



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 von der Firma Aircraft Industries. Die moderne Version NG verfügt über neue Avionik und wird wahrscheinlich in der näheren Zukunft weiter produziert. L410NG ist mit den 2 GE H85-200 Triebwerke mit der Wellenleistung von 850 (SHP) ausgestattet.

ES-19 von Heart Aerospace wird als ein Vergleich für L410 genommen. Das Konzept hat rein elektrisches Antrieb mit einer Batterie. Das Unternehmen hat zwar die ES-19 auf eine hybride Wasserstoffversion ES-30 umgerüstet, das Konzept von ES-19 war aber groß diskutiert und in den wissenschaftlichen Arbeiten oft erwähnt. Das Flugzeug hat vier Triebwerke und sollte die Reichweite von 400 km erreichen mit der Geschwindigkeit von 330 km/h haben [1] [2]. Für die Batterie für ES-19 wird die Kapazität von 900 kWh angenommen [3].

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

Da es bis jetzt nur noch weniger weit ausgearbeitete Konzepte und Modelle von Wasserstoff-Flugzeuge gibt, wird der Betriebsvergleich auf der Basis von einem A321LR gemacht. A321LR ist von Airbus vorgestellte neue Version von A321neo

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

Es ist auch zu erwarten, dass die Flugzeit von 5 bis 15 % höher aufgrund des Wasserstofftank-Gewichts wird [4]. Für die Arbeit wird es ein Wert von 10 % genommen. Der Vergleich zum SAF-Betriebskosten findet auch mit 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 von einem A321LR nicht zur Verfügung steht, wird der Listenpreis von einem A321neo genommen. Sie kommen aus einer Flugzeug-Reihe und können vergleichbare Preise haben.

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. Diese Daten in der Literatur sind noch nicht verfügbar.

Infrastrukturkosten

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

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 die Kosten einer Fluggesellschaft werden 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, sie sind ähnlich. Als Grundlage für ein Modell wurde von Association of European Airlines (AEA) 1989 gewählt, da sie hohen Anwendung in der akademischen Welt hat, umfassend ist und Berechnungswerte für Kurz-, als auch Langstecken hat.

Reservebedarf beträgt 30 % von Gesamtkapazität.

1.2.1 Betriebskosten einer Fluggesellschaft

Die Gleichung (1.1) stellt die Betriebskosten DOC für Flugzeugbenutzung dar. Die bestehen aus Treibstoff-/Energiekosten C_T , Wartungskosten C_W , Entgelte und Gebühren C_{EG} , Kosten für Personal C_{Crew} , kapitalverbundene Kosten C_{KK} .

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

Treibstoff-/ Energiepreise hängt von der Treibstoff- bzw. Energiepreis selbst $P_{T/E}$ und vom Verbrauch von einem Flugzeug pro Blockstunde $m_{Verbrauch,proFlug}$ ab (vgl. (1.2)).

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

Die **Wartungskosten** werden nach Jenkinson 1999 Modell berechnet. Das Modell ermöglicht schnell und grob die Wartungskosten für ein Flugzeug abzuschätzen [17]. Da dieses Modell für konventionelle Flugzeuge ausgearbeitet wurde, werden die Wartungskosten für alternative Antriebe als Prozentanteil von Referenz-Flugzeug berechnet. Die Formeln stammen aus [17] und beziehen sich auf das Jahr 1994, somit muss den Inflationsfaktor k_{Infl} einkalkuliert werden. Die Berechnung liefert die Ergebnisse in USD, deswegen ein Wechselkursfaktor k_{WK} dazugerechnet wird. Die Wartungskosten werden normalerweise auf die Wartung der Flugzeugzelle $C_{W,Zelle,B}$ und Triebwerken $C_{W,Triebwerk,B}$ aufgeteilt, wie in der (1.3) dargestellt. Die Wartungskosten der Zelle sind von dem leeren Betriebsgewicht (Operating Empty Mass m_{OE}) abhängig. Kosten von Triebwerk ist von erzeugten Schub beim Start (Take-Off Thrust $T_{T/O}$) abhängig.

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

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

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

Diese Formeln sind für Triebwerke ausgelegt mit Nebenstromverhältnis 5. Da die neuen größeren Flugzeuge höhere Nebenstromverhältnis hat, für die Vereinfachung wird trotzdem diese Formel benutzt.

Unter **Entgelten und Gebühren** sind Flughafenentgelte (Passagier-, Lande- und Startentgelte, Sicherheitsentgelt, Abfertigung am Vorfeld) und Flugsicherungsgebühr gemeint.// Formel für Flugsicherungsgebühr (C_{FS}) jeweils An- und Abfluggebühr stammt aus [18] und in (1.6) dargestellt. Im Jahr 2025 liegt den Wert P_{FS} bei 380,71 Euro. $MTOW$ bezeichnet Höchstabfluggewicht (Maximum Take-Off Weight) von einem Flugzeug. Die Werte für Flughafenentgelte wurden aus den [19] genommen. Außerdem müssen bei BA-Flugzeugen die Kosten für Batteriewechsel $P_{W,Bat}$ einkalkuliert werden, pro Flugzeug wird ein Wert von 285 EUR genommen [20].

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

Die Betriebskosten werden auf Blockstunden bezogen. Blockstunden bestehen aus Flug- $t_{F,h}$ und Rollzeit t_R zum und von Parkposition t_R . Für Kurs- und Mittelstrecken beträgt t_R 0,25 h und für Langstrecken 0,42 h [21].

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

Crewkost definieren sich aus der Lohn für Piloten L_{Pilot} und Besatzung L_{crew} . Anzahl der Besatzung n_{crew} sind von der Anzahl der Passagiere abhängig. Jeweils je 50 Passagier ist einen Flugbegleiter notwendig [22].

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

Zu **kapitalbezogenen Kosten** gehören Abschreibungs-, Versicherungs- und Verzinskosten. Abschreibungskosten sind von Anschaffungskosten (Kaufpreis), Abschreibungsdauer und Blockstunden pro Jahr abhängig [22]. Abschreibungsdauer

nach AEA ist jeweils 14 Jahre für Kurs- und Mittelstecken und 16 Jahre Langstrecken.

Aufgrund nicht Zugänglichkeit zu den Preisen für alternativen Antrieben wird der Verkaufspreis von elektrischem Flugzeug nach [23] berechnet, wo das Regressionsmodell anhand Marktanalyse erstellt wurde. In der Formel sind 10 % höhere Anschaffungskosten mitbetrachtet, aufgrund der Einführung der neuen Technologie auf den Markt. Die Studie ist aus dem Jahr 2020 und die Preise wurden im USD berechnet, deswegen Inflationsrate k_{Infl} von 1,193 und der Wechselkurs k_{WK} mitbetrachtet werden sollen.

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

Noch ein wichtiger Faktor bei der kapitalverbundenen Kosten ist die Auslastung U eines Flugzeuges. Es wird durch Anzahl verfügbaren Stunden pro Jahr t_{verf} , Blockzeit t_B und Turnaround Zeit t_{TA} . t_{verf} für Kurzstrecken wurde in der Höhe von 3750 h und für Mittel- und Langstrecken 4800 h [21].

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

Verzinsungskosten C_{Zins} sind durch den Prozentanteil von Anschaffungskosten bedingt, für dieser gilt ca. 5 %. Versicherungskosten sind hingegen von dem Kaufpreis eines Flugzeugs abhängig (inklusive Rabatte beim Kauf) und für diese Arbeit werden 5 % angenommen [21].

1.2.2 Infrastrukturkosten

Batterie-Antrieb

Kapitalkosten für BA-Infrastruktur sind in folgender Formel zusammengestellt:

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

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

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

Stromkosten = Anzahl der BSS mal die Leistung mal Kosten pro Einheit Spitzleistung mal Anzahl der Tage/30

Anschaffungskosten BSS = Anzahl BSS mal Kosten mal Tage/Lebensdauer

Tabelle 1.3: Werte und Annahmen für BA-Infrastruktur

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

Anzahl 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 genommen. Die Verluste beim Laden werden ignoriert. Zusätzlich wird der Puffer von 20 % dazu berechnet, um Engpässe zu vermeiden. In dieser Arbeit wird eine Batterie Kapazität von 900 kWh genommen, bei einem 18 Stunden-Betrieb das entspricht 3,6 Stunden Ladedauer für eine Batterie mit insgesamt 5 Ladezyklen pro Tag. Anzahl der Ladegeräten n_{BSS} ist von der Gesamtzahl der Batterien und Ladezyklen abhängig.

$$N_{Bat} = 1,2 \cdot \frac{N_{Abfertigung}}{c_{Batterie}} \tag{1.13}$$

Wasserstoff-Antrieb

Für die Wasserstoff-Antriebe wird einen oberirdischen Tank für kryogene flüssigen Wasserstoff LH_2 , eine kryogene Pumpe zum Befüllen und Entleeren des Lagers kP und ein Betankungswagen BW gebraucht (vgl. (1.14)). Die Preise für die Anlage ist in der Tabelle 1.4 zusammengefasst.

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

Tabelle 1.4: Werte und Annahmen

	Werte	Einheit	Quellen
$P_{\text{Lagertank}}$	34	€/kgGH2 stored	sek [25]
Abschreibung Lagertank	20	Jahre	sek [25]
Größe Lagertank [m^3]	4 732		[26]
P_{kP}	346	€/kg/h	sek [25]
Abschreibung kP	10	Jahre	sek [25]
P_{BW}			

Wie bereits in Grundlagen-Kapitel erläutert wurde, hat den kryogenen Wasserstoff die Dichte von 70 kg/m^3 (Quelle), also können 331.240 t davon in einem Lagertank gespeichert werden.

1.3 Betriebsszenarien

Betriebsszenarien helfen die vorher beschriebene Kosten in Anwendung zu bringen und zeigen mögliche Entwicklung im Jahr 2050. Für die Betriebsszenarien wurde der Flughafen Frankfurt ausgesucht. Das ist der größte Flughafen in Deutschland und als ein Hub aktiv (anderes Wort). Bei einem größeren Flughafen werden die Betriebsdifferenzen deutlicher, da Verkehrsaufkommen viel größer ist. Fraport meldete im Jahr 2023 insgesamt 423764 gewerbliche Flugbewegungen, das sind im Durchschnitt 1160 Flugbewegungen pro Tag. Es wird angenommen, dass die Hälfte davon ist die Abflüge, also müssen 580 Flugzeuge am Tag abgefertigt werden.

Die Gesamtbewegungen teilen sich nach Entfernungen folgend aus:

- 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 benutzt. Es wird angenommen, dass die Flüge von 6 bis 24 Uhr stattfinden. Dies entspricht 18 Stunden. Die Kurzstrecken-Flüge können durch die Batterieantriebe ersetzt werden. Es ist nennenswert, dass die Nachfrage des Kurzstrecken-Bedarfs dadurch nicht bedeckt werden kann, jedoch für diese Arbeit wird angenommen, dass die gleiche Anzahl an Flugzeugen am Flughafen abgewickelt werden.

/subsectionBetriebsszenario I

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

/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 Bodenverkehrsdienst 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] 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>.
- [28] H. Mensen. *Handbuch der Luftfahrt*. Springer-Verlag, 2013.
- [29] D. Schaar und L. Sherry. „Analysis of airport stakeholders“. In: *2010 Integrated Communications, Navigation, and Surveillance Conference Proceedings*. IEEE. 2010, J4–1.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] M. A. Camilleri und M. A. Camilleri. *Aircraft operating costs and profitability*. Springer, 2018.

- [34] Umweltbundesamt. *Aviation in the EU ETS and CORSIA in the Fit for 55 package – Factsheet*. Zugriff am 23. Dezember 2024. Sep. 2023.
- [35] P. J. Ansell. „Review of sustainable energy carriers for aviation: Benefits, challenges, and future viability“. In: *Progress in Aerospace Sciences* 141 (2023), S. 100919.
- [36] International Air Transport Association (IATA). *IATA SAF Handbook*. Zugriff am 27. Dezember 2024. 2024.
- [37] 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>.
- [38] 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>.
- [39] International Air Transport Association (IATA). *SAF Procurement: Pricing Options for Different Strategies*. Zugriff am 28. Dezember 2024. 2024.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] I. Abrantes u. a. „The impact of revolutionary aircraft designs on global aviation emissions“. In: *Renewable Energy* 223 (2024), S. 119937.
- [45] T. Dalmia u. a. „Powering the Future of Electric Aviation“. In: (2022).
- [46] M. Mulder, P. L. Perey und J. L. Moraga. „Outlook for a Dutch hydrogen market: economic conditions and scenarios“. In: (2019).

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