Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Felisa Dib – von Lamezan

Mtnr.: [redacted]

Thema: Commuter Aircraft – Chance auf eine umweltfreundliche Luftfahrt?

Analyse der Umweltauswirkungen von modernen Commuter Aircrafts in der Luftfahrtindustrie

Fakultät Technik und Informatik
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Automotive and Aeronautical Engineering

Felisa Dib-v.Lamezan

Thema: Commuter Aircraft – Chance auf eine umweltfreundliche Luftfahrt? Analyse der Umweltauswirkungen von modernen Commuter Aircrafts in der Luftfahrtindustrie

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Flugzeugbau
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer: Herr Prof. Dr. Volker Wendt
Zweitprüfer: Herr Dipl. Ing. Alejandro Soler

Abgabedatum: 17.07.2024

Eidesstaatliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche im Literaturverzeichnis genannt. Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Hamburg, den 17. Juli 2024

Felisa Dib-v.Lamezan

Zusammenfassung

Felisa Dib-v.Lamezan

Thema der Bachelorthesis
Commuter Aircraft – Chance auf eine umweltfreundliche Luftfahrt?
Analyse der Umweltauswirkungen von modernen Commuter Aircrafts in der Luftfahrtindustrie

Stichworte
Analyse, Umweltauswirkungen, moderne Commuter Aircraft

Kurzzusammenfassung
Diese Arbeit befasst sich mit der Analyse zu den Umweltauswirkungen moderner Commuter Aircraft in der Luftfahrtindustrie.
Hierzu werden drei bestehende Flugzeugtypen unterschiedlicher Commuter Größenklassen mit drei Flugzeugtypen moderner Antriebstechnik ähnlicher Größenklassen verglichen und in Bezug auf den CO_2-Ausstoß, bzw. des CO_2-Äquivalents bewertet.

Felisa Dib-v.Lamezan

Title of the paper
Commuter Aircraft – an opportunity for environmentally friendly aviation?
Analysis of the environmental impact of modern commuter aircraft in the aviation industry

Keywords
Analysis, environmental impact, modern commuter aircraft

Abstract
This thesis deals with the analysis of the environmental impact of modern commuter aircraft in the aviation industry. For this purpose, three existing aircraft types of different commuter size classes are compared with three aircraft types of modern propulsion technology of similar size classes and evaluated in terms of CO_2 emissions or CO_2 equivalent.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis II
Tabellenverzeichnis III
Diagrammverzeichnis III
Abkürzungen III
Einheiten/ Formelzeichen IV
1. Einleitung 1
1.1 Motivation 1
1.1 Aufgabenstellung 2
1.3 Aufbau der Arbeit 2
1.4 Ziel der Arbeit 3
1.5 Grundlegendes Wissen und Definitionen 4
2. Luftfahrt und ihre Auswirkungen auf die Umwelt 6
2.1 Luftverschmutzung durch Abgase und Mikropartikel 8
2.2 Treibhausgase 9
2.3 Lokale Auswirkungen 10
2.4 Globale Auswirkungen 12
2.5 Regionaler Luftverkehr 14
3. Luftfahrt der Zukunft – Regelungen und Ziele zum Klimaschutz 17
3.1 Advisory Council for Aeronautics Research in Europe (ACARE) 17
3.2 International Civil Aviation Organization (ICAO) 20
3.3 IATA 22
4. Aktuelle Situation 23
4.1 Flugverkehr Commuter, Regional, Kurzstrecken 23
4.2 Aktueller CO_2-Ausstoß durch Commuter Aircraft 24
4.3 Vergleichsmodelle 25
4.3.1 Cessna 172 25
4.3.2 ATR 42-600 29
4.3.3 Embraer E175 31
4.4 Berechnung Treibstoffverbrauch 33
4.4.1 Treibstoff Cessna 172 35
4.4.2 Treibstoffverbrauch ATR 42-600 36
4.4.3 Treibstoffverbrauch Embraer E175 38
4.5 CO_2-Emissionen 39
4.5.1 CO_2-Ausstoß pro Flug 39

4.5.2 „Well-To-Tank“ Faktor Kerosin....40
5. Forschung und Entwicklungsprojekte....42
5.1 Herstellung....43
5.2 Einsatz im Antrieb....48
5.3 Herausforderungen beim Einsatz von Wasserstoff als Antriebsmittel....49
5.4 Aktuelle Projekte....52
5.4.1 HY4 – H2Fly....53
5.4.2 Airbus ZEROe Turboprop....56
5.4.3 ZEROe Turbofan....60
5.5 Vergleich Wasserstoff - Kerosin....62
6. Fazit....70
6.1 Schlussfolgerungen aus den Daten....70
6.2 Empfehlungen für die Zukunft....71
6.3 Kritische Reflexion der Arbeit....72
Literaturverzeichnis....75
7. Anhang....81
7.1 ISA....81
7.2 Flight Level Beispiel Werte....81

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Überblick Emissionen Luftfahrt (BDL, 2020)....7
Abbildung 2: ICAO LTO-Cycle (ICAO, 2016)....10
Abbildung 3: ICAO Measurement Points (Nicolas E. Antoine, 2002)....11
Abbildung 4: Hauptlärmquellen am Flughafen (Nicolas E. Antoine, 2002)....12
Abbildung 5: Zusammenstellung der Hauptkomponenten von RF des Klimawandels (IPCC, 2007)....12
Abbildung 6: Globale und regionale durchschnittliche Erderwärmung (P.K. Quinn, 2008)....14
Abbildung 7: CO_2-Emissionen regionaler Flüge (Brandon Graver, 2020)....15
Abbildung 8: ACARE Goals (ACARE, 2022)....18
Abbildung 9: ICAO Basket of Measures (ICAO, 2016)....21
Abbildung 10: Anteil Commuter, Regional, Short Range (MC Kinsey & Company, 2020)....24
Abbildung 11: Cessna Skyhawk 172 (Textron Aviation, Cessna, 2024)....26
Abbildung 12: Cockpit Cessna 172 (Textron Aviation, Cessna, 2024)....26
Abbildung 13: ATR 42-600 (ATR, 2024)....29
Abbildung 14: Embraer E175 (Embraer; A, 2024)....31
Abbildung 15: Fuel Consumption Grafik Turboprop (Kühn, 2023)....34
Abbildung 16: Fuel consumption narrowbody (Kühn, 2023)....34
Abbildung 17: Auszug Cessna 172 Handbuch (Rabe, 2023)....35
Abbildung 18: PEM-Elektrolyseur (www.pepeenergy.com, 2024)....45
Abbildung 19: Vergleich Herstellungsverfahren H2 (Frauenhofer IKTS, 2024)....47
Abbildung 20: HY4 - H2Fly Wasserstoffflugzeug (Universität Ulm, 2020)....53

Abbildung 21: Airbus ZEROe Turboprop (Airbus (A)) 56
Abbildung 22: Airbus ZEROe Turbofan (Airbus (A)) 60
Abbildung 23: Funktion Herstellungsverfahren und CO2-Einsparungen im Verhältnis 68
Abbildung 24: ISA (Internationale Standardatmosphäre) (Airbus, 2002) 81
Abbildung 25: Flightlevel Beispiel Werte (Airbus, 2002) 81

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Fly the green deal (ACARE, 2022) 19
Tabelle 2: Cessna Skyhawk 172 Spezifikation (Textron Aviation, Cessna, 2024) 28
Tabelle 3: ATR 42-600 Spezifikation (ATR (B)), (Palt (B), 2019), (Pratt & Whitney, 2024) 30
Tabelle 4: Embraer E175 Spezifikation (Embraer; A, 2024) (Palt, 2019) 32
Tabelle 5: Durchschnittlicher CO_2-Ausstoß pro Beispiel-Flug 40
Tabelle 6: WTT-Faktor in kg 41
Tabelle 7: Technische Daten der HY4 (DLR (C) Institut für Technische Thermodynamik) 54
Tabelle 8: Wasserstoffverbäuche 62
Tabelle 9: Vergleich CO_2-Emissionen Kerosin - Wasserstoff 62
Tabelle 10: CO_2-Emission in Prozent 65
Tabelle 11: CO_2-Einsparungen in Prozent 65

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Transport 6
Diagramm 2: CO_2-Emissionen 6
Diagramm 3: CO_2-Emissionen bei H_2-Herstellung 46
Diagramm 4: CO_2-Ausstoß Kerosin - Wasserstoff Vergleich 63

Abkürzungen

CO_2	Kohlenstoffdioxid
CH_4	Methan
NO_x	Stickstoff
SO_x	Schwefeloxid
O_3	Ozon
ICAO	International Civil Aviation Organization
APU	Auxiliary Power Unit
EPNL	Effective Percieved Noise Levels
MTOW	Maximum Take-Off Weight
RF	Radiative Forcing
Co_2EPPK	Carbon Dioxide Emissions per Passenger Kilometer
max Pax	maximale Passagieranzahl
H_2	Wasserstoff
O_2	Sauerstoff
SMR	Steam Methane Reforming

PEM	Polymereletrolymembran
SOEC	Solid-Oxid-Electrolysis-Cell
TAS	True Air Speed
ISA	Internationale Standardatmosphäre
FL	Flightlevel
max.	maximal /-e, -r, -en, -s
V_{max}	Maximale Geschwindigkeit
V_{NO}	Normale Reisegeschwindigkeit
V_{NE}	„Never Exceed“- Geschwindigkeit
η	Wirkungsgrad
HAM	Flughafen Hamburg
BER	Flughafen Berlin
LHR	Flughafen London Heathrow
CCE	Flughafen Cairo
IEA	International Energy Agency
IPCC	International Panel of Climate Change
LTO	Landing take-off cycle
ICCT	International Council on Clean Transportation
ACARE	Advisory Council for Aeronautics Research in Europe
SAF	Sustainable Aviation Fuel
IATA	International Air Transport Association
WMO	Weltorganisation für Metereologie
ITU	Internationale Fernmeldeunion
CAEP	Committee on Aviation Environmental Protection
CORSIA	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation

Einheiten/ Formelzeichen

[ft] – feet
[K] - Kelvin
[m] – Meter
[km] – Kilometer
[h] – hour
[kg] - Kilogramm
[Pkm] – Personenkilometer
[kn] - Knoten
[l] – Liter
[grCO_2eq] – Gramm CO_2-Äquivalent
[MJ] – Mega Joule
[kt] - Kilotonnen
[Mt] - Megatonnen

1. Einleitung

1.1 Motivation

Die Luftfahrtindustrie spielt eine entscheidende Rolle in der globalisierten Welt und ist laut ICAO, der International Civil Aviation Agency für einen Anteil von bis zu 2% des weltweiten gesamten CO_2-Ausstoßes und 13% des CO_2-Ausstoßes des globalen Transportwesens verantwortlich (ICAO, 2016). Eine Verdoppelung des Luftverkehrsaufkommens wird in der Luftfahrtindustrie alle 15 Jahre verzeichnet. In einem vergleichbaren Zeitraum steht dem gegenwärtig nur eine Effizienzsteigerung um etwa 15 % mit jeder Flugzeuggeneration gegenüber (DLR Broschüre, 2021) . Angesichts der zunehmenden Sorge um den Klimawandel und die Umweltverschmutzung ist es von großer Bedeutung, die Auswirkungen der Luftfahrt auf die Umwelt genauer zu untersuchen und nachhaltige Lösungen zu finden.

Commuter Aircraft, auch Zubringerflugzeuge genannt, als Flugzeuge für regionale Flugverbindungen, sind eine wichtige Komponente des Luftverkehrsnetzes. Sie werden häufig für kurze Strecken eingesetzt und könnten daher potentiell eine umweltfreundlichere Alternative zu größeren Flugzeugen sein. Eine Analyse der Umweltauswirkungen des Einsatzes von Commuter Aircraft kann dazu beitragen, das Wissen über die Nachhaltigkeit dieser Flugzeugkategorie zu erweitern und Einblicke in mögliche Verbesserungen zu gewinnen.

Anhand einer solchen Analyse kann herausgearbeitet werden, wie effizient und umweltfreundlich diese Flugzeuge im Vergleich zu anderen Optionen sind. Emissionen von Treibhausgasen, Lärm und Schadstoffemissionen sowie Ressourcenverbrauch können bewertet werden. Diese Informationen können dazu beitragen, Richtlinien und Maßnahmen zu entwickeln, um die Nachhaltigkeit der Luftfahrtindustrie zu verbessern und den CO_2-Fußabdruck zu reduzieren.

Darüber hinaus können die Ergebnisse der Analyse dazu beitragen, die Entwicklung neuer Technologien und Strategien zur Verringerung der Umweltauswirkungen von Commuter Aircraft voranzutreiben. Dies könnte die Grundlage für Innovationen in den Bereichen Antriebstechnologie, Materialien, Flugplanung und Infrastruktur bieten.

Eine umfassende Analyse der Umweltauswirkungen des Einsatzes von moderner Commuter Aircraft in der Luftfahrtindustrie ist daher von großer Bedeutung, um den Weg für eine nachhaltigere und umweltfreundlichere Luftfahrt zu ebnen.

1.1 Aufgabenstellung

Es soll eine Recherche zu modernen Zubringerflugzeugen (Commuter Aircrafts) in Verbindung mit der Fragestellung nach dem Potential zu einer Verbesserung der Ökobilanz der Luftfahrt durch Zubringerflugzeuge vorgenommen werden.

Wie sind die derzeitigen Ökobilanz - Richtwerte und - Regelungen der Luftfahrt definiert? Welche Ziele sind gesteckt, um den Klimawandel zu entschleunigen? Welche Projekte/Entwicklungen/Forschungen im Bereich Zubringerflugzeuge sind derzeit in Bearbeitung? In welcher Hinsicht könnten diese zu Erreichung der Umweltziele der Luftfahrt beitragen? Wie könnte zukünftig mit modernen Zubringerflugzeugen im allgemeinen Luftverkehr die Ökobilanz der Luftfahrt beeinflusst werden?

Wie groß ist der potentielle Fortschritt im Vergleich zu anderen Verkehrsmitteln für Pax- und Cargotransport ähnlichen Umfangs und Reichweite?

- Recherchieren Sie zu den oben gestellten Fragen und stellen Sie die Ergebnisse übersichtlich zusammen!
- Stellen Sie die recherchierten Daten zu eigenen Statistiken zusammen!
- Berechnen Sie die potenzielle Einsparung an CO_2-Ausstößen der Luftfahrt durch Einsatz von modernen Zubringerflugzeugen überschlägig mit plausiblen Annahmen.

Die Ergebnisse sollen in einem Bericht dokumentiert werden. Es sind die DIN-Normen zur Erstellung technisch-wissenschaftlicher Berichte zu beachten.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit ergibt sich aus insgesamt 6 Kapiteln.

1. Das erste Kapitel gibt eine Einleitung in das Thema der Bachelorarbeit, mit Motivation, wichtigen Definitionen zum besseren Verständnis der Arbeit, Ziel der Arbeit und dem generellen Aufbau
2. Im zweiten Kapitel wird die aktuelle Situation der Luftfahrt in Bezug auf ihre Umweltauswirkungen und Emissionen beleuchtet.

3. Das dritte Kapitel befasst sich mit aktuellen Maßnahmen und Regelungen in der Luftfahrt und der Industrie, um die Auswirkungen auf das Klima zu verringern und den CO_2-Fußabdruck zu verbessern.
4. Im vierten Kapitel wird Commuter Aircraft näher definiert und erläutert und Beispiele generiert, um ein breiteres Verständnis zum Thema der Arbeit zu schaffen und um eine Basis für den Vergleich zu Commuter Aircraft mit moderner Antriebstechnik zu schaffen.
5. Das fünfte Kapitel befasst sich mit derzeitiger Forschung und aktuellen Entwicklungsprojekten im Bereich der Commuter Aircraft und analysiert, vergleicht und bewertet diese mit den Vergleichsmodellen aus Kapitel 4 hinsichtlich der CO_2-Bilanz.
6. Das sechste Kapitel bildet ein umfassendes Fazit mit einer Schlussfolgerung aus den zusammengetragenen Informationen der Arbeit, einer Empfehlung für die Zukunft und auch einer kritischen Reflexion der erarbeiteten Informationen.

1.4 Ziel der Arbeit

Das Ziel einer Analyse zu den Umweltauswirkungen des Einsatzes moderner Commuter Aircraft in der Luftfahrtindustrie ist es, ein umfassendes Verständnis der Auswirkungen dieser Flugzeugkategorie mit moderner Antriebstechnik auf die Umwelt zu gewinnen. Die Analyse soll dazu dienen, die Umweltauswirkungen zu quantifizieren, zu bewerten und zu vergleichen und mögliche Verbesserungen zu identifizieren. Wissenschaftlich fundierte Informationen sollen bereit gestellt werden, die als Grundlage für umweltpolitische Maßnahmen, technologische Innovationen und betriebliche Veränderungen dienen können, um die Umweltauswirkungen von Kurzstreckenflügen zu verringern und somit die Luftfahrt fortschrittlicher und weniger klimaschädlich aufzustellen.

1.5 Grundlegendes Wissen und Definitionen

Erderwärmung:

Die Erderwärmung bezeichnet den Anstieg der durchschnittlichen Oberflächentemperatur der Erde. Sie ist die Folge eines verstärkten Treibhauseffektes, bei dem sogenannte Treibhausgase, wie Kohlendioxid (CO_2) und Methan (CH_4) die Wärmeenergie der Sonne einfangen und in der Atmosphäre zurückhalten. Dies führt zu einer Aufheizung der Erdatmosphäre und letztendlich zu einem Anstieg der globalen Durchschnittstemperaturen. Die Erderwärmung hat weitreichende Auswirkungen auf das Klima und die Umwelt, darunter schmelzende Gletscher und Polkappen und der damit einhergehende Anstieg des Meeresspiegels, häufigere und intensivere Hitzewellen, veränderte Niederschlagsmuster, veränderte Ökosysteme und erhöhtes Risiko für extreme Wetterereignisse, wie Stürme und Überschwemmungen (Bundeszentrale für politische Bildung, 2017).

Luftverschmutzung:

Luftverschmutzung bezeichnet die Reduktion der Luftreinheit, bzw. -qualität. Sie wird durch Luftschadstoffe verursacht. Schadstoffe können gasförmig, als kleine Partikel und auch in flüssiger Form auftreten und sind schädlich für die menschliche Gesundheit, Tiere und Pflanzen. Die mit Treibhausgasen verschmutzte Luft trägt zu einem erheblichen Teil zur Erderwärmung bei (zdf.de, 2020).

Ökobilanz:

Ökobilanzen definieren sich als eine Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potenziellen Auswirkungen auf die Umwelt eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges (Johannig, 2017).

Treibhauseffekt:

Als natürlicher Treibhauseffekt wird die natürliche Wärmeregulation unseres Planeten bezeichnet. Er beschreibt den Vorgang, in dem Sonnenstrahlen die Erde erreichen und ihre Wärme nur bis zu einem gewissen Anteil wieder durch die Atmosphäre entweichen lassen, ähnlich dem Prinzip eines herkömmlichen Treibhauses. Somit wird eine Temperatur auf der Erde erhalten, die die perfekten Bedingungen für alle verschiedenen Lebensarten und -formen unseres Planeten ermöglichen. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird mit dem Gebrauch des Wortes „Treibhauseffekt“ der menschlich verursachte Treibhauseffekt gemeint, der dem natürlichen Treibhauseffekt sein Gleichgewicht entzieht und als Ursache für die Erderwärmung

bezeichnet werden kann. Dieser menschlich verursachte Treibhauseffekt wird durch viele Faktoren, insbesondere durch Abgase und Luftverschmutzung von CO_2 verstärkt.
Durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe gelangt CO_2 in die Atmosphäre, wodurch mehr wärmende Sonnenstrahlen zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre gehalten werden und die Wärme den Planeten nicht ausreichend entweichen kann. Somit wird zu viel Wärme gespeichert und das Weltklima erhöht sich (ARL, 2013).

CO_2-Emissionen pro Passagierkilometer: Hiermit ist ein Wert gemeint, der den Treibstoffverbrauch pro Passagier und Kilometer berücksichtigt und damit einen besseren Vergleich des Treibstoffverbrauchs zwischen verschiedenen Flugzeugtypen ermöglicht. Auf Englisch wird dieser Wert auch mit CO_2EPPK (CO_2 Emission per Passenger Kilometer) abgekürzt.

Moderne Commuter Aircraft: In dieser Arbeit werden mit der Bezeichnung „moderne Commuter Aircraft“ die neu entwickelten und die sich in der Entwicklung bzw. Forschung befindenden Flugzeuge benannt, die mit alternativen Antrieben ausgestattet werden. Im Bereich der Antriebstechnik gibt es Fortschritte in Richtung Klimafreundlichkeit bzw. Klimaneutralität. Die neue Antriebstechnik ist derzeit und auch voraussichtlich allerdings nur in der Lage, Flugzeuge im Bereich bis max. 100 Passagiere mit Kurzstreckenreichweite bis max. 2500 km zu bedienen. Diese Relationen fallen in den Bereich sogenannter Commuter Aircraft. Somit ergibt sich die Bezeichnung moderne Commuter Aircraft, die sich mit herkömmlicher Commuter Aircraft und kleineren Kurzstreckenflugzeugen vergleichen lässt.

True Air Speed (TAS): Als True Air Speed wird die Geschwindigkeit bezeichnet, mit der die Luft die Tragflächen des Flugzeuges umgibt. Die Geschwindigkeit wird von Windgeschwindigkeiten beeinflusst und unterscheidet sich daher meist von der tatsächlichen Geschwindigkeit, mit der sich das Flugzeug über dem Boden bewegt. (Fritts, 2017).

Flightlevel: Das Flightlevel entspricht der angezeigten Höhe während des Fluges, gemessen in ft (feet) geteilt durch 100, sofern Standardeinstellungen gesetzt sind (Airbus, 2002).

ISA: Die ISA ist eine Tabelle, die die Werte der Internationalen Standardatmosphäre festhält. Die Standardatmosphäre wurde durch die ICAO für die Luftfahrt genormt und definiert. Sie zeigt pro 100 m eine lineare Temperaturabnahme um 0,65 K bis zu der Höhe der Tropopause in 11 km Höhe. Von der Höhe von 11 km bis zu der Höhe von 20 km bleibt die Temperatur der ISA konstant (Deutscher Wetterdienst).

2. Luftfahrt und ihre Auswirkungen auf die Umwelt

Die Luftfahrt ist für ungefähr 2% des gesamten weltweiten CO_2-Ausstoßes verantwortlich. Dieser Wert bemisst sich aus Angaben der ICAO, die in den folgenden Diagrammen *Diagramm 1: Transport* und *Diagramm 2: CO_2-Emissionen* dargestellt sind. Der insgesamte Transportverkehr, der Schifffahrt, Straßentransport, Lufttransport, Schienentransport und weitere Transportmöglichkeiten beinhaltet, erzeugt rund 13% des gesamten globalen CO_2-Ausstoßes. Von diesen 13% des gesamten CO_2-Ausstoßes durch Verkehr, sind wiederum 13% der Luftfahrt zuzuschreiben (ICAO, 2016).

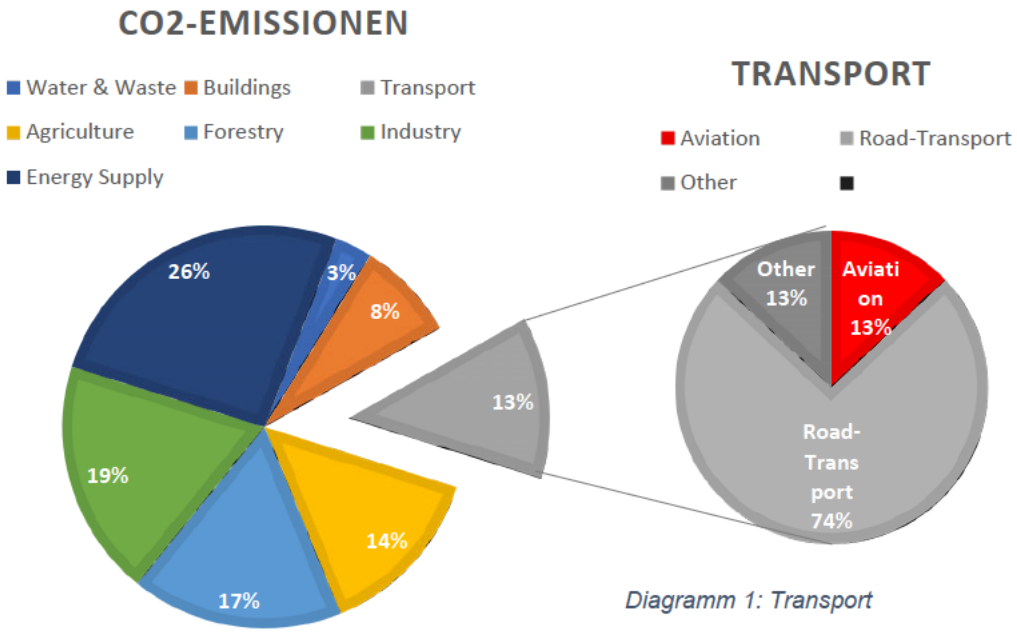

Diagramm 1: Transport

Diagramm 2: CO_2-Emissionen

Gasemissionen der Luftfahrt entstehen aufgrund der Verbrennung von Kerosin als Kraftstoff in den Triebwerken, die als Antrieb des Flugzeuges den notwendigen Schub generieren. Die dabei entstehenden Abgase bestehen aus zwei Arten von Gasen. Zum einen handelt es sich um Treibhausgase, die einen Treibhauseffekt auf der Erde verursachen und somit zur Erderwärmung beitragen. Zum anderen handelt es sich um Luftschadstoffe, die für die menschliche Gesundheit sowie für die Umwelt schädlich sind. Die Hauptprodukte der Kraftstoff- oder Kerosinverbrennung sind Kohlendioxid (CO_2), Stickoxid (NO_x) und Wasserdampf (H_2O). Aber auch Produkte wie Schwefeldioxid (SO_2), Kohlenwasserstoff (HC) und Ruß (C), sind Teil der umweltschädlichen Abgase aus der Kerosinverbrennung. Alle genannten Verbrennungsprodukte haben Auswirkungen auf die lokale Luftqualität. In der

nachfolgenden *Abbildung 1: Überblick Emissionen Luftfahrt* (BDL, 2020) ist eine Übersicht der relevanten klimaschädlichen Verbrennungsprodukte, ihrer Wirkung auf die Umwelt und ihrer Menge pro Kilogramm verbrennendem Kerosin visualisiert.

Abbildung 1: Überblick Emissionen Luftfahrt (BDL, 2020)

Laut Weltklimarat, dem International Panel of Climate Change (IPCC) beträgt der Anteil der Luftfahrt 3 - 5% des gesamten Klimawandels und ist von unterschiedlichen Faktoren abhängig: Art und Menge der Emissionen, Wetterbedingungen, Tageszeit und Emissionsort, die Verweildauer und die geografische Ausbreitung der Emissionen. Bei der Verbrennung von Kerosin entstehen als klimarelevante Emissionen nicht nur die oben genannten Abgase und Schmutzpartikel. Daraus resultierend können hinter dem Flugzeug Kondensstreifen (Zirruswolken) entstehen, wenn das Flugzeug in sehr großen Höhen fliegt und sehr niedrige Temperaturen herrschen. Die genannten Emissionen beeinflussen die atmosphärischen Konzentrationen von Kohlendioxid (CO_2), Ozon (O_3), Methan (CH_4), Wasser (H_2O) sowie Aerosolen.

2.1 Luftverschmutzung durch Abgase und Mikropartikel

Luftschadstoffe speichern keine Wärme in der Atmosphäre und verursachen daher keine globale Erwärmung. Diese Gase und Mikropartikel sind jedoch gesundheitsschädlich und haben große negative Auswirkungen auf unsere Umwelt.

Eine übermäßige Menge an Stickstoffdioxid in der Atmosphäre kann auch zu verschiedenen Problemen führen. Zum einen wird durch die Luftverschmutzung von Stickoxid die Luftqualität erheblich gemindert. Hohe Konzentrationen von Stickoxiden in der Luft können zu Smogbildung führen und die Sichtbarkeit verringern. Dies kann nicht nur die Ästhetik verringern, sondern auch Auswirkungen auf die Gesundheit haben. Somit können Stickoxide zu einer Beeinträchtigung der Atemwege führen. Die Beeinträchtigungen können sich in Form von Reizungen bis hin zu Atemwegserkrankungen wie Asthma, Bronchitis und Atembeschwerden ausdrücken. Insbesondere für Menschen mit bereits bestehenden Atemwegserkrankungen können hohe Konzentrationen von Sickoxiden zu einer Verschlechterung ihrer Symptome führen.
Ein weiterer Nachteil von Stickoxiden in der Luft ist die Bildung von bodennahem Ozon. Dieser Luftschadstoff kommt gewöhnlich in sehr großen Höhen der Atmosphäre vor und ist dort für die Gesundheit sogar in anderer Weise von Nutzen, wird aber nicht eingeatmet. Bodennahes Ozon hingegen wirkt wie ein Reizgas für die Atemwege und kann Pflanzen schädigen und somit landwirtschaftliche Erträge verringern.
Stickoxide können zudem auch zur Bildung von saurem Regen beitragen, wenn sie mit anderen luftverschmutzenden Substanzen wie Schwefeldioxid reagieren. Saurer Regen kann die Umwelt schädigen, indem er Gewässer und Böden übersäuert, was negative Auswirkungen auf Ökosysteme, Pflanzen und Tiere hat.

Schwefeldioxid kann, wie die meisten anderen Abgase Atemwegserkrankungen verursachen und zu Atemproblemen, Veränderungen der Lungenabwehr, bleibenden Schäden an der Lunge und Verschlimmerung bestehender Herz-Kreislauf-Erkrankungen führen. Es trägt auch zu einer beschleunigten Korrosion von Gebäuden und Denkmälern, Versauerung von Seen, Flüssen und Böden bei.

2.2 Treibhausgase

Als Treibhausgase werden gasförmige Bestandteile der Atmosphäre bezeichnet, die den Treibhauseffekt der Erde beeinflussen. Sie absorbieren die Wärmestrahlung der Sonne und erhöhen somit die Temperatur an der Erdoberfläche.

Kohlendioxid (CO_2) ist das wichtigste Treibhausgas, das durch den Luftverkehr ausgestoßen wird und macht den Großteil des vom Menschen zusätzlich verursachten Treibhauseffektes aus. Kohlendioxid hat einen langfristigen Erwärmungseffekt auf das Klima, da zusätzlich in die Erdatmosphäre emittiertes Kohlendioxid durch die natürlichen physikalischen und biogeochemischen Prozesse im Erdsystem nur sehr langsam abgebaut wird. Laut dem Umweltbundesamt 2020 (Umweltbundesamt, 2020) sind nach 1000 Jahren davon noch etwa 15 bis 40 Prozent in der Atmosphäre übrig. Der gesamte Abbau dauert jedoch mehrere hunderttausend Jahre.

Die Kombination von Schwefeldioxid, Kohlenwasserstoff, Wasserdampf und Ruß kann in großen Höhen und sehr niedrigen Temperaturen zu einer Bildung von Kondensstreifen und Zirrusbewölkung führen. Diese menschenverursachten Wolken haben je nach Winkel der Sonneneinstrahlung, Bodenbeschaffenheit und natürlicher Wolkenbedeckung einen kühlenden oder wärmenden Effekt. Ein Teil der Solarstrahlung wird von der Zirrus-Wolkendecke reflektiert. Das kühlt die Atmosphäre. Die Wärmestrahlung der Erde wird dagegen von der anthropogenen Wolkenschicht abgeschirmt und führt zur Erwärmung wie in einem Treibhaus. Forschungsarbeiten zeigen, dass die wärmende Wirkung die Kühlende im Mittel überwiegt.

Auch Stickoxid ist ein Abfallprodukt bei der Verbrennung von Kerosin. Stickoxide sind Vorläuferstoffe für die Bildung von bodennahem Ozon, das zu einer Erwärmung des Klimas beiträgt.

2.3 Lokale Auswirkungen

Gasförmige Emissionen:

Der Lande-Start-Zyklus (LTO: landing take-off cycle) umfasst alle Aktivitäten wie Roll-in, Taxi-out, Start, Steigflug, Anflug und Landung unterhalb einer Höhe von 3000 Fuß oder 915m. Alle Emissionen während des LTO-Zyklus beeinflussen die lokale Luftqualität. International werden Anstrengungen unternommen, um die Emissionen während des LTO-Zyklus zu reduzieren. Die ICAO hat Initiativen zur Verbesserung der lokalen Luftqualität durch ihren Leitfaden für die Luftqualität an Flughäfen „Airport Air Quality Guidance Manual“ ergriffen, der von Zeit zu Zeit aktualisiert wird. Dieses Handbuch enthält Leitlinien zur Unterstützung bei der Bewertung von Flughafenemissionsquellen, Emissionsinventaren und Emissionszuweisungen.

Die Emissionen während des LTO-Zyklus stammen hauptsächlich aus Flugzeugtriebwerken, APUs, Bodengeräten, Kraftfahrzeugen, Bauwesen, Generatoren, Triebwerkstests, Enteisung und Kraftstofflagereinrichtungen. Die Abgasemissionen werden unter Verwendung der folgenden Betriebsarten berechnet, wie in *Abbildung 2: ICAO LTO-Cycle* (ICAO, 2016)dargestellt: Ein- und Ausrollen (7 % Schub, 26 min); Anflug (30 % Schub, 4 min); Steigflug (85 % Schub, 2,2 min) und Start (100 % Schub, 0,7 min) (ICAO, 2016)**.** **D**ie Emissionen variieren je nach Anlage, Fahrzeugen und Ausrüstung in den einzelnen Flughäfen.

Table 3-A1-1. Reference emissions LTO cycle

Operating phase	Time-in-mode (minutes)	Thrust setting (percentage of rated thrust)
Approach	4.0	30
Taxi and ground idle	26	7.0 (in) 19.0 (out)	7
Take-off	0.7	100
Climb	2.2	85

Abbildung 2: ICAO LTO-Cycle (ICAO, 2016)

Fluglärm:

Starker Lärm entsteht am Flughafen durch Starts und Anflüge von Flugzeugen. Alle Verkehrsflugzeuge müssen die von der ICAO in „Annex 16 - Environmental Protection - Volume I - Aircraft Noise“ festgelegten Zertifizierungsstandards erfüllen. Darüber hinaus wurden viele Einschränkungen vorgenommen, um die Ruhe der des Flughafengeländes umgebenden Gemeinde zu gewährleisten. Zum Beispiel sind in Hamburg Flugverbote zwischen 22.00h-06.00h verhängt, um eine Nachtruhe zu gewähren oder am Flughafen London Heathrow werden alle Flüge durch das „Quota Count System“ eingeschränkt (Nicolas E. Antoine, 2002). Dieses System begrenzt die Anzahl der Flüge, indem es Punkte für jede Landung und jeden Start zusammenrechnet. Die kumulierten Punkte dürfen nicht überschritten werden. Außerdem erlaubt der Flughafen Heathrow nur den leisesten Flugzeugen nachts zu fliegen.

Während des Start- und Landevorgangs werden an drei Punkten Lärmemissionsmessungen durchgeführt, die in *Abbildung 3: ICAO Measurement Points* (Nicolas E. Antoine, 2002) (ICAO, 2016) dargestellt sind. Der effektive wahrgenommene Lärmpegel (EPNL), der anhand dieser drei Punkte gemessen wird, darf die Grenzwerte für die Lärmzertifizierung nicht überschreiten. Die Grenzwerte werden auf der Grundlage des maximalen Startgewichts (MTOW) und der Anzahl der Triebwerke des Flugzeugs festgelegt.

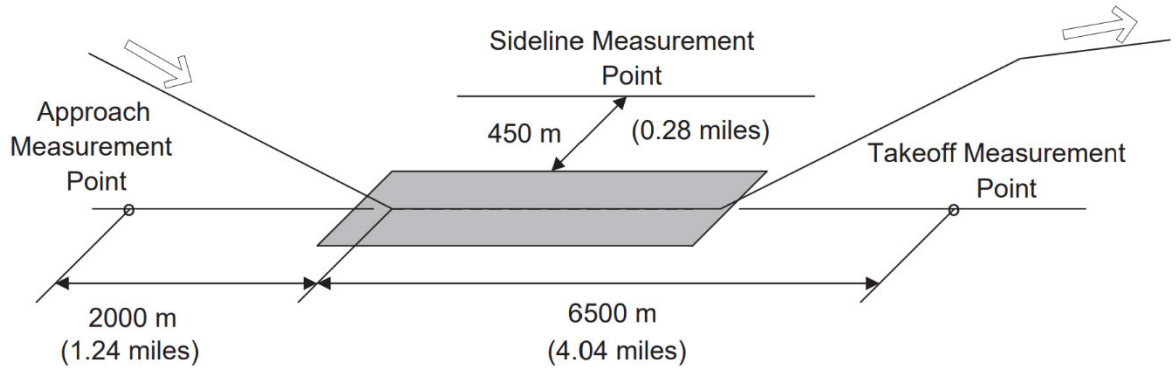

Abbildung 3: ICAO Measurement Points (Nicolas E. Antoine, 2002)

Die Hauptquellen für Flughafenlärm sind Flugzeuge bei Starts und Landungen, wie in *Abbildung 4: Hauptlärmquellen am Flughafen* (Nicolas E. Antoine, 2002) dargestellt. Während des Starts wird der Lärm hauptsächlich durch den Triebwerkslüfter und die turbulenten Luftströmungen des Triebwerksstrahls erzeugt, während beim Anflug der Einlass des Triebwerkslüfters und die Oberfläche des Flugzeugkörpers die dominierenden Lärmquellen sind.

Andere Quellen, die zum Flughafenlärm beitragen, sind Bodenfahrzeuge, APU, der Ausbau und Bau von Flughäfen.

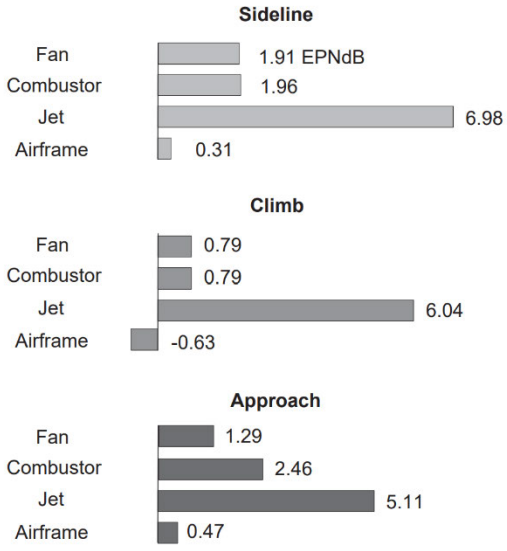

Abbildung 4: Hauptlärmquellen am Flughafen (Nicolas E. Antoine, 2002)

2.4 Globale Auswirkungen

Die Änderung der Energiebilanz der Erde, die durch die Änderung der Wirkung von Sonnenstrahlungen hervorgerufen wird, nennt sich Strahlungsantrieb (engl. Radiative Forcing, RF). Mit anderen Worten, der Einfluss eines Faktors, der den Klimawandel verursachen kann, beispielsweise eines Treibhausgases, wird häufig hinsichtlich seines Radiative Forcings, ausgedrückt in "Watt pro Quadratmeter", bewertet. Der RF ist also ein Maß dafür, wie die Energiebilanz der Erdatmosphäre beeinflusst wird, wenn Klima beeinflussende Faktoren verändert werden. Die Faktoren verändern das Gleichgewicht zwischen der Strahlung der einfallenden Sonne und der ausgehenden Infrarotstrahlung der Erdatmosphäre. Dieses Strahlungsgleichgewicht steuert die

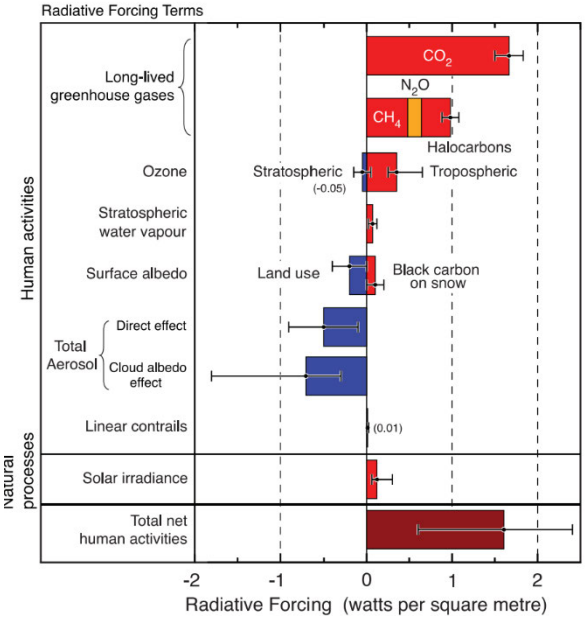

Abbildung 5: Zusammenstellung der Hauptkomponenten von RF des Klimawandels (IPCC, 2007)

Oberflächentemperatur der Erde. Der Begriff Antrieb wird verwendet, um anzuzeigen, dass das Strahlungsgleichgewicht der Erde aus seinem Normalzustand verschoben wird.
Die *Abbildung 5: Zusammenstellung der Hauptkomponenten von RF des Klimawandels* (IPCC, 2007) zeigt eine Zusammenfassung der Hauptkomponenten des Strahlungsantriebs des Klimawandels. All diese Strahlungsantriebe resultieren aus einem oder mehreren Faktoren, die das Klima beeinflussen und mit menschlichen Aktivitäten oder natürlichen Prozessen verbunden sind. Die Werte stellen die Antriebe im Jahr 2005 relativ zum Beginn des Industriezeitalters um 1750 dar. Menschliche Aktivitäten verursachen erhebliche Veränderungen bei langlebigen Gasen, Ozon, Wasserdampf, Oberflächenalbedo, Aerosolen und Kondensstreifen. Die einzige nennenswerte Zunahme des Naturantriebs zwischen 1750 und 2005 ist in der Sonneneinstrahlung zu erkennen. Die dünne schwarze Linie an jedem farbigen Balken stellt den Unsicherheitsbereich für den jeweiligen Wert dar. Ein positiver Strahlungsantrieb kann als Erwärmungseffekt in der Atmosphäre interpretiert werden, während ein negativer Strahlungsantrieb einen kühlenden Effekt hat (IPCC, 2007).

CO_2 ist das am häufigsten vorkommende Produkt aus der Verbrennung von Kerosin. Pro Kilogramm Flugbenzinverbrennung entstehen 3,16 kg CO_2. Das akkumulierte CO_2 breitet sich global aus und verursacht einen Treibhauseffekt. Das von Flugzeugen produzierte CO_2 hat die gleiche Wirkung wie CO_2 aus anderen bodennahen Quellen (Anja Kollmuss, 2009). Weltweit betrachtet hat der Flugverkehr einen Anteil von 3,06% des gesamten CO_2 Ausstoßes zu verantworten. Werden jedoch auch weitere Klimaeffekte berücksichtigt, so beträgt der Anteil der Luftfahrt ungefähr 5% (BDL, 2020).

Wasserdampf ist das zweithäufigste Produkt aus der Verbrennung von Flugbenzin. Bei jedem Kilogramm Kerosinverbrennung entstehen 1,23 kg Wasserdampf (Anja Kollmuss, 2009). Die meisten Wasserdampfemissionen, die von Unterschallflugzeugen erzeugt werden, werden durch Niederschlag innerhalb von 1-2 Wochen aus der Atmosphäre entfernt. Die kurzlebigen Wasserdampfemissionen in der Atmosphäre verursachen regionale Effekte. Diese Effekte sind direkt proportional zur Höhenlage. Der in der oberen Stratosphäre emittierte Wasserdampf hat größere Klimaauswirkungen als der in der unteren Stratosphäre emittierte Wasserdampf.

NO_x allein heizt die Atmosphäre nicht auf. NO_x, das von Flugzeugen produziert wird, katalysiert die Produktion und Zerstörung von Ozon in Abhängigkeit von der Flughöhe. In der Troposphäre trägt NO_x zur Bildung von Ozon bei, während NO_x in der Stratosphäre die Zerstörung von Ozon veranlasst. Die Bildung von Ozon in der Troposphäre führt zu einem globalen Erwärmungseffekt. Auf der anderen Seite führt NO_x zur Zerstörung von Methan in der Atmosphäre. Dadurch kommt es zu einem geringen Kühleffekt der Atmosphäre. Allerdings ist der Kühleffekt im Vergleich zum Wärmeeffekt relativ gering.

Auch andere Flugzeugemissionen wie Sulfate und Rußpartikel wirken sich auf das Klima aus. Sulfate haben eine kühlende Wirkung, indem sie das Sonnenlicht reflektieren. Rußpartikel absorbieren Sonnenstrahlung und wirken wärmend. Die wärmende Wirkung von Rußpartikeln nimmt mit zunehmender Höhe ab. Außerdem variiert die Erwärmungswirkung von Rußpartikeln je nach Ort der Emissionen. *Abbildung 6: Globale und regionale durchschnittliche Erderwärmung* (P.K. Quinn, 2008) zeigt, dass Rußpartikel einen stärkeren Einfluss auf die Umwelt haben, wenn sie über weiße Oberflächen wie Schnee und Arktis ausgestoßen werden. (P.K. Quinn, 2008)

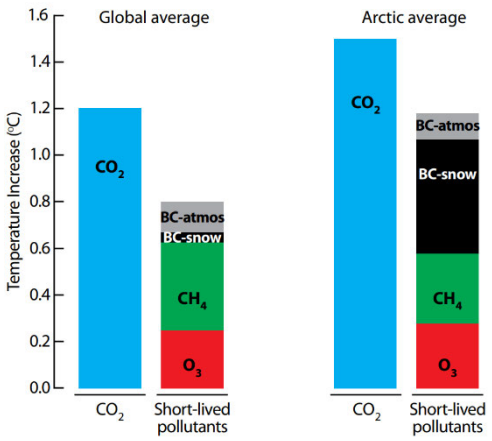

Abbildung 6: Globale und regionale durchschnittliche Erderwärmung (P.K. Quinn, 2008)

Kondensstreifen entstehen durch Kondensation von Wasserdampf in der Atmosphäre zu Eiskristallen. Kondensstreifen haben, wie in Abschnitt *2.2 Treibhausgase* bereits beschrieben, eine wärmende Wirkung auf das Klima.

2.5 Regionaler Luftverkehr

Die Rolle des regionalen Luftverkehrs im Bezug auf die Umweltauswirkungen des gesamten Luftverkehrs kann bei oberflächlicher Betrachtung als zu gering eingeschätzt werden. Laut eines Berichtes der International Council on Clean Transportation (Brandon Graver, 2020), beträgt der Anteil der regionalen Luftfahrt nur 5% des gesamten Luftverkehrs. Durch diese Zahl kann der Eindruck entstehen, die Einsparung von CO_2-Emissionen durch Neuentwicklungen und Verbesserungen von Antriebssystemen im regionalen und kurzstreckigen Luftverkehr könne einen zu geringen Effekt im Verhältnis zum notwendigen Aufwand dafür bringen.

Im Vergleich zum Langstrecken-Luftverkehr sind die Auswirkungen des regionalen und Kurzstrecken-Luftverkehrs allerdings höher und können nicht einfach proportional zum Anteil am gesamten Flugverkehr von 5% mit ebenfalls 5% gemessen werden. Da beim Starten und Landen eines Flugzeuges sehr viel mehr Treibstoff benötigt wird als auf konstanter Reiseflughöhe, kann schon aus diesem Grund angenommen werden, dass ein Flug, je kürzer seine zurückzulegende Strecke ist, umso mehr CO_2 und auch andere Luftschadstoffe und

Treibhausgase pro Passagierkilometer freisetzt. Durch die folgende *Abbildung 7: CO_2-Emissionen regionaler Flüge* (Brandon Graver, 2020) des Berichtes der International Council on Clean Transportation (ICCT) wird diese Annahme bestätigt.

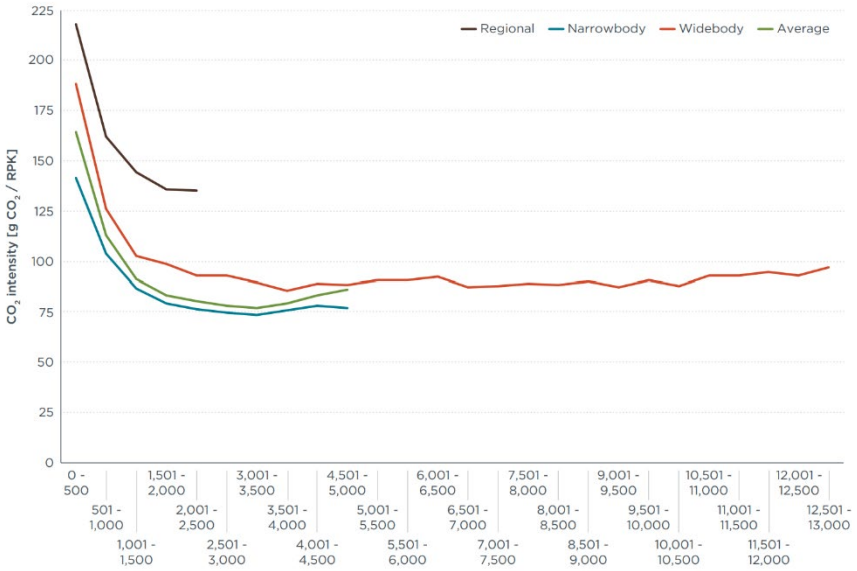

Abbildung 7: CO_2-Emissionen regionaler Flüge (Brandon Graver, 2020)

Aus dieser Abbildung ist zu entnehmen, dass regionale Flüge (in schwarz dargestellt) einen umso höheren CO_2-Ausstoß haben, je kürzer die geflogene Strecke ist und auch im Vergleich zu Widebody und Narrowbody Flugzeugen, die nur für Lang- und Mittelstrecken eingesetzte werden, einen höheren Ausstoß von CO_2 erzeugen.

Bei Kurzstreckenflügen kommt außer des größeren Anteils der Flugzeit von Start und Landung auch noch hinzu, dass die Flugzeughersteller sowie die Airlines ihren Fokus im Punkt Treibstoffeffizienz mehr auf Langstreckenflugzeuge legen. Dadurch erhalten Kurzstreckenflugzeuge in den meisten Fällen eine in Herstellung und Forschung günstigere Antriebstechnik, die daher nicht an die Treibstoffeffizienz von modernen Hochleistungsantrieben von Langstreckenflugzeugen heran reicht.

Zusammenfassend kann hier erwähnt werden, dass Kurzstreckenflüge zwar nur einen geringen Anteil des gesamten Luftverkehrs einnehmen, dieser Anteil aber unverhältnismäßig viel CO_2 pro Passagierkilometer produziert. Ergänzend dazu kann argumentiert werden, dass der CO_2-Ausstoß von Kurzstreckenflügen theoretisch in den meisten Fällen komplett vermeidbar wäre, da diese Strecken auch mit anderen Verkehrsmitteln bereisbar wären, wie zum Beispiel dem Zug.

Oft werden Kurzstreckenflüge jedoch als Anschluss zu einem Langstreckenflug eingesetzt und da ist die Einhaltung von vorgegebenen Abflug- und Ankunftszeiten und auch die

Geringhaltung einer Reisedauer von großer Bedeutung. In beiden Punkten kann die Zugreise nicht mit einer Kurzstreckenflugreise mithalten. Somit bleibt der Kurzstreckenflug weiterhin enorm wichtig und attraktiv für Reisende. Aus diesen Gründen ist Forschung und Innovation zu einer klimafreundlichen Antriebstechnik in diesem Bereich ein Aufwand, der im Sinne der Klimaforschung und des Umweltschutzes wichtig ist.

3. Luftfahrt der Zukunft – Regelungen und Ziele zum Klimaschutz

Für die Luftfahrt sind durch verschiedene Institutionen und Gremien Ziele und Regelungen hinsichtlich einer Verbesserung der Ökobilanz aufgestellt worden. Diese Ziele und Regelungen geben den Rahmen, die Richtung und auch die Geschwindigkeit vor, die für Forschungsprojekte und Weiterentwicklungen maßgeblich sind.

3.1 Advisory Council for Aeronautics Research in Europe (ACARE)

Um die Umweltziele des Luftverkehrs im Jahr 2020 zu erreichen, wurde der Europäische Beirat für Luft- und Raumfahrt (ACARE) gegründet. ACARE ist für die Festlegung des Inhalts der strategischen Forschungsagenda (SRA) mit konkreten Zielen bis zum Jahr 2050 (Flightpath 2050) verantwortlich. Hinsichtlich des Klimawandels und der Umweltauswirkungen der Luftfahrt, hat ACARE in Flightpath 2050 hoch ambitionierte Ziele festgelegt. ACARE geht davon aus, dass im Jahr 2050 die verfügbaren Technologien und Verfahren eine CO_2-Reduzierung um 75 % Emissionen pro Passagier Kilometer erlauben. Eine Reduzierung des Stickstoffs um 90 % (NO_x). Die Lärmemissionen fliegender Flugzeuge sollen um 65 % reduziert werden. Das ist relativ zu Beschaffenheiten typischer neuer Flugzeuge aus dem Jahr 2000. Flugbewegungen sollen beim Rollen emissionsfrei ablaufen. Luftfahrzeuge sollen recycelbar entworfen und hergestellt werden. Europa soll als Kompetenzzentrum zu nachhaltigen alternativen Kraftstoffen, einschließlich solcher für Luftfahrt etabliert werden. Europa soll an der Spitze der Atmosphärenforschung stehen und die Führung bei der Formulierung einer Priorisierung eines Umweltaktionsplans und der Erstellung von globalen Umweltstandards übernehmen (ACARE, 2011).

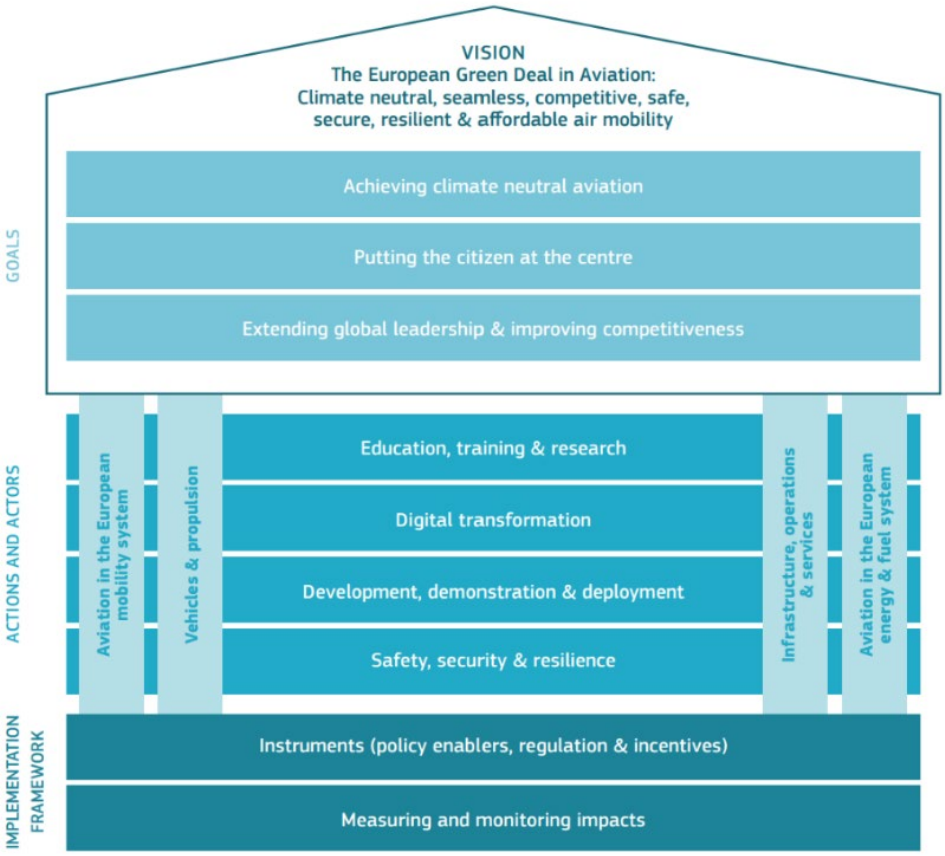

Abbildung 8: ACARE Goals (ACARE, 2022)

Die *Abbildung 8: ACARE Goals* ***(ACARE, 2022)*** (ACARE, 2022) ist aus dem ACARE Dokument „Fly the Green Deal“ entnommen und stellt die, von der ACARE definierten, drei Hauptziele und die zu ihrer Erreichung notwendigen Maßnahmen grob dar. Zum einen soll die Luftfahrt bis zum Jahr 2050 klimaneutral funktionieren. Des Weiteren ist eines der Hauptziele, den Fokus auf die Bevölkerung zu lenken, im Sinne von komfortableren Flugreisen, aber auch der Senkung der schädlichen Auswirkungen des Luftverkehrs auf die Gesundheit, wie Lärm und verschlechterte Luftqualität. Das dritte ambitionierte Hauptziel der ACARE ist eine globale Marktführung und die Dominanz im Wettbewerb zu steigern.

Zur Erreichung dieser Ziele sind drei Zeitrahmen gesteckt. Wie in *Tabelle 1: Fly the Green Deal* (ACARE, 2022) abgebildet, gibt es einen kurzfristigen, einen mittelfristigen und einen langfristigen Zeitrahmen.

Short-term (< 2030)	**Mid-term (< 2035)**	**Long-term (< 2050)**
Reichweiten Verbesserung und Reduktion der Emissionen durch Weiterentwicklung von Technologien mittels europäischer Forschungsprogramme und ACARE Initiativen	Bis 2035 sollen 100% der Flugzeuge in Europa die Fähigkeit zum Gebrauch und über 10 % erheblichen regelmäßigen Gebrauch (ca. 50 % der Zeit) von nachhaltigen Flugkraftstoffen (engl. Sustainable Aviation Fuels, SAF) machen	Bis 2050 sollen 75% der Regional- und Kurzstreckenflotte durch den in 2035 zugelassenen neuen Flugzeugtypen abgedeckt werden
Alle nach 2030 zugelassenen Triebwerke sollen entweder mit ungemischten nachhaltigen oder mit low/ zero carbon Flugkraftstoffen angetrieben werden	Das gesamteuropäische Potenzial für die Kraftstoffeffizienz soll sich um mindetens 10 % gegenüber 2018 mit einer möglichen Erweiterung um 15 % erhöhen. Ermöglichung durch Ausbau von Neuentwicklungen für niedrigeren Kraftstoffverbrauch von Flugzeugen, die zwischen 30 % und 50 % der Gesamtflotte umfassen sollen.	Bis 2050 soll die Kraftstoffeffizienz um 30-50 % gegenüber dem Stand von 2018 verbessert sein
Neue Regional- und Kurzstreckenflugzeuge und Produktentwicklungen sollen definiert und spätestens 2035 in den Markt einsteigen	Das weltweit erste kommerzielle hybrid-elektro Flugzeug sowie Wasserstoffantrieb sollen zertifiziert und zugelassen werden.	Bis 2050 sollen Flugzeuge, ihre Antriebssysteme und ihre Energiequellen nach zirkulären Prinzipien gestaltet sein, das durch ein nachhaltiges und transparentes Ökodesign von Produktionsbeginn bis zum Lebensende ermöglicht werden soll.
		Bis 2050 sollen die europäische Luftfahrt-Lieferkette und der Fertigungssektor über Skope 1, Skope 2 und Skope 3 eine Netto-Null-Treibhausgasemission erreichen.

Tabelle 1: Fly the green deal ***(ACARE, 2022)***

3.2 International Civil Aviation Organization (ICAO)

Die ICAO ist die internationale zivile Luftfahrtorganisation und wurde im Jahr 1944 als Sonderorganisation der Vereinten Nationen gegründet, um Sicherheit, Effizienz und Nachhaltigkeit zu fördern und zu koordinieren. Die ICAO entwickelt internationale Standards und Best Practices für den Luftverkehr und unterstützt ihre 193 Mitgliedsstaaten bei der Umsetzung dieser Standards.

Die ICAO spielt eine wichtige Rolle bei der Regelung des internationalen Luftverkehrs. Sie erstellt und aktualisiert Standards und Empfehlungen in Bereichen wie Flugsicherheit, Luftverkehrsmanagement, Flugbetriebsverfahren, Umweltschutz und Luftfahrtkommunikation. Diese Standards werden von Mitgliedsstaaten der ICAO übernommen und in internationales Recht umgesetzt.

Die ICAO arbeitet eng mit anderen internationalen Organisationen und Gremien zusammen, um eine koordinierte und harmonisierte Entwicklung des Luftverkehrs weltweit sicherzustellen. Dazu gehören Organisationen wie die IATA, die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) und die Internationale Fernmeldeunion (ITU).

Der Council's Committee on Aviation Environmental Protection (CAEP) wurde von der ICAO gebildet, um die meisten ICAO-Umweltaktivitäten durchzuführen. Mit Unterstützung von CAEP werden neue Richtlinien und neue Standards für Fluglärm und Flugzeugtriebwerksemissionen formuliert.

Die ICAO hat das Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA) eingeführt, eine globale marktbasierte Maßnahme, die darauf abzielt, die Emissionen der internationalen Luftfahrt auf dem Niveau von 2020 zu stabilisieren. Die Umweltaktivitäten der ICAO werden zum größten Teil vom Umweltkomitee CAEP (Committee on Aviation Environmental Protection) übernommen, welches sich aus Experten von 31 Mitgliedsstaaten und 22 Beobachtern zusammensetzt (ICAO, 2016).

Auf ihrer Vollversammlung im Jahr 2016 hat die CAEP zwei ehrgeizige Ziele formuliert. Zum einen sollen jährlich 2% Verbesserung der Kraftstoffeffizienz erreicht werden. Und zum anderen ein CO_2-neutrales Wachstum ab 2020. Als Maßnahmen hierfür hat die ICAO den sogenannten „Basket of Measures" mit folgenden Punkten definiert:

- Flugzeugbezogene Technologie und Standards
- Verbessertes Flugverkehrsmanagement und betriebliche Verbesserungen
- Entwicklung und Einsatz nachhaltiger alternative Kraftstoffe
- Marktbasierte Maßnahmen

In der folgenden *Abbildung 9: ICAO Basket of Measures* (ICAO, 2016) ist der „Basket of Measures" im Bezug auf CO_2-Einsparungen über einen Zeitraum von 2010-2040 visualisiert. Die ICAO geht dementsprechend davon aus, dass sie mit den gesamten Maßnahmen bis zum Jahr 2040 bis zu 1700 Mt CO_2 eingespart werden können.

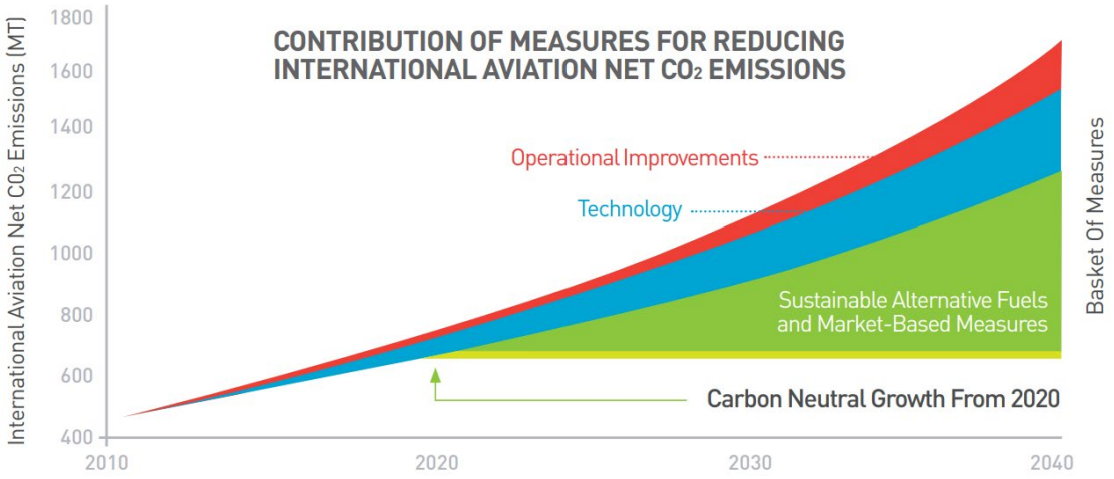

Abbildung 9: ICAO Basket of Measures (ICAO, 2016)

3.3 IATA

Die International Air Transport Association (IATA) ist der Handelsverband der Fluggesellschaften der Welt und vertritt etwa 320 Fluggesellschaften oder 83 % des gesamten Flugverkehrs. Mit dem Programm von Waypoint 2050 ist die IATA bemüht, den Luftverkehr nachhaltiger zu gestalten und die Auswirkungen auf die Umwelt zu reduzieren. (IATA, 2021) Waypoint 2050 besteht aus fünf Hauptpunkten, die die negativen Auswirkungen des Luftverkehrs auf die Umwelt reduzieren können.

1. Reduzierung der CO_2-Emissionen: Das Ziel ist es, bis zum Jahr 2050 den Netto-CO_2-Ausstoß des Luftverkehrs im Vergleich zu 2005 um 50% zu reduzieren. Die soll durch verbesserte Technologien, effizientere Flugdesigns, alternative Kraftstoffe und Maßnahmen zur Verkehrssteuerung erreicht werden.
2. Verbesserung der Treibstoffeffizienz: Die International Civil Aviation Organization (ICAO) fordert die Entwicklung und Umsetzung von Maßnahmen, um den Treibstoffverbrauch pro Passagier- oder Frachteinheit zu verringern. Dies umfasst die Förderung von Leichtbauweise, aerodynamischen Verbesserungen, effizienten Triebwerken und Maßnahmen zur Optimierung von Flugrouten.
3. Förderung von alternativen Kraftstoffen: Waypoint 50 betont die Bedeutung der Entwicklung und Nutzung von nachhaltigen und kohlenstoffarmen alternativen Kraftstoffen für den Luftverkehr. Dies umfasst Biokraftstoffe, synthetische Kraftstoffe und Wasserstoff.
4. Verbesserung der Infrastruktur: Die ICAO ermutigt zu Investitionen in moderne Flughafeninfrastrukturen, um den Einsatz effizienterer und umweltfreundlicherer Technologien zu ermöglichen. Dies beinhaltet die Modernisierung von Flugzeugen, Bodenabfertigungssystemen und Luftverkehrsmanagement.
5. Kapazitätssteigerung: Waypoint 50 betont auch die Notwendigkeit, die Kapazität des Luftverkehrs zu erhöhen, um den steigenden Bedarf zu decken. Dies soll jedoch unter Berücksichtigung von Umweltaspekten und unter Nutzung nachhaltiger Technologien und Verfahren erfolgen.

Waypoint 2050 ist ein wichtiger Meilenstein für die Luftfahrtindustrie, um den Klimawandel anzugehen und den Luftverkehr nachhaltiger zu gestalten. Es kann die Zusammenarbeit zwischen Regierungen, Fluggesellschaften, Flughäfen und anderen Akteuren stärken, um innovative Lösungen für eine umweltfreundlichere Luftfahrt zu entwickeln und umzusetzen.

4. Aktuelle Situation

Um einen Vergleich zu der modernen Commuter Aircraft ziehen zu können, ist es notwendig, die derzeitige Situation des regionalen Flugverkehrs zu beleuchten. Der regionale Flugverkehr, der zukünftig von moderner Antriebstechnik am frühesten profitieren kann, bewegt sich, aufgrund der noch begrenzten Reichweiten und Leistungen dieser Antriebstechnik, hauptsächlich im Bereich von Commuter Aircraft, bzw. kleineren regional eingesetzten Flugzeugen und -routen.

4.1 Flugverkehr Commuter, Regional, Kurzstrecken

Bei Commuter Aircraft handelt es sich um Flugzeuge, die speziell für den Regionalverkehr entwickelt werden. Diese Flugzeugtypen, auf Deutsch auch als „Zubringerflugzeuge“ bezeichnet, sind in der Regel kleinere Flugzeuge, die für kurze Strecken eingesetzt werden. Commuter Aircraft wird für die Beförderung von Passagieren, aber auch von Fracht genutzt, wobei die Sitzplatzkapazität meist geringer ausfällt als die bei herkömmlichen Verkehrsflugzeugen.

Es gibt keine genaue Definition für „Commuter Aircraft“, da der Begriff je nach Kontext unterschiedlich interpretiert werden kann. Der genaue Umfang und die Spezifikation können je nach Land, Fluggesellschaft und Einsatzgebiet variieren.

Allgemein lässt sich allerdings feststellen, dass sich Commuter Aircraft durch folgende bestimmte Merkmale auszeichnen lässt:

1. **Größe**: Commuter Aircraft sind in der Regel kleiner als Standardverkehrsflugzeuge. Sie haben eine geringere Sitzplatzkapazität, die normalerweise zwischen 19 und 100 Passagieren liegt.
2. **Reichweite:** Sie sind für den Betrieb auf kurzen bis mittleren Strecken konzipiert, typischerweise innerhalb einer Region oder zwischen naheliegenden Flughäfen. Die maximale Reichweite kann je nach Modell variieren.
3. **Geschwindigkeit:** Commuter Aircraft fliegen meist in moderater Reisegeschwindigkeit, die für kurze Strecken ausreichend ist. Reisegeschwindigkeit von Großraumflugzeugen können sie nicht erreichen.

4. **Start- und Landeeigenschaften:** Commuter Aircraft sind durch ihre geringere Größe und die niedrigere Reisegeschwindigkeit bedenkenlos an kleineren Flughäfen mit kürzeren Start- und Landebahnen einsetzbar.
5. **Kabinenkonfiguration:** Kabinen von Commuter Aircraft sind häufig einfach gestaltet und bieten begrenzten Komfort. Sie können sowohl ausschließlich mit Sitzreihen als auch mit einer Kombination aus Sitz- und Frachtkapazität ausgestattet sein.
6. **Betriebskosten:** Generell sind Commuter Aircraft kostengünstiger im Betrieb als größere Verkehrsflugzeuge. Das liegt hauptsächlich an den niedrigeren Treibstoffverbräuchen und Wartungskosten.

4.2 Aktueller CO_2-Ausstoß durch Commuter Aircraft

Commuter Aircraft und Regional- bis hin zu Kurzstreckenflieger machen keinen unerheblichen Anteil der gesamten Luftfahrt aus. Der folgenden *Abbildung 10: Anteil Commuter, Regional, Short Range (MC Kinsey & Company, 2020)*ist zu entnehmen, dass der Anteil der der Reichweite von Flugzeugen, die in Zukunft mit moderner Antriebstechnik betrieben werden könnten, etwa 39% der gesamten weltweiten Flotte ausmacht.

Dieser Wert ergibt sich aus den 4% der Commuter Aircraft, 13% des regionalen Luftverkehrs und dem Anteil von Kurzstreckenverkehr der bis maximal 2000 km reicht (2% + 5% + 15%) 22%.

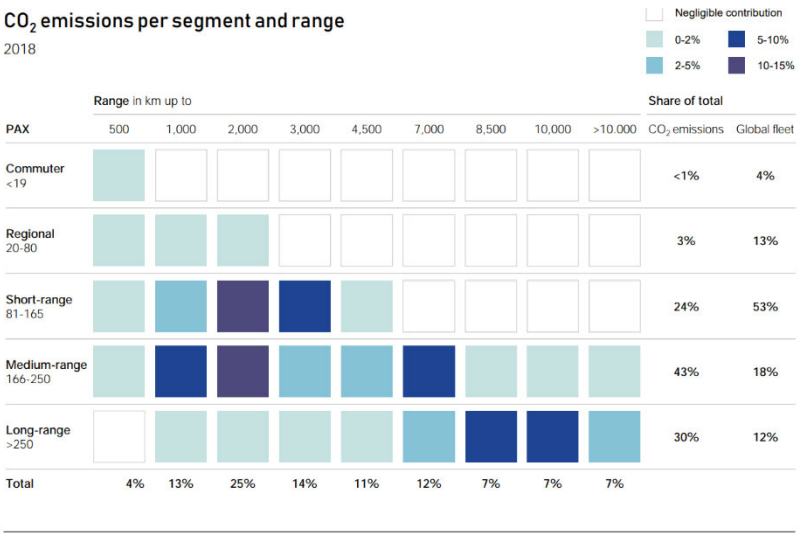

Abbildung 10: Anteil Commuter, Regional, Short Range (MC Kinsey & Company, 2020)

Zudem ist ablesbar, dass die 39% des Commuter- bis hin zum Kurzstreckenluftverkehr bis zu 17% der CO_2-Emissionen des Luftverkehrs ausmachen können, ausgehend davon,

dass der jeweilige prozentuale Anteil wie bei dem Beispiel von Commuter Aircraft erkennbar, im unteren Bereich des für den Farbblock angegebenen Prozentbereiches liegt.

4.3 Vergleichsmodelle

Um einen Überblick über den aktuellen Einsatz und die Nutzung von Commuter Aircraft in Europa zu generieren, werden in diesem Abschnitt des Kapitels stellvertretend für den kurzstrecken- und regionalen Flugverkehr drei verschiedene Typen vorgestellt, die weit verbreitet und häufig in Betrieb sind. Anhand ihrer Spezifikationen kann ein durchschnittlicher Treibstoffverbrauch pro Flug, der damit einhergehende CO_2-Ausstoß und der CO_2-Ausstoß, der für Anlieferung und Herstellung der Flüge benötigt wird, ermittelt werden. Auf dieser Grundlage kann im Kapitel *5. Forschung und Entwicklungsprojekte* ein Vergleich zu neuen Antriebsmöglichkeiten gezogen werden und die tatsächliche CO_2-Reduktion im gesamten Kontext von Herstellung, Anlieferung und Treibstoffverbrauch eingeordnet werden.

4.3.1 Cessna 172

Die Cessna 172 ist ein einmotoriges Leichtbauflugzeug des US-amerikanischen Flugzeugherstellers Cessna mit einem konventionellen Antrieb und einer maximalen Besatzung von 4 Passagieren. Als Benchmark-Model mit beeindruckenden technischen Daten ist die Cessna der meistgebaute und -verkaufte Flugzeugtyp der Welt mit einer Stückzahl von mehr als 44.000 (Schelling, 2017)**.** Außerdem wird die Cessna durch die herausragenden Flugeigenschafen, die hohe Sichtbarkeit, die langsame Landegeschwindigkeit sowie die einfache Handhabung und den nachsichtigen Strömungsabriss für verschiedene Zwecke eingesetzt, von Schulungen über Freizeitflügen bis hin zu Geschäftsreisen und ist bei Flugschülern sowie Piloten aller Erfahrungsstufen sehr beliebt. Darüber hinaus sorgt das Hochflügeldesign für eine bessere Stabilität und eine größere Bodenfreiheit und ist somit sehr optimal für Flugschüler. Mit den Abmessungen von etwa 8,3 m Länge, 2,7 m Höhe und 11 m Flügelspannweite bietet die Cessna ausreichend Platz für die Passagiere und sorgt durch die ergonomische Gestaltung der Kabine mit den Abmessungen von 3,6 m Länge, 1 m Breite und 1,2 m Höhe für den Komfort und die Bequemlichkeit während des Flugs (Textron Aviation, Cessna, 2024)**.** Das Haupt- und Bugfahrwerk sind aerodynamisch verkleidet und sorgen für eine bessere Luftströmung und geringere Luftwiderstand. Die Kabine verfügt über zwei große Türen, die einen bequemen Einstieg- und Ausstieg ermöglichen. In der folgenden *Abbildung 11: Cessna Skyhawk 172* **(Textron Aviation, Cessna, 2024)** ist zu erkennen, dass das Flugzeug über zwei Streben zwischen dem Rumpf und den Tragflächen verfügt, die für bessere Stabilität der Tragflächen sorgen.

Abbildung 11: Cessna Skyhawk 172 (Textron Aviation, Cessna, 2024)

Das Cockpit verfügt über verschiedene Instrumente zur Kommunikationsausrüstung, Flugüberwachung sowie Flugmanagement- und Navigationssysteme, die einfach zu bedienen sind und einen sicheren und effizienten Flug gewährleisten. Außerdem ermöglichen diese Systeme eine präzise Flugsteuerung und bieten eine zuverlässige Leistung. Die folgende *Abbildung 12: Cockpit Cessna 172* **(Textron Aviation, Cessna, 2024)** stellt das Cockpit der Cessna mit den verschiedenen Instrumenten zur Steuerung und Überwachung des Flugzeugs dar. Dabei ist zu erkennen, dass die Cessna über die neuesten Technologien der integrierten Cockpit-Avionik mit grafischen Benutzeroberflächen und hochauflösenden Displays verfügt.

Abbildung 12: Cockpit Cessna 172 (Textron Aviation, Cessna, 2024)

Das Leergewicht liegt bei 762 kg, während das maximale Startgewicht bei etwa 1.157 kg mit einer maximalen Nutzlast von 395 kg liegt. Die Cessna ist besonders gut in der Lage, auf kurzen Start- und Landebahnen zu operieren. Diese Fähigkeit macht das Flugzeug sehr flexibel für den Einsatz auf kleinen Regionalflugplätzen und anderen kleinen Landebahnen. Darüber hinaus wird die Cessna von einem Leistungsstarken mit Luftgekühlten Vierzylinder Lycoming-Benzintriebwerk mit Kraftstoffeinspritzung angetrieben, der eine Leistung von 180 PS bietet. Diese Leistung ermöglicht eine maximale Reisegeschwindigkeit von 230 m/h und eine Höchstgeschwindigkeit von rund 302km/h. Daher kann das Flugzeug effizient und schnell Kurz- und Mittelstrecken mit einer maximalen Reichweite von bis zu 1.185 km und auf einer Höhe von bis zu 14000 ft zurücklegen. Die Luftkühlung des Motors erfolgt durch zwei große aerodynamische Öffnungen in dem vorderen Teil der Cowling und ist somit viel leichter als Flüssigkeitskühlung und kann nicht durch Kühlmittelverlust ausfallen. In Bezug auf die Sicherheit verfügt die Cessna über moderne und zuverlässige Sicherheitssysteme sowie herausragende Manöverfähigkeit, um unvorhergesehenen Situationen während des Flugs problemlos zu begegnen. Schließlich bietet die Cessna einen Gepäckraum mit einer maximalen Gepäckkapazität von 54 kg und einem Volumen von 0,85 m^3, der sich an der linken Seite des Rumpfs hinter der Tür befindet (Textron Aviation, Cessna, 2024).

Weitere technische Daten der Cessna Skyhawk 172 sind der folgenden *Tabelle 2: Cessna Skyhawk 172 Spezifikation* (Textron Aviation, Cessna, 2024) zu entnehmen.

Länge	8,3 m	***Treibstoff-verbrauch**	27,3 l/h	**Max. Reisegeschwin-digkeit**	230 km/h
Höhe	2,7 m	**Max. Startgewicht**	1157 kg	**Max. Reichweite**	1185 km
Spannweite	11 m	**Max. Landegewicht**	1157 kg	**Startdistanz**	497m
Flügelfläche	16,17 m^2	**Nutzbares Kraftstoffgewicht**	144 kg	**Startrollstrecke**	293 m
Kabinenhöhe	1,2 m	**Nutzbares Kraftstoffvolumen**	201 l	**Landedistanz**	407 m
Kabinenbreite	1 m	**Leergewicht**	762 kg	**Landerollstrecke**	175 m
Kabinenlänge	3,6 m	**Nutzlast**	398 kg	**Dienstgipfelhöhe**	4267 m
Max. Pax	4	**Max. Nutzlast**	395 kg	**Max. Geschwindigkeit**	302 km/h
Gepäckraum-volumen	0,85 m^3	**Volle Treibstoffnutzlast**	254 kg	**Max. Steigrate**	223 mpm
Triebwerk-herstelle	Lycoming	**Max. Gepäckgewicht**	54 kg	**Motorleistung**	180 PS

Tabelle 2: Cessna Skyhawk 172 Spezifikation (Textron Aviation, Cessna, 2024)

* Der Treibstoffverbrauch für die Cessna Skyhawk 172 entstammt einem Auszug des Handbuchs für die Cessna 172 für die Höhe von 8000ft und die Geschwindigkeit von 114 kn (Rabe, 2023).

4.3.2 ATR 42-600

Die ATR 42-600 ist ein regionales Turboprop-Flugzeug des französisch-italienischen Flugzeugherstellers ATR (Avions de Transport Régional), mit Sitzplatzkapazität von 30 bis 50 Passagieren (ATR, 2024). Insgesamt wurden bis Stand Mai 2024, 503 Maschinen des Typs ATR 42 seit der ersten Auslieferung im Jahre 1984 ausgeliefert (rzjets.net, 2024), wodurch die Maschine in ihrer Größenklasse und ihres Typs zu den beliebtesten Modellen gehört (Recklies, 2023). Aus diesem Grund kann die ATR 42-600 als repräsentative Maschine in dieser Kategorie betrachtet werden und als Berechnungsgrundlage dienen.

Abbildung 13: ATR 42-600 (ATR, 2024)

Die ATR 42-600 wurde erstmals im Jahr 2007 vorgestellt und ist eine Weiterentwicklung der ATR42-500. Ihre maximale Startmasse beträgt 18.600 kg und die maximale Reichweite liegt bei 1345 km. Die modernen Avioniksysteme verbessern die Flugsicherheit und die Effizienz (ATR, 2024). Der CO_2-Ausstoß liegt bei 93g/Pkm (ATR (B)). Die Dienstgipfelhöhe beträgt 7620 m und die maximale Reisegeschwindigkeit bemisst sich je nach Quelle von 493km/h - 535 km/h (Palt (B), 2019).

Der Antrieb ist mit zwei Pratt & Whitney Canada PW127M-Turboproptriebwerken ausgestattet. Jedes der Triebwerke erzeugt eine maximale Leistung von 2750 PS, was 2022kW ergibt (Pratt & Whitney, 2024).

Weitere Daten zu der ATR 42-600 können der untenstehenden *Tabelle 3: ATR 42-600 Spezifikation* (ATR (B))(ATR (B))(Palt (B), 2019) (Palt (B), 2019) (Pratt & Whitney, 2024)(Pratt & Whitney, 2024)entnommen werden.

Länge	22,67 m	***Treibstoff-verbrauch**	(A) 620 kg/h (B) 0,04085 kg/km/seat (C) 0,03387 kg/km/seat	**Max. Reisegeschwin-digkeit**	535 km/h
Höhe	7,59 m	**Max. Startgewicht**	18600 kg	**Max. Reichweite**	1345 km
Spannweite	24,75 m	**Max. Landegewicht**	18300 kg	**Startdistanz**	1290 m
Flügelfläche	54,5 m^2	**Nutzbares Kraftstoffgewicht**	4500 kg	**Startrollstrecke**	1107 m
Kabinenhöhe	1,91 m	**Nutzbares Kraftstoff-volumen**	3370 L	**Landedistanz**	1080 m
Kabinenbreite	2,57 m	**Leergewicht**	11750 kg	**Landerollstrecke**	966 m
Kabinenlänge	16,87 m	**Nutzlast**	-/-	**Dienstgipfelhöhe**	7620 m
Max. Pax	50	**Max. Nutzlast**	5250 kg	**Max. Geschwindigkeit**	556 km/h
Gepäckraum-volumen	17,2 m^3	**Volle Treibstoff-nutzlast**	3340 kg	**Max. Steigrate**	600 m/min
Triebwerk-hersteller	PW 127XT-M	**Max. Gepäckgewicht**	-/-	**Motorleistung**	2022 kW

Tabelle 3: ATR 42-600 Spezifikation (ATR (B)), (Palt (B), 2019), (Pratt & Whitney, 2024)

*Die Angabe (A) ist die Herstellerangabe (ATR (B)) und bezieht sich auf einen Flug auf FL240, bei einer Auslastung von 95% MTOW und unter ISA- Angaben. Angabe (B) und Angabe (C) entstammen aus den Ausführungen von (Kühn, 2023), S. 46., wobei (B) sich nach dem „Fuel Consumption Extended Payload-Range Diagram“ und (C) sich nach der Angabe des „EEA Master Emission Calculators“ richtet.

4.3.3 Embraer E175

Embraer ist ein brasilianischer Flugzeughersteller für Kurz- und Regionalstrecken Flugzeuge. Das Unternehmen hat im Vergangenen Jahr seine Verkaufszahlen weiter gesteigert und ist somit einer der führenden Hersteller für Kurz- und Regionalstreckenflugzeuge. Insgesamt hat das Unternehmen seit seiner Gründung im Jahr 1969 über 8000 Flugzeuge ausgeliefert (Ebraer; B, 2023). Insbesondere gab es 28 Bestellungen der Embraer E175 im Jahr 2023 (Ebraer; B, 2023), was eine weitere Steigerung der Repräsentierbarkeit für Kurzstreckenflugzeug im Allgemeinen bewirkt. Aus diesem Grund wird das Modell in dieser Arbeit stellvertretend für alle Kurz- und Regionalstrecken Flugzeuge seiner Art genauer betrachtet.

Abbildung 14: Embraer E175 (Embraer; A, 2024)

Die Embraer E175 ist ein Kurzstreckenflugzeug, das von der brasilianischen Firma Embraer hergestellt wird. Sie ist Teil der E-Jet-Serie, die speziell für den regionalen Flugverkehr entwickelt wurde. Die E175 ist das kleinste Modell in der E-Jet-Familie und bietet je nach Sitzkonfiguration Platz für bis zu 88 Passagiere (Embraer; A, 2024).

Das Flugzeug bietet eine hohe Treibstoffeffizienz und ist ausgestattet mit moderner Avionik und fortschrittlichen Flugzeugsystemen. Die Reichweite bei maximaler Auslastung beträgt bis zu 3982km (Embraer; A, 2024). Die zwei Turbofantriebwerke von General Electric haben eine Leistung je Triebwerk von 62,3 kN und kann mit einer TAS von 840 km/h fliegen (Palt, 2019).

Die Spannweite der Embraer E175 beläuft sich auf 28,7 m, während es bei einer Höhe von 9,73 m, eine Länge von 31,68 m aufweist. Weitere technische Daten sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Länge	31,68 m	***Treibstoffverbrauch**	(A) 0,04097 kg/km/seat (B) 0,03166 kg/mk/seat	**Max. Reisegeschwin-digkeit**	829 km/h
Höhe	9,73 m	**Max. Startgewicht**	40370 kg	**Max. Reichweite**	3982 km
Spannweite	28, 7m	**Max. Landegewicht**	34100 kg	**Startdistanz**	1463 m
Flügelfläche	72,7 m^2	**Nutzbares Kraftstoffgewicht**	9355 kg	**Startrollstrecke**	1266 m
Kabinenhöhe	1,82 m	**Nutzbares Kraftstoffvolumen**	11625 L	**Landedistanz**	-/-
Kabinenbreite	26,3 m	**Leergewicht**	21810 Kg	**Landerollstrecke**	1259 m
Kabinenlänge	2,74 m	**Nutzlast**	-/-	**Dienstgipfelhöhe**	12497 m
Max. Pax	88	**Max. Nutzlast**	10094 kg	**Max. Geschwindigkeit**	Mach 0,82
Gepäckraum-volumen	26 m^3	**Volle Treibstoffnutzlast**	5215 kg	**Max. Steigrate**	3084 m/min
Triebwerk-hersteller	GE CF34-8E	**Max. Gepäckgewicht**	-/-	**Motorleistung**	62,3 kN

Tabelle 4: Embraer E175 Spezifikation (Embraer; A, 2024) (Palt, 2019)

* Die Angaben sind den Ausführungen von (Kühn, 2023), S. 46 entnommen. Angabe (A) richtet sich nach dem „Fuel Consumption Extended Payload-Range Diagram“ und Angabe (B) ist die Angabe des „EEA Master Emission Calculators“.

4.4 Berechnung Treibstoffverbrauch

Anhand der in Kapitel *4.3 Vergleichsmodelle* behandelten Vergleichsmodelle für die derzeitige Lage von Commuter-, Kurzstrecken- und Regionalstrecken Aircraft, sollen aus den gewonnenen Daten Treibstoffverbräuche ermittelt werden.

Treibstoffverbräuche geben im weiteren Verlauf Auskunft über die jeweiligen CO_2-Emissionen während des Flugbetriebes, aber auch über den Bedarf an Treibstoff, der unter CO_2-Emissionen hergestellt und ggf. angeliefert werden muss. Somit kann der CO_2-Ausstoß der heute genutzten, Kerosin betriebenen Technik, mit dem CO_2-Ausstoß der innovativen Antriebstechnik von moderner Commuter Aircraft verglichen werden.

Bei den Berechnungen zum Treibstoffverbrauch finden bestimmte Einflussfaktoren, wie erhöhter Treibstoffverbrauch bei Start- und Landeflug, erhöhter oder gesenkten Verbrauch durch möglichen Windwiderstand oder Rückenwind oder auch das Taxifuel, das zum Fahren auf dem Boden benötigt wird, überwiegend keine Beachtung, da die Ausgangsdaten der herangezogenen Flugzeugmodelle stark variieren und die Rechnungen somit schwieriger zu vergleichen sind.

In Darstellungen wie den *Abbildung 15: Fuel Consumption Grafik Turboprop* ***(Kühn, 2023)*** *Abbildung 16: Fuel consumption narrowbody* ***(Kühn, 2023)*** wird ersichtlich, dass auch die verfügbaren Angaben über die einzelnen Flugzeugtypen je nach Quelle der Angabe stark voneinander abweichen. Auf der Y-Achse sind Treibstoffverbräuche angegeben, auf der X-Achse verschiedene Flugzeugtypen. Die verschiedenfarbigen Punkte stehen für die verschiedenen Quellen über die Angaben zum Treibstoffverbrauch. Auffällig hierbei ist, dass die herstellereigenen Angaben aus dem Handbuch (mit der Farbe dunkelblau) meist eher im unteren Bereich des Treibstoffverbrauchs liegen. Dies ist besonders in *Abbildung 17: Fuel consumption narrowbody* ***(Kühn, 2023)*** zu erkennen.

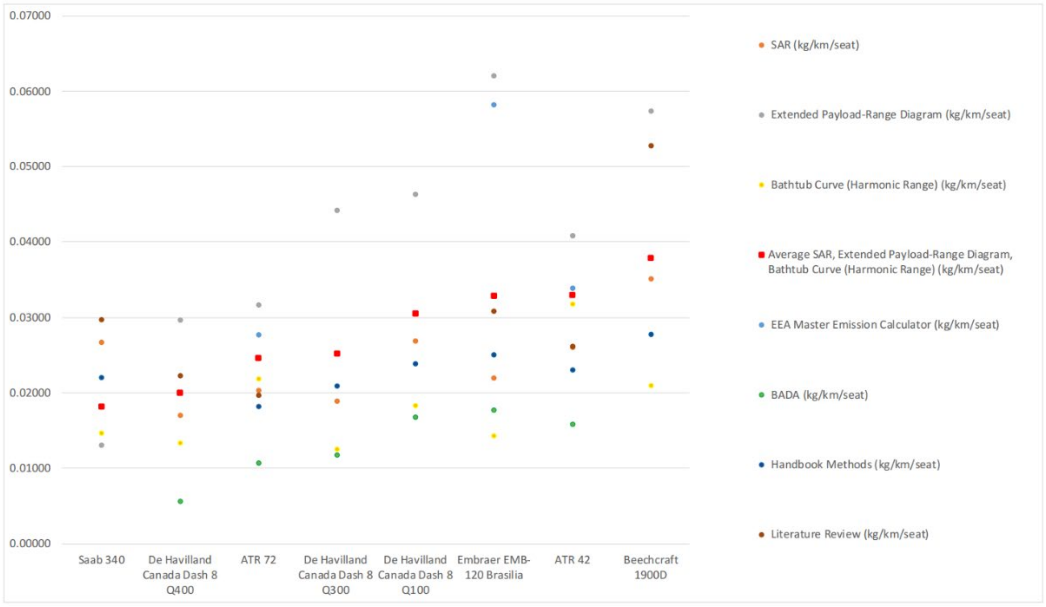

Abbildung 15: Fuel Consumption Grafik Turboprop (Kühn, 2023)

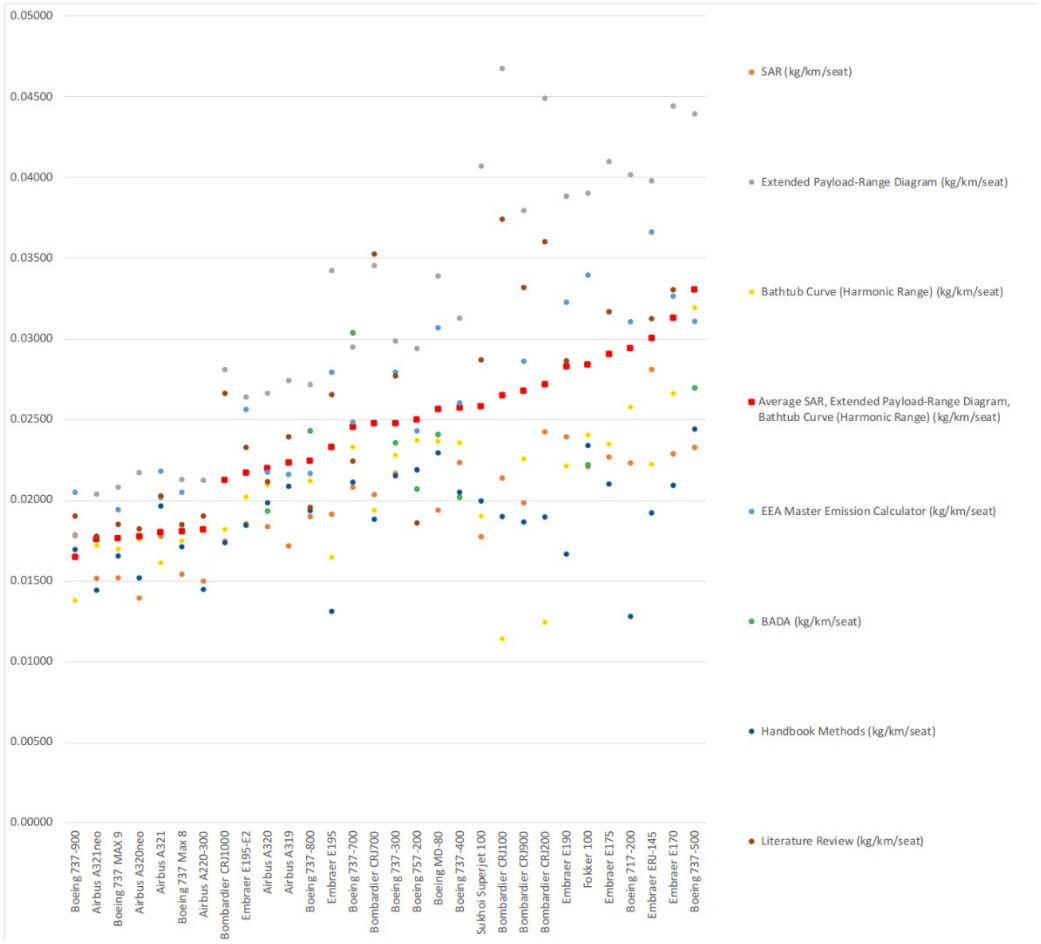

Abbildung 16: Fuel consumption narrowbody (Kühn, 2023)

In dieser Arbeit werden die Treibstoffverbräuche daher rein durch konkrete, verfügbare Angaben zu durchschnittlichem Treibstoffverbrauch während eines Fluges berechnet. Der tatsächliche Verbrauch dürfte schon allein durch das Fehlen des Taxifuels höher sein.

4.4.1 Treibstoff Cessna 172

Um einen Vergleichswert bilden zu können, der den Treibstoffverbrauch für die Cessna Skyhawk 172 in einem für dieses Modell typsichen Flugszenario abbildet, müssen vorerst realistische Annahmen getroffen werden.

Die Cessna Skyhawk 172 hat eine maximale Reichweite von 1185 km und fliegt bei max. Reisegeschwindigkeit 230 km/h auf einer Dienstgipfelhöhe von 4267 m (siehe *Tabelle 2: Cessna Skyhawk 172 Spezifikation* ***(Textron Aviation, Cessna, 2024)***(Textron Aviation, Cessna, 2024)*).*

Allerdings wird bei einem realen Flug niemals die max. Reichweite mit max. Reisegeschwindigkeit geflogen, da diese Parameter sich gegenseitig einschränken.

Laut der nebenstehenden *Abbildung 17: Auszug Cessna 172 Handbuch* **(Rabe, 2023)** kann eine Cessna 172 in Reiseflughöhe von 8000 ft (2438 m) bei 2500 Umdrehungen/min und unter Normaltemperatur mit 64% Leistung eine moderate Reisegeschwindigkeit von 114 kn (211 km/h) fliegen und verbraucht dabei 27,3 l/h an Kraftstoff.

Bedingungen:
Empfohlenes armes Gemisch
Fluggewicht 1043 kp
Klappen eingefahren

Druck-höhe ft	U/ min	20 °C unter Normtemperatur			Normtemperatur			20 °C über Normtemperatur		
		BHP %	TAS kn	Kraftst. l/h	BHP %	TAS kn	Kraftst. l/h	BHP %	TAS kn	Kraftst. l/h
2000	2500	---	---	---	75	116	31,8	71	115	29,9
	2400	72	111	30,3	67	111	28,4	63	110	26,9
	2300	64	106	26,9	60	105	25,4	56	105	23,8
	2200	56	101	23,8	53	100	23,1	50	99	22,0
	2100	50	95	22,0	47	94	21,2	45	93	20,4
4000	2550	---	---	---	75	118	31,8	71	118	29,9
	2500	76	116	32,2	71	115	30,3	67	115	28,4
	2400	68	111	28,8	64	110	26,9	60	109	25,4
	2300	60	105	25,7	57	105	24,2	54	104	23,1
	2200	54	100	23,1	51	99	22,3	48	98	21,6
	2100	48	94	21,2	46	93	20,8	44	92	20,1
6000	2600	---	---	---	75	120	31,8	71	120	29,9
	2500	72	116	30,7	67	115	28,8	64	114	26,9
	2400	64	110	27,3	60	109	25,7	57	109	24,2
	2300	57	105	24,6	54	104	23,5	52	103	22,3
	2200	51	99	22,3	49	98	21,6	47	97	20,8
	2100	46	93	20,8	44	92	20,4	42	91	19,7
8000	2650	---	---	---	75	122	31,8	71	122	29,9
	2600	76	120	32,6	71	120	30,3	67	119	28,4
	2500	68	115	29,1	64	114	27,3	60	113	25,7
	2400	61	110	26,1	58	109	24,6	55	108	23,5
	2300	55	104	23,5	52	103	22,7	50	102	22,0
	2200	49	98	21,6	47	97	20,8	45	96	20,4
10 000	2650	76	122	32,2	71	122	30,3	67	121	28,4
	2600	72	120	30,7	68	119	28,8	64	118	26,9
	2500	65	114	27,6	61	114	25,7	58	112	24,6
	2400	58	109	24,6	55	108	23,5	52	107	22,7
	2300	52	103	22,7	50	102	22,0	48	101	21,2
	2200	47	97	21,2	45	96	20,4	44	95	20,1
12 000	2600	68	119	29,1	64	118	27,3	61	117	25,7
	2500	62	114	26,1	58	113	24,6	55	111	23,5
	2400	56	108	23,8	53	107	22,7	51	106	22,0
	2300	50	102	22,0	48	101	21,2	46	100	20,8
	2200	46	96	20,8	44	95	20,4	43	94	20,1

Abb. 5-7 Reiseleistung

Abbildung 17: Auszug Cessna 172 Handbuch (Rabe, 2023)

Unter den oben getroffenen Annahmen, die im Vergleich zu allen Werten der Tabelle einem durchschnittlichen Verbrauch auf moderater Reiseflughöhe mit moderater Geschwindigkeit entsprechen und unter Berücksichtigung eines Gegenwindes von 20 km/h, verbraucht das

Flugzeug bei einer angenommenen Strecke zwischen Hamburg und München von 612 km (www.luftlinie.org) laut (1) und (2) 87,36 l Treibstoff.

(1) $$\frac{612\ km}{211\ {}^{km}/_{h} - 20\ {}^{km}/_{h}} = 3{,}2\ h$$

(2) $$3{,}2\ h\ \times 27{,}3\ {}^{l}/_{h} = 87{,}36\ l$$

Laut (Bundesamt für Zivilluftfahrt BAZL, 2020) entsprechen 1 kg Kerosin 1,25 l Kerosin.

Die aus Gleichung (2) errechneten 87,36 l Kerosin entsprechen demnach einem Verbrauch von 69,88 kg Kerosin.

4.4.2 Treibstoffverbrauch ATR 42-600

Um sich aus den verfügbaren Angaben der Realität anzunähern, wird für jede Quelle ein durchschnittlicher Treibstoffverbrauch für die Strecke von Berlin nach London ermittelt. Die drei verschiedenen Ergebnisse werden im Anschluss zu einem Mittelwert zusammengefasst.

Laut Herstellerangaben verbraucht die ATR 42-600 unter 95% MTOW, mit ISA-Bedingungen und auf FL240 620 kg/h an Treibstoff *(siehe Tabelle 4: ATR 42-600 Spezifikation* (ATR (B)) (Palt (B), 2019)*)* (Pratt & Whitney, 2024).

FL240 entspricht einer Höhe von 24000ft (Airbus, 2002).

Nach

(3) $$1\ m = 3{,}281\ ft$$

sind

(4) $$\frac{24000\ ft}{3{,}281} = 7314{,}8\ m\ .$$

Bei einem angenommenen Flug von Berlin nach London mit einer Entfernung von 931,85 km (www.luftlinie.org), und bei geflogenem Flight Level von 240, mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von V_{max} x 0,9 ergibt sich somit nach (5) und (6) ein Treibstoffverbrauch von 1199,88 kg.

(5) $$\frac{931{,}85\ km}{535\ {}^{km}/_{h} \times 0{,}9} = 1{,}93\ h$$

(6) $$1{,}93\ h \times 620\ {}^{Kg}/_{h} = 1199{,}88\ Kg$$

Für die Angabe (B) des „Fuel Consumption Extended Payload-Range Diagram“ von 0,04085 kg/km/seat ergibt sich der durchschnittliche Treibstoffverbrauch bei der Strecke von Berlin nach London von 931,85 km, mit einer Auslastung von 50 Sitzen (siehe: Tabelle 4: ATR 42-600 *Spezifikation* (ATR (B)) (Pratt & Whitney, 2024)) nach (7) ein Treibstoffverbrauch von 1903,30 kg.

(7) $$0{,}04085\ \frac{\frac{kg}{km}}{seat} \times 931{,}85\ km \times 50\ seats = 1903{,}30\ kg$$

Nach der Angabe (C) des „EEA Master Emission Calculators“ verbraucht die ATR 42-600 0,03387 kg/km/seat. Unter denselben definierten Voraussetzungen, einer Strecke von Berlin nach London mit 931,85 km und einer Auslastung von 50 Sitzplätzen ergibt sich aus (8) eine Treibstoffverbrauch von 1578 kg.

(8) $$0{,}03387 \frac{\frac{kg}{km}}{seat} \times 931{,}85\ km \times 50\ seats = 1578\ kg$$

Um die drei Angaben in einer Aussage zu vereinen, wird der Mittelwert aus den drei Ergebnissen berechnet:

(9) $$\frac{1199{,}88kg + 1903{,}3\ kg + 1578\ kg}{3} = 1560{,}39\ kg$$

Der aus Gleichung (9) berechnete Mittelwert von 1560,39 kg kann auch in Litern folgenderweise ausgedrückt werden:

(10) $$1560{,}39 \times 1{,}25 = 1950{,}49\ l$$

Die ATR 42-600 verbraucht auf eine Strecke von Berlin nach London durchschnittlich eine Menge von 1560,39 kg oder 1950,49 l Kerosin.

4.4.3 Treibstoffverbrauch Embraer E175

Um sich aus den verfügbaren Angaben der Realität anzunähern, wird für beide Angaben (A) und (B) ein durchschnittlicher Treibstoffverbrauch für die Strecke von Hamburg nach Kairo mit einer Distanz von 3124 km (www.luftlinie.org) berechnet. Die zwei verschiedenen Ergebnisse werden im Anschluss zu einem Mittelwert zusammengefasst.

Für die Angabe (A) aus dem „Fuel Consumption Extended Payload-Range Diagram“ sind 0,04097 kg/km/seat Treibstoffverbrauch angegeben.

In Gleichung (11) wird der Wert mit den zurückgelegten Kilometern auf der Strecke von Hamburg nach Kairo und mit der max. Sitzauslastung von 88 Passagieren (siehe *Tabelle 4: Embraer E175 Spezifikation* (Embraer; A, 2024) (Palt, 2019)*)* berechnet.

$$0{,}04097\ \frac{\frac{kg}{km}}{seat} \times 3124\ km\ \times 88\ seats = 11263{,}14\ kg \tag{11}$$

Nach Gleichung (11) ergibt sich ein Treibstoffverbrauch von 11263,14 kg Kerosin.

In Gleichung (12) wird dasselbe Berechnungsprinzip wie in Gleichung (11) angewendet, mit dem Unterschied, dass Angabe (B) des „EEA Master Emission Calculators“ als durchschnittlicher Treibstoffverbrauch eingesetzt wird.

$$0{,}03166\ \frac{\frac{kg}{km}}{seat} \times 3124\ km\ \times 88\ seats = 8703{,}71\ kg \tag{12}$$

Laut Gleichung (12) hat die Embraer E175 auf der Strecke Hamburg – Kairo einen Kerosinverbrauch von 8703,71kg.

Da die Ergebnisse der Gleichungen (11) und (12) stark voneinander abweichen, wird in der folgenden Berechnung ein Mittelwert aus beiden Werten gebildet.

$$\frac{11263{,}14\ kg + 8703{,}71\ kg}{2} = 9983{,}425\ kg \tag{13}$$

Der in Gleichung (13) errechnete Verbrauch kann auch in Litern ausgedrückt werden.

$$9983{,}425\ \times 1{,}25 = 12479{,}28\ l \tag{14}$$

Nach Gleichung (13) ergibt sich somit ein durchschnittlicher Treibstoffverbrauch von 9983,425 kg auf einer Strecke von 3124km mit 88 Passagieren im Flugzeug, der nach Gleichung (14) auch in 12479,28 l ausgedrückt werden kann.

4.5 CO_2-Emissionen

In diesem Teil des 4. Kapitels werden CO_2-Emissionen anhand der in Kapitel *4.4 Berechnung Treibstoffverbrauch* ermittelten Treibstoffverbräuche sowie Quellen über den CO_2-Ausstoß pro Liter Kerosin Herstellung und Transport ermittelt. Die Analyse dieser Werte gewährt einen Einblick in den Beitrag von derzeitiger Commuter- bis Regional Aircraft an den CO_2-Emissionen der Luftfahrt allgemein und schafft Vergleichswerte für den Abgleich und die Einordnung moderner Commuter Aircraft.

4.5.1 CO_2-Ausstoß pro Flug

Kerosin besteht hauptsächlich aus Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen (chemie.de, 2023). Bei der Verbrennung von Kerosin im Triebwerk, reagiert der Kohlenstoff des Kerosins mit dem Sauerstoff der Luft. Als Abfallprodukte entstehen hauptsächlich Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Wasserdampf. Laut dem Schweizer Bundesamt für Zivilluftfahrt, verbraucht eine Verbrennung von 1 kg eines herkömmlichen Antriebsstoffes wie Benzin, Diesel, Heizöl oder auch Kerosin rund 3 kg Sauerstoff. Die Verbrennungsmasse von 4 kg bringt im Falle von 1 kg Kerosin und 3 kg Sauerstoff eine CO_2-Masse von 3,14 kg. (Bundesamt für Zivilluftfahrt BAZL, 2020). Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass pro verbranntes Kilogramm Kerosin 3,14 kg CO_2 ausgestoßen werden. Um den CO_2-Ausstoß eines bestimmten Treibstoffverbrauchs zu ermitteln, muss dieser mit dem Faktor 3,14 multipliziert werden.

In der folgenden Tabelle werden die Treibstoffverbräuche unser in den Kapiteln *4.4.1 Treibstoff Cessna 172, 4.4.2 Treibstoffverbrauch ATR 42-600, 4.4.3 Treibstoffverbrauch Embraer E175* ermittelten Vergleichswerte und die dadurch entstehenden CO_2-Emissionen aufgelistet.

Flugzeugtyp	Treibstoffverbrauch in kg	CO_2-Emission in kg
Cessna 172	69,88	219,45
ATR 42-600	1560,39	4899,62
Embraer E175	9983,42	31347,95

Tabelle 5: Durchschnittlicher CO_2-Ausstoß pro Beispiel-Flug

4.5.2 „Well-To-Tank“ Faktor Kerosin

Der „Well-To-Tank“ (WTT) Faktor ist ein Maß für die Treibhausgasemissionen, die bei dem gesamten Prozess von Ölförderung über Raffinerie bis hin zum Transport freigesetzt werden. Der Faktor gibt an, wie viele CO_2-Äquivalente pro Energieeinheit des Kraftstoffes während des gesamten Prozesses emittiert werden (Carbon-Connect AG, 2024).

Der WTT-Faktor von Kerosin ist stark abhängig von der Qualität des Ausgangsproduktes und des Raffinerieprozesses. Laut einer Studie zu WTT-Faktoren verschiedener Antriebsstoffe der European Commission aus dem Juli 2015, „Study on actual GHG Data for Diesel, Petrol, Kerosene and Natural Gas“ (European Commission (A), 2015), liegt der WTT-Faktor von Kerosin bei 15,77 grCO_2eq/MJ.

CO_2-Äquivalente sind die Emissionen von CO_2 und anderen Treibhausgasen, die entsprechend ihrem globalen Erwärmungspotential in CO_2 Äquivalente umgerechnet werden (Umwelt Bundesamt, 2018).

Der Energiegehalt von Kerosin liegt bei 43,1 MJ/kg (chemie.de, 2023). Mit Gleichung (15) wird der WTT-Faktor pro Kilogramm Kerosin berechnet.

$$15{,}77 \frac{grCO2eq}{MJ} \times \frac{43{,}1}{1} \frac{MJ}{kg} = 679{,}687\ grCO2eq/kg \quad (15)$$

Es lässt sich somit feststellen, dass pro produziertem Kilogramm Kerosin rund 679,687 grCO_2eq entstehen.

Für die in den Kapiteln *4.4.1 Treibstoff Cessna 172, 4.4.2 Treibstoffverbrauch ATR 42-600, 4.4.3 Treibstoffverbrauch Embraer E175* definierten Beispiele kann folgende Tabelle Werte für den zusätzlichen CO_2-Ausstoß durch Ölförderung, Raffinerieprozess und Transport abbilden.

Flugzeugtyp	Treibstoffverbrauch in kg	CO_2-Emission in kg
Cessna 172	69,88	47,5
ATR 42-600	1560,39	1060,6
Embraer E175	9983,42	6785,6

Tabelle 6: WTT-Faktor in kg

Anhand dieser Berechnung lässt sich erkennen, dass der WTT-Faktor der Kerosinherstellung im Vergleich zu der Verbrennung des Kerosins sehr gering ist. Am Beispiel der ATR 42-600 gelesen, wird für die Herstellung und Lieferung von 1560,39 kg Kerosin, 1060,6 kg CO_2eq ausgestoßen.

Mit Gleichung (16) und (17) lässt wird deutlich, dass bei der Verbrennung von Kerosin und der dafür 100% freigesetzten CO_2 – Emission, ein zusätzlicher Anteil von 21,7 % CO_2 – Emission für die Herstellung der dafür benötigen Kerosinmenge freigesetzt wird.

(16) $$\frac{4899{,}62\ kg\ (CO2)}{1060{,}6\ kg\ (CO2)} = 4{,}61$$

(17) $$\frac{100}{4{,}61} = 21{,}69\%$$

5. Forschung und Entwicklungsprojekte

Der Bedarf in der Luftfahrtbranche an klimafreundlichen Antriebstechnologien ist hoch. Der gesamte Anteil an CO_2-Emissionen der Luftfahrt in Bezug auf CO_2- Emissionen weltweit ist zwar mit 3-5% gering (*vgl.: 3. Luftfahrt und ihre Auswirkungen auf die Umwelt*), pro geflogenen Personenkilometer (Pkm) ist der CO_2-Ausstoß jedoch mit 238 g/Pkm im Vergleich zum Straßen (166 g/Pkm) - und Schienenverkehr (31-58 g/Pkm) deutlich höher (Umwelt Bundesamt, 2022).

In der Forschung zur Reduktion der CO_2-Emissionen durch die Luftfahrt können Projekte in zwei verschiedene Hauptrichtungen unterteilt werden. Zum einen werden neue Antriebsmöglichkeiten durch Wasserstoff als Treibstoff untersucht. Zum anderen wird an der Entwicklung von E-Fuels, synthetisch hergestelltem Kerosin geforscht. In diesem Kapitel der Arbeit soll die neue Forschungsrichtung zum Wasserstoff als alternative Antriebsmethode zur Kerosinverbrennung genauer beleuchtet werden und mit der vorhandenen Datenlage ein Vergleich zwischen den CO_2-Emissionen durch Kerosinverbrennung und den neuen Alternativen hergestellt werden.

In der Forschung sehr weit vorne in der Diskussion als Energiequelle für Flugzeuge ist Wasserstoff. Wasserstoff hat eine enorm hohe Energiedichte, also bei geringer Masse ein hohes Energiepotenzial. Er setzt bei Reaktion mit Sauerstoff so viel Energie frei, dass sich damit Motoren antreiben lassen.

Den größten Vorteil des Einsatzes von Wasserstoff als Antrieb für Flugzeuge, würde die starke Reduktion von Treibhausgasemissionen bewirken. Durch die Verbrennung von Wasserstoff entsteht als Abfallprodukt lediglich Wasser.

Wasserstoff kann entweder mechanische Energie erzeugen, indem er in Verbrennungsmotoren verbrannt wird, oder elektrische Energie, durch den Einsatz in Brennstoffzellen und die dann ablaufende Elektrolyse.

Der Einsatz von Wasserstoff als Treibstoff birgt auch Herausforderungen. Wasserstoff hat bei Raumtemperatur und normalem Druck einen gasförmigen Zustand. Zur Speicherung muss Wasserstoff entweder unter hohem Druck komprimiert oder bei sehr niedrigen Temperaturen als flüssiger Wasserstoff gelagert werden. Beide Methoden erfordern spezielle Tanks und Infrastruktur.

Um Vorteile für die Umwelt beim Einsatz von Wasserstoff voll auszuschöpfen, muss die Produktion von Wasserstoff mit erneuerbaren Energien abgedeckt werden. Die Gewinnung

reinen Wasserstoffs bedarf eines hohen Energieverbrauchs und ist ohne die Verwendung erneuerbarer Energien sehr kohlenstoffintensiv.

5.1 Herstellung

In der Natur kommt Wasserstoff nur in chemisch gebundener Form vor. Daher kann reiner Wasserstoff nur aus Wasserstoffreichen Ausgangsprodukten mit Abspaltungsverfahren gewonnen werden. Unter Einsatz von elektrischer, thermischer oder chemischer Energie lassen sich Wasserstoffverbindungen in ihre einzelnen Bestandteile aufspalten.

Je nach Ausgansprodukt gibt es verschiedene Verfahren, um die chemische Verbindung zu trennen und reinen Wasserstoff zu gewinnen.

Nach dem Global Hydrogen Review 2023 der IEA (International Energy Agency (B), 2023), hat die weltweite Wasserstoffproduktion im Jahr 2022 eine Menge von 95 Mt erreicht.

Dampfreformierung (SMR – Steam Methane Reforming)

Ein Verfahren zur Gewinnung von Wasserstoff ist die Reformierung von fossilen Brennstoffen wie Erdgas und Kohle. In der Regel wird in diesem Verfahren Erdgas unter Hitze in Wasserstoff und Kohlendioxid umgewandelt. Im Vergleich zu Elektrolyse ist dieses Verfahren ein aufwändiger und langwieriger Prozess, der mit hohen CO_2-Emissionen verbunden ist und daher nicht als Anteil zur Verbesserung der Ökobilanz betrachtet werden kann. Dieser Wasserstoff wird auch als grauer Wasserstoff bezeichnet. Die Dampfreformierung von Erdgas, ohne Bindung und Lagerung von CO_2, ist zur Zeit der am weitesten verbreitete Herstellungsprozess für H_2 mit einem Anteil von 62% der gesamten Produktion von Wasserstoff. (International Energy Agency (B), 2023).

Dampfreformierung mit Carbon Capture Storage (CCS)

Die Dampfreformierung mit der Ergänzung von CCS gewinnt ebenfalls Wasserstoff aus Erdgas, mit dem Unterschied, dass das daraus entstehende CO_2 abgeschieden, eingelagert und aufbereitet wird. So gelangt das CO_2 nicht in die Atmosphäre, sondern befindet sich in unterirdischen Lagern. Die Herausforderung hierbei besteht darin, diese Lager dauerhaft

sicher zu halten. Wasserstoff, der mit dieser Methode gewonnen wird, wird auch als blauer Wasserstoff bezeichnet. Nur rund 0.6% des weltweit produzierten Wasserstoffs, werden derzeit mit diesem Verfahren gewonnen (International Energy Agency (B), 2023).

Methanpyrolyse

Bei dem Herstellungsverfahren der Methanpyrolyse wird der Wasserstoff ebenfalls aus Erdgas gewonnen. Durch die Zufuhr von thermischer oder elektrischer Energie wird Methan in seine Bestandteile Kohlenstoff und Wasserstoff gespalten. CO_2 wird bei dem Verfahren zwar selbst nicht freigesetzt, wie bei allen erdgasbasierten Herstellmethoden sind allerdings auch hier die Vorkettenemissionen nicht unerheblich. Dazu zählen auch diffuse Methanemissionen der Erdgasförderung, die im Vergleich zum CO_2 einen noch größeren spezifischen Treibhausgaseffekt verursachen. (Frauenhofer IKTS, 2024) Der durch diesen Prozess generierte Wasserstoff wird als türkiser Wasserstoff bezeichnet.

Es besteht bei allen drei Verfahren auch die Option, anstelle des Erdgases Biogas einzusetzen. Im Hinblick auf die Nachhaltigkeit kann vor allem der Einsatz biogener Reststoffe vorteilhaft sein. Allerdings lägen die Herstellkosten aufgrund der kleineren Anlagengrößen deutlich höher. Zudem müssten auch die Prozessketten und die damit einhergehenden Emissionen in Abhängigkeit der verwendeten Einsatzstoffe wie Abfall- oder Reststoffe beachtet werden.

Elektrolyse - Aufspaltung von Wasser in Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2)

Für die klimaneutrale Aufspaltung von Wasser in seine chemischen Bestandteile H_2 und O_2 ist ein Elektrolyseverfahren notwendig. Hierbei wird durch das Anlegen einer elektrischen Spannung Wasser (H_2O) in Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) mittels der dadurch ablaufenden elektrochemischen Reaktion geteilt.

Die Reaktion teilt sich in zwei Halbzellenreaktionen auf, die jeweils an der Kathode und der Anode ablaufen. Die beiden Elektroden sind in einem Elektrolyten eingetaucht. Die folgenden drei Arten sind die gängigsten Elektrolysearten und werden anhand der jeweilig eingesetzten Elektrolyten unterschieden:

1.) Polymerelektrolytmemabran -Elektrolyse (PEM-Elektrolyse)

Wie in *Abbildung 18: PEM-Elektrolyseur* (www.pepeenergy.com, 2024) dargestellt, werden bei der PEM-Elektrolyse eine protonenleitende gasdurchlässige Membran zwischen die Anode und die Kathode gestellt. Das flüssige Wasser wird der Anode zugeführt und dort in Sauerstoff (O_2) und Protonen (H^+) aufgespalten. Die Protonen werden von der Kathode angezogen, können durch die Membran diffundieren und werden dann mit Elektronen angereichert, wodurch Wasserstoff (H_2) entsteht.

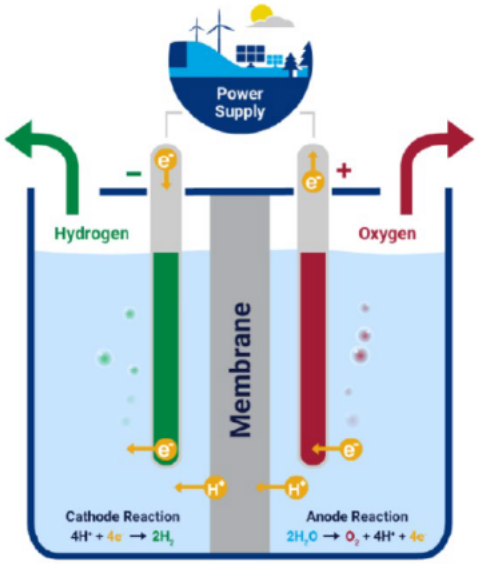

Abbildung 18: PEM-Elektrolyseur (www.pepeenergy.com, 2024)

2.) Alkalische Elektrolyse:

Bei der alkalischen Elektrolyse werden die Elektroden durch ein Diaphragma getrennt und in einer Kalilauge als Elektrolyt eigetaucht. Bei diesem Verfahren wird der Kathode Wasser zugeführt, das sich durch die elektronische Spannung in Hydroxidionen und Wasserstoff aufteilt. Aufgrund des Ladungsunterschieds zwischen Hydroxidionen und Anode, wandern diese durch das Diaphragma und reagieren dort unter Elektronenabgabe zu Wasser und Sauerstoff (Fraunhofer IWU, 2024). Der durch Elektrolyseverfahren gewonnene Wasserstoff wird auch grüner Wasserstoff bezeichnet, da dabei keine umweltschädlichen Abfallprodukte entstehen müssen. Im optimalen Fall wird der Strom für die Stromzufuhr der Elektroden vollständig aus erneuerbaren Energien gewonnen.

3.) Festoxidelektrolyse:

Die Festoxidelektrolyse (Solid-Oxid-Electrolysis-Cell, SOEC) ist eine Form der Hochtemperaturelektrolyse. Bei dieser Art der Elektrolyse wird *„typischerweise eine oxidionenleitende (O_2-) Keramik als Elektrolyt und Separator eingesetzt“* (Fraunhofer IWU, 2024).

Da diese eine ausreichende Leitfähigkeit erst ab mehreren hundert °C entwickelt, wird die SOEC meist zwischen Temperaturen von 500°C - 900°C betrieben. (Fraunhofer IWU, 2024). Wasserdampf wird an der Kathode in Wasserstoff und Oxidionen aufgespalten. Die Oxidionen diffundieren durch den Festkörperelektrolyten und oxidieren an der Anode zu Sauerstoff.

Für das Jahr 2022 erreichte die weltweite Wasserstoffproduktion fast 95 Mt, ein Anstieg von 3 % im Vergleich zu 2021 (International Energy Agency (A), 2023). Wie schon im Vorjahr 2021, ist die Produktion von der Nutzung fossiler Brennstoffe dominiert. Rund 62 % der weltweiten Produktion von Wasserstoff werden durch Dampfreformierung von Erdgas ohne Kohlenstoffabscheidung, -nutzung und -speicherung (CCS) hergestellt. Weitere 37% des gesamten weltweit produzierten Wasserstoffs wird mittels Kohlevergasung oder als Abfallprodukt in der Treibstoffherstellung von Diesel hergestellt. Die emissionsarme Wasserstoffproduktion mit CCS liegt bei weniger als 1 Mt (0,7 % der weltweiten Produktion). Etwa 100 kt H_2 werden mittels Wasserelektrolyse hergestellt. Das sind zwar weltweit betrachtet nicht mehr als mehr als 0,1% des gesamten produzierten Wasserstoffs in dem Jahr, allerdings dennoch ein Wachstum von 35% im Vergleich zum Vorjahr (International Energy Agency (A), 2023).

Die in dem *Diagramm 3: CO_2-Emissionen bei H_2-Herstellung* dargestellten Daten zum CO_2-Ausstoß bei den verschiedenen Herstellungsmethoden von Wasserstoff sind dem Global Hydrogen Review 2023 der IAE entnommen (International Energy Agency (B), 2023).

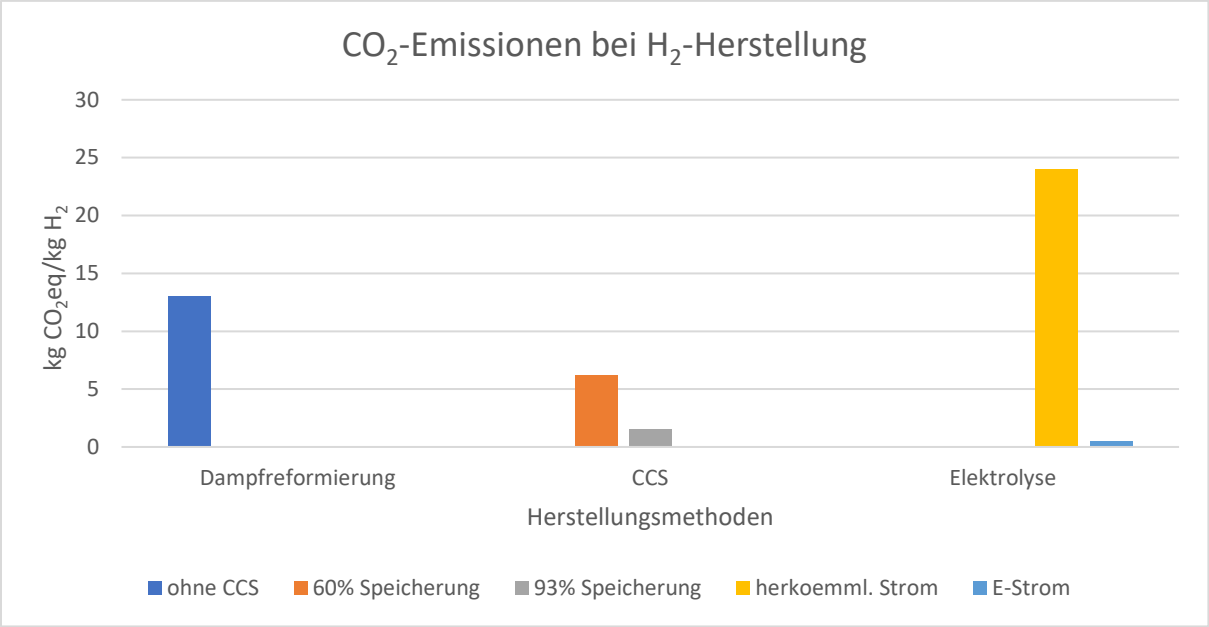

Diagramm 3: CO_2-Emissionen bei H_2-Herstellung

Ausgehend von dieser Datenlage werden bei der Dampfreformierung ohne Bindung und Lagerung von CO_2 13 kg CO_2eq pro kg produziertem Wasserstoff freigesetzt. Bei dem Verfahren von Dampfreformierung mit CCS, variiert der Anteil von freigesetztem CO_2 je nach Speicherungsanteil des CO_2. Bei einem Speicherungsanteil von 93% werden demnach immer noch bis zu 1,5 kg CO_2eq/kg H_2 emittiert und bei einer Speicherung von 60% sogar noch bis zu 6,2 kg CO_2eq/kg H_2. Bei dem Elektrolyseverfahren gehen die Zahlen für den CO_2-Ausstoß am weitesten auseinander. Entscheidend hierfür ist die Stromquelle, die für die Elektrolyse herangezogen wird. Bei herkömmlich produziertem Strom aus Kohlekraftwerken können pro

kg H_2 bis zu 24 kg CO_2eq pro freigesetzt werden. Diese Methode wäre in dem Fall dann noch deutlich CO_2-lastiger als beispielsweise eine Dampfreformierung aus Erdgas. Wird allerdings Strom aus erneuerbaren Energien genutzt, so wird pro kg H_2 maximal 0,5 kg CO_2eq pro ausgestoßen.

Die Kosten der jeweiligen Wasserstoffarten hängen ebenfalls stark von ihren Herstellungsmethoden ab. In der *Abbildung 19: Vergleich Herstellungsverfahren H_2* **(Frauenhofer IKTS, 2024)** ist erkennbar, dass die Gewinnung von grünem, klimaneutralem Wasserstoff noch deutlich kostspieliger ist als die Gewinnung von Wasserstoff durch Dampfreformierung. Laut (Frauenhofer IKTS, 2024) wird der größte Anteil des hergestellten Wasserstoffs derzeit durch Dampfreformierung hergestellt und ist somit nicht klimaneutral. Um Wasserstoff als klimaneutrales Antriebsmittel für Flugzeuge einsetzen zu können, müsste dieser vollständig über Elektrolyse mittels erneuerbarer Energien hergestellt werden.

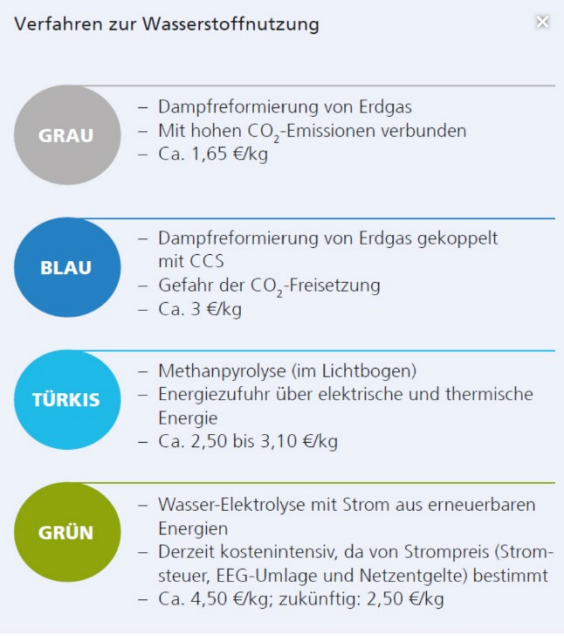

Abbildung 19: Vergleich Herstellungsverfahren H_2 (Frauenhofer IKTS, 2024)

Auch wenn der graue Wasserstoff günstiger im Einkaufspreis zu sein scheint, ist er durch die gestiegenen Preise der CO_2-Zertifikate, die sich im vergangenen Jahr auf durchschnittlich 83,66€ pro Tonne beliefen (tagesschau, 2024), in seiner Herstellung im Preis gestiegen und somit auf einem ähnlichen preislichen Niveau, wie der grüne Wasserstoff (Zentrum Wasserstoff Bayern, 2024).

5.2 Einsatz im Antrieb

Brennstoffzellen

Eine Wasserstoff Brennstoffzelle erzeugt mit hohem Wirkungsgrad elektrische Energie, indem sie Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) zu Wasser (H_2O) umwandelt. Dieser Vorgang wird auch als „kalte Verbrennung“ bezeichnet. Die Reaktion von Wassersoff mit Sauerstoff bedarf hierbei keiner weiteren Energiezufuhr.

H_2-Brennstoffzellen werden grundlegend zwei verschiedenen Typen zugeordnet. Zum einen gibt es die Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) und zum anderen die Solid Oxid Fuel Cell (SOFC).

In der PEM-Brennstoffzelle entsteht der Strom, indem der Wasserstoff (H_2) an der Anode durch einen Katalysator reagiert und Elektronen abgibt, die durch einen Überbrückungsanschluss zur Kathode gelangen. Zugleich entstehen Protonen bei der Oxidation, die durch die Membran zur gegenüberliegenden Kathode wandern. Beim Eintreffen der Protonen und Elektronen des Wasserstoffs auf der Kathodenseite und dem dort befindlichen Sauerstoff (O_2) entsteht Wasser (H_2O). PEM-Brennstoffzellen liegen in einem Leistungsbereich von bis zu 500kW (TÜV Nord, 2024). Der Wirkungsgrad von PEMFC Brennstoffzellen liegt bei 35% – 50% und sie arbeiten bei vergleichsweise geringen Betriebstemperaturen zwischen 70°C – 90°C (Zentrum Wasserstoff Bayern, 2024).

Bei SOFC-Brennstoffzellen liegt der Wirkungsgrad zwar zwischen 50% - 60%, die Betriebstemperaturen sind allerdings enorm hoch und liegen zwischen 650°C – 1000°C. Sie werden sich vor allem in Bereichen zunutze gemacht, in denen ein konstanter, stationärer Betrieb mit höheren Wirkungsgraden erforderlich ist (Zentrum Wasserstoff Bayern, 2024).

Für die Anwendung im Flugzeug ist die PEM-Brennstoffzelle die gefragteste Technologie. Brennstoffzellen sind nur wenige Millimeter dick und haben etwas die Größe eine Blattes Papier in DIN A5 Format. Um Leistung im Megawatt (MW) Bereich zu erreichen, die notwendig wäre, um ein Flugzeug anzutreiben, müssten sogenannte Stacks aus hunderten, übereinander gestapelten, in Reihe geschalteten Brennstoffzellen, verbaut werden. (Hochwarth, 2022).

Verbrennung

Statt in einer Brennstoffzelle mit Sauerstoff zu reagieren, kann Wasserstoff auch als Treibstoffersatz für Verbrennungsmotoren herhalten. Der Wasserstoff wird als Kerosinersatz direkt in der Turbine verbrannt, wodurch diese den Schub generieren kann. Da für die Speicherung von Wasserstoff eine kryogene Kühlung notwendig ist, könnte dadurch der Wirkungsgrad etwas gesteigert werden im Vergleich zu Kerosinbetriebenen Triebwerken. Die Verbrennung von Wasserstoff wäre auch in herkömmlichen Turbinen möglich. So hat Rolls Royce seine Trent-Engines schon erfolgreich auf den Einsatz von Wasserstoff getestet. (Sillers, 2020). Für den Einsatz von flüssigem Wasserstoff wäre dafür allerdings ein Wärmetauscher notwendig, der den flüssigen Wasserstoff vor seiner Einspritzung in die Brennkammer mit einer Temperatur, die höher ist als -253°C, wieder in gasförmigen Wasserstoff umwandelt. Außerdem ist zu beachten, dass 1 kg Wasserstoff zwar eine dreimal höhere Energiedichte als Kerosin hat, aber auch ein 5 mal höheres Volumen. Somit liegt es nahe, die Elemente des Antriebs neu zu modellieren und die neue Gasturbine als System vom Tank bis zum Auslass den neuen Gegebenheiten anzupassen (Sillers, 2020).

5.3 Herausforderungen beim Einsatz von Wasserstoff als Antriebsmittel

Speicherung/Tank

Im Vergleich zu Kerosin mit einer massebezogenen Energiedichte von 11,9 kWh/kg (oder 43 MJ/kg) (chemie.de, 2023) hat Wasserstoff eine dreimal höhere Energiedichte von 33,3kWh/kg (oder 120 MJ/kg) (Brockhorst, 2023). Trotz dessen erfordert das relativ große Volumen von Wasserstoff ein größeres Volumen, was größere Tanks an Bord des Flugzeugs und angepasste Flugzeugdesigns erfordert. Die Größe und das Gewicht von H_2-Tanks stellen große Einschränkungen für den hohen Energiebedarf auf Langstreckenflügen dar – was möglicherweise die Wirtschaftlichkeit von Langstreckenflugzeugen erheblich verringert.

Um das benötigte Volumen zur Speicherung von Wasserstoff zu reduzieren, müsste Wasserstoff statt in gasförmigem Zustand mit einer Energiedichte von 40kg/m^3 im flüssigen Zustand, mit einer dann höheren Energiedichte von 70kg/m^3 gespeichert werden (Universität Augsburg, "Kyrogene Speicherung/Flüssigspeicher - LH2", 2024). Der Wasserstoff müsste in den kyrogenen Bereich von -253°C gekühlt werden, um im flüssigen Zustand gespeichert

werden zu können. Diese Kälteverflüssigung kostet Energie. Dem gegenüber steht Kerosin, das eine deutlich höhere Dichte von 747 – 840 kg/m^3 aufweist (chemie.de, 2023).

Die Tanks für die Speicherung von Wasserstoff brauchen dementsprechend ein deutlich größeres Volumen als die Kerosintanks und müssen gut wärmeisoliert sein. Diese Bedingungen finden sich nicht in den Bereichen der Flügel wieder. Eine Unterbringung der Tanks im Rumpfbereich ist möglich, erfordert aber eine Vergrößerung des Rumpfes in Länge und Breite, was wiederum den Widerstand des Flugzeuges erhöht und in einem wiederum höheren Leistungs- und Energiebedarf resultiert.

Infrastruktur:

Ausgehend von der Studie von McKinsey & Company (MC Kinsey & Company, 2020), wird die Logistikkette, über die der Wasserstoff zu den Flughäfen gelangen kann, von den lokalen Gegebenheiten des jeweiligen Flughafens abhängen.

Generell gilt es, den Wasserstoff, nachdem er mittels Elektrolyseverfahren hergestellt wurde, an seinen Verbraucherstandort zu befördern. Über mittelfristige Sicht bis 2040 kann das überwiegend auf dem Transportweg über Schiff, Schiene oder Straße geschehen. Auf längere Sicht gesehen, laut der McKinsey & Company Studie etwa ab 2050, könnten aufgrund der dann höheren Nachfrage an H_2 auch Pipelines zur Beförderung von Wasserstoff zum Einsatz kommen.

Zur Erprobung einer ersten Infrastruktur können bestimmte Punkt-zu-Punkt-Flüge als Testrouten oder ein dichtes regionales Netzwerk kleinerer Flughäfen aufgebaut werden. Flughäfen mit wettbewerbsfähigem Zugang auf die kostengünstige erneuerbare Energie, die zur Herstellung von grünem Wasserstoff benötigt wird, profitieren dann besonders – zum Beispiel ein Flughafen einer Inselgruppe, die durch den Zugang zu Wasserkraft die Produktion des flüssigen H_2 kurze Transportwege für diesen hätte oder auch Flughäfen entlang der Nordseeküste mit Zugang auf Windenergie sowie Flughäfen in Südeuropa mit Zugang zu Solar- und Windenergie.

Beim Flughafen Frankfurt beispielsweise kann Flüssigwasserstoff mit dem Binnenschiff zum nächstliegenden Main-Hafen transportiert und in der Anfangsphase bis 2050 von dort aus per Lastwagen zum Flughafen gefahren werden.

Kleinere Flughäfen sind auch gut geeignet als erste Infrastruktur-Ausgangspunkte, da sie in der Regel nur eine geringe Anzahl anderer Flughäfen anfliegen und weniger Überlastungsprobleme und räumliche Einschränkungen haben. Platz für Verflüssigungsanlagen und die Lagerung von flüssigem H_2 ist an diesen Standorten leichter

zu generieren als an verkehrsreicheren Flughäfen. Eine schrittweise Einführung und Erprobung einer neuen H_2 Infrastruktur kann mit vergleichsweise wenigen Komplikationen stattfinden.

Die größte Herausforderung im Thema Infrastruktur in Verbindung mit grünem Wasserstoff ist der hohe Aufwand, der betrieben werden muss, um den flüssigen und somit kyrogen gekühlten Wasserstoff von seinem Produktionsstandort hin zum Verbraucherstandort zu befördern. Die Kühlung und die vergleichbar geringe Dichte des flüssigen H_2 (*siehe 5.3 Herausforderungen beim Einsatz von Wasserstoff als Antriebsmittel, Abs.: Speicherung/Tank),* bedürfen besonderer Ausstattung, bzw. durch das größere Volumen mehr Transportwege als das Kerosin. Pipelines müssten zum großen Teil neu gelegt werden oder bestehende Erdgaspipelines für die Kühlung nachgerüstet werden, was einen hohen Aufwand darstellt.

Gefahren in der Handhabung:

In seiner Reinform ist Wasserstoff nicht explosiv. Tiefkalt verflüssigter Wasserstoff ist allerdings bei einer Vermischung mit Sauerstoff in dem Bereich von 4%-78% hochentzündlich und explosiv. Wasserstoff durchmischt sich sehr schnell und intensiv mit der Luft und seine Flamme ist bis zu 2000°C heiß. Abhängig vom Ausströmungsdruck kann die Flamme Längen von bis zu 30m erreichen. Die Flamme ist unsichtbar und gibt nur geringe Wärmestrahlung ab (Johannes Feyrer, 2008).

Wasser als Abgas:

Bei Wasserstoffbetriebenen Flugzeugen entsteht H_2O in Form von Wasserdampf als Abfallprodukt der Verbrennung. Es bedarf noch weiterer, tiefergehender Forschung, um zu untersuchen, ob der dadurch substanziell ansteigende Wassergehalt in den jeweils geflogenen Höhen zum einen zur vermehrten Bildung von Kondensstreifen gegenüber kerosinbetriebenen Flugzeugen bewirkt und zum anderen den Ozonhaushalt der Luftschicht ändert und inwiefern dies negative Auswirkungen auf die Umwelt haben kann.

5.4 Aktuelle Projekte

Wasserstoff gilt als eine der zielführenden Technologien auf dem Weg zum nachhaltigen und CO_2-freien Fliegen. Der Einsatz in der Luftfahrt als Energiequelle wird derzeit in verschiedenen Konzepten tiefgreifend erforscht und auf verschiedene Lösungsansätze intensiv untersucht. Es gibt bereits viele Gründe dafür, dass der Wasserstoff als Energiequelle in der Luftfahrt eingesetzt werden soll. Einerseits ist Wasserstoff als Brennstoff sehr effizient und hat eine dreimal höhere Energiedichte pro Masseeinheit als Kerosin und ist im Vergleich zu anderen Flugkraftstoffen sehr viel leichter *(siehe: 5.3 Herausforderungen beim Einsatz von Wasserstoff als Antriebsmittel, Speicherung/Tank).* Anderseits ist Wasserstoff ein reichlich vorhandener und sauberer Energieträger, da bei der Verbrennung von reinem Wasserstoff in den konventionellen Triebwerken, kein klimaschädliches CO_2 und auch keine Nebenprodukte wie Schwefeloxide (SO_x), Stickoxide (NO_x) oder Methan (CH_4) entstehen, sondern lediglich Wasserdampf. Außerdem kann Wasserstoff auch in Brennstoffzellen zur Erzeugung von Strom durch die Kombination von Wasserstoff und Sauerstoff verwendet werden, der anschließend Elektromotoren zur Erzeugung des Vortriebs speist. Dabei weist die Umwandlung der chemischen Energie des Wasserstoffs in Vortrieb einen wesentlich besseren und eindrucksvolleren Wirkungsgrad auf als bei kerosinbetriebenen Turbinen. Dieser elektrische Antriebsstrang stellt viele neue Möglichkeiten zur Wahl, den Antrieb in die Flugzeugkonfiguration zu integrieren (Nagel, 2020). Darüber hinaus kann durch den Einsatz von Wasserstoff in den Brennstoffzellen die Lärmemissionen im Vergleich zu herkömmlichen Flugzeugtriebwerken reduziert werden (TWI Deutschland). Des Weiteren besteht durch den Einsatz von Wasserstoff in der Luftfahrt lediglich geringe Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen, da Wasserstoff aus erneuerbaren Energiequellen wie Sonnen- oder Windenergie erzeugt werden kann *(siehe: 5.1 Herstellung).* Allerdings ist die Technologie noch nicht auf wettbewerbsfähigem Niveau ausgereift und es gibt noch einige technische Herausforderungen, die intensiv erforscht und bewältigt werden müssen, bevor Wasserstoff als Standardantrieb in der Luftfahrtindustrie eingesetzt werden kann. Die kontinuierliche Forschung und Entwicklung von Wasserstofffflugzeugen ist somit ein vielversprechender Schritt im Bereich des umweltschonenden und nachhaltigen Fliegens. Zurzeit gibt es verschiedene Ansätze für Wasserstofffflugzeuge, wie das Wasserstoffhybridflugzeug, ein Wasserstoffbrennstoffzellen-Flugzeug sowie Wasserstoff-elektrische Flugzeuge, die unterschiedliche und erfolgreiche Lösungen anbieten. Diese Ansätze befinden sich in der Forschung- und Entwicklungsphase und zeigen durch erfolgreich abgeschlossene Tests bereits jetzt ein enormes Potenzial, die Luftfahrt in der Zukunft Klimafreundlich zu gestalten. In diesem Abschnitt werden drei der marktführenden und zukunftsorientierten

Wasserstoffflugzeuge eingehend analysiert und anschließend mit den kerosinbetriebenen Vergleichsmodellen aus dem Kapitel *4.3 Vergleichsmodelle* hinsichtlich des CO_2-Ausstoßes verglichen. Diese Flugzeuge haben das Potenzial, die Zukunft der Luftfahrt nachhaltiger und emissionsfrei zu gestalten sowie die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu reduzieren

5.4.1 HY4 – H2Fly

Die HY4 ist ein innovatives, wasserstoffbetriebenes Passagierflugzeug, das von H2Fly entwickelt wurde. H2Fly ist ein deutsch-österreichisches Unternehmen, das sich auf die Entwicklung und Kommerzialisierung von wasserstoffbetriebenen Flugzeugantrieben spezialisiert hat. Für die Herstellung des Flugzeuges HY4 hat die H2Fly GmbH mit Partnern wie dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), dem slowenischen Flugzeughersteller Pipistrel Vertical Solutions und Air Liquide zusammengearbeitet. (DLR (B), 2023)

Der Erstflug der HY4 fand am 29. September 2016 auf dem Flughafen in Stuttgart statt.

Abbildung 20: HY4 - H2Fly Wasserstofffflugzeug (Universität Ulm, 2020)

Die HY4 ist ein viersitziges, doppelrumpfiges Flugzeug mit einem zentralen Flügel, der die beiden Rümpfe miteinander verbindet. Der Motor und die Brennstoffzelle sind zentral im Flügel

montiert. Das Design mit zwei Rümpfen bietet Platz für den Wasserstoffspeicher und die Passagierkabine und sorgt gleichzeitig für eine ausgewogene Gewichtsverteilung. Durch den Einsatz von Wasserstoff als Energieträger emittiert die HY4 während des Betriebs lediglich Wasserdampf, wodurch das Flugzeug deutlich umweltfreundlicher ist als herkömmliche Flugzeuge.

Die technischen Daten werden in der untenstehenden Tabelle aufgeführt und geben unter anderem Einblick in die Größe, das Gewicht und die Reichweite des Flugzeuges. Anhand dieser Daten kann im späteren Verlauf des Kapitels ein Vergleich zu der Cessna 172 gezogen werden.

Technische Daten HY4	
Spannweite	21,36 m
Länge	7,4 m
Leergewicht (exkl. Brennstoffzelle und Batterie	630 kg
Maximalgewicht	1500 kg
Gewicht Powermodul mit Reibstoffspeicher	400 kg
Motorleistung	80 kW
Dauerleistung Brennstoffzellen/Batterie	45 kW / 45 kW (90 kW insgesamt)
Batteriekapazität	Ca. 21 kWh @ 1C
Höchstgeschwindigkeit	200 km/h
Reisegeschwindigkeit	145 km/h
Antriebsleistung im Reiseflug	26 kW
Reichweite	750 – 1500 km

Tabelle 7: Technische Daten der HY4 (DLR (C) Institut für Technische Thermodynamik)

Die HY4 wird mit einem Elektromotor angetrieben, der durch eine Wasserstoff-Brennstoffzelle mit Energie versorgt wird. Die Brennstoffzelle wandelt Wasserstoff in elektrische Energie um, die dann den Elektromotor antreibt. Die Leistung des Motors liegt bei etwa 80 kW. Der Elektromotor nutzt die elektrische Energie, die von der Brennstoffzelle erzeugt wird, um den Propeller anzutreiben. Die Wasserstoff-Brennstoffzellen haben eine Nennleistung von je 45 kW. Die Brennstoffzelle verwendet komprimierten Wasserstoff, der mit Sauerstoff aus der Luft kombiniert wird. Dadurch wird elektrische Energie mit dem Wasser als Nebenprodukt erzeugt (Schulte, 2021).

Um den Treibstoffverbrauch der HY4 zu ermitteln, kann mit aus Strecke und Geschwindigkeit eine Flugzeit berechnet werden und im Anschluss die für den Flug benötigte Energie mit Leistung und Flugzeit bestimmen. Um ein realistischeres Ergebnis zu erhalten, müsste in

dieser Berechnung auch der Propellerwirkungsgrad mit einfließen, der durch einen Wert mit < 1 die tatsächlich zu erbringende Leistung noch erhöht. Da weder zu dem Wirkungsgrad selbst, noch zu Details über den Aufbau des eingesetzten Propeller Angaben öffentlich einsehbar sind, wird der Wirkungsgrad [η_P] mit einem großzügigen Wert von 0,8 angenommen und in die Berechnung mit aufgenommen.

Die Reisegeschwindigkeit wird in *Tabelle 7: Technische Daten der HY4* (DLR (C) Institut für Technische Thermodynamik) mit 145 km/h angegeben. Um den HY4 mit der Cessna 172 in Vergleich zu setzen, wird dieselbe Strecke wie in *Kap.:4.4.1 Treibstoff Cessna 172 angenommen*, mit der Distanz von Hamburg nach München mit 612 km.

Mit Gleichung (18) wird die Flugzeit berechnet:

$$\frac{612\ km}{145\ km/h} = 4{,}2\ h \tag{18}$$

Die Flugzeit entspricht nach Gleichung (18) 4,2 Stunden. Die Antriebsleistung im Reiseflug, die laut *Tabelle 7: Technische Daten der HY4* (DLR (C) Institut für Technische Thermodynamik) 26 kWh entspricht, auf die Flugzeit bezogen und pro Antriebsleistung mit einem Wirkungsgrad von 0,8 ergibt dann die Energie, die für den Flug benötigt wird und wird mit Gleichung (19) beschrieben.

$$\frac{26kW\ \times 4{,}2\ h}{0{,}8} = 136{,}5\ kWh \tag{19}$$

Die Leistung von 1kWh lässt sich auch in 3,6 MJ ausdrücken. Die Gesamtleistung für den Flug von 136,5 kWh entspricht also einer Energiedichte von 491,4 MJ. Wasserstoff hat eine Energiedichte von 120 MJ/kg *(siehe Kap.: 5.3 Herausforderungen beim Einsatz von Wasserstoff als Antriebsmittel)*. Somit ergibt sich ein Wasserstoffverbrauch aus Gleichung (20) für den definierten Flug.

$$\frac{491{,}4\ MJ}{120\ MJ/kg} = 4{,}1\ kg \tag{20}$$

Der Wasserstoffverbrauch der HY4 für den Flug von Hamburg nach München mit einer kontinuierlichen Reisegeschwindigkeit von 145 km/h und einer Antriebsleistung von 26kW und einem angenommenen Propellerwirkungsgrad von 0,8 beträgt 4,1 kg. Je nach Wirkungsgrad kann der Verbrauch um mehrere Kilogramm abweichen.

5.4.2 Airbus ZEROe Turboprop

Das Airbus ZEROe Turboprop-Konzept ist eines der drei Konzepte, die Airbus im Rahmen ihres Projektes zur Entwicklung emissionsfreier Verkehrsflugzeuge bis 2035 vorgestellt hat. Vorgestellt wurde das Konzept erstmals im September 2020. Es handelt sich um klassisches Turboprop-Design, optimiert für Wasserstoffantrieb.

Abbildung 21: Airbus ZEROe Turboprop (Airbus (A))

Zu den genaueren technischen Daten ist bis zum jetzigen Zeitpunkt lediglich veröffentlicht, dass das Flugzeug bis zu 100 Passagiere über eine max. Reichweite von 1850 km transportieren kann. Der Antrieb läuft über zwei wasserstoffbetriebene Turboprop Triebwerke, die über Brennstoffzellen mit elektrischer Energie durch Wasserstoff angetrieben werden. Der flüssige Wasserstoff soll in speziellen kyrogenen Tanks bei einer Temperatur von -253°C gespeichert werden, um die Energiedichte zu maximieren (Airbus (B), 2020).

Um den Airbus ZEROe Turboprop in Bezug auf Treibstoffverbrauch mit kerosinbetriebenen Turboprop-Antrieben vergleichen zu können, müssen aufgrund der geringen Datenlage zu der Maschine realistische Annahmen getroffen werden. So eine Annahme hängt von mehreren Faktoren ab, einschließlich der Effizienz der Triebwerke, der spezifischen Energie des Treibstoffs und den Designparametern des Flugzeugs.

Der Energiegehalt von Wasserstoff ist mit 33,3 kWh/kg oder 120 MJ/kg knapp dreimal so hoch wie der des Kerosins, mit 11,3 kWh/kg oder 43 MJ/kg (*siehe Kap.: 5.3 Herausforderungen beim Einsatz von Wasserstoff als Antriebsmittel – Speicherung/Tank).*

Turbopropriebwerke haben durchschnittlich betrachtet einen Wirkungsgrad von etwa 0,22 (Mahfouz, 2023). Bei einem Wasserstoffbertriebenen Flugzeug könnte dieser Wirkungsgrad aufgrund der unterschiedlichen Verbrennungseigenschaften abweichen, für diese Arbeit wird aber angenommen, dass die Effizienz vergleichbar bleibt.

Ein typisches modernes Turboprop-Flugzeug, wie die ATR42-600 verbraucht etwa 620 kg Kersosin pro Flugstunde (*siehe Kap.: 4.3.2 ATR 42-600*). Bei 43 MJ/kg Energiegehalt von Kerosin entspricht eine Flugstunde des ATR 42-600 somit 26660 MJ pro Flugstunde.

Wasserstoff liefert einen Energiegehalt von 120 MJ/kg. Somit wird nach Gleichung (21)

(21) $$\frac{26660}{120}\ \frac{MJ/h}{MJ/kg} = 222{,}2\frac{kg}{h}$$

222,2 kg Wasserstoff pro Flugstunde für einen vergleichbaren Turboprop-Antrieb mit Wasserstoff benötigt.

Um einen Treibstoffverbrauchfür die ZEROe - Turboprop ermitteln zu können, werden die Daten des etwas größeren Schwesterflugzeuges ATR 72-600 herangezogen, das Platz für 78 Passagiere bietet und Triebwerke der gleichen Baureihe PW127XT-M mit der Leistung von 2750 shp verbaut hat. Der durchschnittliche Kerosinverbrauch liegt bei einer maximalen Reisegeschwindigkeit Vmax = 500km/h, bei diesem Flugzeug bei 650 kg/h (ATR (C)). Unter Heranziehung der Daten der ATR 72-600 und dem Vergleich zu dem kleineren ATR 42-600 können mittels Extrapolation und Umrechnung, Werte für das größere ZEROe Turbopropflugzeug bestimmt werden.

Im Folgenden wird das Mehrgewicht des ZEROe Turboprop Flugzeugs annähernd berechnet, um im weiteren Verlauf einen theoretischen Kerosinverbrauch anhand der Relation von Gewicht zu Treibstoffverbrauch bei gleich bleibender Motorisierung zu berechnen.

Im darauf folgenden Schritt wird der Kerosinverbrauch in Energiegehalt des Kerosins pro Stunde umgerechnet, der danach dann mit Hilfe des Energiegehalts von Wasserstoff, in den Wasserstoffverbrauch pro kg/h umgerechnet werden kann.

Um das zusätzliche Gewicht eines Flugzeuges für 100 Passagiere im Vergleich zu einem Flugzeug für 78 Passagiere zu bestimmen, müssen mehrere Faktoren berücksichtigt werden. Die Struktur des Flugzeuges, die Anzahl der Sitze, die Nutzlast und das zusätzliche Treibstoffgewicht, das im Fall von Wasserstoff jedoch nur ein Drittel von dem Gewicht annehmen wird, was für den selben Fall an Kerosin benötigt werden würde (siehe Gleichung (21) Energiegehalt Wasserstoff vs. Energiegehalt Kerosin).

1. Gewicht zusätzlicher 22 Passagiere: Pro Passagier + Gepäck können durchschnittlich 100 kg angenommen werden (ICAO (D)). Somit entstehen zusätzliche 2200 kg für Passagiere.
2. Struktur und Ausstattung: Die ATR 42-600 ist ein Passagierflugzeug für 50 Passagiere und hat ein Leergewicht von 11750 kg (*siehe Kap.: 4.3.2 ATR 42-600*). Im Gegenzug dazu hat die ATR 72-600 eine Passagierkapzität von 78 Passagieren und ein Leergewicht von 13600 kg. (ATR (C))**.** Die Daten werden entsprechend auf ein

Flugzeug mit Kapazität für 100 Passagiere extrapoliert. Der prozentuale Anstieg des Leergewichts von einem Flugzeug mit 50 Sitzen zu einem Flugzeug mit 78 Sitzen liegt nach Gleichung (22) bei 15,74%.

$$\frac{13600\ kg - 11750\ kg}{11750\ kg} \times 100 = 15{,}74\% \tag{22}$$

Das sind 15,74 % mehr Gewicht für 28 zusätzliche Sitze. Pro Sitz ergibt das nach Gleichung (23) dann

$$15{,}74\ \% \div 28\ Sitze = 0{,}56\%/Sitz \tag{23}$$

0,56% Gewichtszunahme pro Sitz.

Für 22 weitere Sitze kann somit laut Gleichung (24) angenommen werden,

$$0{,}56\% \times 22\ Sitze = 12{,}32\% \tag{24}$$

dass sich das Leergewicht um 12,32% erhöht. Nach Gleichung (25) wiegt das gesamte Leergewicht somit 15232 kg.

$$13600\ kg \times 1{,}12 = 15232\ kg \tag{25}$$

Zusammen ergibt das dann:

$$2200\ kg\ (Pax) + 15232\ kg\ (Leergewicht) = 17432\ kg \tag{26}$$

Das Flugzeug würde nach diesen Berechnungen und Gleichung (26) 17432 kg wiegen.

Angenommen das ZEROe Turboprop Flugzeug ist mit dem baugleichen Triebwerk ausgestattet wie die ATR 72-600, dem PW127XT-M, das eine Leistung von 2750 shp aufbringen kann und dabei einen Kerosinverbrauch von 650 kg/h hat (ATR (C))**.** Die Extrapolation der Werte der ATR 72-600 auf die Maße des ZEROe Turboprop Flugzeuges würde somit den Kerosinverbrauch ergeben, der aus Gleichung (27) hervorgeht.

$$650\ \frac{kg}{h} \times \frac{17432\ kg}{13600\ kg} = 833{,}15\ kg/h \tag{27}$$

Der Treibstoffverbrauch bei einem Flugzeug mit gleicher Motorisierung, wie der ATR 72-600, aber einem Gewicht von 17432 kg würde 833,15 kg/h in Kerosin betragen.

Mit einem Energiegehalt des Kerosins von 43 MJ/kg würde der Treibstoffverbrauch somit einem Energiegehalt von 36770,6 MJ/h entsprechen.

Für Wasserstoff als Treibstoff, mit 120 MJ/kg Energiegehalt, würde das bedeuten, dass das Flugzeug entsprechend Gleichung (28) einen Treibstoffverbrauch von 306,42 kg/h aufweist.

(28) $$\frac{36770{,}6\ MJ/h}{120\ MJ/kg} = 306{,}42\ kg/h$$

Bei einer angenommenen Reisegeschwindigkeit von Vmax x 0,9 ergibt sich, bei einer Strecke von London nach Berlin mit 931,85 km, somit folgende Flugzeit:

(29) $$\frac{931{,}85\ km}{500\frac{km}{h} \times 0{,}9} = 2{,}07\ h$$

Aus der Flugzeit von 2,07 Stunden und einem Wasserstoffverbrauch von 306,42kg/h lässt sich dann ein Gesamtverbrauch ermitteln, der aus Gleichung (30) hervorgeht.

(30) $$2{,}07\ h\ \times 306{,}42\frac{kg}{h} = 634{,}52\ kg$$

Für das ZEROe Turboprop Flugzeug mit einer Motorisierung der ATR72-600, einem erhöhten Gewicht von 17432 kg, das die Strecke Berlin-London von 913,85 km mit einer durchschnittlichen Reisegeschwindigkeit von 500km/h x 0,9 fliegt, kann festgehalten werden, dass es dafür annähernd 634,52 kg Wasserstoff benötigen würde.

5.4.3 ZEROe Turbofan

Auch bei dem ZEROe Turbofan Flugzeug handelt es sich um ein Konzeptflugzeug, das mit Wasserstoff als Haupttreibstoff betrieben wird. Der ZEROe Turbofan soll über eine Reichweite von bis zu 2000 nautischen Meilen (ca. 3700 km) verfügen und Platz für etwa 120-200 Passagiere bieten (Airbus (B), 2020).

Abbildung 22: Airbus ZEROe Turbofan (Airbus (A))

Airbus hat den ZEROe Turbofan als Teil seiner langfristigen Vision für nachhaltigen Luftverkehr vorgestellt. Derzeit handelt es sich jedoch, wie auch der Turbofan, um ein reines Konzeptmodell, das sich noch in der Entwicklungsphase befindet. Weitere technologische Tests und Fortschritte sind notwendig, um das Flugzeug in den kommerziellen Betrieb einlaufen zu lassen. Wichtig zu erwähnen ist, dass die Informationen zu diesem Projekt nicht reichhaltig veröffentlicht sind und sie sich im Laufe der Entwicklung verändern können. In diesem Abschnitt der Arbeit sollen mögliche Treibstoffverbräuche ermittelt werden, um den für die Herstellung von der benötigten Wasserstoffmenge entstandene CO_2-Emissionen mit den CO_2-Emissionen von kerosinbetriebenen Flugzeugen zu vergleichen.

Die Berechnungen beruhen auf Annahmen mit Daten, die über vergleichbare Flugzeugmodelle vorhanden sind und werden auf die Gegebenheiten des behandelten Flugzeuges aufgerechnet.

Um für dieses Flugzeug einen sich möglichst der Realität annähernden Schätzwert zum Treibstoffverbrauch von Wasserstoff zu bestimmen, wird dieses Flugzeug mit der in Größe und Reichweite vergleichbaren Embraer E175 verglichen. Es wird angenommen, dass der Turbofan mit den gleichen Triebwerken der Sorte GE CF34-8E ausgestattet ist (siehe *Tabelle 4: Embraer E175 Spezifikation (Embraer; A, 2024)*(Embraer; A, 2024) *(Palt, 2019)* (Palt, 2019)*)*

und den selben Treibstoffverbrauch in Kerosin pro Sitz von (A) 0,04097 kg/km/seat oder (B) 0,03166 kg/mk/seat aufweist, der je nach Quelle variiert *(siehe Tabelle 4: Embraer E175 Spezifikation* (Embraer; A, 2024) (Palt, 2019)*).* Auch für dieses Flugzeug wird, wie schon zuvor bei der Embraer im *Kap.: 4.4.3 Treibstoffverbrauch Embraer E175,* der Mittelwert der zwei Unterschiedlichen Ergebnisse für den Treibstoffverbrauch auf der Strecke von Hamburg nach Kairo bestimmt. Im Anschluss wird anhand der Bestimmung des Energiegehalts des benötigten Treibstoffs für die definierte Strecke von Hamburg nach Kairo der Wasserstoffverbrauch für das ZEROe Turbofan Flugzeug definiert.

Die Strecke von Hamburg nach Kairo wird, wie für die Treibstoffermittlung der Embraer E175, mit einer Distanz von 3124 km definiert. Das Turbofan Flugzeug der ZEROe Linie von Airbus soll zwichen 150-200 Passagiere befördern können. Für dieses Beispiel wird ein Mittelwert von einer Kapazität für 175 Passagiere angenommen.

Der Mittelwert des Treibstoffverbrauchs für Kerosin auf der Strecke von Hamburg nach Kairo setzt sich demnach in Gleichung (31) zusammen:

$$\frac{\left(\frac{0{,}04097\,\frac{kg}{km}}{seat} + 0{,}03166\,\frac{kg}{km}/seat\right) \times 3124\,km\ \times 175\,seats}{2} = 19853{,}41\,kg \tag{31}$$

Entsprechend Gleichung (31) würde das ZEROe Turbofanflugzeug 19853,41 kg an Kerosin verbrauchen, wenn es eine Strecke von 3124 km mit 175 Passagieren zurücklegen würde.

In Gleichung (32) wird der Energiegehalt für den gesamten Flug unter Einsatz von Kerosin, mit Energiegehalt von 43,1 MJ/kg (chemie.de, 2023) bestimmt:

$$19853{,}41\,kg\ \times 43{,}1\,\frac{MJ}{kg} =\ 855681{,}97\,MJ \tag{32}$$

Für den gesamten Flug wird demnach ein Energiegehalt von 855681,97 MJ gebraucht. In Gleichung (33) wird der Energiegehalt auf die Masse des dafür benötigten Wasserstoffs umgerechnet, der einen Energiegehalt von 120 MJ/kg *(siehe Kap.: 5.3 Herausforderungen beim Einsatz von Wasserstoff als Antriebsmittel)* hat.

$$\frac{855681{,}97\,MJ}{120\,MJ/kg} = 7130{,}7\,kg \tag{33}$$

Nach Gleichung (33) verbraucht der ZEROe Turbufan auf einer Strecke von 3124km und mit einer Bestuhlung von 175 Pax rund 7130,7 kg Wasserstoff.

Die Ergebnisse zu den Wasserstoffverbräuchen der untersuchten Flugzeuge werden in der *Tabelle 8: Wasserstoffverbäuche* zusammengefasst dargestellt:

HY4	ZEROe Turboprop	ZEROe Turbofan
4,1 kg	634,52 kg	7130,7 kg

Tabelle 8: Wasserstoffverbäuche

5.5 Vergleich Wasserstoff - Kerosin

In diesem Abschnitt des 5. Kapitels wird ein Vergleich zwischen dem CO_2-Ausstoß durch die kerosinbetriebenen Flugzeuge und den wasserstoffbetriebenen Flugzeugen ermittelt. An erster Stelle zu erwähnen gilt, dass durch den Flug der wasserstoffbetriebenen Flugzeuge selbst zwar kein CO_2 freigesetzt wird, durch die Herstellung der dafür benötigten Wasserstoffmenge je nach Herstellungsart jedoch kann ein erheblicher Anteil an CO_2 freigesetzt werden.

Hier werden die CO_2-Emissionen der Flüge, die mit Kerosin im Antrieb geflogen werden, den CO_2-Emissionen der verschiedenen Herstellungsverfahren für die Wasserstoffmengen der vergleichbaren Flüge mit Wasserstoff im Antrieb gegenübergestellt. Die Daten werden aus den Kapiteln *4.5.1 CO_2-Ausstoß pro Flug, 4.5.2 „Well-To-Tank" Faktor Kerosin, 5.1.4 Aktuelle Projekte* entnommen.

	Kerosin-Flüge	H1	H2	H3	H4	H5
HAM - MUC	266,95 kg	53,3 kg	25,42 kg	6,15 kg	98,4 kg	2,05 kg
BER - LHR	5960,22 kg	8248,76 kg	3934,03 kg	951,78 kg	15228,48 kg	317,26 kg
HAM - CCE	38133,55	92699,1 kg	44210,34 kg	10696,05 kg	171136,8 kg	3565,35 kg

Tabelle 9: Vergleich CO_2-Emissionen Kerosin - Wasserstoff

HAM-MUC: Strecke von Hamburg nach München (612 km)
BER – LHR: Strecke von Berlin nach London (931,85 km)
HAM – CCE: Strecke von Hamburg nach Cairo (3124 km)
H1: Herstellungsart 1; Dampfreformierung ohne CCS (13 kg CO_2eq/H_2)
H2: Herstellungsart 2; Dampfreformierung mit CCS 60% Speicherung (6,2 kg CO_2eq/H_2)
H3: Herstellungsart 3; Dampfreformierung mit CCS 93% Speicherung (1,5 kg CO_2eq/H_2)
H4: Herstellungsart 4; Elektrolyse mit herkömmlichem Strom (24 kg CO_2eq/H_2)
H5: Herstellungsart 5; Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Energien (0,5 kg CO_2eq/H_2)

Die farblich hinterlegten Felder der *Tabelle 9: Vergleich CO_2-Emissionen Kerosin - Wasserstoff* bilden die CO_2-Emissionen, die aus den verschiedenen Herstellungsverfahren für Wasserstoff

entstehen, ab. Die rot hinterlegten Felder weisen demnach einen deutlich höheren CO_2-Ausstoß auf, als für den gleichen Flug mit einem kerosinbetriebenen Flugzeug freigesetzt werden würde und sind demnach nicht umwelt- oder klimafreundlicher. Die grün hinterlegten Felder bilden eine deutliche Reduktion an CO_2-Emissionen ab im Gegensatz zu den gleichen Flügen mit kerosinbetriebenen Flugzeugen.

Im folgenden *Diagramm 4: CO_2-Ausstoß Kerosin - Wasserstoff Vergleich* sind die Ergebnisse nochmals in Diagrammform dargestellt.

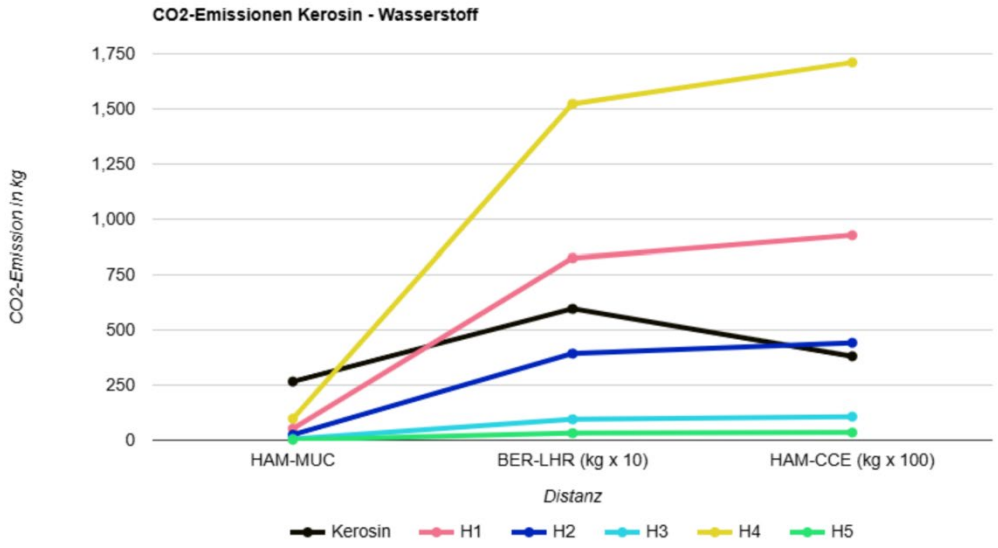

Diagramm 4: CO_2-Ausstoß Kerosin - Wasserstoff Vergleich

Auf der X-Achse des Diagramms sind die 3 Strecken abgebildet, die für den Vergleich herangezogen wurden. Auf der Y-Achse sind die CO_2-Emissionen in Kilogramm aufgeführt. Um die Skalierung der stark voneinander abweichenden Werte der Y-Achse nicht zu sehr auseinander zu ziehen und das Diagramm übersichtlich zu gestalten, sind die CO_2-Ausstöße der Strecke BER-LHR mit dem Quotienten von 10 dividiert und die CO_2-Ausstöße der Strecke HAM-CCE mit dem Quotienten von 100 dividiert dargestellt.

Die schwarze Linie stellt die CO_2-Ausstöße der kerosinbetriebenen Flugzeuge dar. Es ist deutlich zu erkennen, dass alle Herstellungsmethoden für den Bedarf des kleinen 2-4 Personen Flugzeug HY4, auf der kurzen Strecke von Hamburg nach München, immer noch deutlich weniger CO_2 ausstoßen, als es die Cessna 172 auf einem Flug derselben Strecke tut. Für den Bedarf an Wasserstoff, der für die Strecke von Berlin nach London benötigt würde, schneiden die Dampfreformierung mit CCS von 60% sowie von 93% und das Elektrolyseverfahren mit erneuerbaren Energien besser ab und stoßen damit weniger CO_2

aus, als die ATR 42-600 mit einem Flug derselben Strecke. Gut zu erkennen ist hierbei auch, dass die Dampfreformierung ohne CO_2-Speicherung und das Elektrolyseverfahren mit Strom aus herkömmlichen Stromquellen deutlich schlechtere CO_2-Werte aufweisen, als es der Flug mit Kerosin tut.

Auf einer Strecke von Hamburg nach Kairo bleiben lediglich noch zwei Herstellungsverfahren für Wasserstoff mit einem niedrigeren CO_2-Ausstoß als der Flug mit einem kerosinbetriebenen Flugzeug emittieren würde. Die Dampfreformierung mit CO_2-Speicherung von 93% und die Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Energien liegen für die benötigte Menge Wasserstoff noch unter dem CO_2 -Ausstoß für den Flug, der mit Kerosin betrieben würde. Die Herstellungsverfahren der Dampfreformierung, sowie der Dampfreformierung mit Speicherung von 60% und der Elektrolyse mit Strom aus herkömmlichen Quellen, würden sich für diese Menge an benötigtem Wasserstoff im Hinblick auf den CO_2-Ausstoß nicht lohnen.

Aus dem *Diagramm 4: CO_2-Ausstoß Kerosin - Wasserstoff Vergleich* wird sehr deutlich, dass das Herstellungsverfahren der Elektrolyse mit Strom aus herkömmlichen Stromquellen (gelbe Linie) schon bei sehr geringen Mengen an Wasserstoff einen höheren CO_2-Ausstoß mit sich bringt als ein Flug, der eine vergleichbare Strecke mit Kerosin fliegen würde. Wasserstoff, der mit dieser Methode hergestellt wurde, ist demnach ein deutlich umweltschädlicheres Antriebsmittel als das Kerosin. Ähnliches gilt für Wasserstoff, der mittels Dampfreformierung hergestellt wurde (rote Linie). Zwar ist der CO_2-Ausstoß bei diesem Verfahren nicht so hoch, wie bei der Elektrolyse mit herkömmlichem Strom, aber der Wasserstoff ist auch bei dieser Herstellungsmethode nicht für Flüge als umweltfreundlichere Alternative geeignet, die ca. 600 km oder mehr zurücklegen und ungefähr den Dimensionierungen entsprechen, die für diesen Flug in dieser Arbeit angenommen wurden.

Die Dampfreformierung mit Speicherung von 60% des ausgestoßenen CO_2, kann im Fall von Inlandflügen oder Kurzstrecken noch CO_2 einsparen, wenn mit diesem Verfahren Wasserstoff hergestellt wird, der für den Flug dieser Strecken als Antrieb genutzt wird. Ab größeren Strecken lohnt sich diese Herstellungsmethode allerdings nicht mehr, um weniger CO_2 zu emittieren, als das bei einem Flug mit Kerosin geschehen würde.

In jedem Fall umweltfreundlicher und CO_2 sparend sind die Herstellungsmethoden der Dampfreformierung mit Speicherung von 93% CO_2 und die Elektrolyse mit erneuerbaren Energien. Beide Verfahren können den Bedarf an Wasserstoff liefern, der benötigt wird, um die definierten Strecken mit Wasserstoff zu fliegen und bleiben noch in der Produktion des

Wasserstoffs unterhalb des CO_2-Ausstoßes, den Kerosin bei denselben definierten Flügen abgeben würde.

In Tabelle 10: CO_2-Emission in Prozent werden die CO_2-Emissionen in Prozent abgebildet, ausgehend davon, dass die kerosinbetriebenen Flüge 100% der ausgestoßenen CO_2-Menge darstellen. Die daraus resultierende *Tabelle 11: CO_2-Einsparungen in Prozent* verdeutlicht die Einsparungen an CO_2-Emissionen in Prozent je Flugstrecke und Herstellungsverfahren des verwendeten Wasserstoffs.

	Kerosin	**H1**	**H2**	**H3**	**H4**	**H5**
HAM-MUC	100%	19,92%	9,4 %	2,25%	36,84%	0,75%
BER-LHR	100%	138,39%	66,01%	15,96%	255,5%	5,31%
HAM-CCE	100%	243,27%	116,02%	28,07%	449,1 %	9,35%

Tabelle 10: CO_2-Emission in Prozent

	H1	H2	H3	H4	H5	⌀
HAM-MUC	80,1 %	90,6 %	97,75%	63,16%	99,25%	86,17 %
BER-LHR	-38,39 %	33,99%	84,04%	-155,5%	94,69%	65,77%
HAM-CCE	-143,27%	-16,02%	71,93%	-349,1%	90,65%	-69,162
⌀	-34,186 %	36,19%	84,57%	-147,146%	94,86%	

Tabelle 11: CO_2-Einsparungen in Prozent

Die grün markierten Felder der Tabelle stehen für enorme CO_2-Einsparungen von über 70% gegenüber einem Flug mit Kerosin im Antrieb. Gelb gefärbte Felder der Tabelle bilden Einsparungen von CO_2 im Bereich von 0-70% ab. Rot hinterlegte Felder der Tabelle verdeutlichen, dass in diesen Fällen, die Herstellung des benötigten Wasserstoffs für die definierte Strecke den CO_2-Ausstoß, den ein Flug mit einem kerosinbetriebenen Flugzeug für die Strecke verursachen würden, in jedem Fall und teilweise sogar bis über 300% übersteigen.

Zudem wurde in dieser Tabelle zu den jeweiligen Herstellungsverfahren sowie auch zu den einzelnen definierten Beispielstrecken Mittelwerte zur CO_2-Einsparung ermittelt. Diese Mittelwerte lassen eine Tendenz oder einen Trend erahnen, durch den sich abschätzen lässt, für welche Herstellungsmethode bzw. in welcher Flugdistanz und damit zusammenhängender Flugzeugdimension die Entwicklung hin zum Wasserstoff einen positiven Einfluss auf die Umwelt haben kann.

Wasserstoff wird in den meisten Fällen nicht nur aus einer einzelnen Herstellungsmethode produziert, sondern ist oft eine Mischung verschieden produzierter Wasserstoffmengen. Eine

durchschnittliche Bewertung der einzelnen Strecken mit Wasserstoff aus allen 5 Herstellungsverfahren kann Aufschluss darüber geben, ob die Flugstrecke mit der damit verbunden Flugdimension tendenziell eher mehr oder weniger CO_2 ausstößt als das Vergleichsmodell mit Kerosin als Antriebsmittel.

Grün spricht auch bei den Mittelwerten für den Ausbau der jeweiligen Herstellungstechnik bzw. die Entwicklung hin zum Wasserstoff in der Größenklasse. Gelb bewertet die Herstellungsmethode zwar mit positivem Effekt auf die Umwelt, der Effekt fällt aber geringer aus als bei grün hinterlegten Methoden und Größenklassen. Die rot bewerteten Herstellungsverfahren führen nicht zu einer Verbesserung der CO_2-Bilanz der Luftfahrt. Diese Herstellungsverfahren eigenen sich nicht für eine Verbesserung der CO_2-Bilanz der Luftfahrt. Auch die Strecke HAM-CCE ist im Durchschnitt aller Herstellungsverfahren negativ bewertet und die Wahrscheinlichkeit, dass für diese Menge Wasserstoff mehr CO_2 emittiert würde, ist sehr hoch.

Um die Herstellungsweisen in ihrer Effektivität zu CO_2-Einsparungen in Bezug dem prozentualen Anteil zu setzen, zu dem sie als Herstellungsverfahren für Wasserstoff genutzt werden, kann eine lineare Funktion erstellt werden. Aus *Kapitel 5.1.1 Herstellung* geht hervor, dass 99% des Wasserstoffs heutzutage aus Erdgas und Erdöl unter Anwendung der Dampfreformierung hergestellt werden. Das entspricht der Herstellungsart 1 (H1) aus der *Tabelle 10: CO_2-Einsparungen in Prozent,* bei der durchschnittlich für die errechneten Flüge 34,18% mehr ausgestoßen werden als für diese Flüge, wenn sie mit kerosinbetriebenen Flugzeugen geflogen werden würden. Dem gegenüber stehen die Herstellungsverfahren mit CCS und das Elektrolyseverfahren (H2, H3, H5) mit erneuerbaren Energien als Stromquelle, die laut *Kapitel 5.1 Herstellung* nur 0,8% der gesamten Wasserstoffproduktion abdecken. Zusammengerechnet ergeben die Durchschnittswerte der 3 oben genannten Herstellungsverfahren wiederum einen Durchschnittswert von 71,87% CO_2-Einsparung gegenüber den Kerosinflügen.

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass 99% des Hergestellten Wasserstoffs eine Einsparung von -34.18% erbringen und 0,8% des hergestellten Wasserstoffs zu einer CO_2-Einsparung von 71,87% führen. Um daraus eine Funktion zu erstellen, aus der ablesbar wird, wieviel Prozent des Wasserstoffs für die Luftfahrt mindestens aus H2+ H3 + H5 produziert werden müssten, um einen gesamtheitlichen positiven Effekt auf den CO_2-Ausstoß in Form von Einsparung zu erlangen, kann eine lineare Funktion erstellt werden, die auf der Y-Achse die prozentualen CO_2-Einsparungen darstellt, bei der die Basis von 0, die Emissionen der Kerosinverbrennung geschuldeten CO_2-Emissionen darstellen. Die X-Achse kann mit den prozentualen Anteilen der Herstellungsverfahren von H1 und H2+H3+H5 beschrieben werden.

So kann aus dem Graphen der Schnittpunkt aus der Funktion mit der X-Achse als Mischungsverhältnis von Herstellungsverfahren H1 zu H2+H3+H5 gelesen werden, bei dem es sich lohnt, bzw. nicht mehr lohnt, um CO_2 mit der Luftfahrt einzusparen.

Die Funktion lässt sich aus den folgenden Gleichungen herleiten.

Die allgemeine Funktionsgleichung für lineare Funktionen wird mit Gleichung (34) beschrieben:

$$f(x) = y = m \cdot x + b \tag{34}$$

Nach Gleichung (35) gilt:

$$b = y - mx \tag{35}$$

Für die Anwendung dieser Formel und zur Bestimmung der Funktionswerte m und b können die Werte der Ergebnisse für H1 und H2+H3+H5 als y_1 bzw. y_2 eingesetzt werden und ihre prozentualen Anteile in der Produktion jeweils als x_1 bzw. x_2 Wert.

Nach Gleichung (36) und (37) ergeben sich zwei Funktionsgleichungen:

$$f(x_1) = 71{,}87 = m \cdot 0{,}8 + b \tag{36}$$

Und

$$f(x_2) = -34{,}18 = m \cdot 99 + b \tag{37}$$

Nach Verwendung der Gleichung (35) für b in Gleichung (36) ergeben sich folgende Werte:

$$b = 71{,}87 - 0{,}8m \tag{38}$$

Gleichung (38) eingesetzt in Gleichung (37) ergibt:

$$-34{,}18 = 99m + 71{,}87 - 0{,}8m \tag{39}$$

Mit Umstellung und Verrechnung folgt daraus Gleichung (40)

$$m = -1{,}08 \tag{40}$$

Mit Gleichung (40) eingesetzt in Gleichung (38) ergibt sich für b nach Gleichung (41):

$$b = 72{,}7 \tag{41}$$

Die Gleichung f(x) die sich mit Verwendung von Gleichung (41) und (40) ergibt, liest sich nach Gleichung (42):

$$f(x) = -1{,}08 \cdot x + 72{,}7 \tag{42}$$

Aus dieser Gleichung lässt sich die Funktion abbilden, die in *Abbildung 23: Funktion Herstellungsverfahren und CO_2-Einsparungen im Verhältnis* grafisch dargestellt ist. Auf der X-Achse befindet sich das prozentuale Verhältnis von Herstellungsverfahren für Wasserstoff, die derzeit im Einsatz sind. Bei steigendem Wert der X-Achse, steigt der Anteil des Wasserstoffs, der mit Dampfreformierung (H1) hergestellt wird. Auf der Y-Achse befinden sich die durchschnittlichen Werte von CO_2-Einsparungen in Prozent im Vergleich zu Kerosinflügen.

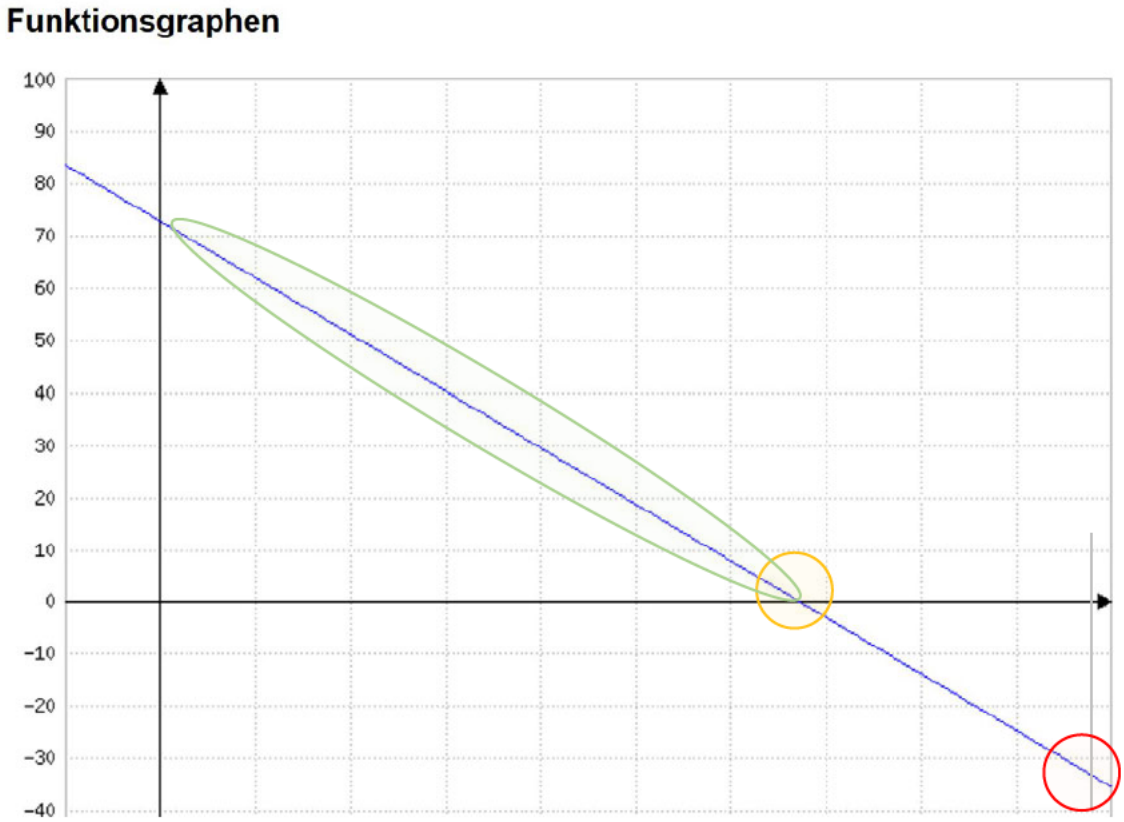

Abbildung 23: Funktion Herstellungsverfahren und CO_2-Einsparungen im Verhältnis

An dieser Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass die Einsparung von CO_2 abnimmt, je größer der prozentuale Anteil des Wasserstoffs wird, der durch Dampfreformierung hergestellt wird.

Aktuell befindet sich das Herstellungsverhältnis von Dampfreformierung zu den klimafreundlicheren Herstellungsverfahren (H2, H3, H5) im roten Bereich. Es würde also durch den Einsatz von Wasserstoff in der Luftfahrt derzeit noch kein CO_2 eingespart, sondern zusätzlich ausgestoßen werden. Mit Gleichung (43) lässt sich das genaue Verhältnis von durch Dampfreformierung hergestelltem Wasserstoff zu Wasserstoff durch umweltschonende Herstellungsverfahren bestimmen, ab dem kein zusätzliches CO_2 mehr freigesetzt werden würde.

(43) $$f(x) = 0: \quad X = \frac{72{,}87}{1{,}08} = 67{,}31$$

Würden demnach nur noch 67,31% des Wasserstoffs mit Dampfreformierung hergestellt werden und die restlichen 32,69 % aus einer Mischung von H2, H3 und H5, so würde die Herstellung des Wasserstoffs gleich dem CO_2-Ausstoß sein, den Kerosinflüge verursachen würden.

6. Fazit

Die vorliegende Arbeit hat sich intensiv mit dem Vergleich von kerosinbetriebenen und wasserstoffbetriebenen Flugzeugen auseinandergesetzt. Ziel der Arbeit war es, auf Basis der zugänglichen Informationen in diesem Themengebiet, möglichst detaillierte Berechnungen und Analysen im Bereich Energieverbrauch sowie die CO_2-Bilanz, beide Antriebstechnologien zu bewerten. In diesem Kapitel werden die wesentlichen Erkenntnisse zusammengefasst, eine auf Grundlage dieser Arbeit fundierte Empfehlung für die zukünftige Ausrichtung der Luftfahrtbranche und eine kritische Reflexion der durchgeführten Untersuchung vorgenommen.

6.1 Schlussfolgerungen aus den Daten

Die Untersuchung hat gezeigt, dass die aktuelle Produktion von Wasserstoff für den Einsatz in Commuter Aircraft noch nicht zu einer signifikanten Reduktion von CO_2-Emissionen im Vergleich zu konventionellem Kerosin führt. Der Hauptgrund hierfür liegt in den vorherrschenden Methoden zur Wasserstoffherstellung, die überwiegend auf fossilen Brennstoffen basieren und daher mit hohen CO_2-Emissionen verbunden sind.

Die Berechnungen belegen, dass, obwohl wasserstoffbetriebene Flugzeuge in der Theorie eine emissionsfreie Alternative darstellen, die gesamte CO_2-Bilanz unter den gegenwärtigen Produktionsbedingungen nicht vorteilhaft ist. Derzeit wird 99% des Wasserstoffs durch Dampfreformierung hergestellt. Diese Tatsache führt zu dem Ergebnis, dass generell für den Einsatz von Commuter Aircraft mit Wasserstoff über kurze und regionale Strecken keine Einsparung an CO_2 durch den Einsatz von Wasserstoff erreicht werden kann.

Lediglich im Bereich von kleinen, sehr leichten Flugzeugen, wie der HY4, die kurze Flugstrecken zurücklegen, lohnt sich der Einsatz von Wasserstoff als Antriebsmittel auch mit der derzeitigen Situation der Herstellungsverfahren (siehe *Tabelle 10: CO_2-Einsparungen in Prozent.)*

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es für eine Einsparung von CO_2 durch Wasserstoff in der Luftfahrt, vehement auf das Verhältnis zwischen den verschiedenen Herstellungsverfahren von Wasserstoff ankommt. Wird ein zu großer Anteil von über 67,31% des Wasserstoffs durch Dampfreformierung hergestellt, so kann durch den Einsatz von Wasserstoff in der Luftfahrt kein CO_2 eingespart werden, sondern das Gegenteil geschieht, es wird sogar mehr CO_2 freigesetzt als mit dem Einsatz von Kerosin für die gleichen Flüge.

Um also tatsächlich das Ziel zu erreichen, die Wasserstoffherstellungsverfahren in ein Verhältnis zu setzen, das weniger CO_2 ausstößt als der Kerosinflug, müsste der Anteil der klimafreundlichen Herstellungsmethoden von H2, H3 und H5 von 0,8% um 4086,25% wachsen, um auf den benötigten Anteil von 32,69% zu kommen. Laut Kap. *5.1.1 Herstellung* ist der Anteil Wasserstoffs, der mittels Elektrolyseverfahren hergestellt wurde, im Jahr 2022 um 35%, auf 0,1% angestiegen im Vergleich zum Vorjahr. Würde der gesamte Anteil der klimafreundlichen Wasserstoffherstellung in vergleichbarem Tempo zunehmen, so würde es noch 12-13 Jahre dauern, bis ein solcher Anteil an der Herstellung des Wasserstoffs erreicht wäre.

6.2 Empfehlungen für die Zukunft

Ausgehend von der Schlussfolgerung, dass beim Thema Wasserstoffantrieb in der Commuter Aircraft hauptsächlich die Herstellungsverfahren die entscheidende Rolle spielen im Hinblick auf CO_2-Einsparungen, können folgende Empfehlungen für die Zukunft festgehalten werden.

- Förderung der Forschung und Entwicklung von grüner Wasserstoffproduktion: Investitionen in die Entwicklung von Elektrolyseverfahren, die mit erneuerbaren Energien betrieben werden, sollte erhöht werden. Die könnte durch staatliche Förderungsprogramme, steuerliche Anreize oder öffentlich-private Partnerschaften unterstützt werden. Erforschung von Biomasse- und Abfallverwertungsmethoden zur Gewinnung von Wasserstoff sollten auch unterstützt werden, um alternative und nachhaltige Produktionswege zu etablieren.

- Ausbau der Infrastruktur für erneuerbare Energien: Der Ausbau und die Integration von erneuerbaren Energiequellen wie Wind- und Solarkraft sind essenziell, um eine stabile und umweltfreundliche Versorgung für die Wasserstoffproduktion sicherzustellen. Zudem ist eine Entwicklung von Energiespeichertechnologien ratsam, um die Schwankungen bei der Energieerzeugung aus erneuerbaren Quellen auszugleichen und eine kontinuierliche Wasserstoffproduktion zu gewährleisten.

- Optimierung und Skalierung der Wasserstoffspeicherung und -verteilung: Forschung und Entwicklung im Bereich der Wasserstoffspeicherung (z.B. in Form von Metallhydriden oder flüssigem Wasserstoff) sollten intensiviert werden, um effektive und sichere Lösungen zu finden. Der Aufbau einer effizienten Verteilungsinfrastruktur, die Transport und Lagerung von Wasserstoff erleichtert, einschließlich der Schaffung von Hubs und Pipelines, sollte gefördert werden.

- Integration von Wasserstofftechnologien in die Luftfahrtindustrie: Enge Zusammenarbeit zwischen Flugzeugherstellern, Energieversorgern und Forschungseinrichtungen, um die Entwicklung und Implementierung von wasserstoffbetriebenen Flugzeugmodellen zu beschleunigen. Pilotprojekte zu Erprobung und Demonstration der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit von wasserstoffbetriebenen Commuter Aircraft unter realen Bedingungen sollten gefördert und unterstützt werden.

- Regulatorische Rahmenbedingungen und Anreize: Einführung von gesetzlichen Vorgaben und Standards zur Förderung der Nutzung von grünem Wasserstoff in der Luftfahrtindustrie und Schaffung von Anreizen für Fluggesellschaften und Flughäfen, die den Umstieg auf wasserstoffbetriebene Flugzeuge unterstützen, beispielsweise durch Subventionen, Steuererleichterungen oder Emissionszertifikate

- Bildung der Öffentlichkeitsarbeit: Sensibilisierung und Aufklärung der Öffentlichkeit und der relevanten Stakeholder über die Vorteile und Herausforderungen von grünem Wasserstoff als nachhaltiger Energieträger. Auch Bildungsprogramme und Fachkräfte, die im Bereich von Wasserstofftechnologie ausgebildet werden, sollten gefördert werden, um den zukünftigen Bedarf an qualifizierten Arbeitskräften zu decken.

6.3 Kritische Reflexion der Arbeit

Diese Arbeit bietet wertvolle Einblicke in das Potential von Wasserstoff als alternativem Treibstoff. Dennoch gibt es mehrere Aspekte, die einer kritischen Reflexion bedürfen, um die Aussagekraft und Genauigkeit der Ergebnisse zu bewerten.

- Nicht berücksichtigte Faktoren:
  CO_2-Ausstoß bei Lagerung und Beförderung von Wasserstoff. Eine wesentliche Lücke in der Analyse besteht darin, dass der mögliche CO_2-Ausstoß, der mit der Lagerung und Beförderung von Wasserstoff verbunden ist, nicht berücksichtig wurde. Die Infrastruktur für die Lagerung und den Transport von Wasserstoff ist komplex und energieintensiv, was potentiell nicht unerhebliche indirekte Emissionen verursachen könnte. Die Emissionen könnten die Gesamtbilanz des CO_2-Ausstoßes von wasserstoffbetriebenen Flugzeugen beeinflussen und sollten für genauere Berechnungen berücksichtigt werden.

- Variabilität der Annahmen für Berechnungen:
  Die Berechnungen zu den Treibstoffverbräuchen in dieser Arbeit basieren zum Teil aus Annahmen, die variieren können, wie z.B. die max. Reisegeschwindigkeit oder die Leistung der Antriebsmotoren bei Gegen- oder Rückenwinden. Diese Variablen können die Ergebnisse zu den Treibstoffverbräuchen negativ aber auch positiv beeinflussen und wurden auf Basis der vorhandenen Datenquellen möglichste realitätsnah getroffen.

- Nicht einbezogener Treibstoffverbrauch durch Taxiing, Start- und Landephase und den Antriebswirkungsgrad:
  In der Analyse findet der Treibstoffverbrauch während des Taxiings, sowie der erhöhte Verbrauch während der Start- und Landephasen und durch den Antriebswirkungsgrad keine Beachtung. Die Phasen und auch der Wirkungsgrad können einen zusätzlichen erheblichen Anteil am Gesamtenergieverbrauch eines Fluges ausmachen und somit auch den CO_2-Ausstoß beeinflussen. Eine umfassendere Analyse für genauere Ergebnisse sollte diese Faktoren mit einbeziehen, um ein vollständiges Bild des Treibstoffverbrauches und der Emissionen zu erhalten.

- Einschränkungen durch öffentlich zugängliche Daten:
  Diese Analyse stützt sich ausschließlich auf öffentlich zugängliche Daten, ohne Zugang zu firmeninternen Informationen. Dies kann zu Einschränkungen in der Genauigkeit der Aktualität der verwendeten Daten führen. Firmeninterne Daten können detaillierte Einblicke in spezifische Betriebsbedingungen und Effizienzmetriken ermöglichen, die für eine präzise Bewertung erforderlich sind.

- Berücksichtigung der Dampfreformierung bei der Wasserstoffproduktion:

Ein weiterer wichtiger Punkt, der in der Arbeit nicht tiefergehend behandelt wurde, ist die Tatsache, dass etwas 0,7% des als klimafreundlich bezeichneten Wasserstoffs durch Dampfreformierung erzeugt wird (H2, H3), bei der CO_2 als Abfallprodukt anfällt. Auch wenn bei diesen Herstellungsverfahren das CO_2 durch Einlagerung und Bindung nicht direkt in die Luft freigesetzt wird, bleibt es dennoch ein potentielles Risiko für zukünftige Freisetzungen. Auch diese indirekten Emissionen und Risiken sollten in eine ehrliche Gesamtbewertung der Umweltbilanz von wasserstoffbetriebenen Flugzeugen einfließen, da sie die tatsächliche Klimafreundlichkeit der verwendeten Wasserstoffproduktionen beeinflussen können.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in dieser Arbeit wichtige erste Schritte zu Bewertung des CO_2-Ausstoßes von wasserstoffbetriebenen Flugzeugen unternommen hat. Allerdings gibt es mehrere kritische Bereiche, die weiter untersucht und in die Analysen mit einbezogen werden müssten, um zu fundierteren und genaueren Schlussfolgerungen zu kommen. Zukünftige Arbeiten sollten die Lagerung und den Transport von Wasserstoff, den Treibstoffverbrauch während aller Flugphasen und den Antriebswirkungsgrad, und detaillierte Datenquellen berücksichtigen. Je detaillierter die Betrachtung der einzelnen Aspekte erfolgt, desto realistischer werden die Einschätzungen der Umweltvorteile von Wasserstoffflugzeugen.

Literaturverzeichnis

ACARE. (2011). *Flightpath 2050: Europe's Vision for Aviation.* Luxembourg: Publications Office of the European Union.

ACARE. (2022). *Fly the Green Deal.* Brüssel: Publication Office of the European Union.

Airbus (A). (kein Datum). Abgerufen am 10. 06 2024 von https://www.airbus.com/en/asset-preview/1181

Airbus (B). (21. 09 2020). Airbus reveals new zero-emission concept aircraft. Abgerufen am 10. 06 2024 von https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2020-09-airbus-reveals-new-zero-emission-concept-aircraft

Airbus. (01 2002). *"Getting to Grips with Aircraft Performance".* Von www.smartcockpit.com: https://www.smartcockpit.com/docs/Getting_to_Grips_With_Aircraft_Performance.pdf abgerufen

Anja Kollmuss, A. C. (2009). Carbon Offsetting & Air Travel Part 2: Non-CO2 Emissions Calculations. In A. C. Anja Kollmuss, *Carbon Offsetting & Air Travel* (S. 11-13). Stockholm: SEI Discussion Paper.

ARL. (2013). Glossar Klimawandel und Raumentwicklung. *E-Paper der ARL Nr. 10(2. Überarbeitete Ausgabe)*, 23. Hannover: ARL Hannover 2013. Abgerufen am 05 2024 von https://www.arl-net.de/system/files/media-shop/pdf/e-paper_der_arl_nr10.pdf

ATR (B). (kein Datum). *"ATR 42-600".* Von www.atr-aircraft.com: https://www.atr-aircraft.com/wp-content/uploads/2022/06/ATR_Fiche42-600-3.pdf?_gl=1*c8x7zd*_up*MQ..*_ga*NjU2MjA2MjU2LjE3MTcwNTY2Njc.*_ga_C5YPS486CN*MTcxNzA1NjY2Ni4xLjAuMTcxNzA1NjY2Ni4wLjAuMA.. abgerufen

ATR (C). (kein Datum). ATR 72-600. Abgerufen am 10. 06 2024 von https://www.atr-aircraft.com/wp-content/uploads/2022/06/ATR_Fiche72-600-3.pdf?_gl=1*1hhj2h4*_up*MQ..*_ga*MjEzODgyMzc2NS4xNzE4MDQ4NzQy*_ga_C5YPS486CN*MTcxODA0ODc0Mi4xLjEuMTcxODA0ODc2MS4wLjAuMA..

ATR. (05 2024). *www.atr-aircraft.com*. Von https://www.atr-aircraft.com/aircraft-services/aircraft-family/ abgerufen

BDL. (2020). *www.bdl.aero.de*. Von https://www.bdl.aero/de/publikation/klimaschutzreport/ abgerufen

Boom, E. v. (7. 12 2020). *"Wie weit kannst du mit einer Cessna fliegen?".* Von www.flyouts.com: https://www.flyouts.com/de/trivia/wie-weit-kannst-du-mit-einer-cessna-fliegen#:~:text=Laut%20dem%20Handbuch%20unserer%20Beispiel-Cessna%20172%20kannst%20du,das%20bedeuten%2C%20dass%20du%201.294%20km%20fliegen%20k%C3%B6nntest. abgerufen

Brandon Graver, P. D. (2020). *CO2 EMISSIONS FROM COMMERCIAL AVIATION: 2013, 2018, AND 2019.* Washington: ICCT.

Brockhorst, D. M. (2023). *www.energieinfo.de, Wasserstoff*. Von https://www.energieinfo.de/eglossar/wasserstoff abgerufen

Bundesamt für Zivilluftfahrt BAZL. (2020). *"CO2-Emissionen des Luftverkehrs".* Von file:///C:/Users/sital/Downloads/CO2-Emissionen_des_Luftverkehrs%20(2).pdf abgerufen

Bundeszentrale für politische Bildung. (01. 09 2017). Erderwärmung. Abgerufen am 05 2024 von https://www.bpb.de/kurz-knapp/zahlen-und-fakten/globalisierung/52724/erderwaermung/

Carbon-Connect AG. (2024). *"Well to Tank Factor / WTT Factor"*. Von www.carbon-connect.ch: https://www.carbon-connect.ch/resources/glossar/well-to-tank-factor-wtt-faktor#:~:text=Der%20Well%2Dto%2DTank%20(,Gastank%20oder%20Kraftstofftank)%20verbunden%20sind. abgerufen

Cavcar, M. (kein Datum). *"The International Standard Atmosphere".* Von http://fisicaatmo.at.fcen.uba.ar: http://fisicaatmo.at.fcen.uba.ar/practicas/ISAweb.pdf abgerufen

chemie.de. (2023). *www.chemie.de*. Von https://www.chemie.de/lexikon/Kerosin.html abgerufen

De Havilland Aircraft of Canada Limited. (2022). *https://dehavillandfield.com/*. Von https://dehavillandfield.com/wp-content/uploads/2022/08/Dash8_Spec_Sheet_web.pdf abgerufen

Deutscher Wetterdienst. (kein Datum). *"ICAO-Standardatmosphäre (ISA)".* Von www.dwd.de: https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/S/Standardatmosphaere_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3 abgerufen

DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (2015). *Abschlussbericht; Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie.* Von www.edocs.tib.eu: https://edocs.tib.eu/files/e01fb17/875738052.pdf abgerufen

DLR (B). (07. 09 2023). Weltweit erster Pilotflug eines mit flüssigem Wasserstoff betriebenen Elektroflugzeugs absolviert. (I. f. Thermodynamik, Hrsg.) *DLR Portal*. Abgerufen am 09. 06 2024 von https://www.dlr.de/de/tt/aktuelles/nachrichten/2023/07-september-2023-weltweit-erster-pilotflug-eines-mit-flussigem-wasserstoff-betriebenen-elektroflugzeugs-absolviert

DLR (C) Institut für Technische Thermodynamik. (kein Datum). HY4. *Emissionsfreie Passagierflüge*. (DLR, Hrsg.) Abgerufen am 09. 06 2024 von file:///C:/Users/sital/Downloads/dlr-flyer-hy4_1892%20(1).pdf

DLR. (2023). "Langsamer Ventilator - weniger Lärm".

DLR Broschüre. (2021). *www.dlr.de.* Von Broschüre: Auf dem Weg zu einer Emissionsfreien Luftfahrt: https://www.dlr.de/de/forschung-und-transfer/luftfahrt abgerufen

Ebner, U. (31. 05 2020). Leise Reise. *Flugrevue*.

Ebraer; B. (16. 10 2023). *"Embraer deliveries increase by 30% to 43 aircraft in 3Q23".* Von www.embraer.com: https://embraer.com/global/en/news/?slug=1207295-embraer-deliveries-increase-by-30-to-43-aircraft-in-3q23 abgerufen

Embraer; A. (2024). *"E175"*. Von www.embraercommercialaviation.com: https://www.embraercommercialaviation.com/commercial-jets/e175/ abgerufen

European Commission (A). (07 2015). *"Study on actual GHG Data for Diesel, Petrol, Kerosene and Natural Gas", S.12 (ES-10).* Von www.energy.ec.europa.eu:

https://energy.ec.europa.eu/system/files/2015-08/Study%2520on%2520Actual%2520GHG%2520Data%2520Oil%2520Gas%2520Executive%2520Summary_0.pdf abgerufen

Frauenhofer IKTS. (2024). *www.ikts.frauenhofer.de*. Von https://www.ikts.fraunhofer.de/de/industrieloesungen/wasserstofftechnologien/wasserstofferzeugung_und_wasserstoffmarkt.html abgerufen

Fraunhofer IWU. (2024). *www.hydrogen-lab.de*. Von https://www.hydrogen-lab.de/de/wissensraum-wasserstoff/wissensraum-wasserstoff-wasserstofferzeugung.html abgerufen

Fritts, S. (17. 05 2017). *"What is true airspeed?"*. Von www.thinkaviation.net: https://www.thinkaviation.net/true-airspeed/ abgerufen

Hochwarth, D. (09. 12 2022). Airbus entwickelt Flugzeug mit wasserstoffbetriebenem Brennstoffzellen-Triebwerk. *ingenieur.de*.

Höfler, A. (2023). *www.tec-science.com*. Von https://www.tec-science.com/de/mechanik/gase-und-fluessigkeiten/grenzschichtablosung-stromungsabriss/ abgerufen

IATA. (2021). *www.aviationbenefits.org.* Von https://aviationbenefits.org/media/167417/w2050_v2021_27sept_full.pdf abgerufen

ICAO (D). (kein Datum). Glossary. S. 3. Abgerufen am 10. 06 2024 von https://www.icao.int/dataplus_archive/Documents/20130807/GLOSSARY%20v1%202.pdf

ICAO. (2016). *Environmental Report.* Montreal: Environment Branch of the International Civil Aviation Organization.

ICAO. (2016). *On Board - A Sustainable Future.* Montreal, Canada: International Civil Aviation Organization.

ICAO. (2016). *www.icao.int.* Von https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Doc%209889.SGAR.WG2.Initial%20Update.pdf abgerufen

International Energy Agency (A). (2023). Global Hydrogen Review 2023. S. 64-69. Abgerufen am 15. 06 2024 von https://iea.blob.core.windows.net/assets/ecdfc3bb-d212-4a4c-9ff7-6ce5b1e19cef/GlobalHydrogenReview2023.pdf

International Energy Agency (B). (2023). *Global Hydrogen Review 2023.* IEA Publications. Abgerufen am 08. 06 2024 von https://iea.blob.core.windows.net/assets/ecdfc3bb-d212-4a4c-9ff7-6ce5b1e19cef/GlobalHydrogenReview2023.pdf

International Energy Agency. (2023). *Global Hydrogen Review 2023.* IEA Publications. Abgerufen am 08. 06 2024 von https://iea.blob.core.windows.net/assets/ecdfc3bb-d212-4a4c-9ff7-6ce5b1e19cef/GlobalHydrogenReview2023.pdf

IPCC. (2007). www.ipcc.ch. In V. R. Piers Forster, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* (S. 131-217). Cambridge: Cambridge University Press. Von https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg1-chapter2-1.pdf abgerufen

Johannes Feyrer, J. J. (10 2008). *www.fwvbw.de.* Von https://www.fwvbw.de/fileadmin/Downloads/Einsatz_Wasserstoffleitfaden.pdf abgerufen

Johannig, A. (12. 04 2017). *Methodik zur Ökobilanzierung im Flugzeugvorentwurf.* Hamburg: Verlag Dr. Hut.

Kochan, D. K. (20. 10 2017). Wer mehr zahlt, fliegt ruhiger. (S. Przybilla, Interviewer)

Kühn, M. (11. 09 2023). *"Fuel Consumption of the 50 Most Used Passenger Aircraft".* Von www.fzt.haw-hamburg.de: https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/arbeiten/TextKuehn.pdf abgerufen

Kurtulus Ozcan, S. N. (2006). *www.researchgate.net.* Von https://www.researchgate.net/publication/277072792_In-cabin_noise_levels_during_commercial_aircraft_flights abgerufen

Mahfouz, H. (02. 02 2023). Vergleich des Kraftstoffverbrauchs von Strahltriebwerken und Propellertriebwerken. S. 26-35. Abgerufen am 10. 06 2024 von https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/arbeiten/TextMahfouz.pdf

MC Kinsey & Company. (2020). *Hydrogen powered aviation.* Louxembourg: Publications Office of the European Union.

Misol, D. I. (13. 02 2020). *leichtbau.dlr.de*. Von https://leichtbau.dlr.de/quiet-eco-efficient-flying-cabin-elements-with-integrated-active-noise-reduction abgerufen

Nagel, B. (2020). *Grünes Fliegen - Abheben mit Wasserstoff; Bundesregierung.de.* Von https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/fliegen-mit-wasserstoff-1776282 abgerufen

Nicolas E. Antoine, I. M. (2002). *Aircraft Optimization for Minimal Environmental Impact.* Stanford: Stanford University.

P.K. Quinn, T. B. (2008). *The Impact of Short-Lived Pollutants on Arctic Climate.* Oslo: AMAP Technical Report.

Palt (B), K. (2019). *"ATR, Avions de Transport Regional ATR 42"*. Von www.flugzeuginfo.net: https://www.flugzeuginfo.net/acdata_php/acdata_atr42_dt.php abgerufen

Palt, K. (2019). *"Embraer 175/ERJ 170-200"*. Von www.flugzeuginfo.net: https://www.flugzeuginfo.net/acdata_php/acdata_emb175_dt.php abgerufen

Pratt & Whitney. (2024). *"PW 127XT"*. Von www.prattwhitney.com: https://www.prattwhitney.com/en/products/regional-aviation-engines/pw127xt abgerufen

Rabe, M. (09 2023). *"Wie Kraftstoffberechnung für Motorflugzeuge einfach erstellen".* Von www.fliegerei.blog: https://fliegerei.blog/kraftstoffberechnung/#1-kraftstoffverbrauch-aus-dem-flughandbuch-ermitteln abgerufen

Randow, M. v. (2023). *www.fluglärm-portal.de*. Von https://www.xn--fluglrm-portal-9hb.de/fluglaerm-debatte/laermquellen/ abgerufen

Randow, M. v. (2023). *www.fluglärm-portal.de*. Von https://www.xn--fluglrm-portal-9hb.de/laerm-vermeiden/moderne-flugzeuge/triebwerke/ abgerufen

Randow, M. v. (kein Datum). *www.klimaschutz-portal.aero*. Von https://www.klimaschutz-portal.aero/glossar/eu-flightpath-2050/ abgerufen

Recklies, B. (09. 04 2023). *"Das waren die 10 beliebtesten Turboprops 2022"*. Von www.aerotelegraph.com: https://www.aerotelegraph.com/das-waren-die-zehn-beliebtesten-turboprops-2022 abgerufen

rzjets.net. (05 2024). *"ATR42, ATR72 Production List"*. Von www.rzjets.net: https://rzjets.net/aircraft/?typeid=310 abgerufen

Schelling, J. (18. 08 2017). *"60 Jahre VW Käfer der Lüfte"*. Von www.nzz.ch: https://www.nzz.ch/mobilitaet/luftfahrt/cessna-172-60-jahre-vw-kaefer-der-luefte-ld.1311303 abgerufen

Scholz, P. D.-I. (kein Datum). *www.fzt.haw-hamburg.de.* Von https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/materialFS/FS_Skript_2-Klimaanlagen.pdf abgerufen

Schulte, K. (2021). MAHEPA Projektfortschritte. *(2021/02)*, S.82-88. (P. u. Flugzeug, Hrsg.) Abgerufen am 09. 06 2024 von https://mahepa.eu/wp-content/uploads/2021/05/PF_02_2021.pdf

Sillers, P. (03. 10 2020). CNN Travel. *Why this space age airplane could change flying forever*. Abgerufen am 09. 06 2024 von https://edition.cnn.com/travel/article/airbus-zero-emissions-concept-plane/index.html

Smith, M. J. (1989). *Aircraft Noise.* Cambridge University Press.

Spiegel Wissenschaft. (07. 07 2009). *Antares DLR-H2 Motorsegler mit Brennstoffzelle*. Von www.Spiegel.de: https://www.spiegel.de/fotostrecke/antares-dlr-h2-motorsegler-mit-brennstoffzelle-fotostrecke-44122.html abgerufen

tagesschau. (04. 01 2024). *"Emissionshandel bringt Deutschland Rekordeinnahmen"*. Von www.tagesschau.de: https://www.tagesschau.de/wirtschaft/energie/rekorderloes-emissionshandel-100.html#:~:text=Die%20Preise%20f%C3%BCr%20die%20europ%C3%A4ischen,vergangenen%20Jahr%20101%2C25%20Euro. abgerufen

Textron Aviation, Cessna. (2024). *Cessna Skyhawk*. Von www.cessna.txtav.com: https://cessna.txtav.com/de-de/piston/cessna-skyhawk abgerufen

TÜV Nord. (2024). *www.tuev-nord.de*. Von https://www.tuev-nord.de/de/unternehmen/energie/wasserstoff/wasserstoff-brennstoffzelle/ abgerufen

TWI Deutschland. (kein Datum). *Was sind die Vor- und Nachteile von Wasserstoffbrennzellen? .* Von www.twi-global.com: https://www.twi-global.com/locations/deutschland/was-wir-tun/haeufig-gestellte-fragen/was-sind-die-vor-und-nachteile-von-wasserstoff-brennstoffzellen#:~ abgerufen

Umwelt Bundesamt. (2018). *"CO2 equivalent"* . Von www.sns.uba.de: https://sns.uba.de/umthes/en/concepts/_00603578.html abgerufen

Umwelt Bundesamt. (2022). *www.umweltbundesamt.de.* Von https://www.umweltbundesamt.de/bild/vergleich-der-durchschnittlichen-emissionen-0 abgerufen

Umweltbundesamt. (26. 03 2020). *www.umweltbundesamt.de*. Von https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase abgerufen

Universität Augsburg, "Kyrogene Speicherung/Flüssigspeicher - LH2". (2024). *www.uni-augsburg.de.* Von https://www.uni-augsburg.de/de/forschung/einrichtungen/institute/amu/wasserstoff-forschung-h2-unia/h2lab/h2-sp/physikalische-

speicherung/lh2/#:~:text=Fl%C3%BCssiger%20Wasserstoff%20hat%20eine%20volumetrische,einem%20Druck%20von%20700%20bar. abgerufen

Universität Ulm. (11. 12 2020). Brennstoffzellen-Flugzeug am Stuttgarter Airport präsentiert Umweltschonender und lautloser Antrieb erhält Testflugerlaubnis. Ulm. Abgerufen am 09. 06 2024 von https://www.uni-ulm.de/home/uni-aktuell/article/wasserstoff-flugzeug-hy4-erhaelt-permit-to-fly-forschung-wasserstoff-brennstoffzellen-antrieb-schon-2030-fit-fuer-40-sitzer/

www.luftlinie.org. (kein Datum). Von https://www.luftlinie.org/M%C3%BCnchen/Hamburg abgerufen

www.pepeenergy.com. (2024). Von https://www.pepeenergy.com/blog/podemos-considerar-hidrogeno-futuro-combustible-alternativo/ abgerufen

www.tinnitustalk.com. (2022). Von https://www.tinnitustalk.com/threads/in-cabin-noise-level-of-wide-body-aircraft-%E2%80%94-airbus-a380-the-quietest.49240/ abgerufen

zdf.de. (09. 09 2020). Was bedeutet Luftverschmutzung? Abgerufen am 05 2024 von https://www.zdf.de/kinder/logo/was-bedeutet-schlechte-luft-100.html

Zentrum Wasserstoff Bayern. (2024). *www.h2.bayern.de*. Von https://h2.bayern/infothek/faqs/ abgerufen

7. Anhang

7.1 ISA

Table 3 International Standard Atmosphere [2]

ALTITUDE (Feet)	TEMP. (°C)	PRESSURE			PRESSURE RATIO δ = P/Po	DENSITY σ = ρ/ρo	Speed of sound (kt)	ALTITUDE (meters)
		hPa	PSI	In.Hg				
40 000	- 56.5	188	2.72	5.54	0.1851	0.2462	573	12 192
39 000	- 56.5	197	2.58	5.81	0.1942	0.2583	573	11 887
38 000	- 56.5	206	2.99	6.10	0.2038	0.2710	573	11 582
37 000	- 56.5	217	3.14	6.40	0.2138	0.2844	573	11 278
36 000	- 56.3	227	3.30	6.71	0.2243	0.2981	573	10 973
35 000	- 54.3	238	3.46	7.04	0.2353	0.3099	576	10 668
34 000	- 52.4	250	3.63	7.38	0.2467	0.3220	579	10 363
33 000	- 50.4	262	3.80	7.74	0.2586	0.3345	581	10 058
32 000	- 48.4	274	3.98	8.11	0.2709	0.3473	584	9 754
31 000	- 46.4	287	4.17	8.49	0.2837	0.3605	586	9 449
30 000	- 44.4	301	4.36	8.89	0.2970	0.3741	589	9 144
29 000	- 42.5	315	4.57	9.30	0.3107	0.3881	591	8 839
28 000	- 40.5	329	4.78	9.73	0.3250	0.4025	594	8 534
27 000	- 38.5	344	4.99	10.17	0.3398	0.4173	597	8 230
26 000	- 36.5	360	5.22	10.63	0.3552	0.4325	599	7 925
25 000	- 34.5	376	5.45	11.10	0.3711	0.4481	602	7 620
24 000	- 32.5	393	5.70	11.60	0.3876	0.4642	604	7 315
23 000	- 30.6	410	5.95	12.11	0.4046	0.4806	607	7 010
22 000	- 28.6	428	6.21	12.64	0.4223	0.4976	609	6 706
21 000	- 26.6	446	6.47	13.18	0.4406	0.5150	611	6 401
20 000	- 24.6	466	6.75	13.75	0.4595	0.5328	614	6 096
19 000	- 22.6	485	7.04	14.34	0.4791	0.5511	616	5 791
18 000	- 20.7	506	7.34	14.94	0.4994	0.5699	619	5 406
17 000	- 18.7	527	7.65	15.57	0.5203	0.5892	621	5 182
16 000	- 16.7	549	7.97	16.22	0.5420	0.6090	624	4 877
15 000	- 14.7	572	8.29	16.89	0.5643	0.6292	626	4 572
14 000	- 12.7	595	8.63	17.58	0.5875	0.6500	628	4 267
13 000	- 10.8	619	8.99	18.29	0.6113	0.6713	631	3 962
12 000	- 8.8	644	9.35	19.03	0.6360	0.6932	633	3 658
11 000	- 6.8	670	9.72	19.79	0.6614	0.7156	636	3 353
10 000	- 4.8	697	10.10	20.58	0.6877	0.7385	638	3 048
9 000	- 2.8	724	10.51	21.39	0.7148	0.7620	640	2 743
8 000	- 0.8	753	10.92	22.22	0.7428	0.7860	643	2 438
7 000	+ 1.1	782	11.34	23.09	0.7716	0.8106	645	2 134
6 000	+ 3.1	812	11.78	23.98	0.8014	0.8359	647	1 829
5 000	+ 5.1	843	12.23	24.90	0.8320	0.8617	650	1 524
4 000	+ 7.1	875	12.69	25.84	0.8637	0.8881	652	1 219
3 000	+ 9.1	908	13.17	26.82	0.8962	0.9151	654	914
2 000	+ 11.0	942	13.67	27.82	0.9298	0.9428	656	610
1 000	+ 13.0	977	14.17	28.86	0.9644	0.9711	659	305
0	+ 15.0	1013	14.70	29.92	1.0000	1.0000	661	0
- 1 000	+ 17.0	1050	15.23	31.02	1.0366	1.0295	664	- 305

Abbildung 24: ISA (Internationale Standardatmosphäre) (Airbus, 2002)

7.2 Flight Level Beispiel Werte

Pressure (hPa)	Pressure altitude (PA)		FL= PA/100
	(feet)	(meters)	
200	38661	11784	390
250	34000	10363	340
300	30066	9164	300
500	18287	5574	180
850	4813	1467	50
1013	0	0	0

Abbildung 25: Flightlevel Beispiel Werte (Airbus, 2002)