mit flüssigen Wasserstoff angetriebene Konzept N3-X [43] vorgeschlagen. Das Modell ist *hybrid wing body* konzipiert und verspricht, dass der Treibstoffverbrauch bis um 70 % reduziert werden kann. Universal Hydrogen

ZeroAvia stellt ihre hybrid Wasserstoff-elektrischen Antriebe mit 3 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. Der Antrieb ist mit gasförmigem Wasserstoff angetrieben.

Aufgrund des schweren und massiven Wasserstofftanks werden unterschiedliche wasserstoffkonfigurationen vorgeschlagen. Es gibt Konzepte, wo der Tank am Rumpf, am Ende des Rumpfes oder vorne, hinter der Pilotenkabine sitzt. Abschließend ist zu beobachten, dass aktuell viele 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 im Entwicklungsprozess und bis jetzt ist ratsam, wie zukünftige Flughäfen aussehen werden und welche Ausstattung für die Flugzeug-Abfertigung ausgesucht wird. Wasserstoff-Flugzeuge werden erst ab dem Jahr 2035 in auf den Markt eintreten, wobei die BA-Flugzeuge schon in den nächsten Jahren erwartet werden. Der Wechsel zu nachhaltigen Antrieben kann es zu deutlichen Änderungen in der Infrastruktur und Abläufen am Vorfeld führen, die in diesem Kapitel beschrieben werden. Außerdem auf der Grundlage der unterschiedlichen Quellen und vernünftigen Behauptungen wird eine Reihe der Annahmen für diese Arbeit getroffen.

3.1 Änderungen an der Abfertigung 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 werden müssen und mehr Arbeitskräfte geschult werden müssen. In diesem Teil wird näher auf die Änderungen in der Infrastruktur durch die Einführung von neuen Antrieben eingegangen und die Forschungsrichtung ausgesucht.

3.1.1 SAF

SAF ist zwar nicht die beste langfristige Lösung wegen vorhandenen Emissionen, aber wegen benötigter Entwicklung der anderen nachhaltigen Antrieben stellt eine gute Option dar. In der nahen Zukunft werden vor allem die großen Flugzeuge mit BA-Antrieb nicht entwickelt, deswegen können SAF für die Langstreckenflüge benutzt werden [30]. 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 benutzt werden [30]. Dadurch, dass SAF zu herkömmlichen Treibstoffen beigemischt wird, ist zurzeit ein zusätzlicher Treibstofftank für das gemischte Kraftstoff gebraucht. Bis jetzt Transport von SAF mit einer Pipeline nicht zugelassen (Quelle?). Bei der intensiven Recherche wurde jedoch keine Information gefunden, die besagt, dass es verboten wird reine SAF nicht als Drop-In zu benutzen. Aus diesem Grund gilt für die Arbeit, dass die Lieferung von SAF mit bestehenden Pipelines zertifiziert und genauso wie bei Betankung mit herkömmlichen Treibstoffen zugelassen wird.

3.1.2 Batterie-Antrieb

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

In der Literatur werden zwei Batterien-Lademöglichkeiten diskutiert, die Batterien zu wechseln (Swap-Methode), wo die Batterie aus dem Flugzeug herausgenommen werden und an einer Ladestation geladen, oder Ladekabel in das Flugzeug einzustecken (Plug-In), wie bei etablierten E-Autos. Zudem ist ein modulares System möglich, wo beide Ansätze benutzt werden [44]. 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 auf dem Boden verursacht werden. Nichtsdestotrotz kann schnelle Ladung zur Stagnation von Lebensdauer einer Batterie führen (Quelle).

3.1 Änderungen an der Abfertigung und dazugehörige Kosten von alternativen Antrieben

Ladeleistung ist für die Dauer der Ladung verantwortlich. Reduzierung der Lebensdauer der Batterien hat zur Folge, dass die Batterien schneller ausgetauscht werden müssen und mehr Kosten dadurch entstehen.

Plug-In Methode benötigt ein schnelles Laden, damit Flugzeuge weniger Zeit auf Boden verbringen müssen. Jedoch ist ein Anstieg in Turnaround-Zeiten aufgrund nicht zurzeit möglichen Schnellladung möglich [45].

Bei *Swap-Methode* kann Aus- und Einbau der Batterie aus dem/in das Flugzeug lange dauern [30]. Guo et al. [46] ist zum Schluss gekommen, dass Batteriewechsel effizienter und ökonomischer ist, wenn die batteriebetriebenen Flugzeuge nur ein kleiner Teil (unter 10 %) der Flotte ist, in anderem Fall lohnt sich eine Plug-In-Ladung. Für die Batteriewechsel müssen auch Transport und Hebezeuge gestellt werden, um die Batterien bewegen zu können [33]. Jedoch mit Batteriewechsel können die Abfertigungszeiten reduziert werden (Quelle), was an einem großen Flughafen von der Bedeutung ist.

Batteriewechsel bietet gleichmäßigere Deckung der Nachfrage [46] und kompatibler mit der Flugplanung [44], da der Austausch einer Batterie viel schneller ist, als Dauer einer Plug-In Ladung. Dennoch werden mehrere Batterien benötigt, die zudem ordnungsgemäß und sicher gelagert werden müssen [44]. Außerdem ermöglicht der Swap-Methode langsames Laden und macht das Laden mit geringer Leistung möglich [45]. Aus diesen Gründen werden in nächsten Teilen die Kosten für diese Option ausgewertet.

Würde der Austausch der Batterien parallel zu anderen Prozessen, wie Deboarding kann die kürzere Turnaround-Zeit im Vergleich zu konventionellen Flugzeugen erreicht werden [5].

Annahmen für die BA-Analyse

Für weitere Betrachtung wurde es die Swap-Methode entschieden. Zudem wird es angenommen, dass die Batterien für Flugzeuge zur Flughafen-Infrastruktur gehören. Das bedeutet, dass diese Anschaffungskosten für Flughafen anfallen. Danach werden die Batterien in Form von Leasing von für Fluggesellschaften ausgeliehen.

Für die Ladevorgänge wird Strom benötigt. Die Strompreise und die vorhandene Leistung sind normalerweise von Tag und Nacht abhängig [44], aus praktischen

Gründen wird die konstante Spitzenleistung von Batteriewechselsystem von 250 kW wird angenommen. Bei einer Batteriekapazität von 900 kWh, würde die Ladung bei so einer Leistung ohne Beachtung der Verluste 3,6 Stunden dauern.

Für die Nachhaltigkeit des Batterieantriebes sind die Energiequellen von der Bedeutung. Der Strom aus dem Stromnetz kann sein Ursprung aus den Kraftwerken und Verteilerzentren haben [30]. Was dazu führt, dass die fossilen Brennstoffe für die Verbrennung benutzt werden und dadurch zu Emissionen beitragen. Als Alternative wäre Nutzung der erneuerbaren Energiequellen, wie Windenergie oder Solarenergie. Diese Energie ist normalerweise teurer und die Produktionsmenge ist bis jetzt nicht ausreichend, um die Luftverkehr-Nachfrage zu decken (Quelle).

3.1.3 Wasserstoff

Logistik ist ein wichtiger Teil der Produktionskette. Die Nutzung des Wasserstoffs am Flughafen erfordert Austausch der Betankungsanlagen und Anschaffung neuen Lieferketten, um Wasserstoff als Treibstoff benutzen zu können. Diese Investitionskosten werden die Flughafenbetreiber beeinträchtigen.

Transport

Die Lieferketten und die Produktion des Wasserstoffs haben ein großes Gewicht in der vorhandenen Literatur. Der Transport ist durch Pipelines im gasförmigen Zustand, LKW und Zügen sowohl im gasförmigen, als auch im flüssigen Zustand möglich. Kapitel 2.5.3 stellte die möglichen physischen Formen von Wasserstoff dar und am Ende darlegte, dass flüssiger Wasserstoff für den Transport als im Gasform vorteilhafter ist. Außerdem kann es 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 müssen nach Flughafenposition gewählt werden. Für die Flughäfen, die nahe einer Wasserstoff-Pipeline liegen ist sinnvoller damit der Wasserstoff zu besorgen, als mit einem LKW transportieren zu lassen. Für europäische Distanzen sind die Wasserstoff-Pipelines günstiger als Transport mit chemischen Verbindungen, welcher bei längeren Distanzen in Betracht kommt [47]. Bei Änderung von Erdgasleitung für Wasserstoff können Kosten gespart werden und muss keine neue Infrastruktur gebaut werden, sondern die Leitungen für Wasserstoff umgerüstet werden können

[47]. Jedoch der Transfer von LH_2 mit vakuumisolierte Pipeline beschränkt sich auf die kurzen Distanzen wegen proportionalen Skalierung der Verluste zu Leitungslänge [29]. Obwohl die hohen Kapitalkosten von Pipeline-Anlage zu erwarten, die Betriebskosten niedriger sein werden [34].

Mulder et al. [34] vertritt der Ansicht, dass bei größerem Umfang an Wasserstoff die Pipelines vorteilhafter als LKW - Lieferung sind. Colpan et al.[29] ist jedoch der Meinung im Fall, wenn große Menge an Wasserstoff benötigt wird, ist der Lieferung weder mit LKW noch Pipeline sinnvoll.

Dennoch nach Schenke et al. [48] kann Lieferung den flüssigen Wasserstoff mit einem LKW bei einer hohen Anzahl an Flügen kostengünstiger als andere Lieferalternativen sein. Allerdings Transport von LH_2 erfordert speziell konstruierte Tanks [34].

Speicherung

Gasförmiger Wasserstoff kann unterirdisch in Salzkavernen und in erschöpften Gasfelder gespeichert werden [47], Sie müssen sich in der unmittelbaren Nähe zum Flughafen befinden. Da es sich je nach Flughafenstandort variiert, wird dieser Speicheroption nicht weiter behandelt. Außerdem kann es für die Lagerung ein oberirdischer Druckzylinder, wo flüssiger Wasserstoff oder als festen Materialien (wie Metallhybriden) gespeichert wird. Aufgrund tiefen Temperaturen müssen diese Zylinder oder Tankern müssen gut isoliert und kryogen sein [47]. Andernfalls wird flüssiger Wasserstoff bei der Lagerung verdampft, was zum Verlust der Menge kommt [47]. Die Verdampfung wird mit größeren Lager kleiner [29].

Dennoch der größte Teil der Verdampfung findet durch Transferphase statt [47]. Somit muss der Weg zwischen Betankung und dem Speicher kurz sein, damit Verdampfungsverluste minimiert werden können [29]

Eine weitere mögliche Betankungsoption ist der Austausch des Flugzeugtanks als Kapseln. Dabei werden die leeren Kapseln an die Wasserstoffproduktionsstelle zurückgegeben, wo die wieder nachgefüllt werden können [29]. Diese Möglichkeit kann vor allem für die kleineren Flughäfen als Alternative sein, da kein Wasserstoffspeicher und sonstige Anlagen bereitgestellt werden müssen. Für längeres Parken am Flughafen werden kalte Tanks eine sichere Verbindung mit der Wasserstoffinfrastruktur benötigen [29]

In dem Unterkapitel ?? wurde angeführt, dass die Produktion des Wasserstoffs, viel Platz Energie und hohe Kosten benötigt. Produktion und Verflüssigung des Wasserstoffs am Flughafen würde viel zusätzliche Infrastrukturkosten [30]. Deswegen für die Flughäfen wäre es die Alternative besser, das Wasserstoff, woanders einzukaufen und zum Flughafen mit LKW oder Pipelines liefern zu lassen [49]. Aufgrund aufwendigeren und kostenintensiven Infrastrukturprozessen für die Produktion und Verflüssigung von Wasserstoff werden wahrscheinlich Flughäfen, besonders kleineren, anfangs auf die "On-Site"-Produktion verzichten.

Aufgrund hohen Unterschiedes zu herkömmlichen Treibstoffen und neuen Ausrüstungen müssen die Mitarbeiter neu geschult werden, um mögliche Gefahren zu erkennen und zu vermeiden [49].

Annahmen für die Analyse Die Gesamtinvestitionen sind von der Wahl der Produktion, Speicherung, Lieferketten als auch Betankungsentscheidung abhängig. Da derzeit nicht einsehbar ist, welcher Technologie umgesetzt wird, fokussiert sich die Arbeit auf einen bestimmten Versorgungsweg.

Die externe Produktion ist am Anfang sinnvoll [29], aus diesem Grund wurde angenommen, dass die Produktion des Wasserstoffes und Verflüssigung nicht am Flughafen stattfindet, sondern eingekauft und zum Flughafen mit LKW transportiert. Am Flughafen wird der Wasserstoff in kryogenen Tanks gespeichert und mit Betankungswagen werden die Flugzeuge mit Kraftstoff befüllt. Lieferkosten für flüssigen Wasserstoff LH₂ werden nicht explizit ausgerechnet, da die schon in Betriebskosten von Wasserstoffbetriebenen Flugzeuge eingeschlossen sind. Die Abbildung 3.1 stellt so eine Variante von Produktion- und Lieferketten für flüssigen Wasserstoff dar.

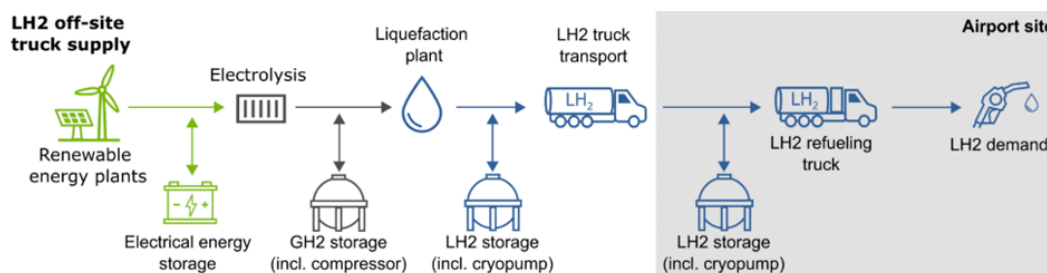


Abbildung 3.1: Lieferkette von flüssigem Wasserstoff mit externer Herstellung und interner Lagerung bzw. die Betankung [48]

Zusätzlich wird es davon ausgegangen, dass Sicherheitsradius beim Wasserstoffbetankung nicht erweitert wird.

3.2 Flugzeuge und Annahmen

3.2.1 Vergleichene Flugzeuge und relevante Flugzeugdaten

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

Konventionelle Flugzeuge

Für den Vergleich mit elektrischen Batteriegetriebene Flugzeug wurde ein L410 genommen. L410 ist ein Zubringer-Flugzeug mit 19 Plätzen der Firma Aircraft Industries. Die moderne Version L410NG verfügt über neue Avionik und mit zwei GE H85-200 Triebwerken mit einer Wellenleistung von 850 (SHP) ausgestattet (Quellen). Verbrauch von einem L410 beträgt 240 kg/h [50]. Sonstige wichtige für die Methodik Flugzeugdaten wurden in der Tabelle 3.1 zusammengefasst. Unter V ist die Reisegeschwindigkeit und R ist die Reichweite eines Flugzeugs zu verstehen. $MTOW$ ist das Höchstabfluggewicht und EOW (Empty Operating Weight) ist die Betriebssleermasse eines Flugzeugs.

Für den Vergleich von größeren Distanzen wurde für A321LR entschieden. Die A321LR ist ein Schmalrumpfflugzeug von Airbus und ist eine Version der A321neo mit einer größeren Reichweite. Flugzeug ist mit zwei Triebwerken ausgestattet, die einem maximalen Schub ($T_{T/O}$) von 33 kN haben [51].

Alternative Flugzeuge und Annahmen

Die ES-19 von Heart Aerospace dient als Vergleich zur L410. Das Konzept hat einen rein elektrischen, batteriebetriebenen Antrieb. Das Unternehmen hat zwar die ES-19 auf eine hybride Wasserstoffversion 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, wobei hierbei eine Reisegeschwindigkeit von 330 km/h erreicht wird [52] [53]. Für die Batterie der ES-19 wird eine Kapazität von 720 kWh benötigt, mit 30 % der

Reserveenergie resultiert in 900 kWh [28].

Mit jetziger Leistung der Batterien wäre es unmöglich bei so einem Gewicht und der Distanz zu bleiben. Deswegen wird es angenommen, dass die Batterien sich positiv in Gewicht-zu-Leistungs-Verhältnis entwickeln und Kapazitätswert von 450 kWh/kg erreicht wird. Manche Studien gehen davon aus, dass die Einsparungen in der Wartungskosten von BA-Flugzeugen 10-15 % erreichen können [45], [54]. Deswegen in dieser Arbeit wird eine Verminderung von 10 % zu dem Referenzflugzeug genommen. Da es bis jetzt nur wenig ausgearbeitete größere Konzepte für Wasserstoff-Antrieb gibt, wird der Betriebsvergleich auf der Basis von einer A321LR stattfinden. Dabei wird es angenommen, dass das Flugzeug mit Wasserstoffturbine betrieben ist. Im Vergleich zu konventionellen Flugzeugen werden die Wasserstoff-Flugzeuge, die für Mittelstrecken geeignet, 14 % höheres MTOW haben und die Kapitalkosten für das Kurzstrecken-Flugzeug um 7 % sowie Wartungskosten um 6 % steigen [25]. Diese Anteile sind zwar für Mittel- und Langstrecken Flugzeuge positiv, aber werden dennoch für diese Arbeit angenommen.

Die Änderung für Abfertigungsprozesse können erheblich sein [55].

Es ist zu erwarten, dass die Wasserstoff-Flugzeuge länger als konventionelle Flugzeuge werden und dass Kraftstoffsicherheitszone bei Anschließen und Trennung von Wasserstoff-Betankung zum Jahr 2030 auf 20 m reduziert werden [56].

Die Flugzeit nimmt zwischen 5 und 15 % aufgrund des Wasserstofftank-Gewichts zu [25]. Aus diesem Grund wurde es für einen Wert von 10 % für die Arbeit entschieden. Auslastung eines Flugzeugs mit Wasserstoff-Antrieb kann im Vergleich zu konventionellen Flugzeug sinken, da potenziell WA-Flugzeuge wegen der Betankungsprozesse mehr Zeit auf dem Boden verbringen werden (Quelle). Der Vergleich zu SAF-Betriebskosten findet auch mit der A321LR statt. Es wird davon ausgegangen, dass der Unterschied nur bei Treibstoffkosten entsteht. Für die A321LR wird die Passagieranzahl von 220 und Verbrauch von 1,7 kg pro Kilometer und pro PAX angenommen [57]. In der Tabelle 3.1 sind relevante charakteristische Werte und Annahmen für die Vergleichsflugzeuge zusammengefasst. Anhand dieser Daten ist ES-19 langsamer als ein L410, das bedeutet für gleiche Strecke wird mehr Zeit benötigt, was am Ende die Auslastung eines Flugzeugs und Betriebskosten verändern kann. Aufgrund des Batteriegewichts ist das BA Flugzeug schwerer als konventionelle Alternativen. Die beiden Flugzeuge können die gleiche Anzahl an Passagieren befördern. Obwohl die

Reisegeschwindigkeiten bei Referenz- und BA-Flugzeugen sich unterscheiden werden, für die Kurzstrecken-Flügen ergibt sich keine erhebliche Differenz. Deswegen es wird angenommen, dass die batteriebetriebenen Flugzeuge ähnliche Auslastung wie konventionelle Flugzeuge aufweisen. Die Änderung der Lebensdauer von BA-Flugzeugen wird auch nicht erwartet [33]. Ein A321LR wird mit oben genannten Annahmen größere Geschwindigkeit und Reichweite, sowie kleinere 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	[58]
ES-19	330	400	8 618	-	19	[52] [53]
A321LR	1104	7 400	97 000	52 060	max. 244	[59] [57]
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. In Betracht dessen, dass der Verkaufspreis einer A321LR nicht zur Verfügung steht, wird auf den Listenpreis einer A321neo zurückgegriffen. Da sie aus einer Flugzeug-Reihe kommen, kann es davon ausgegangen werden, dass die Preise ähnlich sind. Der Inflationsfaktor wurde dazugerechnet.

Tabelle 3.2: Flugzeugpreise

	L410	A321neo	Quelle
Verkaufspreis [EUR]	6 455 884	129,5 Mio	[60] [61]

3.3 Aufstellung der Formeln für Kosten

In dem Kapitel 2.3 sind die entstehenden Kosten beim Betrieb der Fluggesellschaft definiert. Schließlich in diesem Unterkapitel sind die dazugehörigen Formeln anhand anderer Modelle vorgestellt und teilweise angepasst.

Es gibt eine Reihe von Methoden, um DOC zu berechnen. Diese wurden kurz in dem Teil 2.3 erwähnt. Als Grundlage für ein Modell wurde der 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. 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 Verbraucherpreisindex Deutschland aus Statistischem Bundesamt, entsprechende eingesetzte Werte sind in der Anlage XX zu finden. Alle Werte in USD werden mit dem Wechselkurs ⁵ (EUR 1 = USD 1.0245) umgerechnet und mit Pfund (1,20 = EUR 1). Aufgrund der hohen Unsicherheit der Preisprojektionen wird der Preis für Kerosin konstant gehalten, nämlich im Wert von 0,688 EUR pro Liter [11]. Stromkosten von 0.1976 € per kWh werden auch als konstante angenommen [62]. 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 Rechnungen verwendet [63]. Wegen der starken Schwankungen des Wasserstoffpreises wird der Durchschnittspreis für elektrolytisch hergestellten Wasserstoff von 4,88 EUR/kg eingesetzt [64].

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} .

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

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 [10].

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

⁵Wechselkurs vom 14.01.2025

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

$$C_T \text{ [EUR]} = (P_{T/E} \cdot m_{V,B}) \quad (3.3)$$

Die Treibstoff- bzw. Energiepreis $P_{T/E}$ sind in der Tabelle zusammengeführt.

Die **Wartungskosten** werden nach dem Jenkinson 1999 Modell berechnet. Das Modell ermöglicht es, grob aber schnell die Wartungskosten für ein Flugzeug abzuschätzen [65]. Da dieses Modell auf konventionelle Flugzeuge ausgearbeitet wurde, berechnet man die Wartungskosten für alternative Antriebe als Prozentanteil des Referenz-Flugzeugs, die in 3.2.1 angeführt sind. Die Formeln stammen aus [65] 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 Gleichungen (3.4)-(3.6) dargestellt. Die Wartungskosten der Zelle sind von dem leeren Betriebsgewicht (Operating Empty Mass m_{OE}) abhängig. Kosten des Triebwerks sind vom erzeugten Schub beim Start (Take-Off Thrust $T_{T/O}$) abhängig.

$$C_{W,B} \text{ [EUR]} = (C_{W,Zelle,B} + n_T \cdot C_{W,Triebwerk,B}) t_B \cdot n_{F,Jahr} \cdot k_{WK} \cdot k_{Infl} \quad (3.4)$$

$$C_{M,AF,b} \text{ [EUR]} = (175 \frac{USD}{h} + 0,0041 \frac{USD}{h} \cdot m_{OE}) \cdot k_{Infl} \quad (3.5)$$

$$C_{M,E,L,b} \text{ [EUR]} = (0,00029 \frac{USD}{h} \cdot T_{T/O}) \cdot k_{Infl} \quad (3.6)$$

Diese Formeln sind für Triebwerke mit Nebenstromverhältnis von 5:1 ausgelegt [65]. Trotz der höheren Nebenstromverhältnisse die bei moderneren und größeren Flugzeugen gegeben sind, wird aus Gründen der Vereinfachung diese Formel genutzt.

Zur **Entgelte und Gebühren** C_{EG} gehören Flughafenentgelte (Passagier-, Lande- und Startentgelte, Sicherheitsentgelte sowie Abfertigung am Vorfeld) und die Flugsicherungsgebühr gemeint. Die detaillierte Beschreibung den benutzten Entgelten und Gebühren sind in der Anhang XX zu finden.

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 Lohn von 37 EUR für Flugbegleiter und 90 EUR für Piloten pro Blockstunden berechnet [66]. Die Erklärung für die Kosten sind in der Anhang XX zu finden. Die Werte stammen aus Grundgehalt und 75 Blockstunden pro Monat.

$$C_{crew} \text{ [EUR]} = (L_{Pilot} \cdot 2 + L_{crew} \cdot n_{crew}) \cdot t_B \quad (3.7)$$

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

Da keine öffentlich zugänglichen Marktpreise für Luftfahrzeuge mit alternativen Antriebssystemen vorliegen, wird die Kalkulation der Anschaffungskosten für elektrisch betriebene Flugzeuge nach der Methodik von [67] durchgeführt. In der Arbeit wurde das Regressionsmodell anhand einer Marktanalyse für 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 die Inflationsfaktor k_{Infl} und der Wechselkurs k_{WK} ebenfalls betrachtet werden sollen.

$$C_{BA,ac} \text{ [EUR]} = (407408 \cdot n_{PAX} - 2967.4) \cdot k_{WK} \cdot k_{Infl} \quad (3.8)$$

Ein weiterer wichtiger Faktor der kapitalgebundenen Kosten ist die Auslastung U eines Flugzeuges. Es wird durch die Anzahl der verfügbaren Stunden pro Jahr t_{verf} , Blockzeit t_B und Turnaround Zeit t_{TA} berechnet. Die jährliche Verfügbarkeitszeit t_{verf} beträgt für Kurzstreckenflugzeuge 3750 h, während für Mittel- und Langstreckenflugzeuge ein Wert von 4800 h eingesetzt wird [10]. Für die Kurzstrecken-Flugzeuge wurde Turnaround-Zeit ein Wert von 1,5 h genommen (Quelle). Aufgrund der Größe und aufwendigere Abfertigung wird für die Mittelstrecken 2 h ausgewählt.

$$U = \frac{t_{verf}}{t_B + t_{TA}} \quad (3.9)$$

Verzinsungskosten C_{Zins} sind durch den Prozentanteil von Anschaffungskosten bedingt, für diese gelten ca. 5 %. Versicherungskosten sind hingegen von dem Kaufpreis eines Flugzeugs abhängig (inklusive Rabatte beim Kauf), in dieser Arbeit werden ebenfalls 5 % angenommen [10]. Weitere Formeln für kapitalgebundene Kosten sind in dem Anhang XX zu finden.

3.3.2 Infrastrukturkosten

Batterie-Antrieb

Kapitalkosten für BA-Infrastruktur sind in folgender Formel zusammengestellt:

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

$$\begin{aligned} C_{Bat} &= P_{Bat} \cdot n_{Bat} \\ C_{BSS} &= P_{BSS} \cdot n_{BSS} \end{aligned} \quad (3.11)$$

, wobei P_{Bat} der Preis für eine Batterie darstellt und n_{Bat} die Anzahl der Batterien, die benötigt sind. Dazu werden noch die 20 % Reserve-Batterien mitgerechnet, um Einschränkung in den Betrieb zu umgehen. P_{BSS} ist der Preis des Ladegeräts der Batteriewechselstation und n_{BSS} ist der Anzahl an Ladegeräten. Stromkosten werden

hier nicht mitbetrachtet, da die bereits in Betriebskosten pro Flug mitberechnet werden und somit durch Fluggesellschaft gedeckt wird. Für die Berechnung wird die lineare Beschreibung benutzt. Es ist nicht auszuschließen, dass für die richtige Lagerung von Batterien zusätzliche Anlagen, z.B. Lagergebäuden benötigt werden.

Tabelle 3.3: Werte und Annahmen der BA-Infrastruktur

	Werte	Quelle
P_{BSS} [EUR]	11 974	[46]
Abschreibung BSS [Jahre]	10	[44]
P_{Bat} [EUR/kWh]	125000	[46]
Lebenszyklen Bat	5000	[33]
Abschreibung Bat [Jahre]	2,7	

Die Anzahl der Batterien ist von der Gesamtanzahl der Abfertigungen $N_{Abfertigung}$ und Ladezyklen $c_{Batterie}$ einer Batterie abhängig. Zeitgleich der Anzahl der Zyklen, die eine Batterie an einem Tag geladen werden kann, ist von Betriebsstunden des Flughafens und Ladedauer der Batterie abhängig. In der Zukunft ist die Lebensdauer einer Batterie bis 5000 und mehr Zyklen zu erwarten [33], deswegen wurde der Wert von 5000 Zyklen in der Berechnung angenommen. Ladedauer ist von Leistung des Ladungstations und Kapazität einer Batterie. Für die Ladegeräte wurde die konstante Spitzenleistung von 250 kW angenommen [44]. 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 angenommen Batteriekapazität von 900 kWh und Ladegeräten mit der Leistung von 250 kW, entspricht das 3,6 Stunden Ladedauer. Bei einem 18 Stunden-Betrieb entspricht das insgesamt 5 Ladezyklen pro Tag für jede Batterie. Daraus kann abgeleitet werden, dass jede Batterie 1000 Tage überleben bis ihre Leistung bis 80 % sinkt. Die Einbeziehung der Abschreibungswerte unterstützt die dritte Hypothese.

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

Wasserstoff-Antrieb

Für Wasserstoff-Antriebe wird ein oberirdischer Tank für kryogenen flüssigen Wasserstoff LH_2 , eine kryogene Pumpe zum Befüllen und Entleeren des Lagers

kP und ein Tankwagen BW gebraucht (vgl. (3.13)). Die Preise für die Anlage sind in der Tabelle 4.2 zusammengefasst. Benötigter spezifischen Energiebedarf für die Infrastrukturelemente, wie Betankungswagen oder kryogene Pumpe, als auch Wirkungsgrad der Technologien wird dabei nicht betrachtet.

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

Tabelle 3.4: Werte und Annahmen der Wasserstoffinfrastruktur

	Werte	Einheit	Quellen
Preis Lagertank $P_{Lagertank}$	41,9	EUR/kg LH ₂	[48]
Abschreibung Lagertank	20	Jahre	[68]
Volumen Lagertank [m^3]	4 732	m^3	[69]
Preis kryogene Pumpe P_{kP}	250171	EUR/kg/h	[56]
Abschreibung kP	10	Jahre	[68]
Preis Betankungswagen P_{BW}	87848	EUR	[56]
Abschreibung BW	12	Jahre	[56]

Wie bereits im Grundlagen-Kapitel erläutert wurde, hat der kryogene Wasserstoff eine Dichte von ca. 65 kg/m^3 [29], also können 307,58 t in einem kugelförmigen Lagertank gespeichert werden. A wird davon ausgegangen, dass die Vorgänge der Betankung des Wagens und folgende Betankung des Flugzeugs jeweils 30 Minuten dauern [56]. (1 Flugzeug pro Tankwagen, also alles von - Ankunftsrate abhängig)

Außerdem brauchen diese Teile versorgung mit der spannung: Kontrollraum, Wartungseinrichtugen

3.4 Betriebsszenarien

Betriebsszenarien helfen die vorher beschriebenen Betriebs- und Infrastrukturkosten in Anwendung zu bringen und eine mögliche Entwicklung in der nahen 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 werden müssen, wodurch mehr Arbeitskräfte geschult werden müssen.

Deshalb wird für die Betriebsszenarien der Flughafen Frankfurt 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 [70]:

- 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 selben Werte wie bei Langstreckenflügen verwendet, jedoch mit einer anderen Distanz von 4000 Kilometer, dass Treibstoffverbrauch pro Stunde sich nicht ändern wird.

Anhand der zugrundeliegenden Informationen wird eine Flotte mit 580 Flugzeugen aufgestellt, in welcher alternative Antriebe eingesetzt werden. Aufgrund der Flugeschränkungen in der Nacht wird angenommen, dass die Flüge von 6 bis 24 Uhr gleichmäßig stattfinden. 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. Die Mittel- und Langstrecken werden von Flugzeugen mit Wasserstoffturbine und SAF durchgeführt. Durch Betrachtung des tatsächlichen Flugplans sind die Spitzenstunden eines Tages zu ermitteln, bei welchen Verkehrsfluss stärker als im Durchschnitt ist. 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 Aufteilung der Antriebe für jedes Szenario ist in der Abbildung 3.2 dargestellt. In

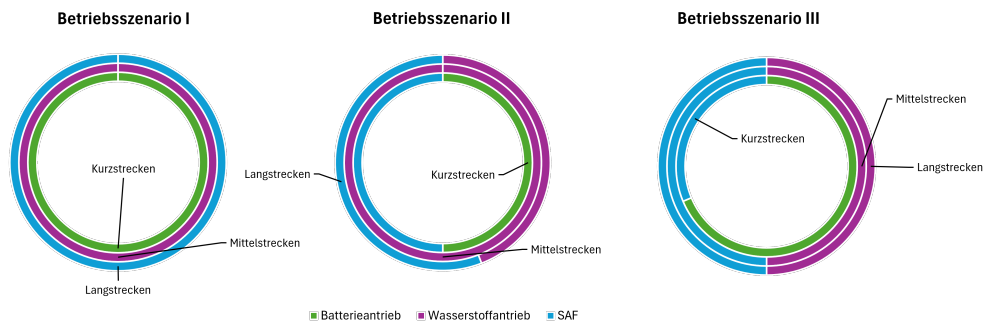


Abbildung 3.2: Aufteilung der Flugzeugflotte nach Antriebsart

dem **ersten Betriebsszenario** wird angenommen, dass:

- Die Kurzstrecken durch den BA komplett ersetzt werden;
- Die Mittelstrecken werden vollkommen durch WA und
- die Langstrecken durch SAF bedient.

Das **zweite Betriebsszenario** wird mit folgender Aufteilung berechnet:

- 50 % der Kurzstrecken wird durch BA und 50 % durch SAF betrieben;
- die Mittelstrecken werden, genau wie im ersten Szenario, komplett durch Wasserstoffflugzeuge betrieben und
- Langstrecken werden zu 10 % der Gesamtflotte durch SAF und der Rest durch Wasserstoff bedient.

Das **dritte Szenario**:

- 50 % der Kurzstrecken werden durch BA, die restlichen 22,8 % mit SAF betrieben
- Mittelstrecken: 50 % der Mittelstrecken werden mit WA und 50 % mit SAF betrieben
- Langstrecken: 50 % der Langstrecken werden mit WA und die 50 % mit SAF betrieben

Daraus ergibt sich die folgende Flottenaufteilung für die einzelnen Szenarien:

Tabelle 3.5: Werte und Annahmen der BA-Infrastruktur

Szenario I			
	Batterieantrieb	Wasserstoffantrieb	SAF
Kurzstrecken	422	-	-
Mittelstrecken	-	54	-
Langstrecken	-	-	104
Szenario II			
Kurzstrecken	211	-	211
Mittelstrecken	-	54	-
Langstrecken	-	46	58
Szenario III			
Kurzstrecken	290	-	132
Mittelstrecken	-	27	27
Langstrecken	-	52	52

4 Auswertung den Ergebnissen und kritische Auseinandersetzung

Anhand vorgeschlagene in dem Teil 3 Methodik wurde in diesem Kapitel den Vergleich zwischen Referenz-Flugzeugen und alternativen Antrieben geschaffen. Außerdem werden aufgestellte Betriebsszenarien ausgewertet, schließlich diskutiert und mit anderen Arbeiten verglichenen, als auch auf die Vorschläge für die anderen Arbeiten eingegangen.

4.1 Vergleich von Referenzflugzeugen und neuen Antrieben

Folgende Erkenntnisse ermöglichen Diskussion der ersten Hypothese. Die Ergebnisse sind nach Flugdistanzen aufgeteilt.

Kurzstreckenvergleich: Batterieantrieb und SAF vs. konventioneller Treibstoff In der Abbildung 4.1 sind die Ergebnisse für batteriebetriebenes ES-19 und konventionelles L410 dargestellt. Der Vergleich wurde für 400 Kilometer Flug gemacht. Die Gesamtbetriebskosten des ES-19 sind ca. 22 % höher des konventionellen L410, wobei der Antrieb mit SAF nur 3,6 % höher Ergebnis liefert. Entgelte und Gebühren bewirken den größten Teil der Betriebskosten aller verglichenen Antrieben, gefolgt von

kapitalbezogenen Kosten. Bei den ersten ist einen signifikanten Unterschied zu konventionellem Antrieb zu sehen, nämlich 56 %, bei den zweiter sind das 36 % höhere Kosten bei BA. Der Anteil der Treibstoff- bzw. Energiekosten ist am niedrigsten im Vergleich zu anderen Kosten und die Treibstoffkosten sind bei konventionellem Flugzeug 30 % höher. Die Treibstoffkosten für SAF sind wesentlich höher (38 %).

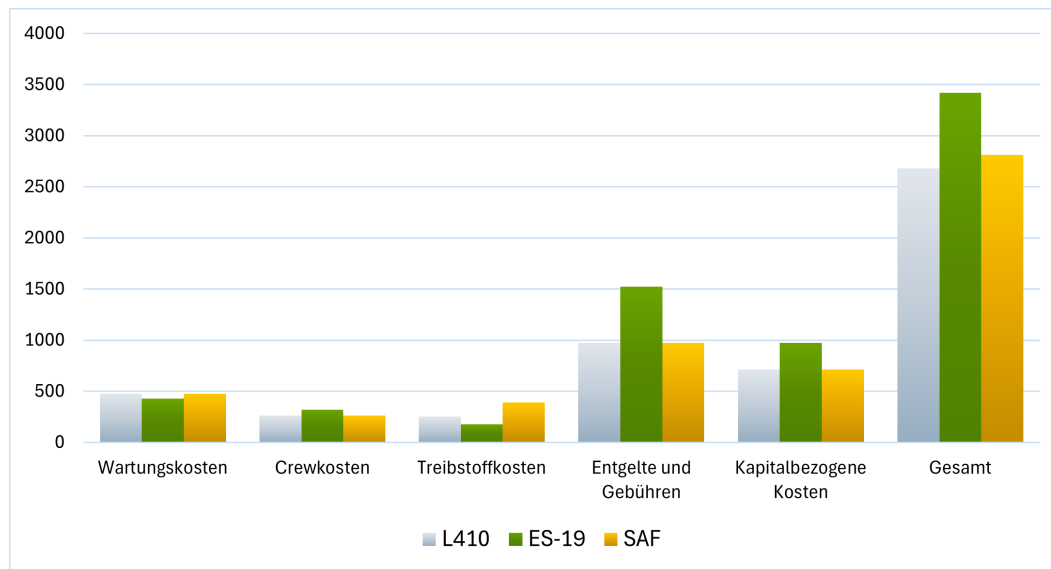


Abbildung 4.1: Vergleich der Referenz und Flugzeug mit der Batterie-Antrieb und SAF

Zu Entgelten und Gebühren bringen die zusätzlichen Abfertigungskosten in der Flughafenentgelte bei, wie Batteriewechsel oder Leasing der Batterie für den Flug. Dieser Wert wird auch in der Sensitivitätsanalyse 4.3 überprüft. Der Einflusswert für kapitalbezogenen Kosten ist der Anschaffungspreis von einem Flugzeug. Dieser Wert wurde als weiterer Parameter für Sensitivitätsanalyse ausgewählt.

Langstreckenvergleich: Wasserstoffantrieb und SAF vs. konventioneller Treibstoff

In den weiteren Abschnitten wird die Gegenüberstellung zwischen den herkömmlichen Treibstoffen, SAF und Flugzeug mit wasserstoffbetriebener Turbine für 6000 Kilometer-Flug durchgeführt. Aufgrund der hohen derzeitigen Wasserstoffpreise wurde zum Vergleich der Wasserstoffmindestpreis von 2,1 *EUR/kg* für den Jahr 2050 herangezogen [64], um die mögliche Entwicklung der Wasserstofftechnologien zu sehen. Das Ergebnis zeigt, dass die SAF- und Wasserstoffbetriebene Flugzeuge höhere Betriebskosten haben (siehe 4.2). Die Betriebskosten für Wasserstoffturbine

fallen 40 % und für SAF etwa 19 % teurer ein. Treibstoff- und kapitalbezogene Kosten haben den größten Einfluss auf die Gesamtkosten, Wartungs- und Crewkosten entgegen den geringsten. Einfluss der Entgelte und Gebühren auf Gesamtkosten ist nicht so groß, wie bei dem kleineren verglichenen Flugzeugen. Der Treibstoffkosten für WA sind fast doppelt so hoch (ca. 197 %) wie für herkömmlichen Triebwerk. Die Entgelte und Gebühren, Crew- und Wartungskosten haben nicht so ein drastischer Unterschied zu konventionellen Antrieb. Werden die Entwicklung zukünftigen Preise für Wasserstoff mitbetrachtet, kann es sogar zu geringeren Treibstoffkosten im Vergleich zu konventionellen Antrieb führen. Die Gesamtbetriebskosten werden jedoch teurer bleiben.

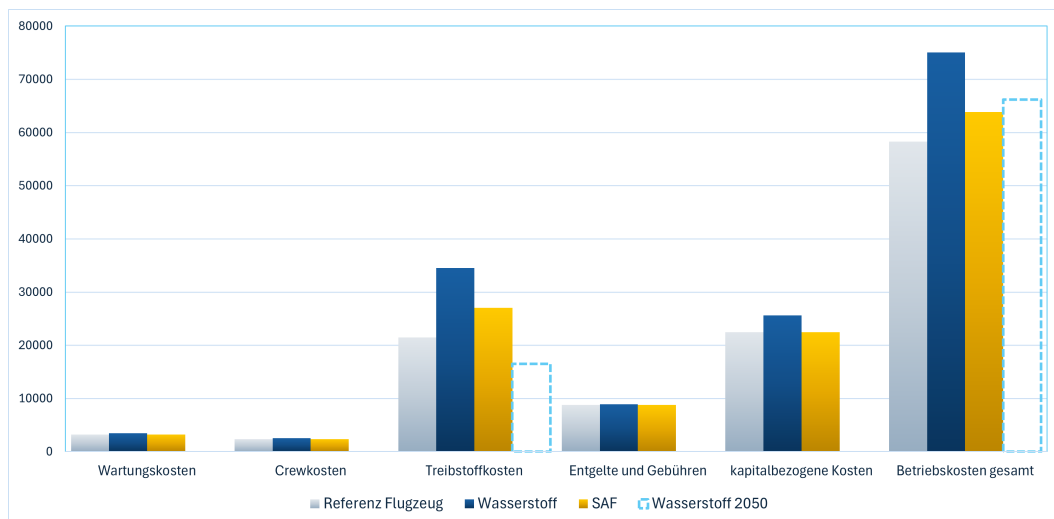


Abbildung 4.2: Vergleich der Referenz und Flugzeug mit der Wasserstoffantrieb und SAF für einen 6000 km Flug

Da die Treibstoffkosten einer der größten Teil in Ergebnissen ausmachen, wird der bedeutsame Parameter Treibstoffpreis für Sensitivitätsanalyse ausgewählt.

Werden Betriebskosten pro Passagierkilometer ausgerechnet und verglichen, haben die großen Flugzeuge geringere Kosten als die kleinen Flugzeuge. Wie auch vorher resultiert wurde, haben hier konventionelle Treibstoffe den Vorteil unter 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. Wobei erstens werden die Betriebskosten unter sich verglichen, zweitens die benötigten Infrastrukturkosten für jedes Szenario und schließlich werden die Szenarien mit der Berücksichtigung beider Aspekte angeschaut.

Betriebskosten

Obwohl der Unterschied zwischen Betriebskosten gleichmäßig ist, hat unter allen Betriebsszenarien das zweite die höchsten Gesamtbetriebskosten (siehe Abb. 4.5). Erstes gegenüber hat die geringsten Kosten. Werden, das zweite Szenario ist 3,5 % teuer als das erste. **Zweites Szenario:** Großteil (58 %) der Kosten entsteht durch wasserstoffbetriebene-Flugzeuge. Weitere 36 % verursacht den SAF. **Erstes Szenario** hat der niedrigste Betriebswert von allen drei. Die Kosten des ersten Szenarios teilen sich folgend aus. Betrieb mit der SAF verursacht in diesem Szenario die meisten Kosten. Etwa ein Drittel der Kosten sind von dem Betrieb mit Wasserstoff verbunden. Das **dritte Szenario** hat 1 % geringere Kosten als das zweite. Erkennbar ist auch, dass die Betriebskosten, die durch Batterieantrieb verursacht am geringsten unter allen Szenarien sind.

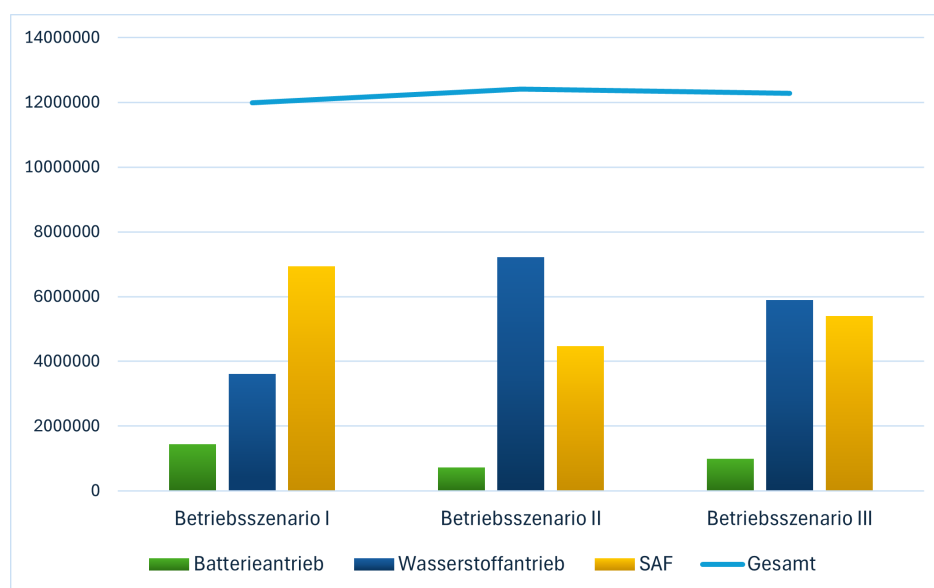


Abbildung 4.3: Betriebskosten in Abhängigkeit von Szenarien mit Gesamtkostentrend

Infrastrukturkosten

In der Tabelle 4.1 sind die benötigten Infrastrukturanschaffungswerte für jedes Szenario zusammengefasst. Nennenswert ist, dass in der Berechnung von allen

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

Betriebsszenarien erstmal nur einmalige Infrastrukturausgaben ohne jährliche Abschreibungen ausgerechnet sind (siehe Abb. 4.5). Das erste Szenario hat die kleinsten Ausgaben, wobei das zweite Szenario gegenüber die größte und ist 27 % höher als das erste. Die Gesamtkosten für das zweite Szenario liegen über 35 Tausend Euro. Bei erstem Szenario ist die Aufteilung den Preisen für Batterieinfrastruktur und Wasserstoffinfrastruktur fast die gleichen Anteile hat. Wird

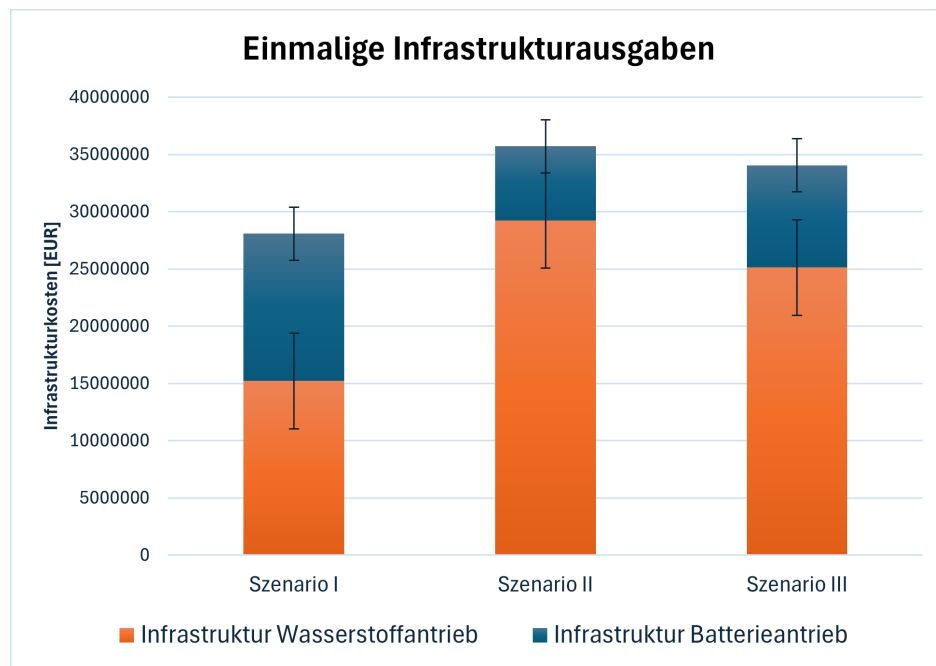


Abbildung 4.4: Vergleich der einmaligen Infrastrukturausgaben zwischen den Betriebsszenarien

die lineare jährliche Abschreibung mitbetrachtet, sehen die Ergebnisse anders aus. Diese Erkenntnisse stützen die dritte Hypothese weiter. Die erheblichsten Kosten entstehen im ersten Szenario, wobei bei einmaligen Ausgaben dieses Szenario

bringt das beste Ergebnis. Die geringsten jährlichen Abschreibungskosten würde das zweite Szenario liefern, obwohl bei einmaligen Ausgaben dieses Szenario die größten Werte hat. Demnach die ungünstige Wahl der Abschreibungsverteilung kann die anfangs günstigere Ausgaben, bei der Abschreibung höher als vergleich zu anderen Szenarien machen und somit wurde die dritte Hypothese bewiesen.

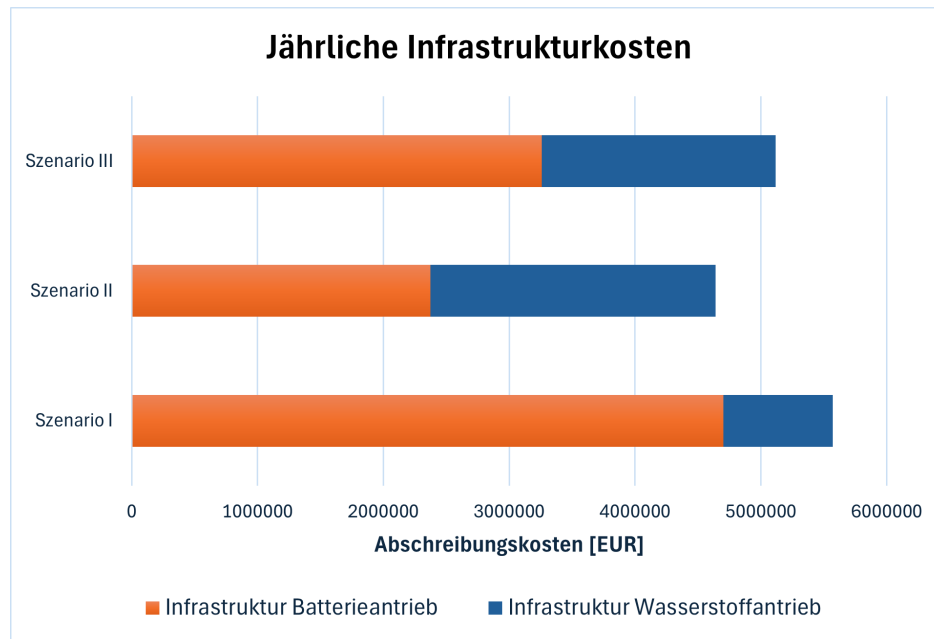


Abbildung 4.5: Vergleich der jährlichen Infrastrukturausgaben zwischen den Betriebsszenarien

4.3 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse ermöglicht die Robustheit einer Berechnung zu überprüfen und die Parameter mit größtem Einfluss herauszufinden. Dafür wurde die Teilkosten aus dem 4.1 ausgesucht, die größter Einfluss auf die Gesamtkosten haben. Bei dem Vergleich von Batterie, SAF und herkömmlichen Treibstoff sind die Entgelte und Gebühren, als auch kapitalbezogene Kosten.

Dafür wurden folgende Parametern für BA ausgesucht: 1. der Preis für Leasing einer Batterie, 2. Anschaffungspreis für das Flugzeug. Der erste Wert kann je nach Leistung der Batterie und Häufigkeit der Nutzung unterschiedlich ausfallen, deswegen wäre es wichtig anzuschauen, welcher Unterschied im Betriebskosten entsteht, wenn der

Preis für Leasing 10 % teurer wäre. Die Preise für neue Flugzeugantriebe werden durch die steigende Nachfrage mit der Zeit sinken, aus diesem Grund wurde der 10 % Rückgang den Anschaffungspreisen angeschaut.

Werden Entgelte um 10 % erhöht, erhöhen sich die Betriebskosten moderat ($S = 0,15$), auch der Senkung den Anschaffungspreisen um 10 % nicht so einen großen Einfluss auf das Gesamtsystem hat ($S = 0,28$).

Beim Vergleich von Wasserstoffbetrieben und SAF mit konventionellem Antrieb entsteht der größte Kostenanteil von Treibstoffkosten. Deswegen wurde der Parameter "Treibstoffpreis" für Sensitivitätsanalyse ausgewählt. Der Preis für alternative Antriebe und Treibstoffe soll in der Zukunft sinken und Preis für herkömmlichen Treibstoffen aufgrund Wachstum von Ölpreisen wachsen. Zudem wird ein Wert von 10 % zugrunde gelegt.

Tabelle 4.2: Sensitivitätsanalyse: Unterschied der Betriebskosten vom Parameter Treibstoffpreis

Antriebe	Referenz	Wasserstoff	SAF
Ausgang <i>EUR</i>	56340,3	78853,1	66853,5
Preis Szenario (+/- 10 %)	58290,4	75020,3	63852,1
Abweichung %	3,5	-4,9	-4,5
S	0,35	0,49	0,45

Der Wasserstoffantrieb reagiert 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 die neuartigen Antriebe höhere Betriebskosten für eine Fluggesellschaft bringen 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 am technischen Anforderungen und neuen zusätzlichen Abfertigungsprozessen, die mit neuartigen Kraftstoffen dazukommen. Avogadro et al.[45] kommt zu gleichem Ergebnis, dass in der näheren Zukunft batteriebetriebene Flugzeuge höhere Betriebskosten aufweisen werden. Und Marksel et al. [60] in ihrem Vergleich von konventionellem Flugzeug und Wasserstoffbrennzelle, geht davon aus, dass die Betriebskosten sogar unter dem marktüblichen Kerosinjets vordringen werden. Jedoch die nächsten 10 Jahre ist das nicht zu erwarten. Die Entwicklung von Ölpreisen sind hier von der Bedeutung, da dadurch die Attraktivität der neuen Technologien beeinflusst werden kann. Die höheren Kosten für elektrische Flugzeuge sind vor allem von Anschaffungspreise für die Flugzeuge abhängig. Die Sensitivitätsanalyse zu diesem Parameter zeigte, dass das Modell den Änderungen gegenüber robust reagiert. In der Arbeit wurde der Konzept des Batterie-Leasing am Flughafen vorgeschlagen. Unter realen Bedingungen ist es möglich, dass die Batteriemodule bei Anschaffung der Flugzeugen mitbesorgt werden müssen, was endlich die Antriebskosten der Fluggesellschaften steigern können.

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

Wobei die größeren Fluggesellschaften sich eine heterogene Flotte aussuchen werden, werden Low-Cost-Carrier eher eine homogene zusammenstellen. Somit je nach Strategie werden sich die Kosten verschieben. Werden die Betriebskosten zusammen mit Infrastrukturkosten für jedes Szenario angeschaut, fällt auf, dass die Infrastrukturkosten sich proportional zu Betriebskosten verhalten. Für die beiden hat das zweite Szenario die höchsten Kosten und das erste die geringsten. Die Betriebskosten unterscheiden sich prozentual um 3,5 %, während die Infrastrukturkosten um 27 % höher ausfallen. Obwohl kein direkter Zusammenhang zwischen Betriebskosten und Infrastrukturkosten besteht, kann die Auswahl der eingesetzten Technologien seitens der Flughafenbetreiber einen Einfluss darauf haben, welche Antriebsarten von Fluggesellschaften gewählt werden. Somit wurde sich die

zweite Hypothese widerlegt. Die Batterieantriebe verursachen zwar in der Szenarien die geringsten Kosten. Jedoch darf es nicht vergessen werden, dass die Batterien eingeschränkte Reichweite haben, als auch ungenügende Sitzangebot und damit können nicht vollständig die Nachfrage von Kurzstrecken decken.

Betriebsszenarien - Infrastrukturkosten

Wie bereits in den Ergebnissen ausgewertet wurde, sind bei zweitem Szenario die größten einmaligen Infrastrukturkosten zu erwarten. Das liegt daran, dass dieses Szenario die größten Anschaffungseinheiten für den Wasserstoffantrieb haben. Das erste Szenario liefert hingegen das kleinste Ergebnis, dabei ist die Kostenverteilung zwischen BA und WA ist etwa gleich groß. Wird die lineare Abschreibung zusätzlich betrachtet, ist eine Differenz in der Ergebnissen zu sehen. Die jährlichen Abschreibungskosten sind in dem ersten Szenario am höchsten und hingegen zu Gesamtinfrasturkturkosten bringt hier das zweite die geringsten jährlichen Infrastrukturkosten. Das ist bedingt durch ungünstige für erstes Szenario Abschreibungsstruktur. In diesem Fall soll beobachtet werden, ob die andere Abschreibungsmethode optimaler werden. Folglich ist weitere Hypothese, dass 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, hat sich bewiesen.

Beschränkungen der Forschung

Trotz der Ergebnisse unterliegt diese Arbeit einigen Beschränkungen. Die Arbeit hat sich nur auf Betriebskosten der Fluggesellschaften und Anschaffungskosten für die Infrastruktur, jedoch nicht auf die Betriebskosten der Infrastruktur. Außerdem sind am Flughafen viele andere Stakeholder beschäftigt, vor allem welche Herausforderungen bei Bodendienstleister dazu kommen werden.

Die Komplexität des realen Systems und Technologien wurde durch die vereinfachte Annahmen reduziert, um eine fokussierte Analyse zu ermöglichen. Wegen fehlender Daten in der technologischen Entwicklungen von neuen Antrieben wurden einige Annahmen. Zudem wurde die Arbeit in begrenzter Untersuchungszeitraum stattgefunden, wodurch manche Variablen vernachlässigt werden mussten. Angesichts der Mangel an relevanten Daten war es unmöglich die Ausbildungskosten bei der

Einführung den neuen Antrieben zu berechnen. Es lässt sich eindeutig feststellen, dass da eine Forschungslücke vorhanden ist, welche noch erkundet werden muss. Trotz einer gesendeten Anfrage zu dem Thema an ein bedeutendes Unternehmen blieb eine Antwort bislang aus.

Die Ausrechnung der Kosten wurde nur mit der Betracht den Passagieren und der Fracht außer Acht gelassen hat.

Vorschläge für eventuelle weiterführende Forschungen Um die Ergebnisse zu vertiefen und die Arbeit detaillierter zu erforschen, können die Kosten für jede Entfernung berechnet werden. Das ermöglicht die Berechnungen auf die tatsächliche Flotte rübergetragen und Preisanstiege je Entfernung rauszusuchen. Als anderes Aspekt für die Vertiefung wäre interessant anzuschauen, welche konkrete Unterschiede in Emissionen durch alternative Antriebe entstehen, welcher Unterschied sich in Flughafen-Entgelten bildet und welche Kosten dadurch für Luftfahrzeugbetreibern ergeben. Vor allem durch möglich zukünftige politische Entscheidung.

5 Fazit

Die innovative Antriebe und Kraftstoffe, wie SAF, Wasserstoff und Batterieantrieb, schlagen Verkleinerung der Auswirkungen von Luftverkehr auf die Umwelt. Die Wirtschaftlichkeit von denen ist jedoch diskussionswürdig. Diese Arbeit hat sich mit dem Thema Implementierung den neuartigen Antrieben am Flughafen auseinandergesetzt. Dabei wurden anhand der Recherche sowohl die Antriebe als auch die Infrastruktur und Versorgungswege untersucht. Schließlich wurden die erwarteten Betriebskosten für Fluggesellschaften, als auch Kapitalkosten für die Flughäfen berechnet.

Die Betriebskosten werden zwar bei alternativen Antrieben im Vergleich zu traditionellen Jets steigen, jedoch mit den Vorteilen, die sie im Umweltauswirkungen bringen, müssen die preislichen Anstiege in Kauf genommen werden. Zudem wurden die Betriebskosten und Infrastrukturkosten anhand drei Szenarien berechnet. Die Infrastrukturkosten am Flughafen drehte sich um Swap-Methode für Batterieantriebe und Nutzung von kryogenen flüssigem Wasserstoff. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass größere Nutzung von Wasserstoff-Antrieben zu größere Infrastrukturkosten führen kann. Jedoch die Nutzung der Abschreibungsmethode ein Unterschied zwischen Szenarien ausmacht. Dies beantwortet die eingangs gestellte Forschungsfrage, welcher Einfluss von der Einführung ausgeht.

Diese Arbeit bietet eine Übersicht zu wirtschaftlichen Zusammenhängen mit Bezug auf neuen Antriebsverfahren. Um das Potenzial von neuen Technologien jedoch vollständig auszuschöpfen, müssen weitere Untersuchungen mit den tiefen Ausblicken in Infrastruktur, Ausbildung und Technologien am 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), S. 173359.
- [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] D. Schaar und L. Sherry. „Analysis of airport stakeholders“. In: *2010 Integrated Communications, Navigation, and Surveillance Conference Proceedings*. IEEE. 2010, J4–1.
- [7] H. Mensen. *Handbuch der Luftfahrt*. Springer-Verlag, 2013.
- [8] 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.
- [9] Airbus. *Airbus A321 Aircraft Characteristics: Airport and Maintenance Planning*. Revision 1. Original Issue: September 30, 1992. März 2022.

- [10] D. Scholz. *Aircraft Design / DOC*. Lecture Notes, Hamburg University of Applied Sciences (HAW Hamburg). Zugriff am 5. Januar, 2025. 2015.
- [11] International Air Transport Association (IATA). *Industry Statistics*. Report. Updated: June 2024. Juni 2024.
- [12] 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.
- [13] B. für Raumentwicklung und B.-B. für Zivilluftfahrt. „Infrastrukturkosten Luftverkehr“. In: *Ergebnisse Pilotrechnung. Schlussbericht*. Zürich (2003).
- [14] A. Wittmer, T. Bieger und R. Müller. *Aviation systems: management of the integrated aviation value chain*. Springer, 2011.
- [15] B. u. S. Wissenschaftlicher Beirat beim Bundesministerium für Verkehr. *Handlungsbedarf für Planung und Nutzung der Flughafeninfrastruktur in Deutschland*. 2011.
- [16] Umweltbundesamt. *Aviation in the EU ETS and CORSIA in the Fit for 55 package – Factsheet*. Zugriff am 23. Dezember 2024. Sep. 2023.
- [17] P. J. Ansell. „Review of sustainable energy carriers for aviation: Benefits, challenges, and future viability“. In: *Progress in Aerospace Sciences* 141 (2023), S. 100919.
- [18] International Air Transport Association (IATA). *IATA SAF Handbook*. Zugriff am 27. Dezember 2024. 2024.
- [19] 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>.
- [20] 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.
- [21] 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>.

-
- [22] International Air Transport Association (IATA). *IATA Press Release – 10 December 2024*. Zugang am 17. Februar 2025. 2024.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] C. Sky u. a. „Hydrogen-powered aviation: a fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050“. In: (2020).
- [26] 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), S. 111564.
- [27] M. Hepperle. „Electric flight-potential and limitations“. In: (2012).
- [28] S. Donckers, K. Stamoulis und A. Apostolidis. „Electric flight operations for interisland mobility“. In: *Journal of Physics: Conference Series*. Bd. 2716. 1. IOP Publishing. 2024, S. 012009.
- [29] C. O. Colpan und A. Kovač. *Fuel Cell and Hydrogen Technologies in Aviation*. Springer, 2022.
- [30] T. Dalmia u. a. „Powering the Future of Electric Aviation“. In: (2022).
- [31] I. Abrantes u. a. „The impact of revolutionary aircraft designs on global aviation emissions“. In: *Renewable Energy* 223 (2024), S. 119937.
- [32] S. Shahid und M. Agelin-Chaab. „A review of thermal runaway prevention and mitigation strategies for lithium-ion batteries“. In: *Energy Conversion and Management: X* 16 (2022), S. 100310.
- [33] J. O. Reimers. „Introduction of electric aviation in Norway“. In: *Green Future: Norway* (2018).
- [34] M. Mulder, P. L. Perey und J. L. Moraga. „Outlook for a Dutch hydrogen market: economic conditions and scenarios“. In: (2019).
- [35] H. Eichlseder und M. Klell. „Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Erzeugung, Speicherung, Anwendung“. In: (2012).

- [36] 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.
- [37] B. Khandelwal u. a. „Hydrogen powered aircraft: The future of air transport“. In: *Progress in Aerospace Sciences* 60 (2013), S. 45–59.
- [38] P. Aircraft. *Velis Electro*. Zugriff am 10. Februar, 2025.
- [39] B. Luftfahrt. *CE-Liner: A Concept for Universally Electric Air Transport*. Zugriff am 9. Februar, 2025. 2011.
- [40] Embraer S.A. *Embraer presents the Energia Family – Four New Aircraft Concepts Using Renewable Energy Propulsion Technologies*. Zugriff am 03. Januar 2025. 2021.
- [41] Airbus. *Airbus unveils Zero-Emission Aircraft (ZEA) concepts*. Online PDF. Zugriff am 16. Januar, 2025. 2020.
- [42] 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/>.
- [43] NASA Glenn Research Center. *N3-X Airplane Concept*. Zugriff am 9. Februar, 2025.
- [44] 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.
- [45] N. Avogadro und R. Redondi. „Demystifying electric aircraft’s role in aviation decarbonization: Are first-generation electric aircraft cost-effective?“ In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 130 (2024), S. 104191.
- [46] Z. Guo u. a. „Aviation to grid: Airport charging infrastructure for electric aircraft“. In: *International Conference on Applied Energy*. 2020.
- [47] C. H. J. Undertaking. „Strategic research and innovation agenda 2021–2027“. In: *Agenda 2021* (2022), S. 179.
- [48] F. Schenke u. a. „LH2 supply for the initial development phase of H2-powered aviation“. In: *Energy Conversion and Management: X* 24 (2024).
- [49] Y. Gu u. a. „Hydrogen-Powered Aircraft at Airports: A Review of the Infrastructure Requirements and Planning Challenges“. In: *Sustainability* 15.21 (2023), S. 15539.

-
- [50] LET Aircraft Industries. *L 410 UVP-E20 Brochure*. Zugriff am 2. Februar, 2025. 2016.
- [51] EUROCONTROL. *Aircraft Performance Database: Airbus A321*. Zugriff am 14. Januar, 2025. URL: <https://contentzone.eurocontrol.int/aircraftperformance/details.aspx?ICAO=A321>.
- [52] 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).
- [53] 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/>.
- [54] P. B. Wangsness u. a. „Fremskyndet innfasing av elfly i Norge: mulige“. In: *Environmental and Resource Economics* 37.1 (2021), S. 181–210.
- [55] Aerospace Technology Institute (ATI). *Airports, Airlines, Airspace Operations and Hydrogen Infrastructure*. Techn. Ber. Zugriff am 16. Januar, 2025. Aerospace Technology Institute (ATI), März 2022.
- [56] J. Hoelzen u. a. „H₂-powered aviation at airports–Design and economics of LH₂ refueling systems“. In: *Energy Conversion and Management: X* 14 (2022).
- [57] D. Fonseca. *Direct Operating Costs, Fuel Consumption, and Cabin Layout of the Airbus A321LR*. Zugriff am 03. Februar, 2025. Feb. 2022.
- [58] 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>.
- [59] Airbus. *A321neo*. Zugriff am 03. Februar, 2025. URL: <https://aircraft.airbus.com/en/aircraft/a320-family/a321neo>.
- [60] 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.
- [61] AeroTELEGRAPH. *Die Listenpreise 2018 von Airbus*. Zugriff am 14. Januar, 2025. 2018. URL: <https://www.aerotelegraph.com/die-listenpreise-2018-von-airbus>.

- [62] 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.
- [63] M. Watson u. a. „Sustainable aviation fuel technologies, costs, emissions, policies, and markets: a critical review“. In: *Journal of Cleaner Production* 449 (2024).
- [64] 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.
- [65] N. Brüge und F. Kranich. „Wartungskosten von Passagierflugzeugen bei verschiedener Triebwerksanzahl berechnet nach DOC-Methoden“. In: (2018).
- [66] 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.
- [67] 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.
- [68] J. Hoelzen u. a. „H₂-powered aviation–Design and economics of green LH₂ supply for airports“. In: *Energy Conversion and Management: X* 20 (2023).
- [69] 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.
- [70] A. Fraport. „Frankfurt Airport Luftverkehrsstatistik 2023“. In: *Frankfurt am Main* (2024).
- [71] L. Martinez-Valencia, M. Garcia-Perez und M. P. Wolcott. „Supply chain configuration of sustainable aviation fuel: Review, challenges, and pathways for including environmental and social benefits“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 152 (2021), S. 111680.
- [72] M. A. Camilleri und M. A. Camilleri. *Aircraft operating costs and profitability*. Springer, 2018.
- [73] International Air Transport Association (IATA). *SAF Procurement: Pricing Options for Different Strategies*. Zugriff am 28. Dezember 2024. 2024.

- [74] K. Goodge und P. Withey. „An Analysis of Direct Operating Costs for the Wright Spirit Electric Aircraft“. In: *Aerospace* 11.12 (2024), S. 1007.
- [75] R. H. Liebeck u. a. *Advanced subsonic airplane design and economic studies*. Techn. Ber. 1995.
- [76] D. F. GmbH. *Flugsicherungsgebühren*. Zugriff am 11. Januar 2025.
- [77] International Energy Agency (IEA). *Fossil jet and biojet fuel production cost ranges (2010-2030)*. Zugriff am 03. Januar 2025. 2021.
- [78] European Central Bank (ECB). *Euro Reference Exchange Rate: USD*. Online Resource. Zugriff am 14. Januar 2025.
- [79] 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.
- [80] Fraport AG. *Flughafenentgelte nach § 19b LuftVG: Entgelte für Zentrale Bodenverkehrsdiens Infrastruktureinrichtungen (gültig ab 01. Januar 2025)*. Zugriff am 17. Januar 2025. Jan. 2025.
- [81] Z. Guo u. a. „Infrastructure planning for airport microgrid integrated with electric aircraft and parking lot electric vehicles“. In: *Etransportation* 17 (2023), S. 100257.