



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 technische Anforderung und neue zusätzliche 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	Betrieb-, Infrastruktur- und Ausbildungskosten	6
2.2.1	Betriebskosten einer Fluggesellschaft	6
2.2.2	Infrastrukturkosten	8
2.2.3	Ausbildungskosten	9
2.2.4	Klimapolitische Maßnahmen	10
2.3	Neuartige Antriebe	11
2.3.1	Sustainable Aviation Fuel (SAF)	11
2.3.2	Batterie-Antrieb	13
2.3.3	Wasserstoff-Antrieb	15
3	Änderungen durch neue Antriebe, Annahmen und Methodik	19
3.1	Änderungen an der Abfertigung und dazugehörige Kosten von alternativen Antrieben	19
3.1.1	SAF	19
3.1.2	Batterie-Antrieb	20
3.1.3	Wasserstoff	21
3.2	Flugzeuge und Annahmen	25
3.2.1	Verglichene Flugzeuge und relevante Flugzeugdaten	25
3.2.2	Allgemeine Annahmen	27
3.3	Aufstellung der Formeln für Kosten	27
3.3.1	Betriebskosten einer Fluggesellschaft	28
3.3.2	Infrastrukturkosten	31

3.4	Betriebsszenarien	33
4	Auswertung den Ergebnissen und kritische Auseinandersetzung . . .	37
4.1	Ergebnisse des Gegenüberstellens von Referenzflugzeugen und neuartigen Antriebsansätzen	37
4.2	Ergebnisse der Betriebsszenarien	39
4.3	Sensitivitätsanalyse	42
4.4	Bewertung der Ergebnisse	42

1 Motivation

Laut Verordnung (EU) 2021 soll die EU zum Jahr 2050 klimaneutral sein und bereits zum Jahr 2030 sollen die Treibhauseffekte um mindestens 55% im Vergleich zum Jahr 1990 reduziert werden. Im Jahr 2023 ermittelte Umweltbundesamt, dass die Treibhausgase im Vergleich zum Vorjahr um mehr als zehn Prozent gesunken sind. Nichtsdestotrotz wurden allein in Deutschland im Jahr 2023 673 Mio. Tonnen Treibhausgase freigesetzt [1]. CO₂-Emissionen haben die Auswirkungen auf die Umwelt und sind eine Ursache für den Klimawandel. Luftverkehr hat auch seine Rolle in diesen Einfluss. Etwa 2,5 % von ganzen anthropogenen CO₂-Emissionen weltweit werden vom Luftverkehr durch die Treibstoffverbrennung verursacht [2].

Ob nachhaltige Alternativen die Emissionswerte mindern oder vermeiden können, ist derzeit ein begehrtes Thema.

Neben dem Kohlendioxid CO₂ und Wasserstoff H₂O entstehen bei der Verbrennung des Treibstoffs andere Nebenprodukte, die das Klima beeinflussen, wie Stickoxide NO_x, die für Ozonbildung in der Stratosphäre verantwortlich sind [2].

Diese Arbeit widmet sich dem Thema nachhaltige Antriebe, nämlich im Fokus stehen nachhaltige Kraftstoffe (SAF), Wassertreibstoff und batterieelektrische Antriebe. Durch die neuartigen Konfigurationen und alternative Kraftstoffe und Antriebe existiert die Möglichkeit die unnötigen Emissionen zu vermeiden. Innovative Antriebe, wie Batterie, Wassertreibstoff oder Sustainable Aviation Fuel (SAF), versprechen unter nachhaltiger Produktion und Logistik geringere Einfluss auf die Umwelt und somit die Reduktion der Emissionen.

Eine zusammenfassende Berechnung der Kosten für die alle drei Alternativen durch die Einführung dieser Antriebe und den Betrieb entstehen, wurde bislang noch

nicht systematisch untersucht. In der wissenschaftlichen Arbeiten sind die bereits getrennte Kostenberechnungen für die einzelne Alternative, meistens für elektrische oder wasserstoffbetriebene Flugzeuge, zu finden. Die Interesse für das Thema im Vergleich zu ... deutlich gestiegen. Neue Erkenntnisse und Vorschläge.

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

Dieses Thema ist für die Praxis relevant, weil alle Fluggesellschaften bestimmten Kriterien unterliegen. Geprägt von strengeren und wachsenden Maßnahmen in Bezug auf die Treibhausgase, brauchen die Betriebsunternehmen neue Technologien, um die höhere CO₂-Emissionen und damit verbundene höheren Kosten zu vermeiden. Es soll untersucht werden, ob die nachhaltigen Antriebe eine Möglichkeit haben kostengünstig im Markt zu gelangen und Wettbewerb durchstehen oder sogar als Ersatz für die konventionellen Kraftstoffe, wie Kerosin, dienen können.

Im Rahmen dieser Studienarbeit werden folgende Themen berührt: Kapitel 2 stellt die relevanten Grundlagen zur weiteren Forschung dar, wie Stakeholder am Flughafen und deren Teil an der Abfertigung eines Flugzeugs, die Betriebskosten, gesetzliche Einflüsse auf der Luftverkehr sowie die zukünftigen Flugzeugkonfigurationen mit neuer Antriebstechnologien. Darauf aufbauend werden im Kapitel 3 die Methodik für die Kostenberechnung und betriebliche Szenarien für einen Flughafen definiert, als auch die getroffenen Annahmen erörtert. Kapitel 4 begeht sich um die Auswertung der Kostenanalyse für den Betrieb und aufgestellten Betriebsszenarien, dazugehörige Sensitivitätsanalyse und kritische Auseinandersetzung mit den Ergebnissen. Zusätzlich werden in diesem Kapitel die aufgestellten Hypothesen diskutiert. Kapitel ?? enthält eine abschließende Zusammenfassung und erdenkliche Richtung für die weiterführende Forschungsarbeiten. Im Anhang sind die zusätzliche Information 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 ?? stellt die Grundlagen der Flugzeugabfertigung und die beteiligten Stakeholder am Flughafen dar. Zunächst beschäftigt sich das Kapitel 2.2 mit den bedeutenden Informationen zu Kosten am Flughafen und Emission-Regulierungsinitiativen. Anschließend werden im Teil 2.3 die neuartigen alternativen Antriebe und dadurch betriebene Konzepte und Flugzeugmodelle vorgestellt.

2.1 Stakeholder am Flughafen

Am Flughafen ist eine Vielzahl an Stakeholdern beschäftigt, die miteinander agieren. Durch die neuen Luftfahrzeugantriebe steht diesen Akteuren eine schwierige Aufgabe vor. Gute Zusammenarbeit der Akteure/Stakeholdern fördert die Pünktlichkeit der Abfertigung und hilft die Verspätungen zu vermeiden [3].

Flughafen

Einer der Stakeholder am Flughafen ist der Flughafenbetreiber selbst. Der Flughafen stellt der Fluggerät- und Passagierabfertigung Infrastruktur wie bspw. Terminals

oder Start- und Landebahnen zur Verfügung (das gilt als Kernfunktion), wofür Nutzungsgebühren erhoben werden [2].

Zum Flughafen gehören außer Start- und Landebahnen unter anderem Rollwege, Vorfeld, Flugsteige, sowie die Infrastruktur für die Gepäckabfertigung. Darüber hinaus stellen Flughäfen eine intermodale Verknüpfung dar [2]. Direkte Nutzer von Flughäfen sind die Im- und Exporteure von Dienstleistungen und Waren [4].

Flughäfen sind ein großer Teil der regionalen Wirtschaft [4] und sorgen für eine Vielzahl an Arbeitsstellen. Dennoch verursachen sie ein Ausmaß an Lärm und Umweltbelastungen, die durch die Emissionen der Flugzeuge entstehen. Demnach verlangt der Flughafen hierfür ebenfalls Entgelte.

Für die Entwicklung der Infrastruktur und Begleichung der Betriebskosten müssen Flughäfen gelegentlich finanzielle Unterstützung aus anderen Quellen, wie staatliche Subventionen, in Anspruch nehmen [4]. 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. Und die kleineren Flughäfen durch weniger Betrieb mehr auf die Hilfe angewiesen. 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.¹ Ein Hub ausmacht ein großer Flughafen mit mächtigem Anteil an Umsteigeverkehr.

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 [4]. Die

¹Die Daten stammen aus dem Statistischem Bericht, "Luftverkehr auf Hauptverkehrsflughäfen 2023"

Erträge unterscheiden sich sowohl je nach Flughafengröße und -strategie, als auch von dem Flugzeugtyp.

Bodenverkehrsdienste

Bodenverkehrsdienste sind für die Abfertigung der Flugzeuge auf dem Boden zuständig. Nach Conrady [2] gehört zu ihren Tätigkeiten außerdem: die Fluggastabfertigung, administrative Abfertigung sowie Transportdienste. Sie sind auf Infrastruktureinrichtungen wie Gepäckförderanlagen und Betankungsanlagen 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 [5].

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

Zu den Systempartnern (Stakeholdern) am Flughafen zählen ebenfalls Luftfahrzeughersteller, Flugsicherungen, Reiseveranstaltern, staatliche Institutionen [6], sowie Beteiligte wie Passagiere, Arbeitskräfte und Passagierdienstleister. Sie nehmen nicht direkt an der Flugzeugabfertigung bzw. an Betrieb am Vorfeld teil, deswegen werden sie außerhalb des Fokus dieser Arbeit bleiben. 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 Betrieb-, Infrastruktur- und Ausbildungskosten

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

2.2.1 Betriebskosten einer Fluggesellschaft

Die Betriebskosten bei einer Flugzeugabfertigung werden auf Direct Operating Costs (*DOC*), und Indirect Operating Costs (*IOC*) geteilt, die werden auch Einzel- und Gemeinkosten genannt [2]. Nach Mensen [5] können *DOC* einem bestimmten Flugzeug oder einer Strecke zugeordnet werden und können normalerweise als *DOC* pro Flugstunde, pro Kilometer, pro Passagierkilometer oder pro Blockstunde berechnet werden. Wobei *IOC* sind nicht direkt einem Flug zugewiesen, sondern für den gesamten Betrieb anfallen, wie z.B. zeitabhängige Instandhaltungskosten, Verwaltungskosten, Infrastrukturkosten. Nach der Beschäftigungsabhängigkeit werden die Kosten auf fixe und variable Kosten aufgeteilt. Fixe Kosten sind unabhängig von dem Betrieb (z.B. Kapitalkosten, Versicherung, Personalkosten), wo hingegen die variablen Kosten sich von der Beschäftigung ändern. Die Kostenstruktur einer Fluggesellschaft kann mit der Abbildung 2.1 veranschaulicht werden.

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 für CO₂-Reduktion können einen Anreiz oder sogar eine Verpflichtung für die Fluggesellschaften schaffen, um die beste Lösung für eine Flotte zu finden. Mehr um politische Anreize gibt es im folgenden Unterkapitel 2.2.4. Es gibt verschiedene bereits vorgestellte Formeln für die Berechnung der *DOC* [7]. Die meisten schließen die gleichen Kosten ein, unterscheiden sich jedoch mit Rechnungsweise für einzelne Kosten.

Mitberechnet werden Treibstoffkosten, Crewkosten, Wartungskosten, kapitalbezogene Kosten.

Treibstoffkosten sind ein erheblicher Teil der Betriebskosten. In den USA ein Drittel von allen Gesamtkosten (*TOC*) aller Fluggesellschaften sind die Kosten für Treibstoff

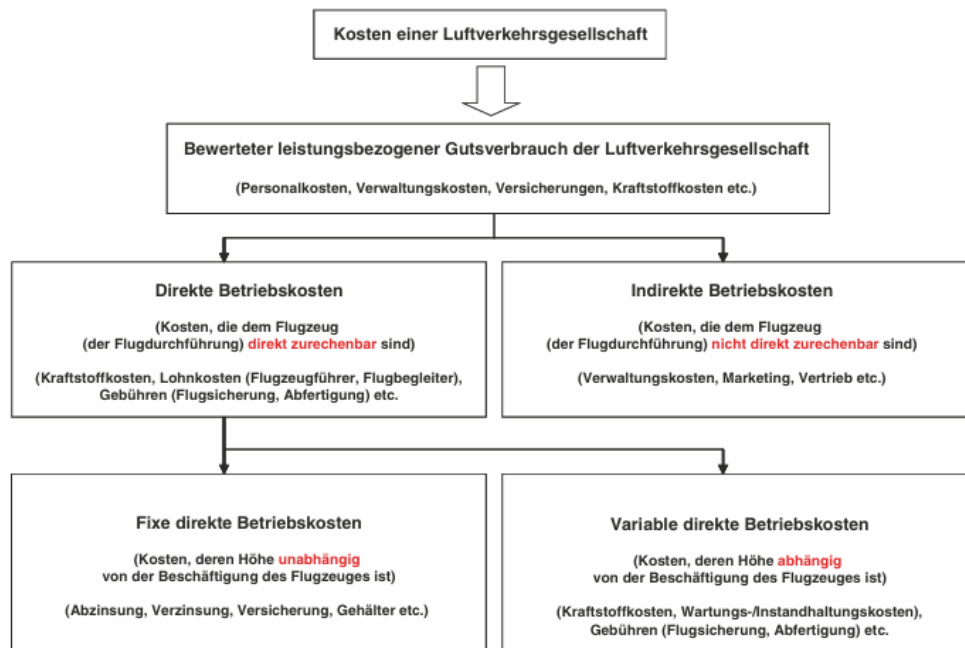


Abbildung 2.1: Kostenstruktur einer Fluggesellschaft [5]

und Öl, vergleichsweise (in Korrelation) beträgt die Abfertigung am Flughafen ein Sechstel [2]. Im Jahr 2023 wurden etwa 92 Milliarden Gallonen Kraftstoff durch der Luftfahrtindustrie verbraucht und somit war der Treibstoffrechnung fast 32 % alles Betriebskosten in der Luftfahrt [8]. Die jährlichen Steigerungen den Preisen für fossile Rohstoffe kann die nachhaltige Initiative fördern.

Crewkosten sind auch ein Bestandteil der direkten Betriebskosten. Zu einer Crew gehören Piloten und Kabine-Besatzung. Nach Conrady [2] bestehen die Besatzungskosten aus Gehälter, Reisekosten und Schulungskosten. Es gibt jedoch nur wenige Arbeiten, die bei der Berechnung der Betriebskosten die Ausbildungskosten erwähnen.

Wartungskosten von einem Flugzeug fassen zusammen die Arbeitskosten für Beschäftigten und benötigten Materialien für die Wartung. Außerdem werden die Kosten nach Wartung einer Zelle und den Triebwerken unterteilt [9]. Meistens werden diese Komponente von unterschiedlichen Unternehmen hergestellt (Quelle). Am Vorfeld bei der Luftfahrzeugabfertigung findet eine *Line Maintenance* statt, dabei wird der Reifendruck und Ölstände überprüft [2]. Überdies gibt es eine Reihe anderen regelmäßigen Kontrollen. Wartungskosten sind von Auslastung eines Flugzeugs, je mehr ein Flugzeug sich im Betrieb befindet, desto größere Wartungskosten zu erwarten. Je nach Flotte sind die Ersparnisse möglich, wenn die Fluggesellschaften mehrere Flugzeuge vom gleichen Typ anschaffen [2]. In diesem Fall sind weniger

Schulungen für die Techniker notwendig.

Unter **kapitalbezogenen Kosten** sind die Kosten, die mit der Abschreibungskosten sind ein Teil der Kapitalkosten für das Flugzeug, die für den festgelegten Zeitraum, wo Flugzeug benutzt wird, verteilt. Die Abschreibungskosten können auch auf Infrastruktur bezogen werden.

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 geringere Relevanz ausgelassen.

2.2.2 Infrastrukturkosten

Durch den Anstieg der Nachfrage oder wie in dem Fall von innovativen Antrieben sind die Änderungen an der Flughafeninfrastruktur notwendig. Von der Infrastruktur sind abhängig welche Kapazitäten einen Flughafen hat. Die Infrastrukturkosten eines Flughafens bestehen aus Kosten für luft- und landseitige Anlagen. Landseitige sind die Einrichtung, die zum Flughafen gehören, wie Terminal oder administrative Gebäuden. 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 Anschaffung-/Investitionskosten (Kapitalanforderungen), sondern auch die Kosten für die Instandhaltung der Anlagen und Betriebskosten. Kapitalkosten (wie Verzinsung und Abschreibung), die mit Infrastrukturinvestitionen zusammenhängen machen ein großer Teil an Gesamtkosten von einem Flughafen aus [10]. Infrastrukturträger im Luftverkehr sind neben den Flughäfen die Bodenabfertigungsdienste, Kommunikationseinrichtungen (z. B. SITA) und Flugsicherungseinrichtungen (Radar-, Funknavigationsanlagen, Flugverkehrskontrolle ATC = Air traffic control). "Flughäfen müssen wirtschaftliche Analyse nutzen, um Entscheidung über Flughafeninvestitionen zu treffen. Investitionsbeihilfen werden durch die Passagieranzahl des Flughafens bestimmt. Die Flughäfen mit mehr als fünf Millionen Passagieren sollen ihre Kapitalkosten selbst tragen können [2]. Die Flughäfen in der Deutschland sind überwiegend in der öffentlichen Hand [2].

Über landseitige Anlagen finanzieren sich Flughäfen über Mieten, Konzessionen und weitere Quellen. Hat Flughafen regionale Bedeutung werden auch anderen Interessentengruppen an der Entwicklung teilnehmen. Planung der Infrastrukturerweiterung oder -neubau muss in enger Zusammenarbeit zwischen Stakeholdern (Regulierungsbehörden, Mitarbeiter, Anteilseigner, Kreditoren usw) stattfinden [10].

Außerdem müssen Infrastrukturentscheidungen die Interessen der Gesellschaft treffen.

Diese Arbeit wird sich auf die Anschaffungskosten für neue Infrastruktur fokussieren und nicht mit laufenden Kosten, wie Betriebskosten, Unterhalt- und Administrationskosten den Flughäfen, da sie untergeordnete Relevanz haben.

2.2.3 Ausbildungskosten

Die Schulungen sind ein wichtiger Teil der Ausbildung. Nach ICAO Annex 6 muss das Schulungsprogramm eine Kompetenzschulung für alle installierten Geräte umfassen. Aufgrund neuen erwarteten Antrieben werden neue Infrastruktur und Geräte benötigt und somit entstehen neue Notwendigkeit für Gefahren im Luftverkehr. Wegen unzureichende Datenlage in dem Bereich ist schwierig die Ausbildungsdauer und damit verbundenen Kosten präzise zu berechnen. Aus diesem Grund wird auf eine detaillierte Analyse der Ausbildungskosten verzichtet und nur auf allgemein erforderliche Kenntnisse bei der Schulung zusammengefasst/hinweisen. Dabei wird in dem Teil ?? auf die Sicherheitsaspekte und Gefahren beim Umgang mit jedem Antrieb eingegangen und im Teil ?? Fazit für Ausbildung zusammengefasst. Wasserstoff: benötigt zusätzliche Fortbildung

Die Ausbildung soll die allgemeinen Charakteristiken des Wasserstoffs, Umgang mit Wasserstoff möglich verbundene Gefahren, wie zu reagieren im Notfallsituationen beinhalten. Die Schulungen sollten für alle Beteiligten an der Luftfahrzeugabfertigung gemacht werden.

2.2.4 Klimapolitische Maßnahmen

Durch klimapolitischen Initiativen können die Verminderung der 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) 2018/1139 etabliert die gesetzlichen Instrumente für die Sicherheit und den Umweltschutz in der Zivilluftfahrt innerhalb der EU und fixiert die Rolle der Europäischen Agentur für Flugsicherheit (EASA). EASA als Luftfahrtbehörde verpflichtet die Umweltleistung der Luftfahrt zu überwachen und zu fördern, wozu die Gebühren erhebt werden. Außerdem macht die Verordnung die Zulassung von neuen Flugzeugen leichter und dadurch fördert Innovationen und Anregungen für nachhaltige Luftfahrttechnologien.

Die Verordnung ermöglicht Gebührenanpassung und Anreize für die Projekte, die ökologische Vorteile bringen und zu einem hohen Umweltschutzniveau beizutragen.

Die konkreten Maßnahmen dürfen auf nationalen Ebenen gesteuert werden, aber die die Mitgliedstaaten verpflichtet sind, die Sicherheit und Umweltschutz zu betrachten. Nach Artikel 126 kann die EASA (nach Konsultation der Kommission) die detaillierten Vorschriften für die Gebühren bestimmen, um nachhaltige Technologien und innovative Projekte zu fördern. Solche politischen Entscheidungen können die Fluggesellschaften zu motivieren, Emissionen zu vermeiden und somit wirtschaftlich einzusparen.

Ab Jahr 2012 wurde in der Europäische Union (EU) EU-Emissionsrechthandel (EU ETS) für Luftverkehr eingeführt. Ein Großteil der Zertifikate wird unentgeltlich für die Fluggesellschaften zugeteilt, den Rest wird versteigert. Das Ziel ist die begrenzte Zertifikate unter Gesellschaften zu verteilen und somit die Treibhauseffekte zu senken. Die Einnahmen von der Versteigerung werden dafür eingesetzt.[2] Im Jahr 2016 hat Internationale Zivilluftfahrtorganisation (ICAO) die Resolution A39-3 herausgebracht, wo Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA) als globale Maßnahme für den Markt vorgestellt wurde. 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, wo Mitglieder

verpflichtet sind teilzunehmen [2]. Werden die Emissionen von dem Jahr 2020 überschritten, müssen die Beteiligte in anderen Bereichen die Kohlenstoffdioxide ausgleichen, z.B. durch Bepflanzung oder anderen Klimainitiativen.

Ab Jahr 2027 werden alle Betreiber aus dem Europäischen Wirtschaftsraum (EWR) entweder CORSIA oder EU ETS unterliegen [11]. Im Raum der Europäischen Wirtschaftsraum gilt EU ETS und hat anspruchsvollere Klimaschutzmaßnahmen als CORSIA [11]. CORSIA-Regeln gelten hingegen für internationale Flüge außerhalb Europäischen Wirtschaftsraum (EWR).

Mit dem Gesetzgebungspaket "Fit to 55" will die EU bis zum Jahr 2030 die Emissionen, unter anderem vom Luftverkehr, um mindestens 55 % senken. Verordnung RefuelEU legt fest, welcher Anteil der nachhaltigen Kraftstoffe (SAF) soll im Verbrauch sein, Verpflichtungen für Kraftstofflieferanten, Flughäfen in der Union, sowie Luftfahrzeugbetreiber.

2.3 Neuartige Antriebe

Obwohl sich der Kraftstoffverbrauch in der letzten 30 Jahren halbiert [5] 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 [12].

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

2.3.1 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 [13]. Die SAFs werden zu

herkömmlichen Treibstoffen beigemischt. IATA besagt, dass die zulässige Mischrate zurzeit bei max. 50 % liegt. Es existieren bis jetzt elf Verfahrenswege aus unterschiedlichen Rohstoffen für die SAF-Produktion, manche werden aktuell für die Nutzung bewertet [14].

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 kann zu Leckagen in der Dichtung führen [15]. Aus diesem Grund ist bis jetzt kein Flugzeug für das Fliegen mit reinem SAF zertifiziert [13].

Im Hinblick auf die Zukunft ist zu erwarten, dass die CO₂-Reduktion mit dem reinen 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 [16].

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

Es gibt keinen SAF-Flugtreibstoff, der Emissionen komplett vermeidet, durch bestimmte Verfahren können sie jedoch bis zu 95 % reduziert werden [14].

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 [17]. Die Haupteinschränkung von HEFA ist die begrenzte Anzahl an Rohstoffen [17]. Der Anteil der SAF-Nutzung (HEFA) ist bei ... Vielversprechend ist auch das Power-to-liquid (PtL) Verfahren. Dieses katalytische Verfahren, nach Fischer-Tropsch, nutzt zur Herstellung eine Kombination aus Kohlenmonoxid (CO) und durch Elektrolyse produzierten Wasserstoff (H₂) [17]. Das Verfahren erzeugt die höchsten CO₂-Emissionseinsparungen [18], jedoch befindet es sich in einem früheren Stadium [17].

In Bezug auf die Infrastruktur sind manche davon überzeugt, dass keine Änderungen im Flugzeug oder am Betankungssystem notwendig sind [19] Wobei Dahal et al. [20] jedoch davon ausgeht, dass neue Antriebe und Triebwerke für die Nutzung des reinen SAF entwickelt werden müssen. Das reine SAF wurde noch nicht zertifiziert, um in das Treibstofflager vom Flughafen zu gelangen [13].

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

Die Preise für nachhaltige Flugtreibstoffe sind zwei- bis zu fünfmal höher als für herkömmliche Kerosin [13]

In EU-Richtlinien sowie in CORSIA sind die Kriterien für SAF-Qualität festgelegt. Im Rahmen EU-ETS gelten SAFs als emissionsfrei und bei der richtigen Zertifizierung sind vor der Abgabe von CO₂-Zertifikaten befreit [14]. Die Preise für nachhaltige Flugtreibstoffe sind zwei- bis zu fünfmal höher als für herkömmliche Kerosin [13]. Um Fluggesellschaften für die Nutzung der nachhaltigen Kraftstoffe zu motivieren, hat EU-ETS 20 Mio. Zertifikaten zur Verfügung gestellt [14]. In ReFuelEU sind vor allem die verpflichtete Beimischungsanteile von nachhaltigen Stoffen festgelegt.

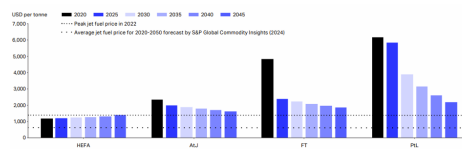


Abbildung 2.2: Durchschnittlicher IATA-Mindestverkaufspreis [14]

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

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

2.3.2 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 Batterie-Antriebs (BA) ist in der Abbildung 2.3 gezeigt.

Es gibt drei unterschiedliche Antriebskonfigurationen von elektrischen Flugzeugen: vollelektrisch, funktioniert nur auf der Batterie oder Brennstoffzelle als Energiequelle,

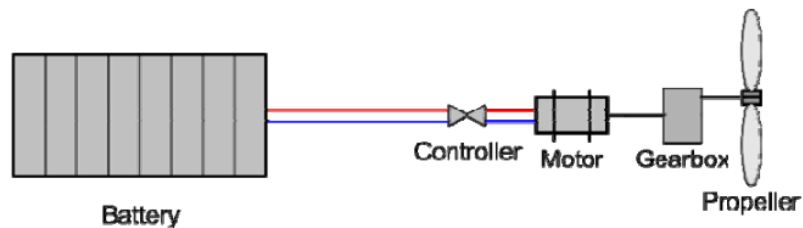


Abbildung 2.3: Einfaches Modell eines Batterieantriebs [21]

turboelektrisch und hybrid-elektrisch ist eine Mischung von konventionellen Gasturbinenriebwerken mit Kerosin und Batterie oder Brennstoffzellen [20]. Im Folgenden wird ein vollelektrischer Antrieb beschrieben. Funktionsweise Elektromotor: Durch Potenzialdifferenz und einem Stromfluss wird die elektrische Energie in mechanische umgewandelt. Im Vergleich zum Verbrennungsmotor ist der einzige bewegliche Teil bei BA der Rotor [22], was die Wartungskosten 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 [22].

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 [22]. Durch die Umwandlung der elektrischen in chemische Energie kann diese in der Batterie gespeichert werden. Im Laufe des Fluges verändern die Batterien ihr Gewicht nicht, unabhängig davon, ob sie leer oder vollständig geladen sind [22]. Eine in der wissenschaftlichen Literatur weit verbreitete Batterie ist die Lithium-Ion-Batterie. Diese haben eine hohe Energiedichte im Vergleich zu anderen vorhandenen Batterien. Heutige Li-ion Batterien haben eine Energiedichte von 150-300 Wh/kg [23]. Werden diese Werte mit der spezifischen Energiedichte von 12 kWh/kg von Kerosin verglichen [24], ergibt sich eine Differenz von ca. 45-facher Steigerung gegenüber einer Li-Ion-Batterie. Das weist darauf hin, dass Batterien ein viel höheres Gewicht für die gleiche Energie verursachen. Somit steigt auch die Masse des Flugzeugs. 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 [24].

In Forschung befinden sich weitere Arten von Batterien wie Lithium-Sulfur, Lithium-Air, sowie Solid-state Batterien, welche vielversprechend wirken (Quelle).

Der Batteriewechsel ist kompatibler mit der Flugplanung, benötigt aber mehrere Batterien für den Austausch, was die Logistik erschwert und höhere Anschaffungskosten verursacht. Batterien müssen ordnungsgemäß und sicher gelagert werden. [25]

Ein Batteriewechsel ist öfters vorkommende in der Literatur Ladung.

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

Transportkapazität ist nicht so groß, wie bei konventionellen Flugzeugen und auch die Reichweite für Regionalflüge [26]. Die Energieproduktion ist nicht emissionsfrei [26], dafür muss mehr erneuerbaren Quellen hergestellt werden, wie Solar- und Windenergie.

In Bezug auf Sicherheit, das größte Gefahr bei BA ist chemische Reaktion des thermischen Durchgehens, wofür stabile Kühlungssysteme benötigt sind [22]. Thermisches Durchgehen verursacht einen starken Anstieg der Innentemperatur von Batterie, was zu kompletten Ausfall der Batterie oder Freisetzung der brennbaren Gase führen kann [27].

2.3.3 Wasserstoff-Antrieb

In vielen Forschungsarbeiten wird der Wasserstoff als die Lösung für umweltfreundliche Luftfahrt dargestellt/vorgestellt. Dieses Energiemedium wird jedoch von Kosten, Sicherheit und öffentlicher Akzeptanz behindert [12]. Durch 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 der Kondensstreifen führt [21]. *Herstellung*

Es existieren unterschiedliche Wege zur Herstellung von Wasserstoff. Die gängigsten Herstellungswege sind Dampfreformierung (Steam Methane Reforming - SMR) und die Elektrolyse. Bei SMR trifft Wasserdampf in der Reaktion zusammen mit Methan aus Erdgas, infolgedessen entsteht der Wasserstoff H_2 und Kohlenmonoxid CO bzw. -dioxid [28]. Bei der Elektrolyse wird das Wasser mithilfe von Elektrizität in Wasserstoff H_2 und Sauerstoff O_2 gespalten [28]. Durch diesen Herstellungsweg können CO_2 -Emissionen vollständig vermieden werden [24]. Die Nachhaltigkeit der Elektrolyse ist außerdem genauso wie bei BA von der Stromquelle abhängig. Wenn für die Produktion von Wasserstoff erneuerbare Energiequellen (wie Solar- und Windanlagen) genutzt werden, wird dieser als grüner Wasserstoff bezeichnet [28]. Durch Elektrolyse produzierter grüner Wasserstoff ist kostenintensiv [24] und von den Stromkosten abhängig. Wird der Strom aus fossilen Energieträgern erzeugt, kommt es zu indirekten Emissionen. Beispielhaft bei anderen Herstellungswegen (grauer und blauer Wasserstoff) kommt es hingegen zum Ausstoß von Kohlenstoff, wobei bei blauem Wasserstoff das CO_2 gesammelt und gespeichert wird [28].

Zustände Es gibt unterschiedliche Zustände, wie das Wasserstoff benutzt werden kann. Die gängigsten in Verkehrsbranche sind die gasförmige GH_2 und kryogener flüssigen Wasserstoff LH_2 . Um mehr Energie speichern zu können, muss der gasförmigen H_2 stark komprimiert werden, nämlich bei einem Druck von 350 oder 700 bar gespeichert werden [23], um weniger Platz zu verbrauchen/benötigen. Flüssiger Wasserstoff entsteht durch die Verflüssigung des Wasserstoffs. In der Tabelle 2.1 sind die Vergleichswerte für Kerosin und Wasserstoff sowohl im flüssigen Zustand als auch im gasförmigen dargestellt. Das LH_2 hat zwar bessere Gewichtsverhältnisse als Kerosin, jedoch wird für die gleiche Menge Energie 3,5-mal so viel Platz gebraucht.

Flüssiger kryogener Wasserstoff ist viel besser geeignet für den Transport mit LKW als gasförmigen, aber dafür benötigt mehr Energieaufwand [23].

Zündungstemperatur?

Für Flugzeuge, die mit Wasserstoff betrieben werden, ist die Tankisolierung von großer Bedeutung. Der flüssigen LH_2 muss bei -253 °C Grad gelagert werden [23].

Antrieb

Wasserstoff kann in zwei unterschiedlichen Weisen als Antrieb genutzt werden:

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

	volumetrische Energiedichte in kWh/l	gravimetrische Energiedichte in kWh/kg
Wasserstoff LH2	2,6 [23]	37,0 [23]
Wasserstoff GH2		
Kerosin	9,5 [23]	11.9 [23]

erstens als Treibstoff für die Verbrennung im H_2 -Verbrennungsmotor, zweitens in der Brennstoffzelle, um den elektrischen Motor anzutreiben [19]. Zudem gibt es ein hybrid-elektrisches Antrieb, wo die Brennstoffzelle zusammen mit einer Batterie genutzt wird. Eine andere Methode, um Wasserstoff in der Luftfahrt zu nutzen ist die Brennstoffzellentechnologie. Durch die chemische Reaktion aus gasförmigem Wasserstoff H_2 und Sauerstoff O_2 wird Strom produziert [24] und dadurch der Propeller vom Flugzeug angetrieben. Brennstoffzellen (wie die Polymerelektrolytbrennstoffzelle) haben eine höhere Energiedichte (als was?) und können somit für Mittel- oder Langstrecken genutzt werden [24]. Brennstoffzellen benötigen den gasförmigen Wasserstoff [23] und ziemlich schwer von Gewicht und der Struktur [21]. Aufgrund besserer Speicherung in flüssiger Form muss überlegt werden, wann der Wasserstoff in Gasform überführt wird.

Colpan et al. [23] ist der Meinung, dass sich die Wasserstofftriebwerke im Vergleich zu konventionellen Düsentriebwerken ähneln werden. Allerdings werden zusätzliche Komponenten, wie Kraftstoffpumpen, Wärmetauscher von flüssigem Wasserstoff.

Flüssiger Wasserstoff

Die Nutzung von Wassertreibstoff ist für größere Flugzeuge geeignet und somit für längere Strecken. Das vorhegeht von Gewichtsanteil von LH2 Tank in Abhängigkeit von der gelagerten Menge. Große Flugzeuge bieten bessere Speichereffizienz und Wasserstoffmengen-Verhältnis. "(da niedrige Tankgewichte erforderlich sind, um den hohen spezifischen Energievorteil von Wasserstoffkraftstoff voll auszuschöpfen)"[12]

hydrogen-Electric Antrieb Sobald die Brennstoffzellen in dem Flugzeug integriert sind, werden Generatoren/Generatoren das Auxiliary Power Unit (APU)-System des Flugzeugs mit Strom versorgen. Zum Einsatz kommen Brennstoffzellen mit Protonenaustauschmembran, deren Strom die Motoren antreibt. Die Motoren werden über Propeller verfügen, die dann dem Flugzeug Schub verleihen, da

sie sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten im Verhältnis zur Drosselklappe drehen.[24]

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

not sure: [20] In der Dahal et al. Studie wurde ein Konzept vorgeschlagen, wo die Tanks auf dem Fuselage sich befinden. "Die kryogenen Kraftstofftanks erfordern eine angemessene Isolierung sowie die Verwendung von Materialien, die gegen Versprödung und zyklische Belastungen schützen, die durch die thermische Ausdehnung und Kontraktion beim Nachfüllen und den Kraftstoffverbrauch verursacht werden"

Sicherheit beim Umgang mit Wasserstoff Wasserstoff kann hochentzündlich sein [24]. Die Forschung der Wasserstoff muss sich mit den Themen wie Explosionsgefahr, Materialgefahr, Betankung und bei der Umgang bei Abfertigung auseinandersetzen. Bei richtiger Infrastruktur ist der Wasserstoff nicht gefährlicher als andere brennbare konventionelle Treibstoffe und in manchen Fällen sogar sicherer [29].

Für die Verbrennung des Wasserstoffs werden Änderung in der Brennkammer benötigt, damit höhere Temperaturen vermieden werden können [29] Der Wasserstoff hat hohe Flammengeschwindigkeit, und große Gefahr Flammensrückschlag bei der Flammenausbreitung.

Die zusätzliche Ausbildung für Wartungsmitarbeiter und die Schulungen für Bodenabfertigen werden benötigt, weil die Charakteristiken von Wasserstoff sich von herkömmlichen Treibstoffen stark unterscheiden. [28]?

3 Änderungen durch neue Antriebe, Annahmen und Methodik

Konzepte mit neuen Antrieben befinden sich im Entwicklungsprozess und bis jetzt es ist ratsam, wie zukünftige Flughäfen aussehen werden und welche Ausstattung für die Flugzeug-Abfertigung ausgesucht wird. Wasserstoff-Flugzeuge werden ab 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 getroffen. Die Größe des Flughafens beeinflusst die Infrastrukturkosten. Größere Flughäfen können mehr Flugzeuge als Regionalflughäfen abfertigen, was dazu führt, dass mehr Abfertigungsplätze umgerüstet/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.

3.1 Änderungen an der Abfertigung und dazugehörige Kosten von alternativen Antrieben

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 [24].

SAF benötigt keine Infrastrukturänderung und darf in bestehenden Systemen und Flugzeugen benutzt werden [24]. 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 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 und genauso wie Kerosin-Betankung 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 (Quelle).

Wartungsverfahren unterscheidet sich stark von konventionellen Flugzeugen. Es ist zu erwarten, dass die Wartungskosten niedriger sein können durch weniger bewegende Teile in dem Antrieb. Jedoch bei einem Fehler muss der ganze Motor ausgetauscht werden [24], was die hohen Kosten mit sich bringt. Die elektrischen Motoren werden keine Kontrolle Gasturbinenriebwerks ("Hot-Section Inspection") benötigen, jedoch die Teile wie Lager ausgetauscht werden müssen und es werden mögliche Schäden durch Gelangen der Fremdpartikel in den Motor verursacht [30], was ungeplante Wartungen benötigt. Die Änderung der Lebensdauer von Flugzeugen wird auch nicht erwartet [30].

In der Literatur werden zwei Lademöglichkeiten diskutiert, die Batterien zu wechseln (Swap-Methode), d.h. aus dem Flugzeug herauszunehmen und an einer Ladestation zu laden, oder Ladekabel in das Flugzeug einzustecken (Plug-In).

Bei BA 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 bringen. Bei *Swap-Methode* kann Aus- und Einbau der Batterie aus dem/in das Flugzeug lange dauern [24]. Guo et al. [31] 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 [30]. Jedoch mit Batteriewechsel können die Abfertigungszeiten reduziert werden (Quelle), was an einem großen Flughafen von der Bedeutung ist. Batteriewechsel bietet gleichmäßigere Deckung der Nachfrage, da der Austausch einer Batterie viel schneller ist, als Dauer einer Plug-In Ladung [31]. Aus diesen Gründen werden in nächsten Teilen die Kosten für diese Option ausgewertet.

Austausch ermöglicht langsameres Laden und macht das Laden mit geringer Leistung möglich. Anstieg in Turnaround-Zeiten aufgrund nicht zurzeit möglichen Schnellladen möglich [32].

Die konstante Spitzenleistung von Batteriewechselsystem von 250 kW wird angenommen. Der Strom ist normalerweise von Tag und Nacht abhängig und davon welche Nutzung herrscht wird. Angenommen ist die Batteriekapazität, wie bei der ES-19, dauert es 3,6 h bis die Batterie geladen wird. d.h. 10 fzg jeder braucht batterie, dann diese batterie kann erst in 4 std benutzt werden. Bei *Plug-In* ... 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 [24]. 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). Anstieg in Turnaround-Zeiten aufgrund nicht zurzeit möglichen Schnellladen möglich [32]. Modulares System: beide gleichzeitig

3.1.3 Wasserstoff

Die Betankungsanlagen am Flughafen müssen ausgetauscht werden oder neue Lieferketten angeschafft werden müssen, um Wasserstoff als Treibstoff benutzen

zu können. Diese Investitionskosten werden die Betreiber beeinträchtigen. Wasserstoff kann hochentzündlich sein [24]. Wird der flüssigen Wasserstoff verschüttet, wird es aufgrund seiner Leichtigkeit vertikal nach oben verdampft [23]. Die Dauer des Brandes von LH2 ist kürzer als bei Kerosin [23]. Die Effizienz der Produktions- und Lieferkosten ist geografisch determiniert. Für europäische Distanzen sind die Wasserstoff-Pipelines günstiger als Transport mit chemischen Verbindungen, welcher bei längeren Distanzen in Betracht kommt [33]. 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 [33]. Lieferung Logistik ist ein wichtiger Teil der Produktionskette. Nach Schenke et al. [34] kann Lieferung den flüssigen Wasserstoff mit einem LKW bei einer großen Zahl an Flügen kostengünstiger als andere Lieferalternativen sein. Transport von LH2 erfordert speziell konstruierte Tanks [28]. Der Transport ist durch Pipelines im gasförmigen Zustand, LKW und Zügen sowohl im gasförmigen, als auch im flüssigen Zustand möglich.

Wasserstoff kann unterirdisch in Salzkavernen und in erschöpften Gasfelder gespeichert werden [33], 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 in festen Materialien (wie Metallhydriden) gespeichert wird. Diese Zylinder oder Tankern müssen gut isoliert und kryogen sein [33]. Andernfalls wird flüssiger Wasserstoff bei der Lagerung verdampft, was zum Verlust der Menge kommt, jedoch der größte Teil der Verdampfung findet durch Transferphase statt [33]. Der Weg zwischen Betankung und dem Tank, damit Verdampfungsverluste minimiert werden können [23] Die externe Produktion ist am Anfang sinnvoll [23]. Der Transfer von LH2 mit vakuumisolierte Pipeline beschränkt sich auf die kurze Distanzen wegen Skalierung der Verluste zu Leitungslänge (proportional) [23]. Wird der große Menge benötigt, weder LKW noch Pipeline sinnvoll [23]

Obwohl auf Wasserstoff und dazugehörige Infrastruktur wartet eine Reihe der Zertifizierungen, die Anschaffungskosten können bereits gefunden werden.

3.1 Änderungen an der Abfertigung und dazugehörige Kosten von alternativen Antrieben

Aufgrund aufwendigen Infrastrukturprozessen für die Produktion und Verflüssigung von Wasserstoff werden wahrscheinlich Flughäfen, besonders kleineren, anfangs auf die „On-Site“-Produktion verzichten.

Die Verdampfung wird mit größeren Lager kleiner [23]. Eine weitere mögliche Betankungsoption ist der Austausch des Flugzeugtanks als Kapseln, dabei werden die leeren Kapseln an die Wasserstoffproduktionsstelle zurückgegeben, wo sie wieder nachgefüllt werden können [23]. Diese Möglichkeit kann vor allem für die kleineren Flughäfen als Alternative sein, da man keine Wasserstoffspeicher und sonstige Anlagen bauen muss. Für längeres Parken am Flughafen, werden für kalte Tanks eine sichere Verbindung mit der Wasserstoffinfrastruktur [23] Transportkosten sind von der geografischen Lage des Flughafens abhängig, befindet sich ein Flughafen nahe einer Wasserstoff-Pipeline...

Auslastung eines Flugzeugs mit Wasserstoff-Antrieb kann im Vergleich zu konventionellen Flugzeugen sinken, da eventuell WA-Flugzeuge wegen der Betankungsprozesse mehr Zeit auf dem Boden verbringen werden (Quelle).

Lieferung von gasförmigem Wasserstoff mit niedrigem Druck mit dem Straßenverkehr bis jetzt nur für ungenügende Menge möglich [33]

Wartung: Brennstoffzellen haben auch weniger bewegende Teile [24] und in dem Bereich zu weniger Wartungskosten kommen kann, allerdings der benötigte Wasserstofftank braucht öfteren Wartung (Quelle). „Flüssiger Wasserstoff muss jedoch bei Minusgraden gelagert werden, was eine Verbesserung der Speichertechnologien sowohl im Flugzeug selbst als auch auf Flughäfen erfordert.“ Wasserstoff kann entweder als Brennstoff für Verbrennung genutzt werden oder als Wasserbrennstoffzelle für die elektrischen Flugzeuge. [24]

In dem Unterkapitel 2.3.3 wurde angeführt, dass die Produktion des Wasserstoffs hohe Kosten, viel Platz und Energie benötigt. Deswegen für die Flughäfen wäre es die Alternative besser, das Wasserstoff, woanders einzukaufen und zum Flughafen mit LKW oder Pipelines liefern zu lassen [35]. Die Änderung für Abfertigungsprozesse können erheblich sein [36]. 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 [37].

Aufgrund hohen Unterschiedes zu herkömmlichen Treibstoffen und neuen Ausrüstungen müssen die Mitarbeiter neu geschult werden, um mögliche Gefahren zu erkennen und zu vermeiden [35].

In der Arbeit Dalmia et al. [24] wird die Produktion am Flughafen diskutiert. Dazu wird einen Elektrolyseur für Erzeugung des gasförmigen Wasserstoffs, einen Kompressor und einen Tankwagen oder eine Pipeline mit modularem Tanksystem für Betankung der Flugzeuge benötigt. Modulares Tanksystem kann in bestehenden Flugzeugen eingesetzt werden und wird als wie Fracht in das Flugzeug geladen.

Mulder et al. [28] schätzt die Investitionskosten für Wasserstoff durch Elektrolyse deutlicher günstiger als ein Kohlekraftwerk. Obwohl die hohen Kapitalkosten von Pipeline-Anlage zu erwarten, die Betriebskosten niedriger sein werden. Also bei größerem Umfang lohnt es Pipelines, sonst Lkw. Annahmen: Es wird davon ausgegangen, dass Sicherheitsradius beim Wasserstoffbetankung nicht erweitert wird. Da sich die Flughafenposition topografisch unterscheidet, wird die Annahme getroffen, dass die Lieferung mit LKW stattfindet und die Lieferkosten bereits in dem Preis von flüssigem Wasserstoff inbegriffen sind. Lieferkosten für flüssigen Wasserstoff LH₂ und HEFA werden nicht explizit ausgerechnet, da die schon in Betriebskosten von Wasserstoff-getriebene Flugzeuge eingeschlossen sind. Es wird vor allem angenommen, dass die Produktion des Wasserstoffes und Verflüssigung nicht am Flughafen stattfindet, sondern eingekauft und zum Flughafen transportiert.

Eine Kryopumpe bringt den Wasserstoff auf den benötigten Druck von 1000 bar.
"?file:///C:/Users/henri/Downloads/765438.pdf

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 eine bestimmte Versorgungsweg.

Lieferkosten für flüssigen Wasserstoff LH₂ werden nicht explizit ausgerechnet, da die schon in Betriebskosten von Wasserstoff-getriebene Flugzeuge eingeschlossen sind. Es wird vor allem angenommen, dass die Produktion des Wasserstoffes und Verflüssigung nicht am Flughafen stattfindet, sondern eingekauft und zum Flughafen

transportiert wird. Die Abbildung 3.1 stellt eine Variante von Produktion- und Lieferketten für flüssigen Wasserstoff dar.

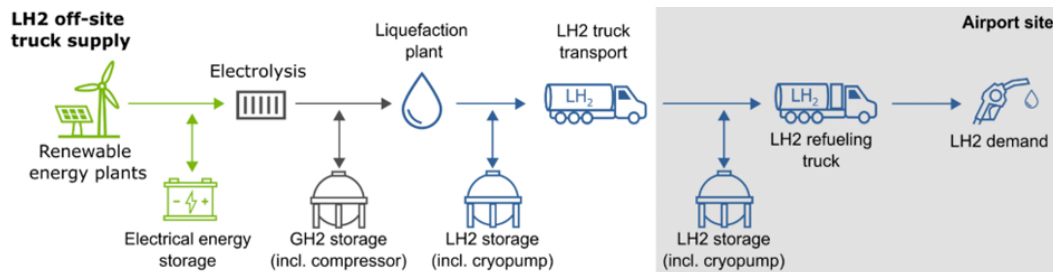


Abbildung 3.1: Lieferkette von flüssigem Wasserstoff mit externer Herstellung und interner Lagerung bzw. die Betankung [34]

Batterie-Antrieb Es wird angenommen, dass die Batterien für BA zur Flughafen-Infrastruktur gehören, d.h. die Anschaffungskosten für Flughafen anfallen und danach werden von für Fluggesellschaften ausgeliehen in Form von Leasing.

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 [38]. Sonstige wichtige für die Methodik Flugzeugdaten wurden in der Tabelle 3.1 zusammengefasst. Unter V ist die Reisegeschwindigkeit zu verstehen. R ist die Reichweite eines Flugzeugs. $MTOW$ ist die Höchstabfluggewicht und

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 [39].

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 [40] [41]. Für die Batterie der ES-19 wird eine Kapazität von 720 kWh benötigt, mit 30 % der Reserveenergie resultiert in 900 kWh [22].

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 [32], [42]. 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 [19]. Diese Anteile sind zwar für Mittel- und Langstrecken Flugzeuge positiv, aber werden dennoch für diese Arbeit angenommen.

Es ist auch zu erwarten, dass die Flugzeit zwischen 5 und 15 % aufgrund des Wasserstofftank-Gewichts zunimmt [19]. Aus diesem Grund wurde es für einen Wert von 10 % für die Arbeit entschieden. 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 [43]. 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 zu 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.

Tabelle 3.1: Bewertete Flugzeuge: Werte und Annahmen

	V [km/h]	R [km]	MTOW [kg]	EOW [kg]	PAX-Anzahl	Quellen
L410	417	2 570	7000	4120	19	[44]
ES-19	330	400	8618		19	[40] [41]
A321LR	1104	7400	97000		max. 244	[45] [43]
WA				110580	–	

Dass die Anschaffungspreise die Betriebskosten beeinflussen, wurde bereits in 2.2 diskutiert. Die Tabelle 3.2 stellt die Verkaufspreise für konventionelle Referenz-Flugzeuge dar. Da 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. Die Preise können nicht aktuell sein, deswegen wird für die beiden noch ein Inflationsfaktor dazugerechnet.

Tabelle 3.2: Flugzeugpreise

	L410	A321neo	Quelle
Verkaufspreis [EUR]	6 455 884	129,5 Mio	[46] [47]

3.2.2 Allgemeine Annahmen

3.3 Aufstellung der Formeln für Kosten

In dem Kapitel 2.2 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 2.2 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 sich unterscheidet, wurde es angegeben. Die Betriebskosten berechnet mit konstanter Reisegeschwindigkeit und Verbrauch ohne Berücksichtigung erheblicher Energieverluste während des Starts und der Landung.

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 [7].

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

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

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

Die **Wartungskosten** werden nach dem Jenkinson 1999 Modell berechnet. Das Modell ermöglicht es, grob aber schnell die Wartungskosten für ein Flugzeug abzuschätzen [48]. 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 [48] 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 Gleichung (3.4) 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 [48]. 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 [2]. Die Besatzungskosten sind mit Lohn von 37 EUR für Flugbegleiter und 90 EUR für Piloten pro Blockstunden berechnet [49]. 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 Verzinsungskosten. Abschreibungskosten sind von Anschaffungskosten (Kaufpreis), Abschreibungsdauer und Blockstunden pro Jahr abhängig [2]. Die Abschreibungsdauer nach AEA beträgt jeweils 14 Jahre für Kurz- und Mittelstecken und 16 Jahre für Langstrecken. Formeln für kapitalgebundene Kosten sind in der Appendix A zu finden.

Da keine öffentlich zugänglichen Marktpreise für Luftfahrzeuge mit alternativen Antriebssystemen vorliegen, wird die Kalkulation der Anschaffungskosten für elektrisch betriebene Flugzeuge nach der Methodik von [50] 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 [7]. 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 [7]. Die Formeln sind im 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	[31]
Abschreibung BSS [Jahre]	10	[25]
P_{Bat} [EUR/kWh]	125000	[31]
Lebenszyklen Bat	5000	[30]
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 [30], 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. 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. [25] 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.

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

Wasserstoff-Antrieb

Für Wasserstoff-Antriebe wird ein oberirdischer Tank für kryogenen flüssigen Wasserstoff LH₂, 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 4.3 zusammengefasst.

Außerdem benötigen die Infrastrukturelemente ein spezifischer Energiebedarf, wie Betankungswagen oder kryogene Pumpe, der wird aber nicht betrachtet. Effizienz der Technologien wurde auch vernachlässigt.

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

Wie bereits im Grundlagen-Kapitel erläutert wurde, hat der kryogene Wasserstoff eine Dichte von ca. 65 kg/m³ [23], also können 307,58 t in einem kugelförmigen Lagertank gespeichert werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Vorgänge der

Tabelle 3.4: Werte und Annahmen

	Werte	Einheit	Quellen
Preis Lagertank $P_{Lagertank}$	41,9	EUR/kg LH ₂	[34]
Abschreibung Lagertank	20	Jahre	[51]
Volumen Lagertank [m^3]	4 732		[52]
Preis kryogene Pumpe P_{kP}	250171	EUR/kg/h	[37]
Abschreibung kP	10	Jahre	[51]
Preis Betankungswagen P_{BW}	87848	EUR	[37]
Abschreibung BW	12	Jahre	[37]

Betankung des Wagens und folgende Betankung des Flugzeugs jeweils 30 Minuten dauern [37]. (1 Flugzeug pro Tankwagen, also alles von - Ankunftsrate abhängig)

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

3.4 Betriebsszenarien

Betriebsszenarien helfen die vorher beschriebene Betrieb- und Infrastrukturkosten in Anwendung zu bringen und eine mögliche Entwicklung in der nahen Zukunft zu zeigen. Die Größe des Flughafens beeinflusst die Infrastrukturkosten. Bei einem größeren Flughafen werden die Betriebsdifferenzen deutlicher, da das Verkehrsaufkommen wesentlich höher ist. Größere Flughäfen abfertigen täglich mehr Flugzeuge als Regionalflughäfen, was dazu führt, dass mehr Abfertigungsplätze umgerüstet/versorgt werden müssen und mehr Arbeitskräfte geschult werden müssen. Deshalb wird für die Betriebsszenarien der Flughafen Frankfurt gewählt, der fungiert als bedeutendes Luftverkehrsdrehkreuz und zudem der größte Verkehrsflughafen Deutschlands. 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 am Tag abgefertigt werden. Die Gesamtbewegungen teilen sich nach Entfernungen folgend auf [53]:

- Kurzstrecken (bis 2500 km) sind bei 72,8 %;
- Mittelstrecken (bis 6000 km) sind 9,3 %;

- Langstrecken (ab 6000 km) die restlichen 17,9 %.

Da ist nicht explizit definiert wird, welche Entfernungen Flugzeug fliegt, werden die Betriebskosten anhand vorher beschriebene Distanzen berechnet. Nämlich für Kurzstrecken wird eine Entfernung von 400 km genommen und für Langstrecken eine Distanz von 6000 km. Für Mittelstrecken werden die Betriebskosten mit einer Distanz von 4000 Kilometer berechnet, jedoch es wird davon ausgegangen, dass Treibstoffverbrauch sich nicht ändert. Anhand dessen wird eine Flotte mit 580 Flugzeugen aufgestellt, wo die alternativen Antriebe im Einsatz sind. Aufgrund der Flugeinschränkungen in der Nacht wird es 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. Hier wird auch als Ersatz SAF mitberechnet. Es ist nennenswert, dass nur Teil der tatsächlichen Nachfrage des Kurzstrecken-Bedarfs dadurch gedeckt werden kann. Die Mittel- und Langstrecken werden durch Flugzeuge mit Wasserstoffturbine und SAF versorgt/erfüllt. In Betrachtung des tatsächlichen Flugplans sind die Spitzenstunden im Laufe des Tages zu finden, wo der Verkehrsfluss stärker als im Durchschnitt ist. In diesem Fall werden höhere Infrastruktur- und Betriebskosten zu erwarten. Indessen um die Interpretation zu erleichtern, wird in dieser Arbeit angenommen, dass stündlich die gleiche Anzahl an Flugzeugen am Flughafen abgewickelt werden. Die Aufteilung den Antrieben für jedes Szenario ist in der Abbildung **betriebsszenarien** dargestellt.

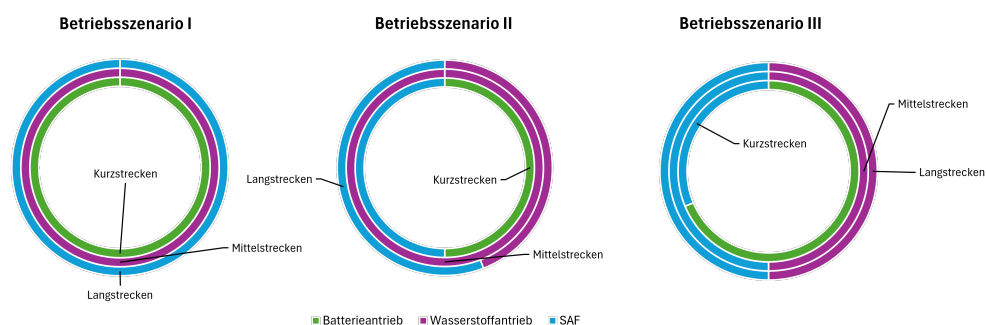


Abbildung 3.2: Aufteilung der Flugzeugflotte nach Antriebsart

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

Das **zweite Betriebsszenario** wird mit folgender Aufteilung berechnet. Die Hälfte der Kurzstrecken wird durch BA versorgt und die andere Hälfte durch SAF; die Mittelstrecken werden genauso, wie im ersten Szenario komplett durch die Wasserstoffflugzeuge bedient und bei Langstrecken sind 10 % SAF und den restlichen Anteil Wasserstoff.

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

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 Ergebnisse des Gegenüberstellens von Referenzflugzeugen und neuartigen Antriebsansätzen

Folgende Erkenntnisse ermöglichen Diskussion der ersten Hypothese. Die Ergebnisse sind nach Flugdistanzen aufgeteilt. **Vergleich des Batterie-Antriebs und SAF mit einem konventionellen Treibstoff für eine Kurzstrecke**

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 %).

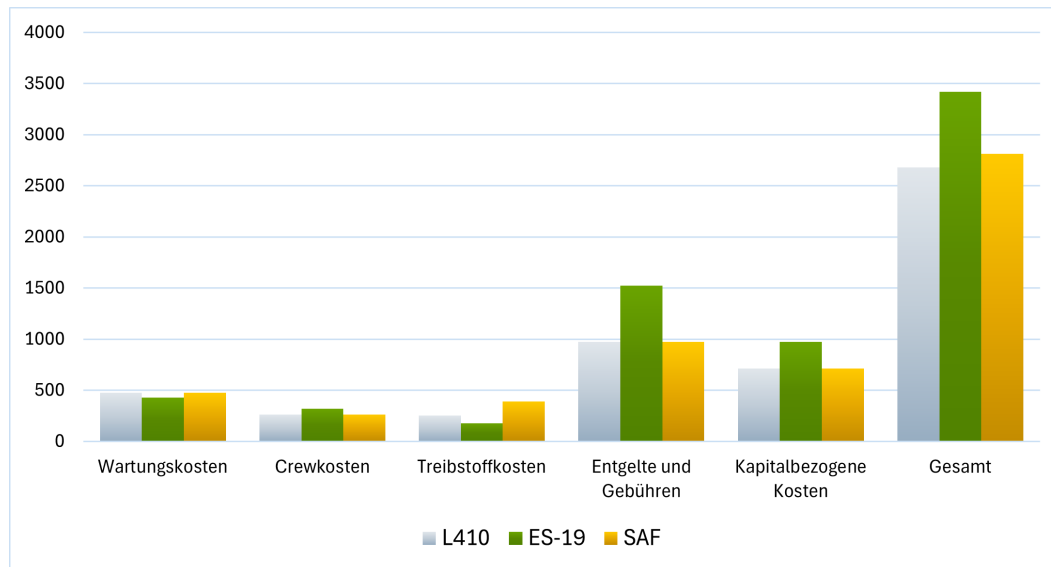


Abbildung 4.1: Vergleich der Referenz und Flugzeug mit der Batterie-Antrieb und SAF

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.

Vergleich des Wasserstoffantriebs und SAFs mit einem Referenz-Flugzeug für eine Mittelstrecke

In der vorgeschlagene Vorgehensweise wurde den Vergleich zwischen den herkömmlichen Treibstoffen, SAF und mit Wasserstoffturbine betriebenen Flugzeug für 6000 Kilometer-Flug erstellt. Aufgrund der hohen derzeitigen Wasserstoffpreise wurde zum Vergleich der Wasserstoffmindestpreis von 2,1 *EUR/kg* für den Jahr 2050 herangezogen [54], um die mögliche Entwicklung 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. 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.

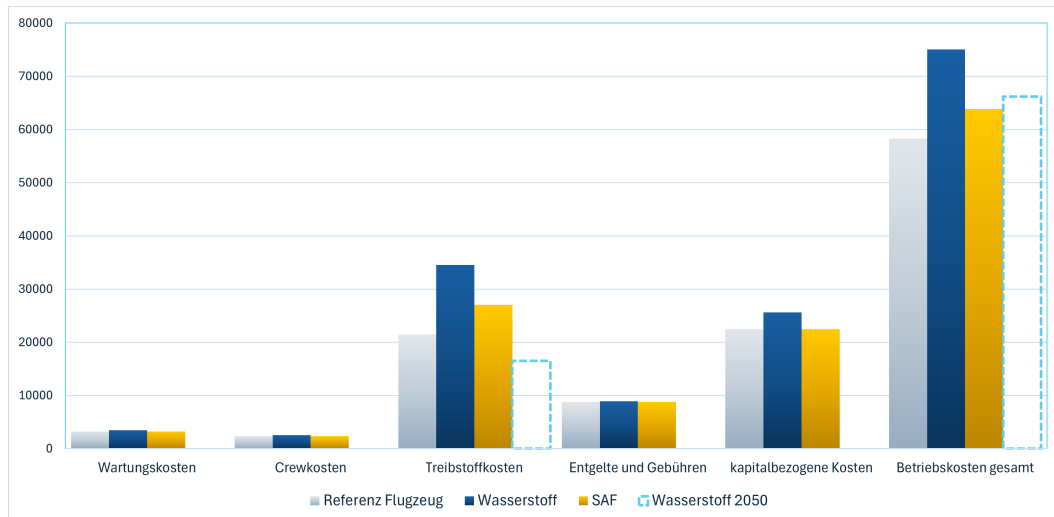


Abbildung 4.2: Vergleich der Referenz und Flugzeug mit der Wasserstoffantrieb und SAF für einen 6000 km Flug

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 Die Flottenaufteilung nach Szenarien kann in der folgenden Tabelle zusammengefasst werden:

Obwohl der Unterschied zwischen Betriebskosten gleichmäßig ist, hat unter allen Betriebsszenarien das zweite die höchsten Gesamtbetriebskosten (siehe Abb. 4.4). 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

Tabelle 4.1: 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

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 am Batterieantrieb verursacht am geringsten unter allen Szenarien sind.

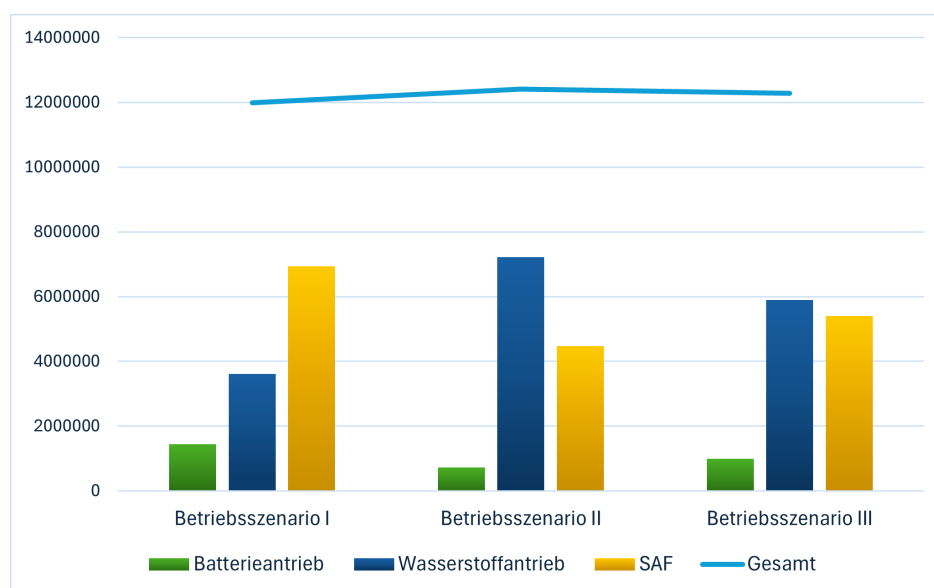


Abbildung 4.3: Betriebskosten in Abhängigkeit von Szenarien mit Gesamtkostentrend

Infrastrukturkosten

Nennenswert ist, dass in der Berechnung von allen Betriebsszenarien erstmal nur einmalige Infrastrukturausgaben ohne jährliche Abschreibungen ausgerechnet sind. In der Tabelle 4.2 sind die benötigten Infrastrukturanschaffungswerte für jedes Szenario zusammengefasst.

Tabelle 4.2: 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

Das erste Szenario hat die kleinsten Ausgaben, wobei das zweite Szenario die größte und 27 % höher als das erste. Die Gesamtkosten für das zweite Szenario liegen über 35 Tausend Euro.

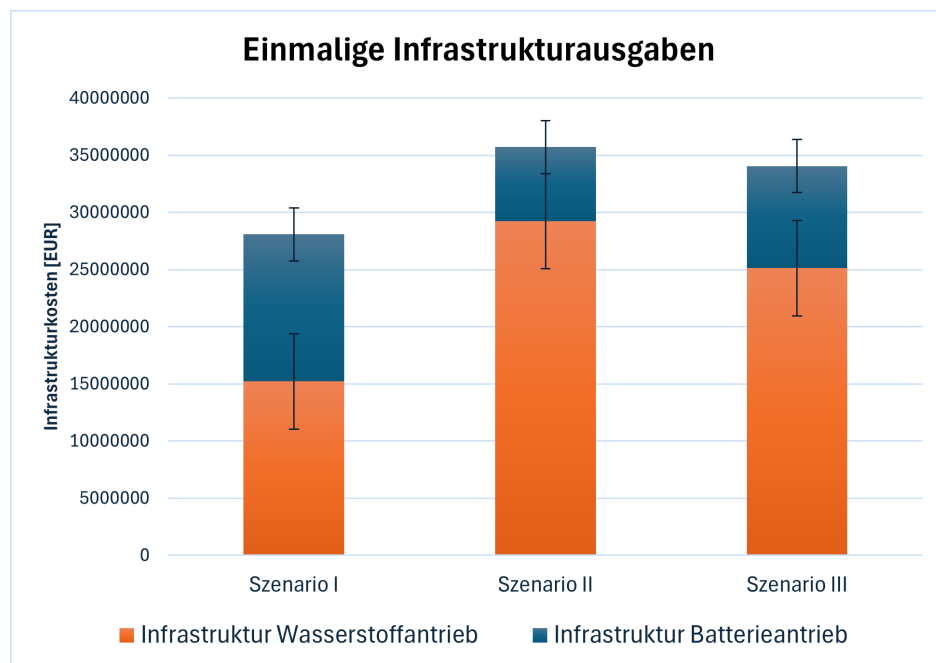


Abbildung 4.4: Vergleich der einmaligen Infrastrukturausgaben zwischen den Betriebsszenarien

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 den Vergleich von Batterie, SAF und herkömmlichen Treibstoff sind das Entgelte und Gebühren, als auch kapitalbezogene Kosten. Dafür wurden folgende Parametern ausgesucht: 1. der Preis für Leasing einer Batterie, 2. Flugzeugpreis Der ersten Wert kann je nach Leistung der Batterie und Häufigkeit der Nutzung unterschiedlich ausfallen, deswegen wäre es wichtig anzuschauen, welcher Unterschied im Betriebskosten entsteht, wenn ich 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 wurde angeschaut.

Beim Vergleich von Wasserstoffbetrieben und SAF mit konventionellem Antrieb entsteht der größte Kostenanteil von Treibstoffkosten und kapitalbezogenen Kosten. Deswegen wurde für Parametern wie: 1. Preis für Treibstoff; 2. Anschaffungskosten eines Flugzeugs entschieden. Dabei Preis für alternative Antriebe soll in der Zukunft senken und Preis für herkömmlichen Treibstoffen aufgrund Wachstum von Ölpreisen wachsen. Es wird auch den Wert von 10 % genommen. Wie bereits angesprochen wird der Anschaffungspreis für neue Technologien mit der Zeit sinken.

Tabelle 4.3: 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

Der Wasserstoffantrieb reagiert der Preisänderung gegenüber am stärksten.

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 hat sich die erste aufgestellte Hypothese bestätigt. 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 sensibel reagiert.

Betriebsszenarien - Betriebskosten Die Analyse der Betriebskosten unter unterschiedlichen Betriebsszenarien bringt die Kenntnisse bei, dass die Betriebskosten werden sich je nach ausgewählte Antriebe ändern. Sollte Flottengröße oder Zusammensetzung sich ändern, würden unterschiedliche Ergebnisse rauskommen. Wobei die Größere Fluggesellschaften sich, werden Low-Cost-Carrier eher die geringste Betriebskosten liefert das erste Szenario

Die Verteilung der Betriebskosten in den Szenarien ist definitiv von der Wahl den Antrieben anhängig. Die Batterieantriebe verursachen zwar in der Szenarien die geringsten Kosten. Jedoch darf es nicht vergessen werden, dass die Batterien eingeschränkte Reichweite, als auch ungenügende Sitzangebot und können nicht vollständig die Nachfrage von Kurzstrecken decken.

Betriebsszenarien - Infrastrukturkosten

Beschränkungen der Forschung Trotz den Ergebnissen unterliegt diese Arbeit einigen Beschränkungen. Aufgrund begrenzter Zugang zu relevanten Daten. Die Arbeit hat sich nur auf Betriebskosten der Fluggesellschaften und Anschaffungskosten für die Infrastruktur, jedoch nicht auf die Betriebskosten der Infrastruktur.

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 Betrachtung der Passagieren und der Fracht außer Acht gelassen.

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

Vergleich zu anderen Arbeiten: „Im Vergleich zu bisherigen Untersuchungen wird deutlich, dass...“ „Im Kontext der bestehenden Literatur deuten die Ergebnisse darauf hin, dass...“

Es gibt eine Menge anderer Arbeiten, die Betriebskosten entstehenden durch neuartige Antriebe verglichen mit konventionellen. Im Vergleich zu anderen Untersuchungen haben sich die Ergebnisse... Es gibt Werke, die sich detaillierter mit Infrastruktur auseinandersetzen und mehr Komponenten, als auch z.B. Installationsprozesse mitbeziehen.

Die Ergebnisse werden interpretiert und Erkenntnisse werden erläutert.

Die Beschränkungen der Forschung und deren Auswirkungen werden dargelegt.

Es wird beschrieben, inwiefern die Erwartungen erfüllt worden sind.

Eventuelle Ursachen und Folgen für die Ergebnisse werden besprochen.

Vorschläge für eventuelle weiterführende Forschungen werden gemacht.

Ergebnisse werden interpretiert.

Es werden keine zu vagen Empfehlungen für weiterführende Forschungen gemacht.