



Studienarbeit

Stakeholder-Kostenanalyse an Flughäfen bei Einführung neuer Luftfahrzeugantriebe

Henrieta Bohdanova

Geboren am: 28.06.1998 in Kyiv

10.12.2024

Gutachter

Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Fricke

Betreuer

Dipl.-Ing. Edgar Böttcher

Henrieta
Bohdanova

Thesen zur Arbeit

1. These 1
2. These 2
3. These 3
4. These 4

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

Einheiten

<i>bar</i>	Bar
<i>km</i>	Kilometer

Symbole

CO_2 Kohlenstoffdioxid

1.1 Flugzeuge und Annahmen

1.1.1 Relevante Flugzeugdaten

Um den betrieblichen Unterschied zwischen konventionellen und mit neuartigen Antrieben Flugzeugen zu zeigen, werden die Referenz-Flugzeuge

L410 ist ein Zubringer-Flugzeug mit 19 Plätzen der Firma Aircraft Industries. Die moderne Version NG verfügt über neue Avionik und wird wahrscheinlich in der näheren Zukunft weiter produziert. Die L410NG ist mit zwei GE H85-200 Triebwerken mit einer Wellenleistung von 850 (SHP) ausgestattet.

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. Sie hat vier Triebwerke und sollte über eine Reichweite von 400 km verfügen, wobei sie hierbei mit einer Reisegeschwindigkeit von 330 km/h fliegt [1] [2]. Für die Batterie der ES-19 wird eine Kapazität von 900 kWh angenommen [3].

In der Tabelle 1.1 sind relevante charakteristische Werte und Annahmen von beiden Flugzeugen zusammengefasst. Die ES-19 ist langsamer als eine L410, d.h. das für gleiche Strecke mehr Zeit benötigt wird, was am Ende die Auslastung verändern kann. Aufgrund des Batteriegewichts ist das BA Flugzeug schwerer als konventionelle Alternativen.

Da es bis jetzt nur wenige ausgearbeitete Konzepte und Modelle von Wasserstoff-Flugzeugen gibt, wird der Betriebsvergleich auf der Basis von einer A321LR gemacht. Die A321LR ist eine von Airbus vorgestellte neue Version der A321neo mit einer

größeren Reichweite. Im Vergleich zu konventionellen Flugzeugen werden die mittelstreckigen Wasserstoff-Flugzeuge 14 % höheres MTOW haben und die Kapitalkosten für das Kurzstrecken-Flugzeug sowie Wartungskosten steigen um 7 % und 6 % [4]. Diese Anteile sind zwar für Mittel- und Langstrecken Flugzeuge positiv, diese Abweichungen werden dennoch für diese Arbeit angenommen.

Es ist auch zu erwarten, dass die Flugzeit zwischen 5 und 15 % aufgrund des Wasserstofftank-Gewichts zunimmt [4]. Für die Arbeit wird ein Wert von 10 % angenommen. Der Vergleich zu SAF-Betriebskosten findet auch mit der A321LR statt. Es wird davon ausgegangen, dass der Unterschied nur bei Treibstoffkosten entsteht.

Tabelle 1.1: Bewertete Flugzeuge: Werte und Annahmen

	V [km/h]	R [km]	MTOW [kg]	EOW [kg]	PAX-Anzahl	Quellen
L410	417	2 570	7000	4120	19	[5]
ES-19	330	400	8618		19	[1] [2]
A321LR	1104	7400	97000		194	[6] [7]
WA				110580	194	

Dass die Anschaffungspreise die Betriebskosten beeinflussen können, wurde bereits in 2-2 diskutiert. Die Tabelle 1.2 stellt die Verkaufspreise für konventionelle Referenz-Flugzeuge dar. Da der Verkaufspreis einer A321LR nicht zur Verfügung steht, wird auf den Listenpreis einer A321neo zurückgegriffen. Sie kommen aus einer Flugzeug-Reihe es kann davon ausgegangen werden, dass die Preise ähnlich sind.

Tabelle 1.2: Flugzeugpreise

	L410	A321neo	Quelle
Verkaufspreis [EUR]	6 455 884	129,5 Mio	[8] [9]

1.1.2 Sonstige Annahmen

Auf der Grundlage der unterschiedlichen Quellen und vernünftigen Behauptungen wurde eine Reihe der Annahmen getroffen.

Die Betriebskosten werden mit Reisegeschwindigkeit ohne Beachtung von Start und Landung, wo auch mehr Energie verbraucht wird. Batterie: 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/Leistungs-ratio entwickeln und Kapazitätswert von 450 kWh/kg genommen.

Stromkosten von 0.1976 € per kWh werden auch als konstante angenommen [10].

Manche Studien gehen davon aus, dass die Einsparungen in der Wartungskosten von BA-Flugzeugen 10-15 % erreichen können [11], [12]. Deswegen in dieser Arbeit wird ein Wert von 10 % zu dem Referenzflugzeug genommen.

Es wird davon ausgegangen, dass Sicherheitsradius beim Wasserstoffbetankung wird nicht erweitert.

Infrastrukturkosten

Da sich die Flughäfen Position topografisch unterscheidet, wird die Annahme getroffen, dass die Lieferung mit LKW stattfindet und die Lieferkosten sind bereits in dem Preis von flüssigem Wasserstoff inbegriffen.

Alle Werte in USD werden mit dem Wechselkurs ¹ (EUR 1 = USD 1.0245) umgerechnet und beim Pfund (1,20 = EUR 1).

Obwohl die maximalen Geschwindigkeiten unter Referenz- und BA-Flugzeugen sich unterscheiden werden, für die Kurzstrecken-Flügen ergibt es sich nicht eine sehr große Differenz. Deswegen es wird angenommen, dass die batteriebetriebenen Flugzeuge ähnliche Auslastung wie konventionelle Flugzeuge aufweisen.

In der Zukunft ist die Lebensdauer einer Batterie bis 5000 und mehr Zyklen zu erwarten [13], deswegen wurde auch dieser Wert in der Berechnung angenommen.

Aufgrund der hohen Unsicherheit der Preisprojektionen wird der Preis für Kerosin konstant gehalten, nämlich im Wert von 0,688 EUR pro Liter [14].

In Anbetracht der Kostensenkung für nachhaltige Kraftstoffe in der Zukunft, wird der minimale Preis für HEFA-Treibstoff von 1,07 EUR pro Liter wird in den Rechnungen verwendet [15].

Lieferkosten für flüssigen Wasserstoff und HEFA werden nicht explizit ausgerechnet, da die schon in Betriebskosten von Wasserstoff-getriebene Flugzeuge eingeschlossen

¹Wechselkurs vom 14.01.2025

sind. Es wird vor allem angenommen, dass die Produktion des Wasserstoffes und Verflüssigung nicht am Flughafen stattfindet, sondern eingekauft und zum Flughafen transportiert.

Es wird angenommen, dass die Batterien für BA zur Flughafen-Infrastruktur gehören, d.h. die Anschaffungskosten Flughafen anfallen und danach werden die für Fluggesellschaften ausgeliehen. Die Inflationsfaktoren stammen aus Verbraucherpreisindex Deutschland aus Statistischem Bundesamt.

Die Besatzungskosten sind mit Lohn von 37 EUR für Flugbegleiter und 90 EUR für Piloten pro Blockstunden berechnet [16].

Die konstante Spitzenleistung von Batteriewechselsystem von 250 kW wird angenommen. Der Strom ist normalerweise von Tag und Nacht abhängig und wie viel parallel genutzt 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.

1.2 Aufstellung der Formeln für Kosten

Wie bereits im Kapitel 2 beschrieben wurde, werden die Kosten einer Fluggesellschaft auf direkte und indirekte Betriebskosten verteilt. In diesem Kapitel werden die dazugehörigen Formeln vorgestellt und teilweise angepasst.

Es gibt eine Reihe von Methoden, um DOC zu berechnen, wobei diese oft ähnlich sind. 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 Langstecken hat.

Der Reservebedarf beträgt 30 % der Gesamtkapazität.

1.2.1 Betriebskosten einer Fluggesellschaft

Die Gleichung (1.1) stellt die Betriebskosten DOC der Flugzeugnutzung dar. 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} .

$$DOC \text{ [EUR]} = C_T + C_W + C_{Crew} + C_{KK} + C_{EG} \quad (1.1)$$

Treibstoff-/ Energiepreise hängen vom Treibstoff- bzw. Energiepreis selbst $P_{T/E}$ und vom Verbrauch eines Flugzeugs pro Blockstunde $m_{Verbrauch_{proFlug}}$ ab (vgl. (1.2)).

$$C_T \text{ [EUR]} = (P_{T/E} \cdot n_{F,Jahr} \cdot m_{Verbrauch,B}) \quad (1.2)$$

Die **Wartungskosten** werden nach dem Jenkinson 1999 Modell berechnet. Das Modell ermöglicht es, grob aber schnell die Wartungskosten für ein Flugzeug abzuschätzen [17]. Da dieses Modell auf konventionelle Flugzeuge ausgearbeitet wurde, berechnet man die Wartungskosten für alternative Antriebe als Prozentanteil des Referenz-Flugzeugs. Die Formeln stammen aus [17] 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 (1.3) 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.

$$C_{W,B} \text{ [EUR]} = (C_{W,Zelle,B} + n_T \cdot C_{W,Triebwerk,B}) t_B \cdot n_{F,Jahr} \cdot k_{WK} \cdot k_{Infl} \quad (1.3)$$

$$C_{M,AF,b} \text{ [EUR]} = (175 \frac{USD}{h} + 0,0041 \frac{USD}{h} \cdot m_{OE}) \cdot k_{Infl} \quad (1.4)$$

$$C_{M,E,L,b} [\text{EUR}] = (0,00029 \frac{\text{USD}}{\text{h}} \cdot T_{T/O}) \cdot k_{Infl} \quad (1.5)$$

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

Unter **Entgelte und Gebühren** sind Flughafenentgelte (Passagier-, Lande- und Startentgelte, Sicherheitsentgelte sowie Abfertigung am Vorfeld) und die Flugsicherungsgebühr gemeint. Die Formel der Flugsicherungsgebühr (C_{FS}) für jeweils An- und Abfluggebühr stammt aus [18] und ist in der Gleichung (1.6) dargestellt. Im Jahr 2025 liegt der Wert P_{FS} bei 380,71 Euro. Der $MTOW$ bezeichnet das Höchstabfluggewicht (Maximum Take-Off Weight) eines Flugzeugs. Die zugrunde liegenden Werte der Flughafenentgelte basieren auf den Daten von [19]. Außerdem müssen bei BA-Flugzeugen die Kosten für Batteriewechsel $P_{W,Bat}$ einkalkuliert werden, pro Flugzeug wird ein Wert von einem Wert in Höhe von 285 EUR ausgegangen [20].

$$C_{FS} [\text{EUR}] = \left(\frac{MTOW}{50} \right)^{0,7} \cdot P_{FS} \quad (1.6)$$

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 [21].

$$t_B = t_{f,h,j} + t_R \quad (1.7)$$

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 [22].

$$C_{crew} [\text{EUR}] = (L_{Pilot} \cdot 2 + L_{crew} \cdot n_{crew}) \cdot t_B \quad (1.8)$$

Zu **kapitalbezogenen Kosten** gehören Abschreibungs-, Versicherungs- und Verzinsungskosten. Abschreibungskosten sind von Anschaffungskosten (Kaufpreis), Abschreibungsdauer und Blockstunden pro Jahr abhängig [22]. Die Abschreibungsdauer nach AEA beträgt jeweils 14 Jahre für Kurz- und Mittelstrecken und 16 Jahre für Langstrecken.

Da keine öffentlich zugänglichen Marktpreise für Luftfahrzeuge mit alternativen Antriebssystemen vorliegen, wird die Kalkulation der Anschaffungskosten für elektrisch betriebene Flugzeuge nach der Methodik von [23] durchgeführt, in welcher das Regressionsmodell anhand einer Marktanalyse erstellt wurde. 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 Inflationsrate k_{Infl} 1,193 und der Wechselkurs k_{WK} ebenfalls betrachtet werden sollen.

$$C_{BA,ac} [\text{EUR}] = (407408 \cdot n_{PAX} - 2967.4) \cdot k_{WK} \cdot k_{Infl} \quad (1.9)$$

Ein weiterer wichtiger Faktor der kapitalgebundenen Kosten ist die Auslastung U eines Flugzeuges. Es wird durch die Anzahl der verfügbaren Stunden p.a. 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 angesetzt wird [21].

$$U = \frac{t_{verf}}{t_B + t_{TA}} \quad (1.10)$$

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 [21].

Außerdem bestehen bei alternativen Antrieben betriebliche Kosten, die durch Infrastrukturbedienung bedingt sind.

1.2.2 Infrastrukturkosten

Batterie-Antrieb

Kapitalkosten für BA-Infrastruktur sind in folgender Formel zusammengestellt:

$$CAPEX \text{ [EUR]} = C_{Bat} + C_{Strom} + C_{BSS} + C_{W,Bat} + C_{Hubwagen} \quad (1.11)$$

$$\begin{aligned} C_{Bat} &= P_{Bat} \cdot n_{Bat} \\ C_{Strom} &= n_{BSS} \cdot P_{Strom} \cdot N_{menge} \\ C_{BSS} &= P_{BSS} \cdot n_{BSS} \\ C_{Hubwagen} &= P_{Hubwagen} \cdot n_{Hubwagen} \end{aligned} \quad (1.12)$$

wobei P_{Bat} der Preis für eine Batterie darstellt und n_{Bat} die Anzahl der Batterien, die benötigt sind. N_{menge} ist die Menge an Strom, der für das Laden einer Batterie nötig ist. P_{BSS} ist der Preis des Ladegeräts der Batteriewechselstation und n_{BSS} ist wie immer der Anzahl an Ladegeräten. Außerdem werden die Kosten für Batteriewechsel $P_{W,Bat}$ und Preis pro Hubwagen $P_{Hubwagen}$ mitbetrachtet.

Tabelle 1.3: Werte und Annahmen der BA-Infrastruktur

	Werte	Quelle
P_{BSS} [EUR]	11 974	[24]
P_{Bat} [EUR/kWh]	125000	[24]
$P_{W,Bat}$ [EUR]	285	[20]
P_{HW} [EUR]		

Die Anzahl der Batterien ist von der Gesamtanzahl der Abfertigungen $N_{Abfertigung}$ und Zyklen $c_{Batterie}$ einer Batterie abhängig. Für die Ladegeräte wurde die Leistung von 250 kW angenommen. Die Verluste beim Laden werden ignoriert. Zusätzlich wird der Puffer von 20 % implementiert, um Engpässe zu vermeiden. In dieser Arbeit wird eine Batteriekapazität von 900 kWh angenommen, bei einem 18 Stunden-Betrieb entspricht das 3,6 Stunden Ladedauer für eine Batterie mit insgesamt 5 Ladezyklen pro Tag. Die Anzahl der Ladegeräte n_{BSS} ist von der Gesamtzahl der Batterien und Ladezyklen abhängig.

$$N_{Bat} = 1,2 \cdot \frac{N_{Abfertigung}}{C_{Batterie}} \quad (1.13)$$

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. (1.14)). Die Preise für die Anlage sind in der Tabelle 1.4 zusammengefasst.

$$CAPEX \text{ [EUR]} = P_{Tank} + P_{kP} + P_{BW} \cdot N_{BW} \quad (1.14)$$

Tabelle 1.4: Werte und Annahmen

	Werte	Einheit	Quellen
$P_{Lagertank}$	34	EUR/kgGH2 stored	sek [25]
Abschreibung Lagertank	20	Jahre	sek [25]
Größe Lagertank [m^3]	4 732		[26]
P_{kP}	346	EUR/kg/h	sek [25]
Abschreibung <i>kP</i>	10	Jahre	sek [25]
P_{BW}	87848	EUR	[27]

Wie bereits im Grundlagen-Kapitel erläutert wurde, hat der kryogene Wasserstoff eine Dichte von 70 kg/m^3 (Quelle), also können 331.240 t in einem kugelförmigen Lagertank gespeichert werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Vorgänge der Betankung des Wagens und folgende Betankung des Flugzeugs jeweils 30 Minuten dauern [27]. (1 Flugzeug pro Tankwagen, also alles von - Ankunftsrate abhängig)

1.3 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. Dies 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 die restlichen 17,9 %.

Diese Verteilung wird auch für die Betriebsszenarien genutzt. Es wird angenommen, dass die Flüge von 6 bis 24 Uhr stattfinden. Dies entspricht 18 Stunden. Kurzstrecken-Flüge können durch den Einsatz von batteriebetriebenen Flugzeugen ersetzt werden. Es ist nennenswert, dass die Nachfrage des Kurzstrecken-Bedarfs dadurch nicht gedeckt werden kann, jedoch in dieser Arbeit angenommen, dass die gleiche Anzahl an Flugzeugen am Flughafen abgewickelt werden.

/subsectionBetriebsszenario I

In dem ersten Betriebsszenario wird angenommen, dass die Langstrecken durch die Batterieantriebe komplett ersetzt werden. Die Mittelstrecken werden komplett durch Wasserstoff-Antrieben ersetzt.

/subsectionBetriebsszenario II

Literatur

- [1] 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).
- [2] Heart Aerospace. *Heart Aerospace partners with Aernnova to design and develop the structure for the ES-19 electric airplane*. Accessed: January 20, 2025. 2021. URL: <https://heartaerospace.com/newsroom/heart-aerospace-partners-with-aernnova-to-design-and-develop-the-structure-for-the-es-19-electric-airplane/>.
- [3] 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.
- [4] C. Sky u. a. „Hydrogen-powered aviation: a fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050“. In: (2020).
- [5] LET Aircraft Industries. *L410 NG*. Archived version from 18 August 2021, accessed on [09. Januar, 2025]. 2021. URL: <https://web.archive.org/web/20210818120608/http://www.let.cz/en/l410ng>.
- [6] Airbus. *A321neo*. Accessed: 03. Februar, 2025. URL: <https://aircraft.airbus.com/en/aircraft/a320-family/a321neo>.
- [7] D. Fonseca. *Direct Operating Costs, Fuel Consumption, and Cabin Layout of the Airbus A321LR*. Accessed: 03. Februar, 2025. Feb. 2022.
- [8] 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.

- [9] AeroTELEGRAPH. *Die Listenpreise 2018 von Airbus*. Accessed: January 14, 2025. 2018. URL: <https://www.aerotelegraph.com/die-listenpreise-2018-von-airbus>.
- [10] Eurostat. *Energy Prices: Household and Industrial Consumers*. Accessed: January 20, 2025. 2025. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_pc_205/default/table?lang=en.
- [11] P. B. Wangsness u. a. „Fremskyndet innfasing av elfly i Norge: mulige“. In: *Environmental and Resource Economics* 37.1 (2021), S. 181–210.
- [12] 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.
- [13] J. O. Reimers. „Introduction of electric aviation in Norway“. In: *Green Future: Norway* (2018).
- [14] International Air Transport Association (IATA). *Industry Statistics*. Report. Updated: June 2024. Juni 2024.
- [15] M. Watson u. a. „Sustainable aviation fuel technologies, costs, emissions, policies, and markets: a critical review“. In: *Journal of Cleaner Production* 449 (2024).
- [16] Discover Airlines. *Karriere als Cabin Crew – Bewerbungsbedingungen*. Accessed: January 29, 2025. 2025. URL: https://www.discover-airlines.com/de/de/about-us/career/cabin#terms_conditions.
- [17] N. Brüge und F. Kranich. „Wartungskosten von Passagierflugzeugen bei verschiedener Triebwerksanzahl berechnet nach DOC-Methoden“. In: (2018).
- [18] D. F. GmbH. *Flugsicherungsgebühren*. Zugriff am 11. Januar 2025.
- [19] Fraport AG. *Flughafenentgelte nach § 19b LuftVG: Entgelte für Zentrale Bodenverkehrsdiens Infrastruktureinrichtungen (gültig ab 01. Januar 2025)*. Zugriff am 17. Januar 2025. Jan. 2025.
- [20] Z. Guo u. a. „Infrastructure planning for airport microgrid integrated with electric aircraft and parking lot electric vehicles“. In: *Etransportation* 17 (2023), S. 100257.
- [21] D. Scholz. *Aircraft Design / DOC*. Lecture Notes, Hamburg University of Applied Sciences (HAW Hamburg). Zugriff am 5. Januar, 2025. 2015.

-
- [22] R. Conrady, F. Fichert und R. Sterzenbach. *Luftverkehr: Betriebswirtschaftliches Lehr- und Handbuch*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2019.
- [23] 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.
- [24] Z. Guo u. a. „Aviation to grid: Airport charging infrastructure for electric aircraft“. In: *International Conference on Applied Energy*. 2020.
- [25] J. Hoelzen u. a. „H2-powered aviation–Design and economics of green LH2 supply for airports“. In: *Energy Conversion and Management: X* 20 (2023).
- [26] J. E. Fesmire und A. Swanger. *New LH2 Sphere Presentation*. Presentation at DOE/NASA Advances in Liquid Hydrogen Storage Workshop. Accessed: January 16, 2025. Aug. 2021.
- [27] J. Hoelzen u. a. „H2-powered aviation at airports–Design and economics of LH2 refueling systems“. In: *Energy Conversion and Management: X* 14 (2022).
- [28] Die Bundesregierung. *Klimaziel: Deutschland reduziert Emissionen um 37 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente*. Zugriff am 20. November, 2024. Apr. 2024. URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/treibhausgasbilanz-2023-2265440>.
- [29] H. Mensen. *Handbuch der Luftfahrt*. Springer-Verlag, 2013.
- [30] D. Schaar und L. Sherry. „Analysis of airport stakeholders“. In: *2010 Integrated Communications, Navigation, and Surveillance Conference Proceedings*. IEEE. 2010, J4–1.
- [31] 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.
- [32] A. S.A.S. *Aircraft Characteristics Airport and Maintenance Planning: A380*. Revision Nov 01/20. Zugriff am 31. Dezember 2024. Airbus S.A.S. März 2005.
- [33] 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.

- [34] M. A. Camilleri und M. A. Camilleri. *Aircraft operating costs and profitability*. Springer, 2018.
- [35] Umweltbundesamt. *Aviation in the EU ETS and CORSIA in the Fit for 55 package – Factsheet*. Zugriff am 23. Dezember 2024. Sep. 2023.
- [36] P. J. Ansell. „Review of sustainable energy carriers for aviation: Benefits, challenges, and future viability“. In: *Progress in Aerospace Sciences* 141 (2023), S. 100919.
- [37] International Air Transport Association (IATA). *IATA SAF Handbook*. Zugriff am 27. Dezember 2024. 2024.
- [38] 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>.
- [39] 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>.
- [40] International Air Transport Association (IATA). *SAF Procurement: Pricing Options for Different Strategies*. Zugriff am 28. Dezember 2024. 2024.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] F. Salucci u. a. „Optimal recharging infrastructure sizing and operations for a regional airport“. In: *1st Aerospace Europe Conference (AEC 2020)*. 2020, S. 1–8.
- [45] I. Abrantes u. a. „The impact of revolutionary aircraft designs on global aviation emissions“. In: *Renewable Energy* 223 (2024), S. 119937.
- [46] T. Dalmia u. a. „Powering the Future of Electric Aviation“. In: (2022).

-
- [47] M. Mulder, P. L. Perey und J. L. Moraga. „Outlook for a Dutch hydrogen market: economic conditions and scenarios“. In: (2019).
- [48] C. O. Colpan und A. Kovač. *Fuel Cell and Hydrogen Technologies in Aviation*. Springer, 2022.
- [49] Embraer S.A. *Embraer presents the Energia Family – Four New Aircraft Concepts Using Renewable Energy Propulsion Technologies*. Zugriff am 03. Januar 2025. 2021.
- [50] K. Goodge und P. Withey. „An Analysis of Direct Operating Costs for the Wright Spirit Electric Aircraft“. In: *Aerospace* 11.12 (2024), S. 1007.
- [51] R. H. Liebeck u. a. *Advanced subsonic airplane design and economic studies*. Techn. Ber. 1995.
- [52] International Energy Agency (IEA). *Fossil jet and biojet fuel production cost ranges (2010-2030)*. Zugriff am 03. Januar 2025. 2021.
- [53] European Central Bank (ECB). *Euro Reference Exchange Rate: USD*. Online Resource. Zugriff am 14. Januar 2025.
- [54] Airbus. *Airbus unveils Zero-Emission Aircraft (ZEA) concepts*. Online PDF. Zugriff am 16. Januar, 2025. 2020.
- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] Aerospace Technology Institute (ATI). *Airports, Airlines, Airspace Operations and Hydrogen Infrastructure*. Techn. Ber. Accessed: January 16, 2025. Aerospace Technology Institute (ATI), März 2022.
- [58] C. H. J. Undertaking. „Strategic research and innovation agenda 2021–2027“. In: *Agenda 2021* (2022), S. 179.
- [59] F. Schenke u. a. „LH2 supply for the initial development phase of H2-powered aviation“. In: *Energy Conversion and Management: X* 24 (2024).