



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: Die Einführung innovativer Antriebe führt zu höheren Betriebskosten einer Fluggesellschaft im Vergleich zu herkömmlichen Jettriebwerken, da kostspielige technische Anforderung und neue zusätzliche Abfertigungsprozesse notwendig sind.
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...
4. These 4: Die Wahl der Flottenzusammensetzung mit innovativen Antriebstechnologien in verschiedenen Betriebsstrategien beeinflusst signifikant die Betriebskosten von Fluggesellschaften. Interessanterweise könnte in Szenarien mit den größten Betriebskosten (z. B. bei langen Strecken) die Infrastrukturkosten geringer ausfallen, da manche innovative Antriebe weniger spezifische oder kostspielige Infrastruktur erfordern.
5. These 5: Die Wahl der Flottenzusammensetzung mit innovativen Antriebstechnologien in verschiedenen Betriebsstrategien beeinflusst die Betriebskosten von Fluggesellschaften, wobei Szenarien mit höheren Betriebskosten möglicherweise geringere Infrastrukturkosten erfordern.
6. These 6: 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.

---

These 4: Die Infrastrukturkosten sind schwer vorherzusagen, da unerwartete Reparaturen 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.

These 5: Obwohl bestimmte Szenarien höhere Anschaffungskosten aufweisen, wird der finanzielle Effekt dieser höheren Investitionen durch die längere Abschreibungsdauer relativiert, sodass die jährlichen Belastungen vergleichbar oder sogar geringer bleiben.

# 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

<i>bar</i>	Bar
<i>km</i>	Kilometer
<i>EUR</i>	Euro
<i>USD</i>	Euro
<i>m<sup>3</sup></i>	Kubikmeter
<i>t</i>	Tonnen
<i>kg</i>	Kilogramm

## Symbole

<i>CO<sub>2</sub></i>	Kohlenstoffdioxid
<i>LH<sub>2</sub></i>	flüssiger Wasserstoff
<i>O<sub>2</sub></i>	Ozon

### 1.1 Betriebsszenarien

Betriebsszenarien helfen die vorher beschriebene Betrieb- und Infrastrukturkosten in Anwendung zu bringen und eine mögliche Entwicklung im Jahr 2050 zu zeigen. 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, 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:

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

Da nicht explizit definiert wird, welche Distanzen jedes Flugzeug fliegt, werden die Betriebskosten anhand vorher beschriebene Distanzen berechnet. Nämlich für Kurzstrecken wird von einer Entfernung von 400 km genommen und für Mittel- und Langstrecken eine Distanz von 6000 km. 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 vorgeschlagen und mit kalkuliert. Es ist nennenswert, dass nur Teil der tatsächlichen Nachfrage des Kurzstrecken-Bedarfs dadurch gedeckt werden kann. 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.

Für die Kurzstrecken wird zwischen Batterie-Antrieb und SAF unterschieden, die Mittel- und Langstrecken werden durch Flugzeuge mit Wasserstoffturbine und SAF versorgt/erfüllt. Der Aufteilung der Antriebe für jedes Szenario ist in der Abbildung **betriebsszenarien** dargestellt.

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.

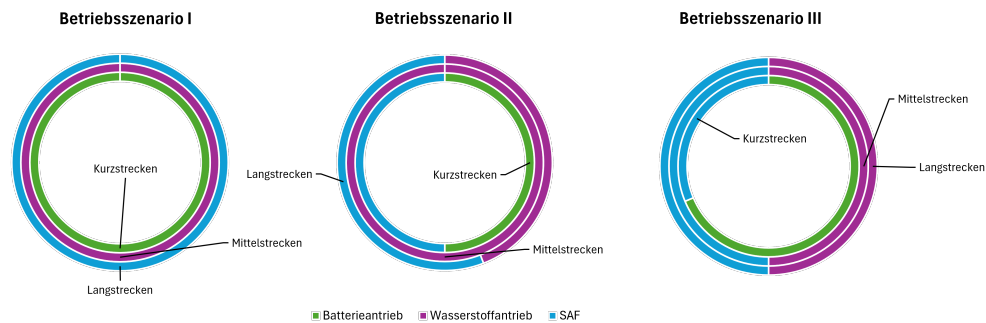


Abbildung 1.1: Aufteilung der Flugzeugflotte nach Antriebsart

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



## 2 Auswertung den Ergebnissen

Anhand vorgeschlagene in dem Teil ?? Methodik wurde den Vergleich zwischen Referenz-Flugzeugen und alternativen Antrieben geschaffen. Außerdem werden aufgestellte Betriebsszenarien ausgewertet und schließlich diskutiert.

### 2.1 Ergebnisse des Gegenüberstellens von Referenzflugzeugen und neuartigen Antriebsansätzen

**Vergleich des Batterie-Antriebs und SAF mit einem konventionellen Treibstoff für eine Kurzstrecke** In der Abbildung 2.1 sind die Ergebnisse für batteriebetriebenes ES-19 und konventionelles L410 dargestellt. Die Werte wurden für 400 Kilometer Flug bestimmt. Die Gesamtbetriebskosten des ES-19 sind ca. 22 % höher des konventionellen L410. Entgelte und Gebühren bewirken den größten Teil der Betriebskosten beider Flugzeugen. Kapitalbezogene Kosten bei BA sind 36 % höher. Der Anteil der Treibstoff- bzw. Energiekosten ist am niedrigsten im Vergleich zu anderen Kosten und mit einem Trend, dass die Treibstoffkosten sind bei konventionellem Flugzeug 30 % höher.

**Vergleich des Wasserstoffantriebs und SAFs mit einem Referenzflugzeug für eine Mittelstrecke** In der vorgeschlagene Vorgehensweise wurde den Vergleich zwischen den herkömmlichen Treibstoffen und durch Wasserstoffturbine betriebenen Flugzeug, als auch mit SAF für 6000 Kilometer-Flug geschaffen.

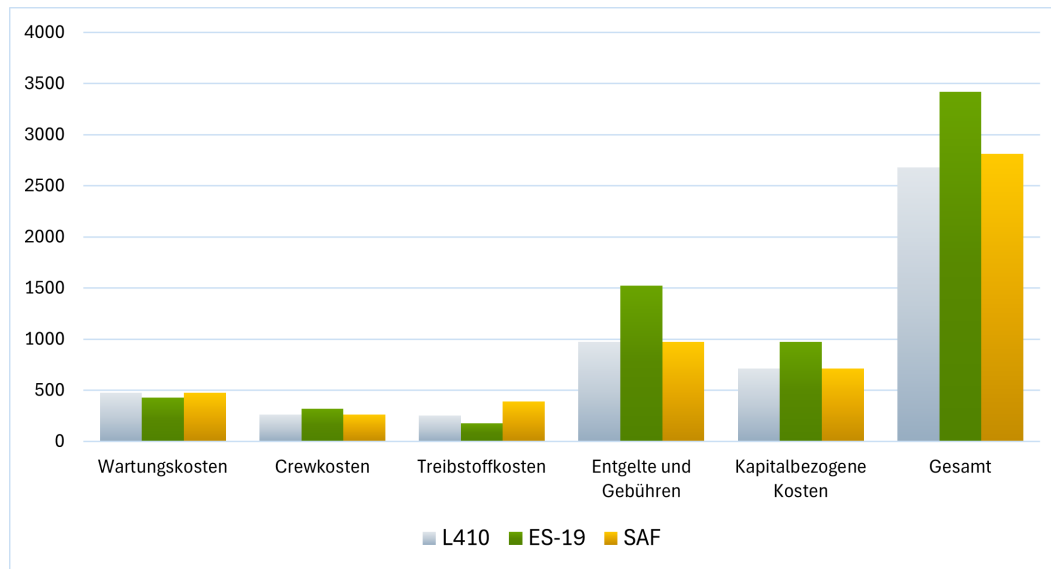


Abbildung 2.1: Vergleich der Referenz und Flugzeug mit der Batterie-Antrieb

## 2.2 Ergebnisse der Betriebsszenarien

In diesem Teil werden die Auswertung der aufgestellten im Kapitel 1.1 ausgewertet und miteinander verglichen.

Obwohl der Unterschied zwischen Betriebskosten gleichmäßig ist, hat unter allen Betriebsszenarien das zweite die höchsten Gesamtbetriebskosten. 60 % der Kosten entstehen durch wasserstoffbetriebene-Flugzeuge. Drittes Szenario hat der niedrigste Betriebswert von allen drei.

Nennenswert ist das in der Berechnung von allen Betriebsszenarien sind erstmal nur einmalige Infrastrukturausgaben ohne jährliche Abschreibungen ausgerechnet. In der Tabelle 2.1 sind die benötigten Werte für jedes Szenario dargestellt.

Tabelle 2.1: Infrastrukturwerte 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 Szenario Nummer zwei die größte. Szenario zwei ist 27 % höher als das erste. Die Gesamtkosten für das zweite Szenario liegen über 35 Tausend Euro.

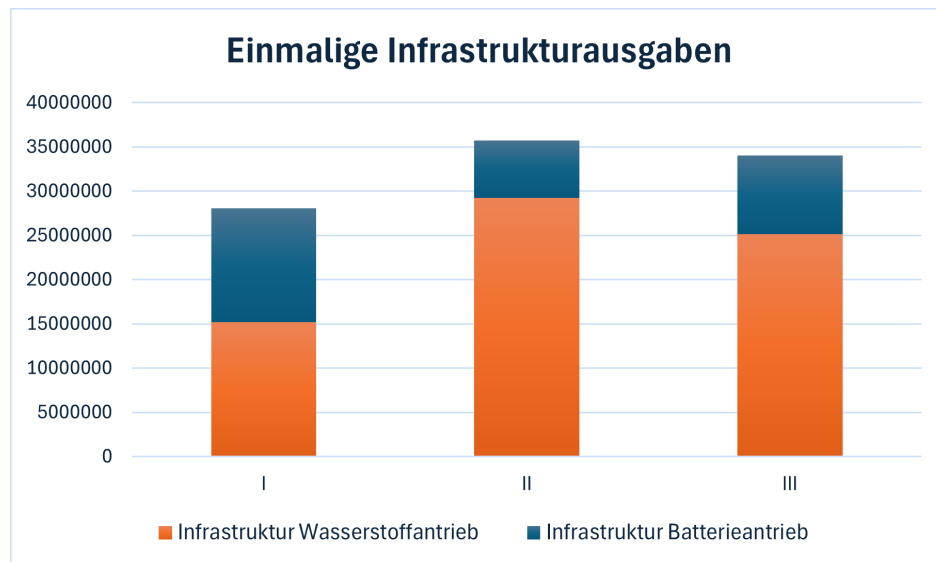


Abbildung 2.2: Vergleich der einmaligen Infrastrukturausgaben zwischen den Betriebsszenarien



# 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] D. Schaar und L. Sherry. „Analysis of airport stakeholders“. In: *2010 Integrated Communications, Navigation, and Surveillance Conference Proceedings*. IEEE. 2010, J4–1.
- [5] 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.
- [6] Airbus. *Airbus A321 Aircraft Characteristics: Airport and Maintenance Planning*. Revision 1. Original Issue: September 30, 1992. März 2022.
- [7] 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.
- [8] C. Sky u. a. „Hydrogen-powered aviation: a fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050“. In: (2020).

- [9] 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.
- [10] M. A. Camilleri und M. A. Camilleri. *Aircraft operating costs and profitability*. Springer, 2018.
- [11] 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.
- [12] Umweltbundesamt. *Aviation in the EU ETS and CORSIA in the Fit for 55 package – Factsheet*. Zugriff am 23. Dezember 2024. Sep. 2023.
- [13] P. J. Ansell. „Review of sustainable energy carriers for aviation: Benefits, challenges, and future viability“. In: *Progress in Aerospace Sciences* 141 (2023), S. 100919.
- [14] International Air Transport Association (IATA). *IATA SAF Handbook*. Zugriff am 27. Dezember 2024. 2024.
- [15] 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>.
- [16] 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>.
- [17] International Air Transport Association (IATA). *SAF Procurement: Pricing Options for Different Strategies*. Zugriff am 28. Dezember 2024. 2024.
- [18] 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.
- [19] 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.

- 
- [20] M. Watson u. a. „Sustainable aviation fuel technologies, costs, emissions, policies, and markets: a critical review“. In: *Journal of Cleaner Production* 449 (2024).
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] I. Abrantes u. a. „The impact of revolutionary aircraft designs on global aviation emissions“. In: *Renewable Energy* 223 (2024), S. 119937.
- [25] 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.
- [26] 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).
- [27] M. Hepperle. „Electric flight-potential and limitations“. In: (2012).
- [28] 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.
- [29] T. Dalmia u. a. „Powering the Future of Electric Aviation“. In: (2022).
- [30] M. Mulder, P. L. Perey und J. L. Moraga. „Outlook for a Dutch hydrogen market: economic conditions and scenarios“. In: (2019).
- [31] C. O. Colpan und A. Kovač. *Fuel Cell and Hydrogen Technologies in Aviation*. Springer, 2022.
- [32] B. Khandelwal u. a. „Hydrogen powered aircraft: The future of air transport“. In: *Progress in Aerospace Sciences* 60 (2013), S. 45–59.

- [33] Embraer S.A. *Embraer presents the Energia Family – Four New Aircraft Concepts Using Renewable Energy Propulsion Technologies*. Zugriff am 03. Januar 2025. 2021.
- [34] 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/>.
- [35] K. Goodge und P. Withey. „An Analysis of Direct Operating Costs for the Wright Spirit Electric Aircraft“. In: *Aerospace* 11.12 (2024), S. 1007.
- [36] D. Scholz. *Aircraft Design / DOC*. Lecture Notes, Hamburg University of Applied Sciences (HAW Hamburg). Zugriff am 5. Januar, 2025. 2015.
- [37] P. B. Wangsness u. a. „Fremskyndet innfasing av elfly i Norge: mulige“. In: *Environmental and Resource Economics* 37.1 (2021), S. 181–210.
- [38] R. H. Liebeck u. a. *Advanced subsonic airplane design and economic studies*. Techn. Ber. 1995.
- [39] D. F. GmbH. *Flugsicherungsgebühren*. Zugriff am 11. Januar 2025.
- [40] International Energy Agency (IEA). *Fossil jet and biojet fuel production cost ranges (2010-2030)*. Zugriff am 03. Januar 2025. 2021.
- [41] International Air Transport Association (IATA). *Industry Statistics*. Report. Updated: June 2024. Juni 2024.
- [42] European Central Bank (ECB). *Euro Reference Exchange Rate: USD*. Online Resource. Zugriff am 14. Januar 2025.
- [43] Airbus. *Airbus unveils Zero-Emission Aircraft (ZEA) concepts*. Online PDF. Zugriff am 16. Januar, 2025. 2020.
- [44] 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.
- [45] Fraport AG. *Flughafenentgelte nach § 19b LuftVG: Entgelte für Zentrale Bodenverkehrsdiens Infrastruktureinrichtungen (gültig ab 01. Januar 2025)*. Zugriff am 17. Januar 2025. Jan. 2025.
- [46] 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](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_pc_205/default/table?lang=en).



- 
- [47] 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.
- [48] 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>.
- [49] 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/>.
- [50] 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](https://www.discover-airlines.com/de/de/about-us/career/cabin#terms_conditions).
- [51] Airbus. *A321neo*. Zugriff am 03. Februar, 2025. URL: <https://aircraft.airbus.com/en/aircraft/a320-family/a321neo>.
- [52] D. Fonseca. *Direct Operating Costs, Fuel Consumption, and Cabin Layout of the Airbus A321LR*. Zugriff am 03. Februar, 2025. Feb. 2022.
- [53] LET Aircraft Industries. *L 410 UVP-E20 Brochure*. Zugriff am 2. Februar, 2025. 2016.
- [54] AeroTELEGRAPH. *Die Listenpreise 2018 von Airbus*. Zugriff am 14. Januar, 2025. 2018. URL: <https://www.aerotelegraph.com/die-listenpreise-2018-von-airbus>.
- [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. Zugriff am 16. Januar, 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).

- [59] J. Hoelzen u. a. „H2-powered aviation–Design and economics of green LH2 supply for airports“. In: *Energy Conversion and Management: X* 20 (2023).
- [60] 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.
- [61] J. Hoelzen u. a. „H2-powered aviation at airports–Design and economics of LH2 refueling systems“. In: *Energy Conversion and Management: X* 14 (2022).
- [62] Z. Guo u. a. „Aviation to grid: Airport charging infrastructure for electric aircraft“. In: International Conference on Applied Energy. 2020.
- [63] J. O. Reimers. „Introduction of electric aviation in Norway“. In: *Green Future: Norway* (2018).
- [64] Z. Guo u. a. „Infrastructure planning for airport microgrid integrated with electric aircraft and parking lot electric vehicles“. In: *Etransportation* 17 (2023), S. 100257.
- [65] 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.
- [66] 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.
- [67] N. Brüge und F. Kranich. „Wartungskosten von Passagierflugzeugen bei verschiedener Triebwerksanzahl berechnet nach DOC-Methoden“. In: (2018).