

#### Studienarbeit

# Stakeholder-Kostenanalyse an Flughäfen bei Einführung neuer Luftfahrzeugantriebe

		• • •	<b>D</b>	1.0		
Н	IANI	riieta	R n r	าส:	2nc	11/2
		Heta	וטטו	IUC	טוג	, v a

Geboren am: 28.06.1998 in Kyiv

10.12.2024

Gutachter

Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Fricke

Betreuer

Dipl.-Ing. Edgar Böttcher

Henriieta Bohdanova

# Thesen zur Arbeit

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

# 1 Abkürzungen, Einheiten und Symbole

## Abkürzungen

**CORSIA** Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation

**DOC** Direct Operating Costs

**EU** Europäische Union

**IOC** Indirect Operating Costs

**TOC** Total Operating Costs

ETS Total Operating Costs

ICAO Total Operating Costs

IATA Total Operating Costs

SAF Sustainable Aviation Fuel

**HEFA** Hydroprocessed Esters and Fatty Acids

BA Batterie-Antrieb

# Einheiten

bar Bar

km Kilometer

EUR Euro

USD Euro

 $m^3$  Kubikmeter

t Tonnen

kg Kilogramm

# Symbole

 $CO_2$  Kohlenstoffdioxid

 $LH_2$  flüssiger Wasserstoff

 $O_2$  Ozon

# 2 Einleitung

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

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

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

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

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

Neben dem Kohlendioxid  $CO_2$  und Wasserstoff  $H_2O$  entstehen bei der Verbrennung des Treibstoffs andere Nebenprodukte, die das Klima beeinflussen, wie Stickoxide NOx, die für Ozonbildung in der Stratosphäre verantwortlich sind [2].

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

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

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

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

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

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

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

### 2.1 Neuartige Antriebe

Obwohl Kraftstoffverbrauch hat sich in der letzten 30 Jahren halbiert [3], der Auswirkungen bleiben hoch. Bei der Untersuchung den alternativen Antrieben sind bestimmte Überlegungen relevant. Dichte von Energieträger, Kosten und Verfügbarkeit des Rohstoffs, Sicherheit in Bezug auf Herstellung und Benutzung, direkte und indirekte CO<sub>2</sub> Emissionen [4].

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

#### 2.1.1 Sustainable Aviation Fuel (SAF)

Sustainable Aviation Fuel oder nachhaltige Flugtreibstoff sind synthetische flüssige Biotreibstoffe oder erneuerbare nicht biogene Stoffe, die mit herkömmlichen Flugkraftstoffen und bestehenden Betankungssysteme kompatibel sind. Deswegen werden sie auch als Drop-In Treibstoffe bezeichnet [5]. Die SAFs werden zu herkömmlichen Treibstoffen beigemischt. IATA besagt, dass die zulässige Mischrate zurzeit bei max. 50 % liegt. Es existieren bis jetzt elf Verfahrenswege aus unterschiedlichen Rohstoffen für SAF-Produktion und manche werden gerade für die Nutzung bewertet [6].

Die SAFs haben ähnliche Charakteristiken, wie Kerosin, was die Energiedichte betrifft. Dennoch Großteil von SAF weisen keine Aromaten auf. Fehlende aromatische Verbindungen in den SAF kann zu Leckagen in der Dichtung führen [7]. Aus diesem Grund bis jetzt ist kein Flugzeug für das Fliegen mit reinem SAF zertifiziert [5].

Im Hinblick auf die Zukunft ist es zu erwarten, dass Reduktion von  $CO_2$  mit dem reinen SAF realisiert werden kann. Ein praxisnahes Beispiel dafür ist den ersten transatlantischen Demonstrationsflug im November 2023 von der Fluggesellschaft Virgin Atlantic, welche mit 100 % SAF durchgeführt wurde [8].

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

Es gibt kein SAF-Flugtreibstoff, die Emissionen komplett vermeidet, jedoch durch bestimmte Verfahren können sie bis 95 % reduziert werden [6].

Aufgrund der kommerziellen Verfügbarkeit ist Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA) eine der wichtigsten Verfahren. Die HEFA wird aus tierischen und pflanzlichen Ölen und Fetten mittels Hydroprocessing hergestellt [9]. Die Haupteinschränkung von HEFA ist begrenzte Anzahl an Rohstoffen [9]. Der Anteil der SAF-Nutzung (HEFA) ist bei ... Vielversprechend ist auch das Verfahren Power-to-liquid (PtL). Dieser katalytische Verfahren nach Fischer-Tropsch nutzt für die Herstellung eine Kombination von Kohlenmonoxid (CO) und durch Elektrolyse produzierter Wasserstoff (H<sub>2</sub>) [9]. Das Verfahren bringt die höchste CO<sub>2</sub>-Emissionseinsparungen [10], jedoch befindet sich im früheren Stadium [9].

In Bezug auf die Infrastruktur sind manche davon überzeugt, dass es keine Änderungen im Flugzeug oder Betankungssystem notwendig sind [11] Wobei Dahal et al. [12] geht jedoch davon aus, dass neue Antriebe und Triebwerke für die Nutzung des reinen SAF entwickelt werden müssen. Das reine SAF wurde noch nicht zertifiziert, um in das Treibstofflager vom Flughafen zu gelangen [5].

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 [5]

In EU-Richtlinien sowie in CORSIA sind die Kriterien für SAF-Qualität festgelegt. Im Rahmen EU-ETS gelten SAFs als emissionsfrei und bei der richtigen Zertifizierung sind vor der Abgabe von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten befreit [6]. Die Preise für nachhaltige Flugtreibstoffe sind zwei- bis zu fünfmal höher als für herkömmliche Kerosin [5] Um Fluggesellschaften für die Nutzung der nachhaltigen Kraftstoffe zu motivieren, hat EU-ETS 20 Mio. Zertifikaten zur Verfügung gestellt [6]. In ReFuelEU sind vor allem die verpflichtete Beimischungsanteile von nachhaltigen Stoffen festgelegt.

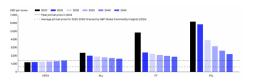


Abbildung 2.1: Durchschnittlicher IATA-Mindestverkaufspreis [6]

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/ Äs a drop-in solution, SAF is expected to deliver about 62% of carbon mitigation needed to achieve net zero by 2050"

#### 2.1.2 Batterie-Antrieb

Eine andere Möglichkeit, Emissionen zu reduzieren, direkten Strom als Antrieb mittels Elektromotoren und Stromspeicher, wie Batterien oder Brennstoffzellen zu nutzen. Eine einfache Darstellung des Batterie-Antriebs (BA) in der Abbildung 2.2 gezeigt.

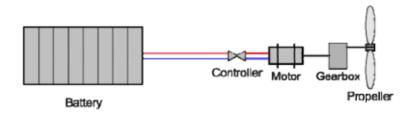


Abbildung 2.2: [13]

Es gibt drei unterschiedliche Antriebskonfigurationen von elektrischen Flugzeugen: vollelektrisch, funktioniert nur auf der Batterie oder Brennstoffzelle als Energiequelle, turboelektrisch und hybrid-elektrisch ist die Mischung von konventionellen Gasturbinentriebwerke mit Kerosin und Batterie oder Brennstoffzelle [12]. Im Weiteren wird ein vollelektrisches Antrieb beschrieben. Funktionsweise Elektromotor: Durch Potenzialdifferenz und einen Stromfluss wird die elektrische Energie in die mechanische umgewandelt. Im Vergleich zum Verbrennungsmotor ist der einzige beweglicher Teil bei BA ist der Rotor [14], was schließlich die Wartungskosten verringern kann. Außerdem besteht der elektrische Antrieb aus Controller, welcher den Energiefluss steuert. Durch Controller wird festgelegt, welche Leistung soll der Motor bringen bzw. wie viel Energie soll von einer Batterie genommen werden für die gewünschte Leistung [14].

Batteriemanagementsystem in einem Flugzeug verfügt über die Information, wie State of Health (SOH), welcher der Unterschied zwischen Anfangs- und Bestandskapazität eine Batterie anzeigt, und State of Charge (SoC), welcher zeigt, wie viel Prozent der verfügbaren Kapazität geladen werden kann [14].

Durch die Umwandlung der elektrischen Energie in die chemische kann die Energie in der Batterie gespeichert werden. Im Laufe des Fluges, die Batterien verändern sein Gewicht nicht, unabhängig davon, ob sie leer oder vollgeladen sind [14]. Eine weit verbreitete in der wissenschaftlichen Literatur Batterie ist das Lithium-Ion. Die haben eine hohe Energiedichte im Vergleich zu anderen vorhandenen Batterien. Heutige Li-ion Batterien haben Energiedichte 100-265 Wh/kg (Quelle). Werden diese Werte zu Kerosins spezifische Energiedichte von 12 kWh/kg verglichen [15], das macht Differenz ist ca. 45-mal höher als von einer Li-Ion-Batterie. Das weist darauf hin, dass Batterien viel mehr Gewicht für die gleiche Energie benötigen/haben. Somit steigt auch die Masse vom Flugzeug.

Die Batterien sind von äußerlichen Bedingungen beeinflussbar. Die kalte Umgebung kann der Wirkungsgrad reduzieren (Quelle), und die warme Umgebung kann zu einem schnelleren Auslaufen der Lebensdauer führen. Die Herstellung der Lithium-Ionen-Batterien ist durch Lithium-Produktion umweltschädlich (was viel Wasser verbraucht, Leckagen gefährlich) und kostenintensiv und Wartung [15].

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

Batteriewechsel ist kompatibler mit der Flugplanungen, aber benötigt mehreren Batterien für den Austausch, was die Logistik schwerer macht und die höheren Anschaffungskosten hat. Batterie sollen richtig und sicher gelagert werden. [16]

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 [17]. Die Energieproduktion ist nicht emissionsfrei [17], 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 [14]. Thermisches Durchgehen verursacht einen starken Anstieg der Innentemperatur von Batterie, was zu kompletten Ausfall der Batterie oder Freisetzung der brennbaren Gase führen kann [18].

#### 2.1.3 Wasserstoff-Antrieb

In vielen Forschungsarbeiten wird der Wasserstoff als die Lösung für umweltfreundliche Luftfahrt dargestellt. Diese Alternative ist jedoch von Kosten, Sicherheit und öffentliche Akzeptanz behindert [4]. Durch Nutzung von Wasserstoff werden keine CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht, jedoch es können andere Abgase wie Stickoxid NOx bei der Verbrennung in Wasserstoffturbinen oder Wasserdampf emittiert werden, was zur Bildung der Kondensstreifen führt(Quelle).

#### Zündungstemperatur?

**Tabelle 2.1:** Vergleich von unkomprimiertem Wasserstoffgas hinsichtlich energiebezogenen Eigenschaften mit anderen marktüblichen Treibstoffen bei 26 **Celsius!** 

	volumetrische Energiedichte in kWh/l!	gravimetrische Energiedichte in kWh
Wasserstoff	2,6 [19]	37,0 [19]
Kerosin	9,5 [19]	11.9 [19]

In der Tabelle 2.1 sind die Vergleichswerte für Kerosin und Wasserstoff im flüssigen Zustand dargestellt. Der  $LH_2$  zwar hat bessere Gewichtsverhältnisse als Kerosin, jedoch für die gleiche Menge Energie werden 3,5-mal so viel Platz gebraucht.

Für die Flugzeuge ist die Tankisolierung von großer Bedeutung. Der  $LH_2$  muss bei -253 °C Grad gelagert werden, ansonsten wird es zur gasförmigen Form [19]. In dieser Form muss den Wasserstoff in einem Speicher bei einem Druck von 350 oder 700 bar gelagert werden [19]. Es existieren unterschiedliche Wege für

Wasserstoff-Produktion. Die gängigsten Herstellungswege sind die Steam Methane Reforming (SMR) und Elektrolyse. Bei SMR trifft der Wasserdampf in der Reaktion zusammen mit Methan aus Erdgas, infolgedessen entstehen der Wasserstoff  $H_2$  und Kohlenmonoxid bzw. -dioxid [20]. Bei der Elektrolyse wird das Wasser mithilfe von Elektrizität in Wasserstoff und Sauerstoff  $O_2$  gespaltet [20]. Durch dieser Herstellungsweg können  $CO_2$ -Emissionen vollständig vermieden werden [15].

Die Nachhaltigkeit der Elektrolyse ist außerdem von der Stromquelle abhängig. Wenn für die Produktion vom Wasserstoff sind die erneuerbaren Energiequellen (wie Solar- und Windanlagen) benutzt worden, dann wird als grüner Wasserstoff bezeichnet [20]. Wird der Strom aus fossilen Energieträger erzeugt, kommt es zu indirekten Kohlenstoffemissionen. Durch Elektrolyse produzierte grüner Wasserstoff ist kostenintensiv [15] und von der Stromkosten abhängig. Bei der anderen Herstellungswege (grauer und blauer Wasserstoff) kommt es hingegen zum Ausstoß von Kohlenstoff, wobei bei blauem Wasserstoff werden die CO<sub>2</sub> gesammelt und gespeichert [20].

Wasserstoff kann in zwei unterschiedlichen Weisen als Antrieb benutzt werden: erstens als Treibstoff für die Verbrennung in  $H_2$ -Verbrennungsmotor, zweitens als Brennstoffzelle, um den elektrischen Motor anzutreiben [11].

"Die Wasserstofftriebwerke werden in ihrer Architektur den bestehenden Düsentriebwerken ähneln, jedoch mit einigen Ergänzungen, wie z. B. Kraftstoffpumpen und -steuergeräten, Brennkammern und einem zusätzlichen Wärmetauscher zur Verdampfung von flüssigem Wasserstoff (LH2)"[19] Colpan et al. [19] ist der Meinung, dass die Wasserstofftriebwerke ähnlich zu konventionellen Triebweerken werden. Allerdings werden Komponente, wie Kraftstoffpumpen,

Flüssiger Wasserstoff

Flüssiger Wasserstoff entsteht durch die Verflüssigung des Wasserstoffs.

Senkt man die Temperatur von Wasserstoff bis -253 °C [19], entsteht flüssiger Treibstoff .

Nutzung von Wassertreibstoff ist für größere Flugzeuge geeignet und somit für längere Stecken. Das vorhergeht von Gewichtsanteil von LH2 Tank in Anhängigkeit von der gelagerten Menge. Große Flugzeuge liefern bessere Speichereffizienz und

Wasserstoffmenge-Verhältnis. "(da niedrige Tankgewichte erforderlich sind, um den hohen spezifischen Energievorteil von Wasserstoffkraftstoff voll auszuschöpfen)"[4]

#### Gasförmige Wasserstoff/ Brennstoffzellentechnologie

Eine andere Methode, um Wasserstoff in der Luftfahrt zu benutzen ist der Wasserstoff im gasförmigen Zustand. Diese Technologie wird noch Brennstoffzellentechnologie genannt. Durch chemische Reaktion aus gasförmige Wasserstoff H<sub>2</sub> und Sauerstoff O<sub>2</sub> wird Strom produziert [15] und dadurch der Propeller von dem Flugzeug angetrieben. Brennstoffzellen (wie Polymerelektrolytbrennstoffzelle) haben größere Energiedichte (als was?) und können somit für die Mittel- oder Langstrecken benutzt werden [15]. Um mehr Energiedichte speichern zu können, muss H<sub>2</sub> stark komprimiert werden.

#### hydrogen-Electric Antrieb

Sobald die Brennstoffzellen in das Flugzeug integriert sind, werden Generatoren/Generatoren das Auxiliary Power Unit (APU)-System des Flugzeugs mit Strom versorgen. Zum Einsatz kommen Brennstoffzellen mit Protonenaustauschmembran, deren Strom die Motoren antreibt. Die Motoren werden über Propeller verfügen, die dann dem Flugzeug Schub verleihen, da sie sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten im Verhältnis zur Drosselklappe drehen.[15]

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

#### not sure:

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

Die zusätzliche Ausbildung für Wartungsmitarbeiter und die Schulungen für Bodenabfertigen werden benötigt, weil die Charakteristiken von Wasserstoff sich von herkömmlichen Treibstoffen stark unterscheiden. [20]?

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

#### 2.2 Betriebsszenarien

Betriebsszenarien helfen die vorher beschriebene Kosten in Anwendung zu bringen und zeigen eine mögliche Entwicklung im Jahr 2050. Für die Betriebsszenarien wurde der Flughafen Frankfurt gewählt. Das ist der größte Verkehrsflughafen Deutschlands und fungiert als bedeutendes Luftverkehrsdrehkreuz. Bei einem größeren Flughafen werden die Betriebsdifferenzen deutlicher, da das Verkehrsaufkommen wesentlich höher ist. Der Fraport meldete im Jahr 2023 insgesamt 423764 gewerbliche Flugbewegungen, das sind im Durchschnitt 1160 Flugbewegungen pro Tag. Es wird angenommen, dass die Hälfte davon Abflüge sind, also müssen 580 Flugzeuge am Tag abgefertigt werden.

Die Gesamtbewegungen teilen sich nach Entfernungen folgend auf:

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

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

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

#### 2.2.1 Betriebsszenario I

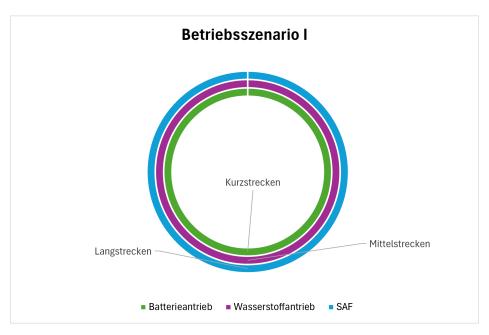


Abbildung 2.3: Aufteilung der Flugzeugflotte nach Antriebsart

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.

#### 2.2.2 Betriebsszenario II

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



Abbildung 2.4: Aufteilung der Flugzeugflotte nach Antriebsart

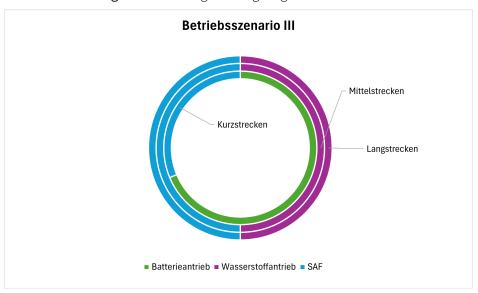


Abbildung 2.5: Aufteilung der Flugzeugflotte nach Antriebsart

#### 2.2.3 Betriebsszenario III

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

# Literatur

- [1] Die Bundesregierung. *Klimaziel: Deutschland reduziert Emissionen um 37 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente*. Zugriff am 20. November, 2024. Apr. 2024. URL: https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/treibhausgasbilanz-2023-2265440.
- [2] R. Conrady, F. Fichert und R. Sterzenbach. *Luftverkehr: Betriebswirtschaftliches Lehr- und Handbuch*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2019.
- [3] H. Mensen. *Handbuch der Luftfahrt*. Springer-Verlag, 2013.
- [4] P. J. Ansell. "Review of sustainable energy carriers for aviation: Benefits, challenges, and future viability". In: *Progress in Aerospace Sciences* 141 (2023), S. 100919.
- [5] International Air Transport Association (IATA). *IATA SAF Handbook*. Zugriff am 27. Dezember 2024. 2024.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.

- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] C. Sky u.a. "Hydrogen-powered aviation: a fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050". In: (2020).
- [12] 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.
- [13] M. Hepperle. "Electric flight-potential and limitations". In: (2012).
- [14] 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.
- [15] T. Dalmia u. a. "Powering the Future of Electric Aviation". In: (2022).
- [16] 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.
- [17] I. Abrantes u. a. "The impact of revolutionary aircraft designs on global aviation emissions". In: *Renewable Energy* 223 (2024), S. 119937.
- [18] 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.
- [19] C. O. Colpan und A. Kovač. *Fuel Cell and Hydrogen Technologies in Aviation*. Springer, 2022.
- [20] M. Mulder, P. L. Perey und J. L. Moraga. "Outlook for a Dutch hydrogen market: economic conditions and scenarois". In: (2019).
- [21] D. Schaar und L. Sherry. "Analysis of airport stakeholders". In: *2010 Integrated Communications, Navigation, and Surveillance Conference Proceedings*. IEEE. 2010, J4–1.

- [22] 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.
- [23] Airbus. *Airbus A321 Aircraft Characteristics: Airport and Maintenance Planning*. Revision 1. Original Issue: September 30, 1992. März 2022.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] M. A. Camilleri und M. A. Camilleri. *Aircraft operating costs and profitability*. Springer, 2018.
- [27] J. Wang. "Research on civil aircraft direct maintenance cost analysis and optimization based on data mining". In: *Journal of Physics: Conference Series*. Bd. 1992. 4. IOP Publishing. 2021.
- [28] Umweltbundesamt. *Aviation in the EU ETS and CORSIA in the Fit for 55 package Factsheet*. Zugriff am 23. Dezember 2024. Sep. 2023.
- [29] International Air Transport Association (IATA). *SAF Procurement: Pricing Options for Different Strategies*. Zugriff am 28. Dezember 2024. 2024.
- [30] M. Watson u.a. "Sustainable aviation fuel technologies, costs, emissions, policies, and markets: a critical review". In: *Journal of Cleaner Production* 449 (2024).
- [31] M. A. Anker, C. Hartmann und J. K. Nøland. "Feasibility of Battery-Powered Propulsion Systems for All-Electric Short-Haul Commuter Aircraft". In: *Authorea Preprints* (2023).
- [32] Embraer S.A. Embraer presents the Energia Family Four New Aircraft Concepts Using Renewable Energy Propulsion Technologies. Zugriff am 03. Januar 2025. 2021.

- [33] Wright Electric. Wright Electric Ultra-Lightweight Motors, Generators, and Batteries for Aerospace and Defense. Zugriff am 9. Februar, 2025. 2025. URL: https://www.weflywright.com/.
- [34] K. Goodge und P. Withey. "An Analysis of Direct Operating Costs for the Wright Spirit Electric Aircraft". In: *Aerospace* 11.12 (2024), S. 1007.
- [35] D. Scholz. *Aircraft Design / DOC*. Lecture Notes, Hamburg University of Applied Sciences (HAW Hamburg). Zugriff am 5. Januar, 2025. 2015.
- [36] P. B. Wangsness u. a. "Fremskyndet innfasing av elfly i Norge: mulige". In: *Environmental and Resource Economics* 37.1 (2021), S. 181–210.
- [37] R. H. Liebeck u. a. *Advanced subsonic airplane design and economic studies*. Techn. Ber. 1995.
- [38] D. F. GmbH. Flugsicherungsgebühren. Zugriff am 11. Januar 2025.
- [39] International Energy Agency (IEA). Fossil jet and biojet fuel production cost ranges (2010-2030). Zugriff am 03. Januar 2025. 2021.
- [40] International Air Transport Association (IATA). *Industry Statistics*. Report. Updated: June 2024. Juni 2024.
- [41] European Central Bank (ECB). *Euro Reference Exchange Rate: USD.* Online Resource. Zugriff am 14. Januar 2025.
- [42] Airbus. *Airbus unveils Zero-Emission Aircraft (ZEA) concepts*. Online PDF. Zugriff am 16. Januar, 2025. 2020.
- [43] European Union Aviation Safety Agency (EASA). *Type-Certificate Data Sheet: PT6A-67 Series Engines*. Techn. Ber. EASA.IM.E.008. Issue 06. European Union Aviation Safety Agency (EASA), Feb. 2022.
- [44] Fraport AG. Flughafenentgelte nach § 19b LuftVG: Entgelte für Zentrale Bodenverkehrsdienst Infrastruktureinrichtungen (gültig ab 01. Januar 2025). Zugriff am 17. Januar 2025. Jan. 2025.
- [45] Eurostat. *Energy Prices: Household and Industrial Consumers*. Zugriff am 20. Januar, 2025. 2025. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg\_pc\_205/default/table?lang=en.
- [46] N. Avogadro und R. Redondi. "Demystifying electric aircraft's role in aviation decarbonization: Are first-generation electric aircraft cost-effective?" In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 130 (2024), S. 104191.

- [47] LET Aircraft Industries. *L410 NG*. Archivierte Version vom 18. August 2021, Zugriff am [09. Januar, 2025]. 2021. URL: https://web.archive.org/web/20210818120608/http://www.let.cz/en/l410ng.
- [48] Heart Aerospace. Heart Aerospace partners with Aernnova to design and develop the structure for the ES-19 electric airplane. Zugriff am 20. Januar, 2025. 2021. URL: https://heartaerospace.com/newsroom/heart-aerospace-partners-with-aernnova-to-design-and-develop-the-structure-for-the-es-19-electric-airplane/.
- [49] Discover Airlines. *Karriere als Cabin Crew Bewerbungsbedingungen*. Zugriff am 29. Januar, 2025. 2025. URL: https://www.discover-airlines.com/de/de/about-us/career/cabin#terms\_conditions.
- [50] Airbus. *A321neo*. Zugriff am 03. Februar, 2025. URL: https://aircraft.airbus.com/en/aircraft/a320-family/a321neo.
- [51] D. Fonseca. *Direct Operating Costs, Fuel Consumption, and Cabin Layout of the Airbus A321LR*. Zugriff am 03. Februar, 2025. Feb. 2022.
- [52] LET Aircraft Industries. *L 410 UVP-E20 Brochure*. Zugriff am 2. Februar, 2025. 2016.
- [53] AeroTELEGRAPH. *Die Listenpreise 2018 von Airbus*. Zugriff am 14. Januar, 2025. 2018. URL: https://www.aerotelegraph.com/die-listenpreise-2018-von-airbus.
- [54] Y. Gu u. a. "Hydrogen-Powered Aircraft at Airports: A Review of the Infrastructure Requirements and Planning Challenges". In: *Sustainability* 15.21 (2023), S. 15539.
- [55] Aerospace Technology Institute (ATI). *Airports, Airlines, Airspace Operations and Hydrogen Infrastructure*. Techn. Ber. Zugriff am 16. Januar, 2025. Aerospace Technology Institute (ATI), März 2022.
- [56] C. H. J. Undertaking. "Strategic research and innovation agenda 2021–2027". In: *Agenda* 2021 (2022), S. 179.
- [57] F. Schenke u. a. "LH2 supply for the initial development phase of H2-powered aviation". In: *Energy Conversion and Management: X* 24 (2024).
- [58] J. Hoelzen u. a. "H2-powered aviation–Design and economics of green LH2 supply for airports". In: *Energy Conversion and Management: X* 20 (2023).

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