

Forschungsbericht 2025-24

Bewertung von Flugzeugentwürfen anhand der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung

Markus Kühlen

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Luftverkehr
Hamburg



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

Forschungsbericht 2025-24

Bewertung von Flugzeugentwürfen anhand der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung

Markus Kühlen

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Luftverkehr
Hamburg

214 Seiten
37 Bilder
33 Tabellen
242 Literaturstellen



Deutsches Zentrum
DLR für Luft- und Raumfahrt



Herausgeber:

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e. V.
Wissenschaftliche Information
Linder Höhe
D-51147 Köln

ISSN 1434-8454
ISRN DLR-FB-2025-24
Erscheinungsjahr 2025
DOI: [10.57676/5a7m-bh53](https://doi.org/10.57676/5a7m-bh53)

Erklärung des Herausgebers

Dieses Werk – ausgenommen anderweitig gekennzeichnete Teile – ist lizenziert unter den Bedingungen der Creative Commons Lizenz vom Typ Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0), abrufbar über <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>

Lizenz



Creative Commons Attribution 4.0 International

Luftfahrt, Flugzeugentwurf, Fluggesellschaft, Flugzeug-Routen-Zuordnung, Lufttransportsystem, Bewertung, Optimierung, Einsatzszenarien

Markus KÜHLEN
DLR, Institut für Luftverkehr, Hamburg

Bewertung von Flugzeugentwürfen anhand der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung

Dissertation, Technische Universität Hamburg

Diese Forschungsarbeit präsentiert ein neuartiges Modell zur Bestimmung realitätsnaher Einsatzszenarien für die Bewertung von Flugzeugentwürfen. Ziel des Modells ist es, die Flugzeug-Routen-Zuordnung im globalen Lufttransportsystem abzubilden, d. h., zu ermitteln, welcher Flugzeugtyp auf welchen Flugrouten eingesetzt wird. Methodisch wird ein Ansatz der mathematischen Optimierung angewendet, um flugleistungsorientierte Einsatzszenarien zu bestimmen. Dabei fließen verschiedene technische, operationelle und ökonomische Faktoren ein, wie Betriebskosten, maximale Reichweiten, Flughafenkapazitäten und der Wettbewerb zwischen Airlines. Zwei Anwendungsfälle veranschaulichen die Nutzung des Modells zur Bewertung von Flugzeugentwürfen.

aviation, aircraft design, airline, fleet assignment, air transportation system, assessment, optimization, operational scenarios

(Published in German)

Markus KÜHLEN
German Aerospace Center (DLR), Institute of Air Transport, Hamburg

Assessing aircraft designs based on the global fleet assignment

Doctoral Thesis, Hamburg University of Technology

This dissertation presents a novel model for determining realistic operational scenarios to evaluate aircraft designs. The aim of the model is to map the fleet assignment in the global air transportation system, i.e., to determine which aircraft type is used on which flight routes. Methodologically, a mathematical optimization approach is employed to identify flight performance-oriented operational scenarios. Various technical, operational, and economic factors are considered, such as operating costs, maximum ranges, airport capacities, and airline competition. Two case studies illustrate the application of the model for evaluating aircraft designs.

Bewertung von Flugzeugentwürfen
anhand der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation (Monografie)

von
Markus Kühlen

aus
Mönchengladbach

2025

Übersicht der Gutachter:

1. Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Volker Gollnick
2. Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Eike Stumpf
Vorsitzender des Prüfungsausschusses:	Prof. Dr.-Ing. Frank Thielecke
Tag der mündlichen Prüfung:	02. Juli 2025

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Luftverkehr des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Hamburg. Mein aufrichtiger Dank gilt allen, die mich auf dem Weg zu dieser Arbeit begleitet und unterstützt haben.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Gollnick danke ich sehr für die konstruktive Betreuung meines Promotionsvorhabens und die wertvollen Diskussionen im Entstehungsprozess meiner Doktorarbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. Eike Stumpf danke ich für seine Tätigkeit als zweiter Gutachter, Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Thielecke für die Übernahme des Vorsitzes des Prüfungsausschusses.

Weiterhin gilt mein Dank den Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Luftverkehr sowie den Co-Autorinnen und Co-Autoren der während der Promotionszeit entstandenen Veröffentlichungen. Der Austausch und das gemeinsame Forschen mit ihnen bringen mir stets große Freude und waren eine Quelle der Motivation für die Anfertigung der Doktorarbeit.

Mein herzlichster Dank gilt meiner Familie für die tatkräftige Unterstützung in allen Lebenslagen. Meiner Freundin Linnea, die die unvermeidlichen Höhen und Tiefen im Schreibprozess aus nächster Nähe miterlebt hat, danke ich von Herzen für ihre liebevolle Unterstützung.

Hamburg, im Juli 2025

Markus Kühlen

Kurzfassung

Flugzeuge im kommerziellen Passagierbetrieb werden in der Praxis von Airlines auf sehr unterschiedlichen und im Mittel deutlich kürzeren Flugrouten eingesetzt, als ihre Auslegungsreichweiten ermöglichen. Da zusätzlich u. a. die Kosten- und Treibstoffeffizienz von Flugzeugen von den Einsatzdistanzen abhängig sind, ist es für eine umfassende ökonomische und ökologische Bewertung neuer Flugzeugentwürfe wichtig, die zu erwartenden Einsatzszenarien im Airline-Flugbetrieb schon in der Bewertung der untersuchten Flugzeugentwürfe miteinzubeziehen.

In dieser Arbeit wird daher ein neuartiges Modell präsentiert, welches realitätsnahe Einsatzszenarien für Flugzeuge im globalen Lufttransportsystem bestimmt. Das Ziel des Modells ist es, in Abhängigkeit von u. a. Flotten- und Technologieszenarien die globale Flugzeug-Routen-Zuordnung abzubilden; d. h., zu ermitteln, welcher Flugzeugtyp in welchem Maß auf welcher Flugroute eingesetzt wird. Methodisch wird hierzu ein Ansatz der mathematischen Optimierung angewandt, wobei das Ziel nicht die eigentliche Optimierung, sondern die Abbildung der Flugzeug-Routen-Zuordnung im globalen Lufttransportsystem ist. Der Mehrwert des entwickelten Modells liegt in der Bestimmung von flugleistungsorientierten Einsatzszenarien unter Berücksichtigung einer Vielzahl an technischen, operationellen sowie ökonomischen Einflüssen und Randbedingungen. Neben den flugzeugtypspezifischen Betriebskosten und Reichweiten fließen u. a. auch die verfügbaren Flughafenkapazitäten, die Flottenzusammensetzung, die Attraktivität des Transportangebots aus Passagiersicht und der Airline-Wettbewerb in das entwickelte Modell mit ein.

Mit zwei beispielhaften Anwendungsfällen wird die Bewertung von Flugzeugentwürfen anhand des entwickelten Modells der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung demonstriert. Der erste Anwendungsfall untersucht, ob ein zukünftiges Kurzstreckenflugzeug aus operationeller und ökonomischer Perspektive mit Turbofan- oder Turboprop-Triebwerken ausgestattet werden sollte. Der zweite Anwendungsfall befasst sich mit der Markteinführung eines Mittelstreckenflugzeugs und den daraus resultierenden Auswirkungen auf die globale Flugzeug-Routen-Zuordnung und deren Performanz.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	vii
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Motivation	1
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Aufbau der Arbeit	4
2 Grundlagen	7
2.1 Bewertung von Flugzeugentwürfen	7
2.1.1 Konzeptioneller Flugzeugentwurf	8
2.1.2 Bewertungsmetriken	10
2.1.3 Einsatzszenarien	15
2.2 Modellierung der Flugzeug-Routen-Zuordnung	23
2.2.1 Ansätze für einzelne Airlines	23
2.2.2 Ansätze für mehrere Airlines	25
2.2.3 Ansätze mit globaler Ausrichtung	27
2.3 Zwischenfazit	31
3 Entwicklung des Modellkonzepts	35
3.1 Modellanforderungen	35
3.1.1 Einsatzbereich	35
3.1.2 Abbildungsqualität	37
3.2 Wahl und Ausgestaltung des Modellierungsansatzes	39
4 Modellentwicklung	45
4.1 Datengrundlage	46
4.2 Optimierungsproblem der Flugzeug-Routen-Zuordnung	48
4.2.1 Mathematische Formulierung	49
4.2.2 Eigenschaften und Anwendung	58
4.3 Submodelle	60
4.3.1 Betriebskosten	60
4.3.2 Treibstoffverbrauch	62
4.3.3 Nutzlast-Reichweiten-Beziehung	63
4.3.4 Flugzeugnutzung	64
4.3.5 Flughafenkapazitäten	71

4.3.6	Start- und Landebahnlängen	74
4.3.7	Umsatzpotential und Passagierattraktivität	77
4.3.8	Airline-Wettbewerb	81
4.4	Kalibrierung	86
4.5	Berechnungsablauf mit dem Gesamtmodell	90
4.6	Verifizierung und Validierung	94
4.6.1	Verifizierung der Submodelle	95
4.6.2	Validierung der Modellgüte	97
4.6.3	Validierung der Modelldynamik	105
4.6.4	Validierung der Modelleigenschaften	108
5	Anwendung	111
5.1	Triebwerksbauart für ein Kurzstreckenflugzeug	111
5.1.1	Untersuchungsszenario	112
5.1.2	Flugzeug-Routen-Zuordnung	115
5.1.3	Ergebnisauswertung	118
5.1.4	Vergleich mit anderen Bewertungsansätzen	121
5.2	Markteinführung eines Mittelstreckenflugzeugs	124
5.2.1	Untersuchungsszenario	126
5.2.2	Flugzeug-Routen-Zuordnung	128
5.2.3	Ergebnisauswertung	130
6	Diskussion	135
6.1	Interpretation der Ergebnisse	135
6.2	Vergleich mit vorläufiger Modellformulierung	139
6.3	Weiteres Verbesserungs- und Anwendungspotential	141
7	Zusammenfassung und Ausblick	145
A	Weitere Daten und Details zur Modellierung	149
A.1	Daten zu den Flugzeugtypen	149
A.2	Flughafenkapazitäten	158
A.3	Betriebskostenmodellierung	165
A.4	Herleitung zu den benötigten Start- und Landebahnlängen	168
B	Weitere Ergebnisse	171
B.1	Validierung der Modellgüte	171
B.2	Triebwerksbauart für ein Kurzstreckenflugzeug	178
B.3	Markteinführung eines Mittelstreckenflugzeugs	180
	Abbildungsverzeichnis	181
	Tabellenverzeichnis	183
	Literaturverzeichnis	185

Nomenklatur

Akronyme

ACM	Flugzeugeigenschaftsleitfaden (Aircraft Characteristics Manual)
ASK	verfügbare Sitzplatzkilometer (Available Seat Kilometers)
ATFM	Luftverkehrsflussmanagement (Air Traffic Flow Management)
ATM	Luftverkehrsmanagement (Air Traffic Management)
ATR	mittlere Temperaturänderung (Average Temperature Response)
BADA	Flugzeugdatenbasis (Base of Aircraft Data) der Eurocontrol
CeRAS	zentrales Flugzeugdatenreferenzsystem (Central Reference Aircraft Data System)
CPACS	einheitliches parametrisches Luftfahrzeugkonfigurationsschema (Common Parametric Aircraft Configuration Schema)
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DOC	direkte Betriebskosten (Direct Operating Costs)
EASA	Europäische Agentur für Flugsicherheit (European Union Aviation Safety Agency)
EIS	Eintritt in den Dienst (Entry Into Service)
Eurocontrol	Europäische Organisation zur Sicherung der Luftfahrt (European Organisation for the Safety of Air Navigation)
EXACT	Erforschung elektrischer Flugzeugkonzepte und -technologien (Exploration of Electric Aircraft Concepts and Technologies)
FAA	US-Bundesluftfahrtverwaltung (Federal Aviation Administration)
FSNC	Netzwerkfluggesellschaft (Full Service Network Carrier)
GCD	Großkreisdistanz (Great Circle Distance)
HHI	Herfindahl-Hirschman-Index
IATA	Internationale Luftverkehrsvereinigung (International Air Transport Association)
ICAO	Internationale Zivilluftfahrtorganisation (International Civil Aviation Organization)
IOC	indirekte Betriebskosten (Indirect Operating Costs)
IPD	Betankungsdifferenz (Into Plane Differential)
ISA	Standardatmosphäre (International Standard Atmosphere)

LCA	Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment)
LCC	Billigfluggesellschaft (Low Cost Carrier)
LP	lineares Programm
LTO-Zyklus	Start-Lande-Zyklus (Landing and Take Off Cycle)
LTS	Lufttransportsystem
MCS	Monte-Carlo-Simulation
MRO	Wartung, Reparatur und Überholung (Maintenance, Repair, Overhaul)
MTOM	maximale Abflugmasse (Maximum Takeoff Mass)
NMAE	normalisierter mittlerer absoluter Fehler (Normalized Mean Absolute Error)
NPV	Nettobarwert (Net Present Value)
NRC	wiederkehrende Kosten (Non-recurring Cost)
NRD	Nutzlast-Reichweiten-Diagramm
NWM	normalisierte Wasserstein-Metrik
RC	wiederkehrende Kosten (Recurring Cost)
RMSE	Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung (Root Mean Square Error)
RPK	verkaufte Passagierkilometer (Revenue Passenger Kilometer)
SAF	nachhaltiger Luftfahrttreibstoff (Sustainable Aviation Fuel)
TCDS	Musterzulassungsdatenblatt (Type Certificate Data Sheet)
TCM	Trajektorienberechnungsmodul (Trajectory Calculation Module)
TLAR	Anforderung an den Flugzeugentwurf (Top-level aircraft requirement)
UML	vereinheitlichte Modellierungssprache (Unified Modeling Language)
VOT	Wert der Zeit (Value of Time)

1. Einleitung

Die Entwicklung von Luftfahrttechnologien und Flugzeugprogrammen ist ein langwieriger und kostspieliger Prozess, dessen aktive Gestaltung eine bestmögliche Beschreibung der entscheidenden Einfluss- und Erfolgsfaktoren erfordert. Dies gilt umso mehr, wenn, wie aktuell, verschiedene evolutionäre und revolutionäre Zukunftstechnologien, beispielsweise nachhaltige Luftfahrttreibstoffe (engl. Sustainable Aviation Fuels; SAF) und Flüssigwasserstoffantriebe, für die kommerzielle Passagierluftfahrt diskutiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher eine neuartige Methodik vorgestellt, welche anhand der Modellierung von möglichen Einsatzszenarien neuartiger Flugzeugentwürfe und -technologien im globalen Lufttransportsystem (LTS) eine Grundlage für deren umfassende Bewertung bietet. In den nachfolgenden Abschnitten 1.1 bis 1.3 werden die Ausgangssituation, die Zielsetzung sowie der Aufbau der Arbeit vorgestellt.

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Der zivile Luftverkehr verfügt über eine langfristige Wachstumshistorie, welche resilient gegenüber kurzfristigen Krisen ist. So vervierfachte sich die Zahl der Flugpassagiere pro Jahr zwischen 1990 und 2018, wie in Abb. 1.1a dargestellt, trotz kurzfristiger Rückgänge der Passagiernachfrage durch die Golfkrise (1990–1991), die Anschläge des 11. Septembers (2001) und die globale Finanzkrise (2007–2008). Mit diesem langfristigen Wachstum ging historisch allerdings auch ein Anstieg der CO₂-Emissionen einher (s. Abb. 1.1a), obwohl durch erhebliche Aufwendungen für Forschung und Entwicklung von Technologien und Prozessen¹ der Treibstoffverbrauch pro verkauftem Passagierkilometer (engl. Revenue Passenger Kilometer; RPK) zwischen 1965 und 2015 halbiert werden konnte (s. Abb. 1.1b). Zusätzlich konnten deutliche Verbesserungen in den Bereichen Sicherheit und Kosteneffizienz bzw. Ticketpreis erzielt werden (s. Abb. 1.1b), die ergänzend zum allgemeinen Wirtschaftswachstum die Nachfrage im Luftverkehr antrieben (*Belobaba et al.*, 2009). Für die Zukunft wird von Herstellern (*Airbus*, 2022b; *Boeing*, 2022b), Regulatoren (*International Civil Aviation Organization*, 2021) und Forschung (*Gelhausen et al.*, 2021) ein weiteres Wachstum des Luftverkehrs erwartet – unabhängig

¹Beispielsweise investierten die beiden Flugzeughersteller Airbus und Boeing im Zeitraum 2000–2013 jährlich zwischen 3 % und 7 % ihres Umsatzes in Forschung und Entwicklung (*Beauregard et al.*, 2015); in den 2010er-Jahren beliefen sich diese jährlichen Investitionen auf jeweils ca. 3 Mrd. € pro Jahr (*Aerospace Technology Institute*, 2018; *Statista*, 2022a,b).

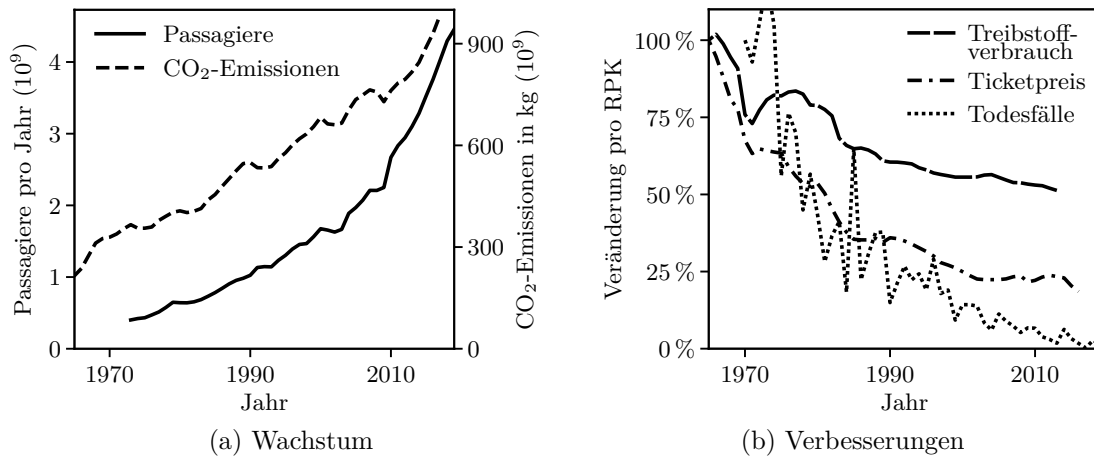


Abb. 1.1: Historische Entwicklung des Luftverkehrs; Daten aus *Kharina und Rutherford* (2015); *International Civil Aviation Organization* (2019); *Lee et al.* (2021); *The World Bank* (2024); *Our World in Data et al.* (2024)

vom kurz- und mittelfristigen Einfluss der COVID-19-Pandemie (2020–2023). In der Folge werden auch die Emissionen und die Klimawirkung des Luftverkehrs, welche neben den CO_2 -Emissionen auch die Wirkung weiterer Klimaspezies umfasst², weiter ansteigen (*International Civil Aviation Organization*, 2022; *Lee et al.*, 2009; *Grewe et al.*, 2021).

Um das LTS zukünftig weiter zu verbessern, insbesondere auch hinsichtlich der zunehmend stärker fokussierten Bewertungsdimensionen Klimawirkung und Nachhaltigkeit, sind daher weitere Forschungen und Entwicklungen notwendig (*Bain & Company*, 2023). Um die verfügbaren Entwicklungsressourcen effektiv und effizient zu steuern, fällt hierbei der frühzeitigen und umfassenden Bewertung neuer Flugzeugentwürfe und -technologien eine zentrale Bedeutung zu, da ein Großteil der Entwicklungsaufwände neuer Technologien durch Entscheidungen zu Beginn des Entwicklungsprozesses festgelegt wird (*Kundu*, 2010; *Nicolai*, 2010; *Dieter und Schmidt*, 2021). Insbesondere für die ökonomische und ökologische Bewertung neuer Flugzeugentwürfe ist dabei relevant, wie diese während des Betriebs durch die Airlines im LTS eingesetzt werden würden (*Yutko*, 2014), da u. a. die Treibstoff- und Kosteneffizienz der Flugzeugentwürfe reichweitenabhängig sind (*Filippone*, 2012) und die Klimawirkung von Flügen orts- und zeitabhängig ist (*Lee et al.*, 2021). Während für evolutionäre Weiterentwicklungen bestehender Flugzeugtypen hierzu in ausreichend guter Approximation das Einsatzprofil des Vorgängers als Bewertungsgrundlage für den Nachfolger dienen kann (*McDonald*, 2013), ist für neue, revolutionäre und disruptive Flugzeugentwürfe, wie solche mit alternativen Energieträgern, einer neuen aerodynamischen Konfiguration oder anderweitig

²Die Nicht- CO_2 -Effekte, aus denen insgesamt fast $2/3$ der Klimawirkung des Luftverkehrs resultiert, umfassen u. a. die Emissionen von Wasserdampf (H_2O) und Stickoxiden (NO_x) sowie die Bildung von Kondensstreifen und Kondensstreifen-Zirren (*Lee et al.*, 2021).

neuen Eigenschaften, die Ermittlung möglicher Einsatzszenarien im LTS als Bewertungsgrundlage gleichermaßen herausfordernd wie wichtig.

Stark vereinfachend kann als Einsatzszenario zur Bewertung eines neuen Flugzeugentwurfs die Auslegungsmission bzw. eine andere einzelne Beispielflugmission verwendet werden.³ In der Praxis zeigt sich allerdings, dass, wie Abb. 1.2 beispielhaft für den Flugzeugtyp Airbus A320ceo im Jahr 2019 veranschaulicht, Flugzeuge im Mittel deutlich unterhalb ihrer Auslegungsreichweite und über stark variierende Distanzen eingesetzt werden (*Husemann et al.*, 2018). In der Folge ist die Betrachtung einer einzelnen Beispielflugmission für die umfassende Bewertung eines neuen Flugzeugentwurfs unzureichend. Stattdessen ist die Ermittlung von distanzverteilten Einsatzszenarien anzustreben.

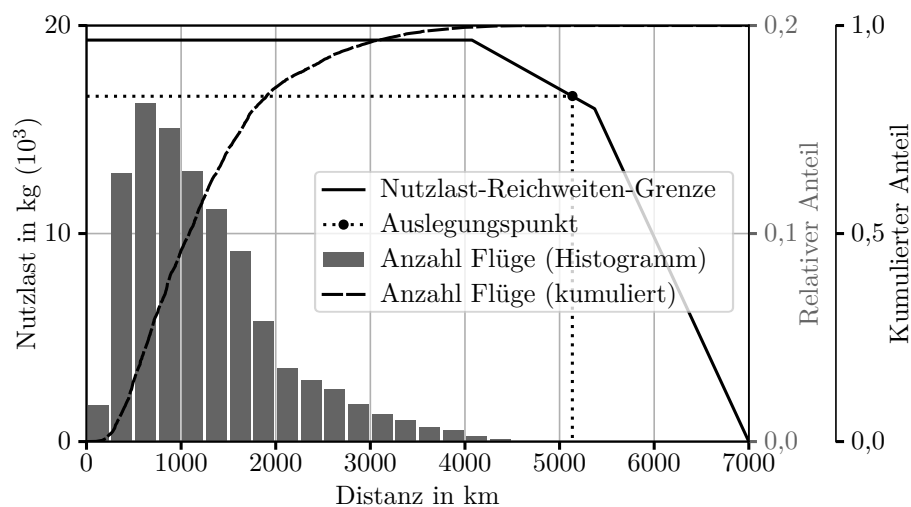


Abb. 1.2: Einsatzdistanzen des Flugzeugtyps Airbus A320ceo in 2019 im Vergleich zu den Nutzlast-Reichweiten-Eigenschaften; Daten aus *Sabre* (2022) und *Airbus* (2022a); Auslegungspunkt basierend auf typischer Passagiernutzlast approximiert

Eine weitere Herausforderung ergibt sich, wenn nicht nur, wie primär aus Hersteller- und Airline-Sicht relevant, allein die Performanz des neuen Flugzeugentwurfs untersucht wird, sondern, wie aus Gesellschafts- und Regulatorensicht von Interesse, die Performanz des gesamten globalen LTS, einschließlich der Reaktionen auf die Einführung des neuen Flugzeugentwurfs, analysiert wird. In diesem Fall gilt es, Veränderungen im Einsatz aller bestehenden Flugzeugtypen im LTS zu erfassen und in der Gesamtbewertung, z.B. hinsichtlich Treibstoffeffizienz, Betriebskosten oder Klimawirkung, zu berücksichtigen. Dies erfordert eine umfangreiche und dynamisch auf veränderte Randbedingungen reagierende Beschreibung der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung. Unter dem Begriff der *globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung* wird hierbei, in Anlehnung an den entsprechend

³Als Flugmission gilt hier der Transport einer Nutzlast über eine Reichweite; im Fall der Auslegungsmission der Transport der Auslegungsnutzlast über die Auslegungsreichweite.

betitelten Planungsprozess für eine einzelne Airline, die Zuordnung eines Flugzeugtyps zu einem durch Start- und Zielflughafen definierten Flugsegment verstanden (*Belobaba et al.*, 2009).

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist, eine solche umfangreiche und dynamische Beschreibung des Flugzeugeinsatzes im LTS vorzunehmen, sodass anhand der resultierenden, modellbasiert ermittelten, globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung neue Flugzeugentwürfe samt ihrer ökonomischen und ökologischen Auswirkungen auf das LTS bewertet werden können. Dazu soll das entwickelte Modell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung (i) zukunfts- und szenariofähig sein, um für eine Vielzahl an Fragestellungen relevante Erkenntnisse generieren zu können; (ii) einen erklärenden Ansatz verfolgen, um kausale Zusammenhänge in den Ergebnissen ganzheitlich nachvollziehen und kritisch hinterfragen zu können; und (iii) die Bewertung der Flugzeugentwürfe hinsichtlich unterschiedlicher, erweiterbarer Metriken ermöglichen, um als Eingangsgröße für Untersuchungen verschiedener Fachdisziplinen, z. B. in der ökonomischen und ökologischen Bewertung, fungieren zu können.

Zusammenfassend soll demnach in der vorliegenden Arbeit, auf Basis der in Wissenschaft und industrieller Praxis diskutierten und verwendeten Methoden, die folgende Forschungsfrage beantwortet werden:

Wie kann die Flugzeug-Routen-Zuordnung im globalen LTS erklärend modelliert werden, um eine umfangreiche ökonomische und ökologische Bewertung von Flugzeugentwürfen unter Berücksichtigung ihres Einsatzes im (zukünftigen) LTS zu ermöglichen?

1.3 Aufbau der Arbeit

Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage ist die vorliegende Arbeit wie folgt aufgebaut:

In Kapitel 2 werden die relevanten Grundlagen anhand der in der Literatur beschriebenen Methodiken vorgestellt. Dabei wird zwischen den beiden für die Arbeit relevanten Themenfeldern, der Bewertung von Flugzeugentwürfen (Abschnitt 2.1) und der Modellierung der Flugzeug-Routen-Zuordnung (Abschnitt 2.2), unterschieden.

Basierend auf den aus der Literatur gewonnenen Erkenntnissen wird in Kapitel 3 ein konzeptioneller Lösungsansatz für die Bewertung von Flugzeugentwürfen anhand der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung entwickelt. Konkret werden Anforderungen an eine zu entwickelnde Modellkette hinsichtlich Einsatzbereich und

Gütekriterien definiert (Abschnitt 3.1) sowie die Gestaltung des Modellierungsansatzes vorgestellt (Abschnitt 3.2).

In Kapitel 4 erfolgt die detaillierte Beschreibung der Modellentwicklung. Es wird die Datengrundlage für die Modellentwicklung beschrieben (Abschnitt 4.1), das mathematische Modell aufgestellt (Abschnitt 4.2) und es werden die weiteren verwendeten Submodelle eingeführt (Abschnitt 4.3). Es erfolgt eine Kalibrierung des entwickelten Gesamtmodells (Abschnitt 4.4), eine Beschreibung des vollständigen Modellablaufs (Abschnitt 4.5) sowie eine Verifizierung der Submodelle und eine Validierung der Modelldynamik und der Modelleigenschaften (Abschnitt 4.6).

Kapitel 5 umfasst die Anwendung des entwickelten Modells der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung zur Bewertung von Flugzeugentwürfen. Es werden zwei beispielhafte Anwendungsfälle vorgestellt. Der erste Anwendungsfall (Abschnitt 5.1) untersucht, ob ein zukünftiges Kurzstreckenflugzeug aus operationeller und ökonomischer Perspektive mit Turbofan- oder Turboprop-Triebwerken ausgestattet werden sollte. Der zweite Anwendungsfall (Abschnitt 5.2) befasst sich mit der Markteinführung eines Mittelstreckenflugzeugs und den daraus resultierenden Auswirkungen auf die globale Flugzeug-Routen-Zuordnung sowie die Performanz des LTS.

In Kapitel 6 erfolgt eine Diskussion der in dieser Arbeit vorgestellten Methodik und der erzielten Ergebnisse. Die Arbeit schließt in Kapitel 7 mit einer Zusammenfassung sowie einem Ausblick auf potentielle weitere Forschungsfragen ab.

Zusätzlich sei an dieser Stelle auf die im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Fachzeitschriften verwiesen: In *Kühlen et al.* (2022) wird eine vorläufige Variante des entwickelten Modells der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung aggregiert präsentiert und in *Kühlen et al.* (2023) wird ein Anwendungsfall des Modells sowie die Verknüpfung mit weiteren, bestehenden Modellen anderer Fachdisziplinen vorgestellt. Weitere Ergebnisse und Anwendungsfälle sind u. a. in den Veröffentlichungen von *Papantoni et al.* (2022), *Wehrspohn et al.* (2022), *Atanasov et al.* (2023), *Burschik et al.* (2023) und *Ramm et al.* (2024) zu finden.

2. Grundlagen

Der Kern der vorliegenden Arbeit umfasst erstens die Bewertung von Flugzeugentwürfen und zweitens die Modellierung der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung. Der Aufbau dieses Kapitels, welches die relevanten, in der Wissenschaft und der industriellen Praxis diskutierten und verwendeten Methoden vorstellt, orientiert sich an dieser Aufteilung. In Abschnitt 2.1 wird die Bewertung von Flugzeugentwürfen in den allgemeinen Prozess des Flugzeugentwurfs eingeordnet. Zudem wird erläutert, welche verschiedenen Metriken zur Bewertung von Flugzeugentwürfen verwendet werden und wie der mögliche Einsatz der Flugzeugentwürfe im LTS bei der Bewertung berücksichtigt wird. In Abschnitt 2.2 werden Ansätze zur Bestimmung der Flugzeug-Routen-Zuordnung für einzelne Airlines, für mehrere Airlines sowie für das globale LTS präsentiert. Abschließend werden in Abschnitt 2.3 die wesentlichen Erkenntnisse dieser Literaturrecherche zusammengefasst, um die Forschungslücken zu unterstreichen, welche durch die vorliegende Arbeit adressiert werden.

2.1 Bewertung von Flugzeugentwürfen

Die Bewertung von Flugzeugentwürfen zielt als Teil des Flugzeugentwurfsprozesses auf die Quantifizierung der Leistungsfähigkeiten und die Auswahl eines geeigneten Flugzeugentwurfs ab (vgl. Abb. 2.1). Hierbei können durch den Einsatz unterschiedlicher Bewertungsmetriken verschiedene Perspektiven der Leistungsfähigkeiten der Flugzeugentwürfe analysiert werden.¹ Da viele dieser Leistungsfähigkeiten auch vom Betriebspunkt des Flugzeugentwurfs abhängen, beispielsweise die Treibstoffeffizienz, hat auch die Wahl der betrachteten Einsatzszenarien einen Einfluss auf die Bewertung der Flugzeugentwürfe. Nachfolgend wird in Unterabschnitt 2.1.1 der Flugzeugentwurfsprozess mit Fokus auf den konzeptionellen Flugzeugentwurf vorgestellt. Anschließend werden in Unterabschnitt 2.1.2 verschiedene Metriken zur Bewertung von Flugzeugentwürfen eingeführt und in Unterabschnitt 2.1.3 Literaturbeispiele mit unterschiedlichen Ansätzen zur Berücksichtigung von Einsatzszenarien in der Auslegung und Bewertung von Flugzeugentwürfen diskutiert. Hierbei wird, wie auch im Rest der vorliegenden Arbeit, primär der zivile, kommerzielle Luftverkehr mit Unterschallflugzeugen adressiert.

¹Der Einfluss der Bewertungsmetriken auf die Auswahl eines *idealen* Flugzeugentwurfs ist beispielsweise in *Johnson (1990)* demonstriert.

2.1.1 Konzeptioneller Flugzeugentwurf

Der Prozess des Flugzeugentwurfs kann nach *Anderson* (1999) und *Raymer* (2018) in drei Phasen aufgeteilt werden: (i) den konzeptionellen Entwurf, (ii) den Vorentwurf und (iii) den Detailentwurf. Im konzeptionellen Entwurf werden die Anforderungen und das Ziel des Flugzeugentwurfs in eine konkrete Flugzeugkonfiguration mit grobem Wissen über Form, Größe, Masse und Flugleistung überführt. Im Vorentwurf werden nur noch kleinere Anpassungen an diesem entwickelten Konzept vorgenommen. Stattdessen werden präzisere und tiefgreifendere Untersuchungen von Aerodynamik, Antrieb, Struktur, Flugleistung und Flugsteuerung durchgeführt. Ziel ist es, am Ende des Vorentwurfs die Form und Leistungsfähigkeit des Flugzeugentwurfs vollständig beschreiben und final festlegen zu können, um die Entscheidung zu treffen, ob das entworfene Flugzeug gebaut werden soll. Im Detailentwurf erfolgt schließlich die exakte technische Ausgestaltung, um das entworfene Flugzeug tatsächlich bauen zu können. Dies umfasst u. a. die Auslegung und das Testen der einzelnen Bauteile und Systeme sowie die Planung und Entwicklung der Fertigungsprozesse. Der Detailentwurf endet mit der Fertigung des ersten neu entworfenen Flugzeugs.

Im Zusammenhang mit dieser Arbeit zur Bewertung von Flugzeugentwürfen anhand der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung ist insbesondere die erste Phase des Flugzeugentwurfsprozesses – der konzeptionelle Flugzeugentwurf – von Interesse. Denn im Zusammenspiel zwischen Flugzeugentwurf und -betrieb stehen vor allem die resultierenden Flugleistungen und operativen Eigenschaften im Mittelpunkt, die größtenteils im konzeptionellen Flugzeugentwurf festgelegt werden. Wie diese Eigenschaften im Detail erzielt werden (Vorentwurf und Detailentwurf), ist aus Betriebssicht und damit für die Flugzeug-Routen-Zuordnung weniger relevant.

Abbildung 2.1 zeigt, in Anlehnung an vergleichbare Abbildungen in z. B. *Anderson* (1999), *Stumpf* (2013) und *Raymer* (2018), schematisch den Prozessablauf im konzeptionellen Flugzeugentwurf. Zu Beginn des konzeptionellen Flugzeugentwurfs werden die Anforderungen an den Flugzeugentwurf (engl. Top-level aircraft requirements; TLARs) festgelegt. Die TLARs können z. B. Anforderungen bezüglich der Reichweite, Nutzlast, Fluggeschwindigkeit oder der Startstrecke des entworfenen Flugzeugs beinhalten.² Basierend auf den TLARs erfolgt anhand von Erfahrungswerten, Technologieannahmen und statistischen Zusammenhängen eine erste grobe Abschätzung der maximalen Abflugmasse (engl. Maximum Takeoff Mass; MTOM). Das MTOM ist aufgrund der elementaren flugmechanischen und

²Eine beispielhafte Sammlung der TLARs für die in Abschnitt 5.1 untersuchten Kurzstreckenflugzeugentwürfe ist in Tab. 5.1 auf Seite 114 gegeben.

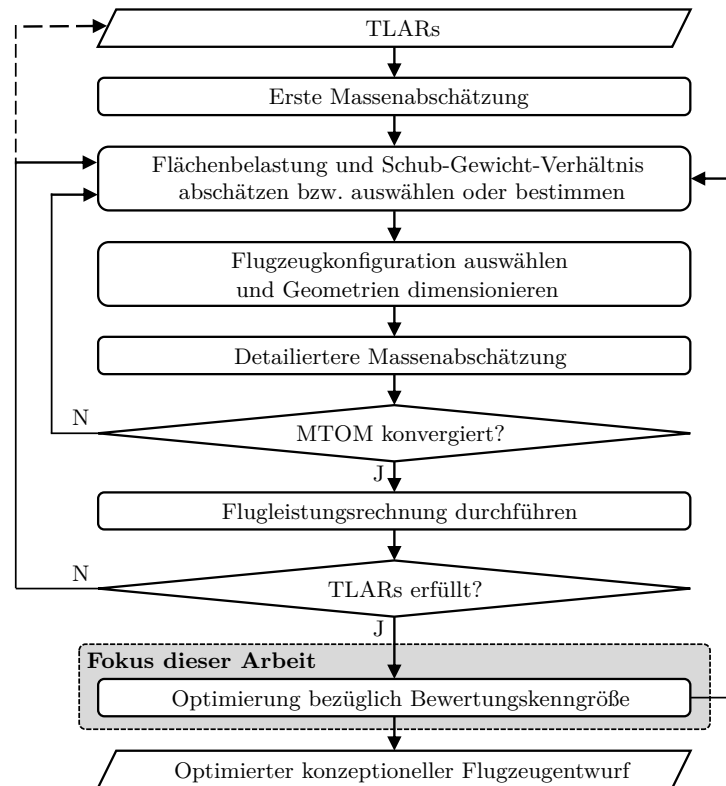


Abb. 2.1: Prozessablauf im konzeptionellen Flugzeugentwurf; eigene Darstellung in Anlehnung an *Anderson* (1999) und *Stumpf* (2013)

aerodynamischen Zusammenhänge zwischen Flugzeugmasse, erforderlicher Auftriebskraft, hieraus resultierendem Widerstand und dem erforderlichen Triebwerksschub zentral für die Flugleistung des entworfenen Flugzeugs.³ Basierend auf den TLARs und der ersten Massenabschätzung werden die Flächenbelastung (Verhältnis von Flugzeugmasse zur Flügelfläche) sowie das Schub-Gewicht-Verhältnis (Triebwerksschub geteilt durch Flugzeugmasse) abgeschätzt bzw. ausgewählt oder bestimmt. Hierfür wird genutzt, dass viele der gängigen TLARs, wie etwa die geforderte Startstrecke und die geforderte Reisefluggeschwindigkeit, anhand flugmechanischer Zusammenhänge direkt in Anforderungen an die Flächenbelastung und das Schub-Gewicht-Verhältnis überführt werden können. Im nächsten Schritt werden die bisher gewonnenen Erkenntnisse verwendet, um die konkrete Flugzeugkonfiguration auszuwählen sowie die Geometrien und die Integration von u. a. Flügel, Rumpf, Leitwerken, Triebwerken und Fahrwerk zu dimensionieren. Hieraus folgt eine detailliertere Massenabschätzung. Falls diese nicht mit den Ergebnissen der vorherigen (ersten) Massenabschätzung übereinstimmt, erfolgt eine Iterationsschleife, in der die Flächenbelastung, das Schub-Gewicht-Verhältnis sowie

³Eine höhere Flugzeugmasse erfordert eine größere Auftriebskraft, damit das Flugzeug abheben kann; eine größere Auftriebskraft führt zu einem größeren aerodynamischen Widerstand; um diesen größeren Widerstand zu überkommen, ist ein größerer Triebwerksschub erforderlich; ein größerer Triebwerksschub erfordert größere, schwere Triebwerke; dies führt erneut zu mehr Masse.

nachfolgend die Flugzeugkonfiguration und -geometrien um die detailliertere Massenabschätzung angepasst werden. Sobald das MTOM konvergiert ist, erfolgt eine Flugleistungsrechnung, um die Erfüllung der TLARs zu überprüfen. Werden die TLARs nicht erfüllt, wird der erarbeitete konzeptionelle Flugzeugentwurf durch eine Anpassung von Flächenbelastung, Schub-Gewicht-Verhältnis und Flugzeugkonfiguration iteriert. Sollten sich die TLARs im Laufe der Entwurfsiterationen als nicht zielführend erweisen, z. B. da sie in Kombination nicht erfüllbar sind oder sie ein unrealistisch hohes Technologieniveau für den angestrebten Markteintrittszeitpunkt erfordern, besteht die Möglichkeit, einzelne Anforderungen innerhalb der TLARs zu lockern. Werden die TLARs erfüllt, liegt ein gültiger konzeptioneller Flugzeugentwurf vor. An dieser Stelle des Entwurfsprozesses bleibt allerdings offen, ob weitere gültige und bezüglich einer zu definierenden Bewertungskenngröße, wie etwa dem Treibstoffverbrauch auf einer beispielhaften Flugmission, bessere Flugzeugentwürfe existieren. Daher besteht eine abschließende Iterationsschleife, deren Ergebnis ein hinsichtlich der TLARs und der Bewertungskenngröße optimierter konzeptioneller Flugzeugentwurf ist. Unterschiedliche Bewertungskenngrößen können hierbei, wie beispielsweise in *Johnson* (1990) demonstriert, zu verschiedenen jeweils optimalen Flugzeugentwürfen führen.

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf dieser, den Prozess des konzeptionellen Flugzeugentwurfs abschließenden Optimierung. Konkret wird mit der in dieser Arbeit vorgestellten Methodik ein neuartiger Ansatz für die Berechnung von Bewertungskenngrößen präsentiert: Anhand der modellierten Flugzeug-Routenzuordnung im globalen LTS werden voraussichtliche Einsatzszenarien für die untersuchten Flugzeugentwürfe ermittelt. Diese Einsatzszenarien können nach diversen Bewertungsmetriken ausgewertet werden und als neuartige Bewertungskenngröße im konzeptionellen Flugzeugentwurf dienen. Insgesamt kann so der voraussichtliche Betrieb des untersuchten Flugzeugentwurfs im globalen LTS bereits in dessen Bewertung und Optimierung berücksichtigt werden.

2.1.2 Bewertungsmetriken

Grundsätzlich kann jede Eigenschaft eines Flugzeugentwurfs, welche ein Ergebnis des Flugzeugentwurfsprozesses ist, z. B. Geometrien oder Systemmassen, als Bewertungsmetrik verwendet werden – dies schließt insbesondere die TLARs, welche Eingangsgrößen für den Entwurfsprozess sind, aus. Aussagekräftige Ergebnisse hinsichtlich einer Gesamtbewertung werden allerdings in erster Linie mit solchen Metriken erzielt, welche mehrere Eigenschaften eines Flugzeugentwurfs zu einer übergeordneten Leistungsfähigkeit zusammenfassen. Für die Bewertung von konzeptionellen Flugzeugentwürfen, wie sie im Rahmen dieser Arbeit im Fokus stehen, lassen sich die in der Literatur häufig verwendeten Bewertungsmetriken

(vgl. Tab. 2.1 in Unterabschnitt 2.1.3) hinsichtlich der drei Perspektiven (a) Treibstoffeffizienz, (b) Ökonomie und (c) Ökologie klassifizieren.⁴ Nachfolgend werden für diese drei Perspektiven einige konkrete Bewertungsmetriken eingeführt und motiviert.

(a) Treibstoffeffizienz

Eine Betrachtung der Treibstoffeffizienz, d. h. des transportarbeitspezifischen Treibstoffverbrauchs, ist aus dreierlei Gründen der naheliegendste Ansatz für die Gesamtbewertung eines Flugzeugentwurfs. Erstens fasst die Treibstoffeffizienz die erreichte Gesamteffizienz des Flugzeugentwurfs, einschließlich der Einflüsse der wesentlichen Entwurfsdisziplinen Aerodynamik, Antrieb, Struktur und Systeme, in einer Kennzahl zusammen (*Liem et al.*, 2012). Zweitens ist die Treibstoffeffizienz ein inhärentes Ergebnis des Flugzeugentwurfs, da sie essenziell ist, um die Erreichung der Auslegungsreichweite als übliches TLAR nachzuweisen. Drittens ist die Treibstoffeffizienz in erster Näherung auch geeignet, um die Ökonomie und Ökologie des Flugzeugentwurfs zu beschreiben, da der verbrauchte Treibstoff eine wesentliche Einflussgröße für die Betriebskosten sowie die Emissionen und die Klimawirkung des Flugzeugentwurfs darstellt (*Govindaraju et al.*, 2017).

Für den direkten Vergleich der Treibstoffeffizienz verschiedener Flugzeugentwürfe bietet es sich an, die Treibstoffeffizienz bei identischen Einsatzszenarien zu betrachten. Dies kann beispielsweise durch die Bildung des Verhältnisses aus Treibstoffverbrauch und den verfügbaren Sitzplatzkilometern (engl. Available Seat Kilometers; ASK)⁵ auf einer oder besser mehreren praxisrelevanten Flugmissionen erreicht werden.

(b) Ökonomie

Für die ökonomische Bewertung von Flugzeugentwürfen existieren verschiedene Metriken, welche die Sicht unterschiedlicher Stakeholder (z. B. Betreiber, Hersteller, Passagiere) wiedergeben.

Für die ökonomische Bewertung aus Betreiber- bzw. Airline-Sicht sind dies u. a. die direkten Betriebskosten (engl. Direct Operating Costs; DOC), z. B. in *Perez und Behdinan* (2002); der erzielbare Gewinn, z. B. in *Hwang und Martins* (2016); und der Nettobarwert (engl. Net Present Value; NPV), z. B. in *Wicke et al.* (2012). Ferner steht auch etwaigen operationellen Auswirkungen der untersuchten Flugzeugentwürfe ein ökonomischer Gegenwert gegenüber, sodass z. B. die Anzahl der benötigten Flugzeugeinheiten, z. B. in *Proesmans und Vos* (2022); und die Anzahl der ermöglichten Direktverbindungen, z. B. in *Grimme et al.* (2021), als Metriken aus Airline-Sicht von Interesse sein können.

⁴Je nach Ziel und Detailgrad des Flugzeugentwurfs können auch weitere Perspektiven, beispielsweise Sicherheit, im Fokus der Entwurfsbewertung stehen.

⁵ASK als Produkt aus der Distanz und der Anzahl an angebotenen Sitzen der Flugverbindung.

Die DOC umfassen die vom Flugzeugentwurf abhängigen Kosten für den Flugbetrieb (*Clark*, 2017). Dies beinhaltet u. a. die Kosten für Treibstoff, Flugzeugbesatzung, Flughafen- und Navigationsgebühren, den Wertverlust des Flugzeugs sowie dessen Wartung, Reparatur und Überholung (engl. Maintenance, Repair, Overhaul; MRO). In Abb. 2.2 ist beispielhaft die relative Zusammensetzung der DOC für einen Flug des Flugzeugtyps Airbus A320ceo zwischen Hamburg und Lissabon im Jahr 2019 dargestellt. Die ökonomische Bewertung eines Flugzeugentwurfs anhand des voraussichtlich erzielbaren Gewinns basiert auf der Betrachtung der Differenz zwischen den möglichen Erlösen durch Ticketverkäufe und den DOC. Die Erlöse durch Ticketverkäufe sind hierbei eine Schnittstelle zur Passagiersicht, da die Zahlungsbereitschaft der Passagiere durch die Attraktivität des Transportangebots (z. B. Reisezeitpunkt, Reisedauer, Umstiege, Kabinenprodukt und Service) beeinflusst wird (*Balcombe et al.*, 2009; *Belobaba et al.*, 2009). Die Betrachtung des NPV erweitert die ökonomische Bewertung aus Airline-Sicht um eine zeitliche Perspektive, indem der zeitliche und verzinste Verlauf von Investitionen (z. B. Flugzeugkauf) und Cashflows (z. B. Ticketverkäufe) berechnet wird, um die Gesamtwirtschaftlichkeit abzubilden.

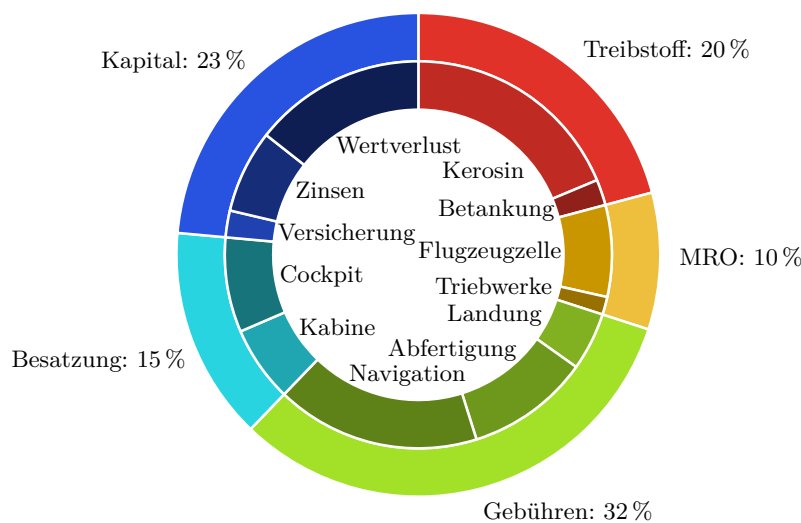


Abb. 2.2: Zusammensetzung der DOC für einen Flug des Flugzeugtyps Airbus A320ceo von Hamburg nach Lissabon im Jahr 2019 gemäß der Modellierung aus Unterabschnitt 4.3.1

Die Anzahl der benötigten Flugzeugeinheiten, um einen Flugplan operationell umsetzen und anbieten zu können, ist dahingehend aus Airline-Sicht eine relevante Metrik, dass für jede Flugzeugeinheit Besatzungen, Flughafenflächen und Flughafenslots zur Verfügung stehen müssen und mit diesen i. d. R. knappen Ressourcen zusätzliche Akquirierungs-, Betriebs- und Verwaltungskosten einhergehen. Die Anzahl der durch einen Flugzeugentwurf ökonomisch sinnvoll ermöglichten Direktverbindungen kombiniert die technischen Nutzlast-Reichweiten-Eigenschaften mit den ökonomischen DOC- und Ticketpreis-Eigenschaften eines Flugzeugentwurfs. Zwar

sind Passagiere aufgrund des erhöhten Komforts und der Zeitersparnis von Direktverbindungen i. d. R. bereit, für diese im Rahmen ihrer individuellen Möglichkeiten Aufpreise zu zahlen, allerdings werden parallel dennoch ausreichend hohe Flugfrequenzen eingefordert, um möglichst zeitnah zu den favorisierten Zeitpunkten reisen zu können. Hieraus folgt, dass, um das Potential von höheren Ticketpreisen für Direktverbindungen auf Routen mit geringer Nachfrage heben zu können, kleinere Flugzeuge erforderlich sind. Dies steht im direkten Kontrast zur Verwendung von größeren Flugzeugen, welche durch Skaleneffekte zu einer Reduzierung der DOC führen können. In der Folge ist die Anzahl der durch einen Flugzeugentwurf ökonomisch sinnvoll ermöglichten Direktverbindungen eine Metrik, welche die Eigenschaften Reichweite, Flugzeuggröße, Betriebskosten und Passagierattraktivität ins Verhältnis setzt.

Für die ökonomische Bewertung von Flugzeugentwürfen aus Hersteller-Sicht sind u. a. die einmaligen Kosten (engl. Non-recurring Cost; NRC) und die wiederkehrenden Kosten (engl. Recurring Cost; RC), jeweils z. B. in *Risse et al.* (2016), sowie der NPV, z. B. in *Desai et al.* (2019), relevant. Die NRC beinhalten die einmalig, d. h. unabhängig von der gebauten Anzahl an Flugzeugeinheiten, anfallenden Kosten für die Entwicklung des Flugzeugs. Dies umfasst u. a. die Forschung und Entwicklung von Technologien; die Auslegung und Konstruktion des Flugzeugs; die Simulation, den Bau und das Testen etwaiger Prototypen; das Aufbauen der Fertigungskapazitäten; sowie die Flugerprobung. Die RC fallen für jede gebaute Einheit an und beinhalten u. a. die Arbeits- und Materialkosten der eigenständig produzierten Teile, die Kaufpreise der zugelieferten Teile sowie die Arbeitskosten des finalen Zusammenbaus. Die Betrachtung des NPV erweitert die ökonomische Bewertung der Hersteller-Sicht, analog zur Airline-Sicht, um die Perspektiven Zeit und Erlöse, indem der zeitliche und verzinsten Verlauf von Investitionen (z. B. NRC) und Cashflows (z. B. Flugzeugverkäufe) berechnet wird.

In den nachfolgend in Unterabschnitt 2.1.3 beispielhaft betrachteten Flugzeugentwurfstudien aus der Literatur ist die Betrachtung der DOC aus Airline-Sicht die meistverbreitete ökonomische Metrik. Dies resultiert zum einen daraus, dass eine Vielzahl an veröffentlichten Modellen zur Berechnung der DOC existiert (*Pohya et al.*, 2018) und dass diese meist aus wenigen analytischen Gleichungen bestehen, sodass die Anwendung der Metrik vergleichsweise einfach ist. Zum anderen fassen die DOC die wesentlichen ökonomischen Leistungsparameter eines Flugzeugentwurfs zusammen und beinhalten direkt oder indirekt die Perspektive der Airlines (die DOC beeinflussen die Profitabilität), der Passagiere (die DOC sind maßgeblich für die Ticketpreise) und der Hersteller (die DOC sind ein wesentliches Verkaufsargument und beinhalten den Kauf- bzw. Verkaufspreis des Flugzeugs).

(c) Ökologie

Für die ökologische Bewertung von Flugzeugentwürfen existiert ebenfalls eine Vielzahl verschiedener Metriken. Um die globalen ökologischen Auswirkungen (*Lee et al.*, 2021) zu untersuchen, werden u. a. die chemischen und partikelförmigen Emissionen des Flugbetriebs einschließlich der daraus resultierenden Klimawirkung betrachtet, z. B. in *Linke et al.* (2020). Ergänzend können im Rahmen einer Lebenszyklusanalyse (engl. Life Cycle Assessment; LCA) umfassende Klimawirkungsuntersuchungen aller weiteren Lebenszyklusphasen durchgeführt werden, wie z. B. in *Howe et al.* (2013). Um die lokalen ökologischen Auswirkungen des Luftverkehrs (*Brooker*, 2006) in der Bewertung von Flugzeugentwürfen zu berücksichtigen, werden u. a. die Lärmemissionen, z. B. in *Brett* (2014), und die gesundheitsschädlichen chemischen und partikelförmigen Emissionen bei Start und Landung, z. B. in *Abu Salem et al.* (2023), analysiert.

Die chemischen und partikelförmigen Emissionen des Betriebs konventioneller, mit Kerosin betriebener Flugzeuge umfassen u. a. die Emissionsspezies Kohlendioxid (CO_2), Wasserdampf (H_2O), Schwefeldioxid (SO_2), Stickoxide (NO_x), Kohlenmonoxid (CO), unverbrannte Kohlenwasserstoffe (UCH) und Feinstaub. Die Emissionsmengen für CO_2 , H_2O und SO_2 folgen aus der stöchiometrischen Verbrennung des Kerosins (C_yH_{2y}) sowie dem chargenabhängigen Grad der natürlichen Schwefelverunreinigungen des Kerosins (*European Union Aviation Safety Agency*, 2010a) und sind demnach in linearer Abhängigkeit des Treibstoffverbrauchs zu berechnen (*Risse et al.*, 2016). Die Emissionsmengen von NO_x , CO , UCH und Feinstaub resultieren aus der realen (unvollständigen) Verbrennung im Flugtriebwerk und sind infolgedessen abhängig von den konkreten Lastzuständen des Triebwerks während des Fluges sowie nicht-proportional zum Treibstoffverbrauch (*Bräunling*, 2015). Die Klimawirkung der Flugemissionen, die etwa zu einem Drittel aus CO_2 -Effekten und zu zwei Dritteln aus Nicht- CO_2 -Effekten besteht, hängt, insbesondere aufgrund der räumlichen Abhängigkeit der Nicht- CO_2 -Effekte, nichtlinear vom Verlauf der Flugmissionen ab (*Lee et al.*, 2021). Dementsprechend werden für die genaue Auswertung von Klimawirkungsmodellen zusätzlich zu den Emissionsmengen – diese sind nur als stark vereinfachende Näherung für die Bewertung der Klimawirkung geeignet (*Grewe und Dahlmann*, 2015) – auch die zeitliche und räumliche Verteilung der Emissionen benötigt. Für die Beschreibung der Klimawirkung sind verschiedene Klimametriken etabliert, welche auf Basis unterschiedlicher physikalischer Größen hergeleitet werden und für die Beantwortung verschiedener, relevanter Fragestellungen verwendet werden können (*Grewe und Dahlmann*, 2015). In den in Unterabschnitt 2.1.3 beispielhaft betrachteten Flugzeugentwurfsstudien aus der Literatur wird insbesondere die Klimawirkungsrechnung als mittlere Temperaturänderung (engl. Average Temperature Response; ATR) über den Zeitraum von 100 Jahren (ATR_{100}) verwendet, z. B. in *Dallara* (2011); *Risse et al.* (2016); *Linke et al.* (2020); *Proesmans und Vos* (2022); *Radhakrishnan et al.* (2022). Im Rahmen einer LCA werden zusätzlich zur Klimawirkung

des Flugbetriebs auch weitere ökologische Folgen, sowohl im Betrieb als auch in der Herstellung sowie der Außerdienststellung des untersuchten Flugzeugentwurfs, analysiert. Hierzu werden u. a. die Metriken Landnutzung, Mineralnutzung, Ozonschichtabbau, Versauerung von Frischwasser sowie Eutrophierung von Frisch- und Meerwasser verwendet (*Howe et al.*, 2013).

Die Bewertung von Flugzeugentwürfen anhand ihrer Lärmemissionen ist insbesondere aus Sicht der Flughäfen und deren Anwohnern von Interesse, denn zum einen sind Flugzeuge bei Start und Landung durch hohe Schubanforderungen und die benötigten aerodynamischen Konfigurationen (ausgefahrenes Fahrwerk und ausgefahrene Klappen als Auftriebshilfen) besonders laut und zum anderen wird der Lärm bei Start und Landung in unmittelbarer Nähe zu Mensch und Natur emittiert (*Brooker*, 2006). Als Metriken zur Quantifizierung der Lärmemissionen können beispielsweise die zur Flugzeugzertifizierung benötigten Messungen an den drei Referenzpunkten Anflug, Überflug und seitlich zur Start- und Landebahn (*International Civil Aviation Organization*, 2017) oder die Größe der flughafen- und flugzeugtypspezifischen Lärmkonturflächen (*International Civil Aviation Organization*, 2016) verwendet werden.

Für die Bewertung von Flugzeugentwürfen anhand ihrer lokalen Einflüsse auf die Luftqualität in der Umgebung von Flughäfen sind als Metriken der Treibstoffverbrauch und die Emissionen während des Start-Lande-Zyklus (engl. Landing and Take Off Cycle; LTO-Zyklus) geeignet. Der LTO-Zyklus fasst die typischen Triebwerksanforderungen bei Start, Landung und Rollen am Boden standardisiert zusammen⁶ und ist, in Analogie zu den Lärmmessungen an Referenzpunkten, eine Zertifizierungsgrundlage für Triebwerke (*International Civil Aviation Organization*, 2023).

2.1.3 Einsatzszenarien

Neben unterschiedlichen Bewertungsmetriken umfassen die Flugzeugentwurfsstudien in der Literatur auch eine Vielzahl unterschiedlicher Ansätze zur Ermittlung von Einsatzszenarien, für die die Flugzeugentwürfe bewertet werden. Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über eine beispielhafte Auswahl an Flugzeugentwurfsstudien. Es ist jeweils angegeben, welcher Ansatz für die Berücksichtigung von Einsatzszenarien verfolgt wird, ob der Entwurf und/oder die Einsatzszenarien aufgrund der ermittelten Ergebnisse modifiziert werden sowie welche Perspektiven durch die berücksichtigten Metriken betrachtet werden und was die hauptsächliche Zielmetrik für den Flugzeugentwurf ist. Nachfolgend werden die Besonderheiten der einzelnen Studien, gruppiert nach den Ansätzen für die Berücksichtigung der Einsatzszenarien, kurz zusammengefasst. Um die Unterschiede zwischen den verschiedenen

⁶Die konkreten Lastzustände sind: (i) 4 Minuten bei 30 % Triebwerksschub (Landeanflug); (ii) 26 Minuten bei 7 % Triebwerksschub (Rollen am Boden); (iii) 42 Sekunden bei 100 % Triebwerksschub (Start) und (iv) 132 Sekunden bei 85 % Triebwerksschub (Steigflug) (*International Civil Aviation Organization*, 2023)

Ansätzen für die Berücksichtigung der Einsatzszenarien zu unterstreichen, sind in Abb. 2.3 vereinfachende Schaubilder der angewandten Methodiken gegeben.

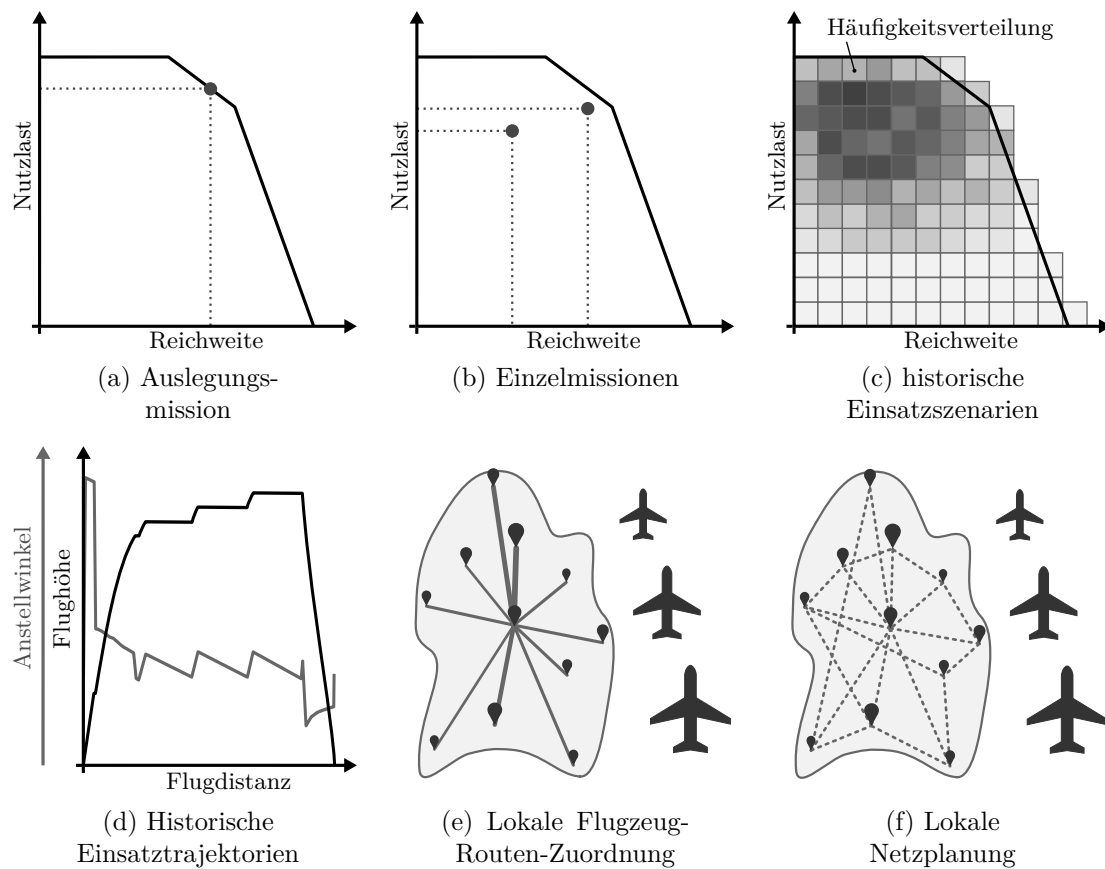


Abb. 2.3: Visualisierung der Ansätze zur Ermittlung von Einsatzszenarien für die Bewertung von Flugzeugentwürfen (vgl. Tab. 2.1)

(a) Auslegungsmission

In den Studien von *Economou et al.* (2011), *Martinez-Val et al.* (2011) und *Proesmans und Vos* (2022) werden Flugzeugentwürfe durchgeführt und anhand ihrer Eigenschaften auf der Auslegungsmission optimiert (vgl. Abb. 2.3a). *Economou et al.* (2011) untersuchen den Treibstoffverbrauch eines zukünftigen Großraumflugzeugs in Abhängigkeit von den TLARs sowie den Unsicherheiten in den Leistungsfähigkeiten zukünftiger Technologien. *Martinez-Val et al.* (2011) untersuchen, inwieweit die Reduzierung der Auslegungsreichweite der Flugzeuge im LTS zu einer Verbesserung der allgemeinen Treibstoff- und Kosteneffizienz (DOC) führt. In *Proesmans und Vos* (2022) wird ein Kurzstreckenflugzeug zur Reduzierung der Klimawirkung (ATR_{100}) entworfen und anhand seiner Flugleistungen auf der Auslegungsmission optimiert. Zusätzlich werden auch die Auswirkungen auf Treibstoffverbrauch, Flugzeit und DOC untersucht sowie eine Pareto-Front zwischen Kosten und Klimawirkung gebildet.

Tab. 2.1: Literatur zur Bewertung von Flugzeugentwürfen kategorisiert nach den verschiedenen Ansätzen zur Berücksichtigung von Einsatzszenarien, den Anpassungen von Flugzeugentwurf und Flugzeugeinsatz basierend auf Rückkopplungen zwischen diesen und den Perspektiven etwaiger Bewertungsmetriken

Quelle	Ansatz für Einsatz- szenarien	Anpassung		Metrik	Treibstoff	Ökonomie	Ökologie
		Entwurf	Einsatz				
<i>Perez und Behdinan (2002)</i>	EM	•				•	
<i>Crossley et al. (2004); Mane et al. (2007);</i>	LFRZ	•	•		○	•	
<i>Mane und Crossley (2012)</i>	LNP	•	•		○	•	
<i>Taylor und de Weck (2007)</i>	LFRZ	•	•		○	○	•
<i>Bower und Kroo (2008)</i>	EM	•			○	○	•
<i>Dallara (2011)</i>	AM	•			•		
<i>Economon et al. (2011)</i>	AM	•			○	•	
<i>Martinez-Val et al. (2011)</i>	AM	•			○	•	
<i>Jansen und Perez (2012, 2013, 2014);</i>	LFRZ	•	•		○	•	
<i>Jansen (2015); Jansen und Perez (2016)</i>	LNP	•	•		○	•	
<i>Lehner et al. (2012)</i>	HET	•			•		
<i>Liem et al. (2012, 2015)</i>	HES				○	•	
<i>Wicke et al. (2012)</i>	EM						•
<i>Howe et al. (2013)</i>	HES	•					
<i>McDonald (2013)</i>	LFRZ		•		○	•	
<i>Roszkopf et al. (2013)</i>	HES	•	○		•	•	○
<i>Brett (2014)</i>	GFW	•	•		•		
<i>Yutko (2014)</i>	ST		•			•	
<i>Desai et al. (2016, 2019)</i>	LFRZ	•	•			•	
<i>Hwang und Martins (2016)</i>	EM					•	•
<i>Risse et al. (2016)</i>	LFRZ	•	•		•		
<i>Govindaraju et al. (2017)</i>	LNP	•	•		○	•	
<i>Perez und Jansen (2017)</i>	LFRZ	•	•			•	
<i>Roy et al. (2017, 2018)</i>	HES	•			•		
<i>Cai et al. (2019)</i>	HET	•			•		
<i>Kim et al. (2020)</i>	HES				○	○	•
<i>Linke et al. (2020)</i>	GNP		•				
<i>Grimme et al. (2021)</i>	AM	•			○	○	•
<i>Proesmans und Vos (2022)</i>	HES	•			○	○	•
<i>Radhakrishnan et al. (2022)</i>	HES				○	○	•
<i>Silberhorn et al. (2022)</i>	AM/EM	•			•		○
<i>Abu Salem et al. (2023)</i>	LNP	•	•		•	○	
<i>Hoogreef et al. (2023)</i>	AM/HES	•			•	○	○
<i>Zhang et al. (2023)</i>							

AM: Auslegungsmission; EM: Einzelmissionen; GFW: globale Flugzeugwahl;
GNP: globale Netzplanung; HES: historisches Einsatzszenario; HET: historische
Einsatztrajektorien; LFRZ: lokale Flugzeug-Routen-Zuordnung; LNP: lokale
Netzplanung; ST: Spieltheorie; •: im Fokus; ○: (teilweise) berücksichtigt

(b) Einzelmissionen

Fünf der Studien aus Tab. 2.1 bewerten Flugzeugentwürfe anhand einer oder mehrerer Einzelmissionen abweichend von der Auslegungsmission (vgl. Abb. 2.3b). *Perez und Behdinan* (2002) analysieren den Entwurf eines Flugzeugs, welches möglichst kosteneffizient (DOC) auf zwei gegensätzliche Flugmissionen, einem Kurzstreckenflug über 2800 km und einem Langstreckenflug über 10 200 km, eingesetzt werden kann. In *Dallara* (2011) wird der Entwurf eines Kurzstreckenflugzeugs für 3000 km hinsichtlich der Klimawirkung (ATR_{100}) optimiert und auf einer Flugmission mit einer Länge von 1000 km basierend auf Treibstoffverbrauch, Flugzeiten, DOC und Klimawirkung bewertet. *Howe et al.* (2013) führen eine LCA des bestehenden Flugzeugtyps Airbus A320ceo durch, wobei der Flugbetrieb durch eine einzelne Flugmission mit einer Länge von 1485 km approximiert wird. *Risse et al.* (2016) verwenden für die ökonomische (DOC, RC, NRC) und ökologische Bewertung (Emissionen, ATR_{100}) eines statischen Kurzstreckenflugzeugentwurfs zwei unterschiedliche Missionen: eine durch die Reichweite beschränkte Mission (5100 km) und eine deutlich kürzere Mission (900 km). In *Abu Salem et al.* (2023) wird die Auslegung eines hybrid-elektrischen Antriebssystems für ein Kurzstreckenflugzeug hinsichtlich zweier Anwendungsfälle vorgestellt. In einem Auslegungsfall wird auf Basis einer Vielzahl von Einzelmissionen der Treibstoffverbrauch während des LTO-Zyklus reduziert, um Emissionen in Flughafennähe zu vermeiden. Im zweiten Anwendungsfall wird das hybride Antriebssystem so ausgelegt, dass der Treibstoffverbrauch für verschiedene Auslegungsmissionen minimal ist.

(c) Historische Einsatzszenarien

Um den potentiellen Flugbetrieb mitsamt variierender Missionsanforderungen in höherem Detailgrad, als durch Einzelmissionen dargestellt, in der Bewertung der untersuchten Flugzeugentwürfe zu berücksichtigen, werden in acht der beispielhaften Literaturstudien historische Einsatzszenarien verwendet (vgl. Abb. 2.3c). Dies bedeutet, dass eine historische Häufigkeitsverteilung der Einsatzdistanzen und -nutzlasten für die Bewertung der untersuchten Flugzeugentwürfe verwendet wird. *Wicke et al.* (2012) wenden die historische Distanzverteilung des Flugzeugtyps Airbus A320ceo als Einsatzszenario für die Bewertung der ökonomischen Implikationen (u. a. NPV) eines Kurzstreckenflugzeugs mit natürlicher Laminarhaltung an. *McDonald* (2013) leitet aus dem Vergleich von Flugzeugeigenschaften und historischen Einsatzszenarien TLARs für zukünftige Flugzeugentwürfe ab und untersucht, inwieweit durch reduzierte Entwurfsanforderungen die Masse zukünftiger Flugzeugentwürfe verringert werden kann. *Brett* (2014) untersucht den Einfluss reduzierter Reichweiten und Reisefluggeschwindigkeiten auf die Effizienz des LTS, indem neue Flugzeugentwürfe mit veränderten Auslegungspunkten die Bestandsflotte bei konstanten Einsatzszenarien ersetzen. Es wird zwischen Treibstoff- und DOC-optimalen Flugzeugentwürfen unterschieden, wobei jeweils auch NO_x -Emissionen und Lärmkonturflächen analysiert werden. Falls die Reichweite der

Neuentwürfe nicht für das Befliegen der historischen Einsatzszenarien ausreicht, werden auch Zwischenlandungen und ihre Implikationen auf Treibstoffverbrauch, Kosten, Emissionen sowie Sicherheit berücksichtigt.⁷ In *Cai et al.* (2019) werden historische Einsatzszenarien für die treibstoffoptimale Auslegung von jeweils einem Regional-, Kurz- und Langstreckenflugzeugentwurf verwendet, wobei die Zielfunktion der Auslegungsoptimierung die Leistungseigenschaften innerhalb wie außerhalb des Auslegungspunkts berücksichtigt. *Linke et al.* (2020) nehmen eine ökologische Bewertung (Emissionen und ATR_{100}) unterschiedlicher Entwürfe eines neuen Mittelstreckenflugzeugs vor. Die Einsatzszenarien der untersuchten Flugzeugentwürfe werden anhand der historischen Einsatzszenarien von Vorgängerflugzeugtypen ermittelt (einmal airlinespezifisch, einmal global). Allerdings werden die untersuchten Flugzeugentwürfe nur auf solchen Routen eingesetzt, auf denen die DOC geringer sind als die der zu ersetzenden Vorgängerflugzeuge. Ein analoges Vorgehen wird in *Silberhorn et al.* (2022) zur Bewertung von Entwürfen für ein Mittelstreckenflugzeug mit alternativen Energieträgern (SAF oder Flüssigwasserstoff) angewandt. In *Radhakrishnan et al.* (2022) wird unter Berücksichtigung von Treibstoffverbrauch, Flugzeit und DOC eine ökologische Optimierung (ATR_{100}) eines Langstreckenflugzeuges basierend auf den historischen Einsatzszenarien des Flugzeugtyps Airbus A350-900 durchgeführt. *Zhang et al.* (2023) verwenden einen Clustering-Algorithmus, um aus dem historischen Einsatzszenario des Flugzeugtyps Boeing 737-800 fünf repräsentative Auslegungsmissionen für einen hybrid-elektrischen Flugzeugentwurf zu identifizieren. Für die resultierenden Flugzeugentwürfe werden die Einflüsse unterschiedlicher Auslegungsmissionen und Technologieannahmen auf Treibstoffverbrauch, DOC und Emissionen (insbesondere CO_2 und NO_x) analysiert.

(d) Historische Einsatzstrajektorien

In den Studien von *Liem et al.* (2012, 2015) und *Kim et al.* (2020) werden Informationen über die im historischen Einsatz erfliegenen Flugzustände verwendet, um neue Flugzeugentwürfe durchzuführen (vgl. Abb. 2.3d). In *Liem et al.* (2012, 2015) wird aus den historischen Einsatzstrajektorien eines existierenden Langstreckenflugzeugs (Boeing 777-200ER) eine Vielzahl an Betriebspunkten (u. a. Machzahl, Anstellwinkel und Flughöhe) identifiziert, um diese für die gekoppelte Struktur- und Aerodynamikauslegung eines neuen, treibstoffeffizienten Langstreckenflugzeugentwurfes zu verwenden. In *Kim et al.* (2020) wird aus Flugbewegungen am Flughafen HKG (Hong Kong International) zuerst ein Flugziel für eine repräsentative Langstreckenmission identifiziert. Anschließend werden die historischen Flugtrajektorien auf dieser repräsentativen Langstreckenmission ausgewertet, um

⁷Für eine detaillierte Untersuchung von Zwischenlandungen als operationelle Maßnahme zur Reduzierung der Klimawirkung des Luftverkehrs sei auf *Linke* (2016) und *Linke et al.* (2017) verwiesen.

eine repräsentative Flugtrajektorie unter Berücksichtigung operationeller Randbedingungen, wie *Step-Climbs*⁸ und Luftverkehrsflussmanagement (engl. Air Traffic Flow Management; ATFM), zu erstellen. Diese wird für die Auslegung eines treibstoffeffizienten Langstreckenflugzeugentwurfs verwendet.

(e) Lokale Flugzeug-Routen-Zuordnung

Um unter Berücksichtigung der Eigenschaften des untersuchten Flugzeugentwurfs Einsatzszenarien für dessen Bewertung und/oder Auslegung zu bestimmen, wird in 14 der beispielhaften Literaturstudien die lokale Flugzeug-Routen-Zuordnung einer einzelnen Airline modelliert (vgl. Abb. 2.3e).⁹ Die Idee hinter diesem Ansatz ist, dass der Flugzeugentwurf nicht isoliert betrachtet wird, sondern gemeinsam mit dem angestrebten Routennetzwerk und der Bestandsflotte einer Airline, um so die gesamte Flugzeug-Routen-Zuordnung hinsichtlich einer Zielmetrik (z. B. DOC oder Profit) zu optimieren. Wenn Flugzeugentwurf als auch Flugzeug-Routen-Zuordnung gemeinsam optimiert werden, resultiert aus der Kopplung der Modelle für den Flugzeugentwurf (i. d. R. nichtlineare Optimierungsprobleme) mit den Modellen für die Flugzeug-Routen-Zuordnung (i. d. R. gemischt-ganzzahlige lineare Optimierungsprobleme; vgl. Unterabschnitt 2.2.1) allerdings die komplexe Gesamtmodellstruktur eines gemischt-ganzzahligen nichtlinearen Optimierungsproblems. Da Optimierungsprobleme dieser Art verhältnismäßig schwierig zu lösen sind, werden in den Literaturstudien, wie nachfolgend beschrieben, vor allem Beispielproblemstellungen geringer Größe untersucht sowie vereinfachende Lösungsansätze diskutiert.

In *Crossley et al.* (2004) wird als Anwendungsfall die Flugzeug-Routen-Zuordnung einer Airline mit drei Routen, einer Bestandsflotte aus zwei Flugzeugtypen und einem zu entwerfenden Kurzstreckenflugzeug hinsichtlich der DOC optimiert. Mit einem hierarchischen Zerlegungsansatz wird die gekoppelte Optimierung von Flugzeug-Routen-Zuordnung und Flugzeugentwurf in ein übergeordnetes Optimierungsproblem mit den zwei Teilsystemen Flugzeug-Routen-Zuordnung und Flugzeugentwurf aufgeteilt. Einerseits ermöglicht dies, die benötigte Rechenzeit für die untersuchte Fragestellung von bis zu 85 Minuten bei direkter Lösung des gemischt-ganzzahligen nichtlinearen Optimierungsproblems auf bis zu 20 Sekunden zu reduzieren. Andererseits steigt durch den Zerlegungsansatz insbesondere bei größeren Anwendungsfällen die Wahrscheinlichkeit, nur ein lokales Optimum statt eines globalen Optimums zu finden. *Mane et al.* (2007) erweitern den Zerlegungsansatz aus *Crossley et al.* (2004), um den Entwurf eines Kurzstreckenflugzeugs mit

⁸Methode des Steigflugs während des Reiseflugs, bei der das Flugzeug in mehreren diskreten, stufenweisen Schritten aufsteigt, um die Treibstoffeffizienz zu maximieren.

⁹„lokal“ bedeutet hier, dass ausschließlich eine (kleine) Untermenge an Routen und Flugzeugtypen einer einzelnen Airline berücksichtigt wird, und steht insbesondere im Kontrast zu der globalen, airlineübergreifenden Flugzeug-Routen-Zuordnung, welche z. B. durch das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell abgebildet wird.

der Flugzeug-Routen-Zuordnung einer Airline mit 31 Routen und einer Bestandsflotte aus elf Flugzeugtypen zu koppeln. In *Mane und Crossley* (2012) wird als zusätzliche Erweiterung die Unsicherheit in der Passagiernachfrage pro Route berücksichtigt und in *Govindaraju et al.* (2017) wird der Einfluss der gegenläufigen Zielmetriken (i) Treibstoffverbrauch minimieren und (ii) Transportproduktivität¹⁰ maximieren auf die resultierenden Flugzeugentwürfe untersucht. *Bower und Kroo* (2008) legen ein Kurzstreckenflugzeug anhand von 18 Entwurfsvariablen für ein Routennetzwerk mit vier Flughäfen und acht Routen aus. Hierbei wird insbesondere der Einfluss der unterschiedlichen Zielmetriken DOC, CO₂-Emissionen (linear abhängig vom Treibstoffverbrauch) und NO_x-Emissionen untersucht. *Roszkopf et al.* (2013) koppeln Flugzeugentwurf, Flugzeug-Routen-Zuordnung und Flottenplanung. Ausgehend von dem Routennetzwerk und der Bestandsflotte einer beispielhaft untersuchten Airline können zusätzliche vorberechnete Kurzstreckenflugzeugentwürfe variabler Größe und Reichweite unter Anpassung der Flugzeug-Routen-Zuordnung in die Flotte eingeführt werden, um den Gesamtprofit der Airline im Untersuchungszeitraum von zehn Jahren zu maximieren. Die aufeinander aufbauenden Studien von *Jansen* (2015) und *Jansen und Perez* (2012, 2013, 2014, 2016) untersuchen unterschiedliche Erweiterungen der Kopplung von Flugzeugentwurf und lokaler Flugzeug-Routen-Zuordnung: In *Jansen und Perez* (2012) werden mehrere Flugzeugtypen als Flugzeugfamilie ausgelegt; in *Jansen und Perez* (2013) wird die Unsicherheit in der Passagiernachfrage berücksichtigt und in *Jansen und Perez* (2014) wird der Einfluss der betrachteten Märkte untersucht. In *Jansen* (2015) und *Jansen und Perez* (2016) werden diese Erweiterungen kombiniert und zwei Flugzeugfamilien mit jeweils drei Flugzeugtypen für ein nordamerikanisches sowie für ein europäisches Kurz- und Mittelstreckennetzwerk mit jeweils 48 Routen ausgelegt. *Hwang und Martins* (2016) maximieren den Profit einer Airline beim Flugbetrieb auf einem Routennetzwerk mit 128 Routen (Kurz-, Mittel- und Langstrecke), indem, ergänzend zur Bestandsflotte aus vier Flugzeugtypen, ein weiterer Flugzeugtyp entworfen wird und zusätzlich die Fluggeschwindigkeiten sowie die Flughöhen entlang der Flugrouten aller Flugzeugtypen optimiert werden. In *Roy et al.* (2017, 2018) wird ein neuer Algorithmus für die Lösung des gemischt-ganzzahligen nichtlinearen Optimierungsproblems der Kopplung von Flugzeugentwurf und Flugzeug-Routen-Zuordnung vorgestellt. Im Gegensatz zu dem weit verbreiteten Zerlegungsansatz kann durch den neuen Lösungsalgorithmus eine engere Kopplung der beiden Subprobleme aufrechterhalten werden. Hieraus resultiert, dass für die vorgestellten Anwendungsfälle mit acht bzw. elf Routen, jeweils zwei bestehenden Flugzeugtypen und einem auszulegendem Flugzeugentwurf bessere Optimierungsergebnisse erzielt werden; d. h., Flugzeugentwurf und Flugzeug-Routen-Zuordnung sind enger aufeinander abgestimmt und es werden größere Profite für die jeweilig untersuchten Airlines erzielt.

¹⁰Konkret ist in der Studie von *Govindaraju et al.* (2017) hiermit die Geschwindigkeit gemeint, mit der die Nutzlast das Ziel erreicht.

(f) Lokale Netzplanung

Ansätze zur Bewertung von Flugzeugentwürfen anhand der lokalen Netzplanung berücksichtigen zusätzlich zur Flugzeug-Routen-Zuordnung auch die Erstellung des Routennetzwerks einer Airline basierend auf der Passagiernachfrage zwischen Start- und Zielflughafen (vgl. Abb. 2.3f).⁹ Hieraus ergeben sich zusätzliche Freiheitsgrade zur Steuerung der Passagierflüsse über Direkt- oder Umsteigeverbindungen, welche für den Entwurf eines optimierten Flugzeugentwurfs genutzt werden können.

Taylor und de Weck (2007) untersuchen den Anwendungsfall eines Netzwerks von sieben Flughäfen in den USA, zwischen denen Nachfrage nach Frachttransport besteht. Um bei gegebener Nachfrage ein ideales Routennetzwerk in Kombination mit einem idealen, zu entwerfenden Flugzeug zu finden, wird zur Lösung des Optimierungsproblems ein heuristischer *Simulated- Annealing*-Algorithmus mit eingebettetem linearen Programm (LP) verwendet. *Lehner et al.* (2012) wenden, in Anlehnung an u. a. *Mane et al.* (2007), einen Zerlegungsansatz an, um die Reichweite und die Sitzplatzanzahl eines neuen Kurzstreckenflugzeugs für ein Passagiernachfragenetzwerk zwischen fünf europäischen Flughäfen und in Ergänzung zu zwei bestehenden Flugzeugtypen zu optimieren. Die Struktur des Routennetzwerks sieht dabei vor, dass als Alternative zu möglichen Direktflügen nur an einem der untersuchten Flughäfen umgestiegen werden kann (Hub-Flughafen). Die Zielmetrik ist der Profit der Airline, sodass in Ergänzung zur Erstellung des Routennetzwerks und der Flugzeug-Routen-Zuordnung auch die Passagierwahl der Reiserouten inkl. Ticketpreisen modelliert wird. *Perez und Jansen* (2017) bauen auf den Arbeiten von *Jansen und Perez* (2016) auf und legen eine Flugzeugfamilie mit drei Flugzeugtypen aus, um die Passagiernachfrage zwischen 15 kanadischen Flughäfen zu bedienen. Durch die Unterscheidung zwischen der Optimierung der DOC und der gleichgewichteten Optimierung von DOC und Reisezeit wird der Einfluss der Passagierpräferenzen auf die Struktur des Routennetzwerks und die Eigenschaften der entworfenen Flugzeugfamilie untersucht. *Hoogreef et al.* (2023) untersuchen den Einfluss von zukünftigen (hybrid-)elektrischen Regionalflugzeugentwürfen auf die DOC, den Profit und die CO₂-Emissionen einer Airline beim Betrieb von Passagierflügen zwischen neun Flughäfen; wobei insbesondere auch Sensitivitäten hinsichtlich Technologieannahmen und Flottendiversifikation untersucht werden.

(g) Weitere Ansätze

Die weiteren, bisher nicht vorgestellten Ansätze in den beispielhaften Literaturstudien aus Tab. 2.1 zur Ermittlung von Einsatzszenarien zur Bewertung von Flugzeugentwürfen sind Spieltheorie, logistische Regression sowie Potentialanalyse mit globaler Flugzeugauswahl. In *Desai et al.* (2016, 2019) wird untersucht, inwieweit die Einführung eines neuen Mittelstreckenflugzeugs wirtschaftlich attraktiv für Flugzeug- und Triebwerkshersteller sowie Airlines ist. Hierzu wird

in *Desai et al.* (2016) ein Ansatz zur Flugzeugentwurfsbewertung basierend auf *Value-Driven Design*¹¹ entwickelt und in *Desai et al.* (2019) zur ökonomischen Bewertung der Flottenentwicklung und des Flugzeugeinsatzes, welche aus einem spieltheoretischen Ansatz des Wettbewerbs zwischen vier Airlines resultieren, angewendet. *Grimme et al.* (2021) entwickeln ein logistisches Regressionsmodell für die Entstehung von direkten Flugverbindungen. Dieses wird angewendet, um die Einführung eines neuen Flugzeugentwurfs mit kleiner Sitzplatzanzahl, aber großer Reichweite hinsichtlich neuer Direktverbindungen in der globalen Netzplanung zu bewerten. In *Yutko* (2014) wird das Potential zur Treibstoffeinsparung untersucht, wenn für jede Flugmission im globalen LTS ein treibstoffoptimaler Flugzeugentwurf ausgelegt und eingesetzt wird. Hierbei werden neben einer geeigneten Wahl von Reichweite und Nutzlast auch Variationen der Reiseflugmachzahl untersucht sowie mögliche Zwischenlandungen auf Langstreckenmissionen von Flugzeugtypen ohne ausreichende Reichweite für einen Direktflug berücksichtigt.

2.2 Modellierung der Flugzeug-Routen-Zuordnung

Die Bestimmung der Flugzeug-Routen-Zuordnung ist ein zentraler Bestandteil der Planungsprozesse einer Airline. Zeitgleich ist die Modellierung der Flugzeug-Routen-Zuordnung auch für andere Fragestellungen, wie Untersuchungen des Wettbewerbs zwischen verschiedenen Airlines und der Entwicklungen im globalen LTS, relevant. Da bei jeder dieser zu untersuchenden Fragestellungen unterschiedliche Aspekte der Flugzeug-Routen-Zuordnung im Vordergrund stehen, werden verschiedene Modellierungsansätze verfolgt. Nachfolgend werden daher in dedizierten Unterabschnitten Ansätze für die Modellierung der Flugzeug-Routen-Zuordnung für einzelne Airlines (Unterabschnitt 2.2.1), für mehrere konkurrierende Airlines (Unterabschnitt 2.2.2) sowie für Untersuchungen des globalen LTS (Unterabschnitt 2.2.3) vorgestellt.

2.2.1 Ansätze für einzelne Airlines

Die Planungsprozesse einer Airline umfassen, aufgezählt von langfristig und strategisch hin zu kurzfristig und taktisch, die Netzwerkplanung, Flottenplanung, Flugplanerstellung, Flugzeug-Routen-Zuordnung, Flugzeugrotationsplanung, Crew-Planung, das Ertragsmanagement sowie das Störungsmanagement (*Cook*, 2017). Demnach ist die Erstellung der Flugzeug-Routen-Zuordnung als mittelfristiger Planungsprozess eingegliedert zwischen bereits durchgeführten Planungsprozessen, deren Ergebnisse zu berücksichtigen sind, und noch durchzuführenden Planungsprozessen, deren Lösbarkeit und Performanz sicherzustellen ist (*Mancel und*

¹¹Für einen allgemeinen Überblick zum Thema Value-Driven Design sei an dieser Stelle auf *Collopy und Hollingsworth* (2011) verwiesen.

Mora-Camino, 2006). Konkret ist das Ziel einer Airline hinsichtlich der Flugzeug-Routen-Zuordnung, die Profitabilität zu maximieren (indem geringe Kosten anfallen und hohe Umsätze erzielt werden), während die zur Verfügung stehende Flugzeugflotte verwendet wird, um den angestrebten Flugplan zu bedienen, und zeitgleich technische und operationelle Randbedingungen, wie die Leistungsfähigkeit der Flugzeugtypen und die Verfügbarkeit von Personal und Infrastruktur, berücksichtigt werden (*Fernando et al.*, 2020). Zusätzlich ist auch die Robustheit der Flugzeug-Routen-Zuordnung gegenüber (kurzfristigen) äußeren Einflüssen auf den Flugbetrieb in die Planung einzubeziehen (*Belobaba et al.*, 2009).

In der Literatur werden eine Vielzahl an Ansätzen zur Modellierung der Flugzeug-Routen-Zuordnung einer einzelnen Airline vorgestellt. Die Anfänge in der mathematischen Modellierung der Flugzeug-Routen-Zuordnung liegen in *Dantzig* (1955, 1963) sowie *Ferguson und Dantzig* (1956). Erstmals wird die Flugzeug-Routen-Zuordnung als LP zur Reduzierung der DOC sowie der Kosten (verpasste Umsätze) für nicht bediente Nachfrage aufgestellt. Die Nachfrage pro Route wird hierbei als fester Wert oder als Wahrscheinlichkeitsverteilung modelliert, sodass Unsicherheiten in der Vorhersage der Passagiernachfrage berücksichtigt werden können. Als Anwendungsfall wird eine fiktive Problemstellung mit fünf Flugrouten und vier Flugzeugtypen betrachtet; einerseits, da das Vorstellen der Methodik im Vordergrund steht, andererseits auch, weil die Lösung des Problems manuell berechnet wird, d. h. ohne den Einsatz von Computern, welche zum Zeitpunkt der ersten Veröffentlichungen noch kaum verbreitet waren.¹²

Praktische Anwendung durch Airlines findet die mathematische Optimierung der Flugzeug-Routen-Zuordnung erst Ende der 1980er-Jahre, nach der Deregulierung des amerikanischen Luftfahrtmarkts und begünstigt durch das damit einhergehende Wachstum der Routennetzwerke der Airlines, die erweiterte Anwendung der Freiheiten der Luft, den zunehmenden Wettbewerbsdruck sowie die zunehmend verfügbare Rechenleistung (*Mancel und Mora-Camino*, 2006). *Abara* (1989) stellt ein bei *American Airlines* für die Modellierung der Flugzeug-Routen-Zuordnung entwickeltes ganzzahliges LP vor. Als Zielfunktionen werden die Minimierung der Betriebskosten sowie die Maximierung des Profits und der Flugzeugnutzung diskutiert. Die Nebenbedingungen des Optimierungsproblems umfassen u. a. die Abdeckung des Flugplans, Flussbedingungen für die Flugzeuge sowie die begrenzte Größe der Flugzeugflotte. Als Anwendungsfälle werden u. a. die Auswahl von Flughäfen für Besatzungsbasen und die Verbesserung der Flugzeugnutzung einzelner Flugzeugtypen vorgestellt. Eine ganzheitliche Optimierung der Flugzeug-Routen-Zuordnung bei *American Airlines* ist aufgrund der begrenzten Rechenkapazitäten, der wenig effizienten Lösungsalgorithmen und der überproportional mit der Modellgröße ansteigenden Rechenanforderungen nicht vorgesehen. Aufbauend auf

¹² „The method employed is simple, and the example used can be solved by hand in an hour or two.“ (Die Methode ist einfach, und das Beispiel kann in ein bis zwei Stunden von Hand gelöst werden.) (*Dantzig*, 1963)

den in *Hane et al.* (1995) dargestellten algorithmischen Verbesserungen stellen *Subramanian et al.* (1994) die ganzheitliche Modellierung der Flugzeug-Routen-Zuordnung für Inlandsflüge bei *Delta Air Lines* vor. Es werden zehn Flugzeugtypen mit insgesamt 450 Flugzeugeinheiten auf 2500 Flüge pro Tag zugeordnet, wobei das Ziel ist, die Kosten für Betrieb und nicht bediente Nachfrage zu reduzieren. Die direkte operationelle Umsetzbarkeit der Ergebnisse wird anhand von Nebenbedingungen sichergestellt, welche z. B. die Reichweiten- und Masseneigenschaften der Flugzeuge, benötigte nächtliche Wartungsintervalle, einzuhaltende Lärmbeschränkungen und Ruhezeiten an Flughäfen sowie die Crew-Planung berücksichtigen; letzteres u. a. indem Flugzeugtypen gruppiert werden, welche die gleiche Zertifizierung der Piloten erfordern.

Zusätzliche Erweiterungen für Algorithmen der Flugzeug-Routen-Zuordnung umfassen u. a. die Einbindung von Buchungsinformationen (*Berge und Hopperstad*, 1993), die erweiterte Berücksichtigung von MRO- und Crew-Planungen (*Clarke et al.*, 1996), die Reduzierung der Rechenanforderungen durch den Einsatz von Heuristiken (*Götz et al.*, 1999) sowie die Berücksichtigung von Netzwerkeffekten (*Lohatepanont*, 2002). Moderne Ansätze zur Bestimmung der Flugzeug-Routen-Zuordnung integrieren mehrere Planungsprozesse einer Airline in ein Optimierungsmodell, z. B. um die Interaktionen der Planung von Routennetzwerk, Flugplan und Passagierpräferenzen mit der Flugzeug-Routen-Zuordnung abzubilden (*Wei et al.*, 2018; *Birolini et al.*, 2021a,b) oder um ganzheitliche Bewertungen auch hinsichtlich von Nachhaltigkeit durchzuführen (*Krömer et al.*, 2024). Weitere Literaturübersichten zum Thema Flugzeug-Routen-Zuordnung einzelner Airlines sind *Mancel und Mora-Camino* (2006) und *Fernando et al.* (2020) zu entnehmen.

2.2.2 Ansätze für mehrere Airlines

Ansätze zur Modellierung der Flugzeug-Routen-Zuordnung für mehrere Airlines sind, im Gegensatz zu den Modellen für einzelne Airlines aus dem vorherigen Unterabschnitt 2.2.1, darauf fokussiert, den im LTS stattfindenden Wettbewerb mehrerer Airlines untereinander und die hieraus resultierenden kompetitiven Aspekte der Planungsprozesse der Airlines einzufangen. Die hiervon primär betroffenen Planungsprozesse sind die Netzwerkplanung, Flottenplanung, Flugplanerstellung, Flugzeug-Routen-Zuordnung und das Ertragsmanagement. Die Modellierung und Analyse des Einflusses des Wettbewerbs auf die Planungsprozesse ist sowohl für einzelne Airlines als auch für Regulatoren und Ökonomen von Interesse; für Airlines, um ihre eigene Wettbewerbsposition abzusichern und zu verbessern, für Regulatoren und Ökonomen, um die Dynamik des Markts nachzuvollziehen und ggf. steuern zu können. So kann Airline-Wettbewerb beispielsweise einerseits zu verbesserter Qualität (z. B. höhere Frequenz oder weniger Verspätung) bei gleichbleibenden Preisen führen (*Gil und Kim*, 2021), andererseits aber auch zu einem übermäßigen Anstieg der Flugfrequenzen und damit einhergehenden Verspätungen (*Presto*, 2023).

Um den Wettbewerbscharakter der Airline-Planungsprozesse modellhaft abzubilden, werden in der Literatur primär Methoden der Spieltheorie angewendet (*Adler*, 2005). Hierbei werden die Planungsprozesse im LTS als nicht-kooperatives Spiel zwischen mehreren Spielern (Airlines) modelliert, welche über jeweils individuelle Strategie (Wahl der Werte der Entscheidungsvariablen) versuchen, ihre jeweiligen Marktanteile oder operativen Gewinne zu maximieren (*Wei und Hansen*, 2007). Als Ergebnis der Modellierung ist dabei insbesondere von Interesse, ob und welche Gleichgewichtszustände auftreten können, in denen es für keinen der beteiligten Spieler rationale Anreize gibt, als einziger von der bisher gewählten Strategie abzuweichen (Nash-Gleichgewicht) (*Kreps*, 1990). Während die relevanten Literaturstudien anfänglich hauptsächlich auf den Wettbewerb hinsichtlich der Flugfrequenzen bei der Erstellung von Flugplänen sowie den Ticketpreisen fokussiert sind, z. B. *Hansen* (1990) sowie *Dobson und Lederer* (1993), berücksichtigen hierauf aufbauende, spätere Literaturstudien zusätzlich auch die Flugzeug-Routen-Zuordnung, entweder durch Sitzplatzanzahl oder durch explizite Flugzeugtypen.

Adler (2001, 2005) untersucht mit einem solchen spieltheoretischen Ansatz den Wettbewerb von Airlines mit Hub-und-Spoke-Routennetzwerken. Hierbei ist das Ziel der unterschiedlichen Airlines, ihren eigenen Profit durch die geeignete Wahl eines Routennetzwerks sowie der zugehörigen Flugfrequenzen, Flugzeuggrößen und Ticketpreise zu maximieren. Es werden zwei Anwendungsfälle im westeuropäischen LTS vorgestellt: Im ersten konkurrieren drei Airlines mit jeweils zwei festgelegten Hub-Flughäfen um die unelastische Passagiernachfrage zwischen 20 Flughäfen; im zweiten vier Airlines mit jeweils einem Hub-Flughafen. Für den ersten Anwendungsfall wird zusätzlich die Sensitivität der Ergebnisse hinsichtlich der Passagiernachfrage untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass, in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von *Dobson und Lederer* (1993) und den theoretischen Schlussfolgerungen aus *Hendricks et al.* (1999), die erreichbaren Gleichgewichtszustände (im ersten Anwendungsfall z. B. als Monopol oder Duopol) von der Höhe der Passagiernachfrage abhängen. Da in den Gleichgewichtsduopolen der direkte Wettbewerb auf identischen Routen von den Airlines in größten Teilen vermieden wird, folgt keine direkte Aussage über die Flugzeug-Routen-Zuordnung im Wettbewerb. *Wei und Hansen* (2007) fokussieren durch die Untersuchung eines Duopols auf Einzelrouten diesen direkten Wettbewerb anhand von Flugzeuggröße und Flugfrequenz. Bei vorgegebenen Ticketpreisen und abseits von Flugzeuggröße und Flugfrequenz keinerlei weiteren Unterscheidungskriterien zwischen den konkurrierenden Airlines zeigen die Ergebnisse, dass zunehmende Nachfrage in Wettbewerbsbedingungen durch erhöhte Frequenz statt größerer Flugzeuggröße bedient wird; selbst wenn größere Flugzeugtypen die DOC reduzieren könnten. Eine Erweiterung der spieltheoretischen Betrachtung von Flugzeuggröße und Flugfrequenz

erfolgt in *Vaze und Barnhart* (2012) durch die Berücksichtigung von Flughafenkapazitäten, Flughafenslots und den auftretenden Verspätungen. Ansätze, welche zusätzlich zum Airline-Wettbewerb auch andere Verkehrsträger, insbesondere Hochgeschwindigkeitszüge, berücksichtigen, werden u. a. in *Adler et al.* (2010) und *Cadarso et al.* (2017) vorgestellt. *Doyme et al.* (2019) bilden das australische Inlandsflugnetz als kompetitives Spiel der vier dort dominierenden Airlines nach. Ausgehend von sozioökonomischen Randbedingungen und den Bestandsflotten der Airlines werden mit den Entscheidungsvariablen Ticketpreis, Flugfrequenz und Flugzeugtyp sowie dem Ziel der Gewinnmaximierung die Passagiernachfrage und das Flugaufkommen ermittelt. Aufgrund der hohen Übereinstimmung von Validierungsergebnissen mit realen Vergleichsdaten wird von den Autoren geschlossen, dass ihr Modell auch für die Untersuchung des Einflusses neuer Technologien und Regularien auf die Flugzeug-Routen-Zuordnung im Airline-Wettbewerb geeignet ist.

2.2.3 Ansätze mit globaler Ausrichtung

Airlines verfolgen mit ihren Geschäftsmodellen i. d. R. regionale bis kontinentale Schwerpunkte, welche durch interkontinentale Flugrouten oder die Mitgliedschaft in Luftfahrtallianzen ergänzt werden können.¹³ Dennoch resultieren aus den individuellen und wettbewerbsbedingten Entscheidungen der einzelnen Airlines hinsichtlich ihrer Flugzeug-Routen-Zuordnungen auch Auswirkungen auf das globale LTS; z. B. bezüglich der globalen Emissionsverteilung des Luftverkehrs. Diese globalen Auswirkungen sind, mehr noch als bei der Modellierung des Airline-Wettbewerbs wie im vorherigen Unterabschnitt 2.2.2 beschrieben, insbesondere für Regulatoren und Ökonomen interessant, um die Entwicklung des Markts nachzuvollziehen und ggf. steuern zu können.

Das Ziel von globalen Ansätzen zur Modellierung der Flugzeug-Routen-Zuordnung ist demnach, etwaige Auswirkungen auf der Ebene des globalen LTS zu erfassen und für veränderte Randbedingungen, wie beispielsweise steigende Passagiernachfrage oder sinkende Treibstoffkosten, möglichst genau vorhersagen zu können. Hierbei ist eine Modellierung des gesamten LTS als Aggregation aus einzelnen Airlines nicht sinnvoll, da aus der Vielzahl an Airlines, der Dynamik im Airline-Geschäftsumfeld sowie der Vielzahl an Interaktionen zwischen den Airlines eine nicht handhabbare Modellkomplexität mit großer erforderlicher Datenbasis resultieren würde. Stattdessen werden in der Literatur verschiedene andere Modellierungsansätze angewandt, welche nachfolgend anhand einzelner, ausgewählter Beispiele vorgestellt werden.

¹³Billigfluggesellschaften (engl. Low Cost Carriers; LCCs) betreiben meist ein rein kontinentales Routennetzwerk aus Punkt-zu-Punkt-Verbindungen. Für Netzwerkfluggesellschaften (engl. Full Service Network Carriers; FSNs), welche kontinentale und ggf. interkontinentale Flugverbindungen an ihren Drehkreuzen in einer Hub-and-Spoke (dt. Nabe und Speiche) Struktur bündeln, folgt meist aus der geografischen Positionierung der Drehkreuze ein klarer kontinentaler Schwerpunkt.

Basierend auf den Arbeiten von *Bhadra* (2003) und *Bhadra et al.* (2003, 2005), welche die Flugzeug-Routen-Zuordnung im US-amerikanischen Inlandsflugverkehr beschreiben, wird in *Reynolds et al.* (2007) als Teil des *Aviation Integrated Model* die globale Flugzeug-Routen-Zuordnung durch eine logistische Regression beschrieben. Das Regressionsmodell gibt anhand der Eingangsgrößen Passagieraufkommen, Routendistanz und Routentyp (Hub-zu-Hub, Hub-zu-Spoke/Spoke-zu-Hub oder Punkt-zu-Punkt) an, zu welchem Anteil die Passagiernachfrage auf einer Flugroute zwischen einem Flughafenpaar durch ein Flugzeug einer gewissen Größenkategorie bedient wird; wobei statt expliziter Flugzeugtypen die drei Flugzeuggrößenkategorien (< 190 Sitzplätze, 190–299 Sitzplätze und > 299 Sitzplätze) unterschieden werden. In einer überarbeiteten Version des Modells, beschrieben in *Dray et al.* (2019) und *Dray* (2020), wird die logistische Regression um die Eingangsgrößen Sitzladefaktor, Runway-Länge, Anzahl der LCCs und Marktkonzentration der Airlines bezogen auf die Passagiere pro Airline erweitert. Als Kennzahl der Marktkonzentration wird der Herfindahl-Hirschman-Index (HHI) verwendet, dessen Definition durch Gl. (2.1) und Gl. (2.2) gegeben ist und der in diesem konkreten Anwendungsfall mit x_i die Anzahl der beförderten Passagiere der Airline i aller N Airlines auf der betrachteten Route beschreibt. Zusätzlich wird im Modell von *Dray et al.* (2019) und *Dray* (2020) zwischen neun Flugzeuggrößenkategorien unterschieden; die kleinste beschreibt Flugzeuge mit 30–69 Sitzplätzen, die größte Flugzeuge mit mehr als 400 Sitzplätzen. Eine Validierung der Modellergebnisse mit historischen Daten unterstreicht, dass das Modell die globalen Einsatzwahrscheinlichkeiten der einzelnen Flugzeuggrößenkategorien für verschiedene Routendistanzen und Weltregionen mit Abweichungen < 10 % beschreibt. Einzig für die kleinsten im Modell beschriebenen Flugzeuge mit 30–69 Sitzplätzen treten größere Abweichungen von bis zu 30 % auf, sodass für das Modell von einer unzureichenden Beschreibung in diesem Marktsegment auszugehen ist.

$$\text{HHI} = \sum_{i=1}^N a_i^2 \quad (2.1)$$

$$a_i = \frac{x_i}{\sum_{j=1}^N x_j} \quad (2.2)$$

Ebenfalls als Teil eines umfassenden Modells des LTS (*Ghosh et al.*, 2016; *Ghosh*, 2019) modellieren *Kölker et al.* (2016) die globale Flugzeug-Routen-Zuordnung als Aggregation von Normalverteilungen. Die Normalverteilungen werden als Beschreibung von historischen Flugplandaten ermittelt und geben jeweils an, wie die Anteile, zu denen Flugrouten einer Routendistanzkategorie durch Flugzeuge einer Flugzeuggrößenkategorie beflogen werden, über verschiedene Passagiernachfragekategorien verteilt sind. Insgesamt werden hierbei acht unterschiedliche Flugzeuggrößenkategorien (zwischen weniger als 19 und mehr als 301 Sitzplätzen), sieben Distanzkategorien (zwischen weniger als 200 km und mehr als 4500 km) sowie acht

Passagiernachfragekategorien (zwischen weniger als 501 Passagieren pro Monat und mehr als 38 000 Passagieren pro Monat) unterschieden.

Im Rahmen ihrer systemdynamischen Betrachtungen der globalen Flottenentwicklung modellieren *Randt* (2013, 2016) und *Randt et al.* (2015) die Flugzeug-Routen-Zuordnung anhand des Ziels, den Treibstoffverbrauch zu reduzieren. Hinsichtlich der Flugzeugflotte werden neun historische Flugzeugkategorien mit jeweils einem repräsentativen Flugzeugtyp unterschieden; hinsichtlich der Flugrouten sechs Weltregionen mit daraus resultierenden 21 Regionspaaren. Für jede Kombination aus Flugzeugkategorie und Regionspaar wird eine repräsentative Flugroutendistanz ausgewählt. Einige in historischen Daten nicht beflogene Kombinationen ausgeschlossen (z. B. Turboprop-Zubringerflugzeuge für Flüge zwischen Afrika und Nordamerika), verbleiben 153 Flugrouten zur Beschreibung des globalen LTS, denen es treibstoffoptimal eine Flugzeugkategorie zuzuordnen gilt. In Ergänzung zu den neun identifizierten historischen Flugzeugkategorien können hierbei, je nach Szenario, weitere zukünftige Flugzeugtypen bzw. -kategorien einbezogen werden. Als Nebenbedingungen werden die Reichweiteigenschaften der Flugzeugkategorien sowie die zur Verfügung stehende Anzahl an Flugzeugeinheiten berücksichtigt; wobei für zukünftige Flugzeugtypen beschränkte Produktionskapazitäten angenommen werden. In *Oguntona et al.* (2016) wird das beschriebene Vorgehen um die Reduzierung der DOC erweitert und mit der treibstoffoptimalen Flugzeug-Routen-Zuordnung verglichen.

Gelhausen et al. (2020, 2021, 2022) modellieren die globale Flugzeug-Routen-Zuordnung unter Berücksichtigung des Einflusses von begrenzten Flughafenkapazitäten. Als Teil ihrer Vorhersage des zukünftigen Luftverkehrsaufkommens werden die Flugzeug-Routen-Zuordnungen des historischen Flugplans, welcher der Vorhersage zugrunde liegt, in die Zukunft fortgeschrieben und für den Vorhersagezeitraum inkrementell angepasst: Wächst die Passagiernachfrage auf einer Flugroute oder werden die auf einer Flugroute eingesetzten Flugzeugtypen mit zunehmendem Flugzeugalter vermehrt ausgeflottet, werden die zusätzlich dieser Flugroute zugeordneten Flugzeugtypen so gewählt, dass die durchschnittliche Sitzplatzanzahl aller auf der Flugroute eingesetzten Flugzeugtypen einem routenspezifischen Zielwert entspricht, welcher aus der Modellierung der Flughafenkapazitäten der Start- und Zielflughäfen folgt.

In den Studien von *Hassan und Mavris* (2014) sowie *Hassan et al.* (2015) wird die globale Flugzeug-Routen-Zuordnung als Teil der Flottenprognose betrachtet. Die globale Flugzeug-Routen-Zuordnung wird in diesem Zusammenhang primär als statisch angenommen, sodass bei einem Nachfragewachstum pro Route ausschließlich die Flugfrequenz und nicht die Flugzeuggröße steigt. Für die Ausflottung bestehender Flugzeugtypen werden zeitliche Verläufe angenommen. Für

die Flottenerneuerung werden für sechs unterschiedliche Flugzeuggrößenkategorien (zwischen 20–50 Sitzplätzen und > 301 Sitzplätzen) manuell Nachfolgeflugzeugtypen vorgegeben, welche auf den Routen der Vorgängerflugzeuge eingesetzt werden. Ähnliche Annahmen bezüglich statischer, in die Zukunft fortgeschriebener Flugzeug-Routen-Zuordnungen basierend auf historischen Flugplandaten werden ebenfalls in den systemdynamischen Modellierungen der Flugzeugflotten und des LTS von *Pfaender et al.* (2010) und *Urban et al.* (2017) getroffen. Auch das *Aircraft Assignment Tool* der Europäischen Organisation zur Sicherung der Luftfahrt (engl. European Organisation for the Safety of Air Navigation; Eurocontrol) und der Europäischen Agentur für Flugsicherheit (engl. European Union Aviation Safety Agency; EASA), beschrieben in *Cavadini und de Lepinay* (2016), ist primär auf eine quasistatische Flugzeug-Routen-Zuordnung ausgerichtet, da Anpassungen der Flugzeug-Routen-Zuordnung typischerweise nur aus dem Austausch vergleichbarer Flugzeugtypen bei Flottenerneuerung oder -wachstum resultieren.

Die Methodiken der Flugzeug-Routen-Zuordnung als Teil der umfassenden Modellierungen des LTS in den Modellen *APMT* (*International Civil Aviation Organization*, 2010; *Federal Aviation Administration*, 2014) sowie *AERO-MS* (*Vlek und Vogels*, 2000; *European Commission*, 2006; *European Union Aviation Safety Agency*, 2010b) sind nicht vollständig veröffentlicht. Die verfügbaren Beschreibungen von *APMT* geben an, dass technologische, operationelle und ökonomische Einflüsse bei der Flugzeug-Routen-Zuordnung berücksichtigt werden, wobei der Fokus, in Übereinstimmung mit den Luftverkehrsprognosen der internationalen Zivilluftfahrtorganisation (engl. International Civil Aviation Organization; ICAO), auf der Verwendung von Sitzplatzklassen anstelle von konkreten Flugzeugtypen liegt. In *AERO-MS* erfolgt die Flugzeug-Routen-Zuordnung anhand des Vergleichs der Betriebskosten von generischen Flugzeugtypen. Diese generischen Flugzeugtypen repräsentieren jeweils die drei Reichweiten- und sechs Sitzplatzkategorien sowie unterschiedliche Technologieniveaus. Die Auswirkungen des Wettbewerbs verschiedener Airlines auf die globale Flugzeug-Routen-Zuordnung werden nicht berücksichtigt, sollen aber in zukünftigen Modellentwicklungen einbezogen werden.

Auch die jährlich veröffentlichten Luftverkehrs- und Flottenprognosen der Flugzeughersteller – *Global Market Forecast* von Airbus (*Airbus*, 2022b) und *Commercial Market Outlook* von Boeing (*Boeing*, 2022b) – beinhalten indirekt globale Flugzeug-Routen-Zuordnungen. Details zu den verwendeten Annahmen und Modellierungen sind allerdings nicht veröffentlicht. Ferner liegen Interessenskonflikte vor, da möglichst hohe zu erwartende zukünftige Absatzzahlen für die Außendarstellung der Flugzeughersteller vorteilhaft sind (*Ghosh*, 2019).

2.3 Zwischenfazit

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Literaturrecherche zusammengefasst und Schlussfolgerungen für die Bewertung von Flugzeugentwürfen anhand der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung abgeleitet. Thematisch umfasst dies die Bereiche konzeptioneller Flugzeugentwurf (Unterabschnitt 2.1.1), Bewertungsmetriken (Unterabschnitt 2.1.2), Einsatzszenarien (Unterabschnitt 2.1.3) sowie die Modellierung der Flugzeug-Routen-Zuordnung (Abschnitt 2.2). Abschließend erfolgt die Identifikation von Forschungslücken, welche durch Innovationen des entwickelten Modells geschlossen werden.

Konzeptioneller Flugzeugentwurf

Der konzeptionelle Flugzeugentwurf als erste von drei Phasen des Flugzeugentwurfsprozesses überführt die Anforderungen und das Ziel des Flugzeugentwurfs in eine konkrete Flugzeugkonfiguration mit grobem Wissen über Form, Größe und Masse. Hierdurch werden die wesentlichen operativen Eigenschaften und die Flugleistungen des Flugzeugentwurfs festgelegt. Innerhalb des konzeptionellen Flugzeugentwurfs stellt die Bewertung des Flugzeugentwurfs den abschließenden Prozessschritt dar, welcher zu einer Optimierung hinsichtlich der Bewertungskenngröße führt (vgl. Abb. 2.1). Die Wahl der Bewertungskenngröße als Kombination aus Bewertungsmetrik und Einsatzszenario beeinflusst demnach direkt das Ergebnis des konzeptionellen Flugzeugentwurfs. Dementsprechend wichtig ist es, durch Bewertungsmetrik und Einsatzszenario die Leistungsfähigkeit des Flugzeugentwurfs für den Betrieb im globalen LTS realitätsnah zu erfassen. Dies ist die Motivation für die in dieser Arbeit entwickelte Methodik für die Bewertung von Flugzeugentwürfen anhand der Flugzeug-Routen-Zuordnung im globalen LTS.

Bewertungsmetriken

Die vorgestellten Flugzeugentwurfsstudien umfassen eine Vielzahl an Bewertungsmetriken aus den Bereichen Treibstoffeffizienz, Ökonomie und Ökologie. Für die vorliegende Arbeit, die das Ziel verfolgt, die Bewertung von Flugzeugentwürfen anhand der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung vorzunehmen, sind von den aufgeführten Bewertungsmetriken primär solche von Interesse, die (i) aussagekräftig für die Leistungsfähigkeit des Flugzeugentwurfs oder des globalen LTS sind und (ii) deren Resultate von den Einsatzszenarien der untersuchten Flugzeugentwürfe abhängen. Dies schließt die Betrachtung der Emissionen im LTO-Zyklus, der lokalen Lärmemissionen an einzelnen Flughäfen sowie der NRC und RC aus. Diese hängen hauptsächlich von den Flugzeug-, Triebwerks- und Fertigungstechnologien sowie den lokalen Betriebsverfahren und Topologien an einzelnen Flughäfen ab, nicht jedoch

von den ermittelten Einsatzszenarien. Im Umkehrschluss sind die Treibstoffeffizienz, die Anzahl der benötigten Flugzeuginheiten, die DOC, die Erlöse durch Ticketverkäufe, die Anzahl sinnvoll ermöglichter Direktverbindungen, die globale Klimawirkung und die LCA konkret von Interesse, da sie für die Bewertung von Flugzeugentwürfen anhand der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung geeignet sind. Auf die explizite Berücksichtigung der letzteren drei Bewertungsmetriken – Anzahl Direktverbindungen, Klimawirkung und LCA – wird im Rahmen dieser Arbeit dennoch verzichtet, da sie umfangreiche Modellierungen in eigenständigen Fachgebieten erfordern (vgl. *Wong et al.* (2023); *Grewe und Stenke* (2008); *Cox* (2018)). Die Anwendbarkeit dieser Bewertungsmetriken für die Bewertung von Flugzeugentwürfen anhand der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung wurde allerdings in den im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Veröffentlichungen *Papantoni et al.* (2022) und *Kühlen et al.* (2023) demonstriert.

Einsatzszenarien

In den beispielhaft vorgestellten Flugzeugentwurfsstudien werden unterschiedlichste Ansätze verwendet, um die Einsatzszenarien von Flugzeugentwürfen in deren Bewertung zu berücksichtigen. Neben der Bewertung anhand einzelner ausgewählter Missionen werden vor allem historische Einsatzszenarien oder die Flugzeug-Routen-Zuordnung einzelner Airlines, ggf. einschließlich der Netzplanung, herangezogen. Eine Betrachtung des globalen LTS erfolgt nur in wenigen Fällen, beispielsweise in *Yutko* (2014) und *Grimme et al.* (2021). Insbesondere erfolgt in keiner der Studien aus der Literatur eine Kombination aus der Betrachtung des globalen LTS und den Flugleistungen der untersuchten Flugzeugentwürfe, um Einsatzszenarien für die Bewertung der Flugzeugentwürfe zu ermitteln. Diese Forschungslücke wird durch die in dieser Arbeit vorgestellte Methodik zur Bewertung von Flugzeugentwürfen anhand der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung adressiert.

Modellierung der Flugzeug-Routen-Zuordnung

Die in der Literatur beschriebenen Ansätze zur Modellierung der Flugzeug-Routen-Zuordnung umfassen Ansätze für einzelne Airlines, für mehrere konkurrierende Airlines sowie für eine globale Ausrichtung. Methodisch wird für einzelne Airlines vor allem die mathematische Optimierung verwendet, während für mehrere konkurrierende Airlines spieltheoretische Ansätze zum Einsatz kommen. Für die Modellierung der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung werden primär statistische Ansätze verfolgt, aber auch systemdynamische Ansätze und das rein statische Fortschreiben historischer Werte finden Anwendung. Eine Anwendung der mathematischen Optimierung für die globale Flugzeug-Routen-Zuordnung existiert nicht. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methodik schließt diese Forschungslücke. Zusätzlich werden in

den Literaturansätzen für die globale Flugzeug-Routen-Zuordnung vereinfachend Flugzeug- und/oder Routenkategorien statt expliziter Flugzeugtypen und Flugrouten verwendet. Auch diese Forschungslücke wird durch die entwickelte Methodik adressiert.

Insgesamt präsentiert die vorliegende Arbeit folglich drei wesentliche Innovationen, welche über den aktuellen Stand der Wissenschaft hinausgehen und bestehende Forschungslücken adressieren:

1. Die Bewertung von Flugzeugentwürfen anhand globaler und flugleistungsabhängiger Einsatzszenarien;
2. Die Verwendung der Methode der mathematischen Optimierung für die Modellierung der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung;
3. Die Modellierung einer flugzeugtyp- und flugroutenspezifischen globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung.¹⁴

Der Mehrwert dieser Innovationen liegt darin, eine im Vergleich zu den bestehenden Ansätzen aus der Literatur in zweierlei Hinsicht umfangreichere Grundlage für die Bewertung von Flugzeugentwürfen zu schaffen. Zum einen wird durch die ermittelten globalen Einsatzszenarien eine ganzheitliche Bewertung der individuellen Leistungsfähigkeit der untersuchten Flugzeugentwürfe ermöglicht. Eine Verzerrung der Bewertungsgrundlage durch die Wahl einzelner Einsatzmissionen oder airlinespezifischer Bestandsflotten und Routennetze, wie sie die bestehenden Ansätze aus der Literatur für die Ermittlung von Einsatzszenarien zur Bewertung von Flugzeugentwürfen erfordern, findet nicht statt (vgl. Unterabschnitt 2.1.3). Zum anderen werden zusätzlich zu den Einsatzszenarien der untersuchten Flugzeugentwürfe auch die Einsatzszenarien aller anderen in der Weltflotte befindlichen Flugzeugtypen ermittelt. Hierdurch lassen sich u. a. Verdrängungseffekte – die Einführung eines neuen Flugzeugtyps beeinflusst den Einsatz der Bestandsflotte – in der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung erfassen, wie sie durch die in der Literatur beschriebenen, mehrheitlich statistischen Ansätze zur Modellierung der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung nicht erfasst werden können.

¹⁴In der wissenschaftlichen Literatur wird diese Innovation im Bereich der Modellierung der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung mit Bezug auf die Vorabveröffentlichung des in dieser Arbeit entwickelten Modells in Kühlen et al. (2022) explizit hervorgehoben: „*To our knowledge, only Kühlen et al. (2022) elaborated a model that considers each aircraft type independently without requiring a fixed segmentation*“ (Unseres Wissens nach haben nur Kühlen et al. (2022) ein Modell ausgearbeitet, das jeden Flugzeugtyp unabhängig betrachtet, ohne eine feste Segmentierung zu erfordern.) (Viry et al., 2025).

3. Entwicklung des Modellkonzepts

Ausgehend von der zu untersuchenden Forschungsfrage (Abschnitt 1.2) sowie aufbauend auf den in der Literatur beschriebenen Studien zu inhaltlich verwandten Fragestellungen (Kapitel 2) erfolgt in diesem Kapitel die Entwicklung des Modellkonzepts für die Bewertung von Flugzeugentwürfen anhand der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung. Hierzu werden im Rahmen einer systematischen Entwicklung und Begründung des Modellkonzepts zuerst Modellanforderungen aufgestellt (Abschnitt 3.1), bevor die Wahl und Ausgestaltung eines geeigneten Modellierungsansatzes vorgestellt wird (Abschnitt 3.2).

3.1 Modellanforderungen

Die Modellanforderungen fassen die aus der zu untersuchenden Forschungsfrage direkt oder indirekt hervorgehenden Ansprüche an einen möglichen Lösungsansatz zusammen. Im Rahmen der Modellentwicklung sind die Modellanforderungen folglich zum einen ex ante für die Wahl und Ausgestaltung eines geeigneten Modellierungsansatzes von Bedeutung (Abschnitt 3.2) und zum anderen ex post für die Validierung des entwickelten Modells (Abschnitt 4.6). Nachfolgend werden zum einen die Modellanforderungen, resultierend aus dem Einsatzbereich des zu entwickelnden Modells, vorgestellt (Unterabschnitt 3.1.1) und zum anderen Modellanforderungen hinsichtlich der Abbildungsqualität, die ein möglicher Lösungsansatz erfüllen soll, beschrieben (Unterabschnitt 3.1.2).

3.1.1 Einsatzbereich

Die Modellanforderungen hinsichtlich des Einsatzbereichs des zu entwickelnden Modells umfassen sowohl die inhaltliche Ausrichtung des Modells als auch dessen einfache und flexible Anwendbarkeit. Insgesamt entstammen die Modellanforderungen des Einsatzbereichs sechs nachfolgend vorgestellten Themenbereichen.

(a) Abbildung der Flugzeug-Routen-Zuordnung im globalen LTS

Das zu entwickelnde Modell soll die Flugzeug-Routen-Zuordnung im globalen LTS erfassen. Dementsprechend gilt es, einen möglichst umfangreichen, überregionalen und relevanten Teil des LTS abzubilden, um einen repräsentativen Charakter der Modellergebnisse für das globale LTS sicherzustellen. Als *Flugzeug-Routen-Zuordnung* wird hierbei, gemäß der zu untersuchenden Fragestellung (Abschnitt 1.2), welche die Einsatzszenarien von (zukünftigen) Flugzeugtypen fokussiert, die Zuordnung eines Flugzeugtyps zu einem definierten Flugsegment verstanden. Die inhaltliche Relevanz der Modellergebnisse wird durch die in Unterabschnitt 3.1.2 aufgestellten Anforderungen an die Abbildungsqualität sichergestellt.

(b) Erklärender Modellierungsansatz

Das zu entwickelnde Modell soll einen erklärenden Modellierungsansatz verfolgen. Hierunter wird verstanden, dass der Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen nachvollziehbar und kontrollierbar gestaltet ist. Dementsprechend soll das entwickelte Modell in möglichst großem Umfang einer White-Box entsprechen, deren Verhalten kausal erklärbar ist. Die Motivation hierfür ist, dass neben den Endergebnissen auch etwaige Zwischenergebnisse auf Plausibilität geprüft werden können, um so die Zuverlässigkeit und Richtigkeit des Gesamtmodells zu überprüfen und zu bestätigen. Zusätzlich vereinfacht ein erklärender Modellierungsansatz sowohl die Quantifizierung als auch die Modifizierung einzelner Einflussfaktoren, wodurch die Anwendbarkeit des Gesamtmodells gesteigert wird.

(c) Szenariofähigkeit und Modelldynamik

Nach Abschluss der Entwicklung soll das zu entwickelnde Modell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung verschiedene Szenarien des LTS abbilden können. Das Ziel hierbei ist es, die wesentlichen Dynamiken des LTS abzubilden, um z. B. die Reaktionen auf veränderte Treibstoffkosten, veränderte Flottenzusammensetzungen oder veränderte Nachfrage auf die Flugzeug-Routen-Zuordnung zu erfassen.

(d) Modellgültigkeit unabhängig vom betrachteten Zeitraum

Als Teil der allgemeinen Szenariofähigkeit soll das zu entwickelnde Modell insbesondere die Untersuchung unterschiedlicher Zeiträume ermöglichen, um sowohl alternative historische Szenarien als auch zukünftige, für die Bewertung neuer Flugzeugentwürfe relevante Szenarien untersuchen zu können.

(e) Anwendbarkeit für die Bewertung von Flugzeugentwürfen

Um die Beantwortung der in dieser Arbeit fokussierten Forschungsfrage zu ermöglichen, gilt es für das zu entwickelnde Modell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung die Anwendbarkeit für die Bewertung von Flugzeugentwürfen sicherzustellen. Dies umfasst einerseits die Berücksichtigung von flugzeugtypspezifischen Leistungsparametern in der Bestimmung der Flugzeug-Routen-Zuordnung und andererseits die Bereitstellung von geeigneten Bewertungsmetriken, um den Einfluss der zu bewertenden Flugzeugentwürfe zu quantifizieren.

(f) Geringe Rechenanforderungen bei Anwendung

Das zu entwickelnde Modell soll nach der vollständigen Entwicklung auf üblicher, zeitgemäßer Computer-Hardware innerhalb von wenigen Minuten die Flugzeug-Routen-Zuordnung eines Jahres berechnen. Dies ermöglicht eine vielfältige Anwendbarkeit, z. B. als Teil von interdisziplinären Modellketten oder für Fragestellungen mit einer Vielzahl von zu untersuchenden Szenarien.

3.1.2 Abbildungsqualität

Die Modellanforderungen hinsichtlich der Abbildungsqualität des zu entwickelnden Modells stellen sicher, dass das Gesamtmodell eine hinreichend hohe Genauigkeit erreicht, um relevante Forschungsfragen, insbesondere die in dieser Arbeit fokussierte Bewertung von Flugzeugentwürfen, zu beantworten. Konkret soll der Nachweis der Abbildungsqualität anhand von Metriken der drei Kategorien (a) *Routenkategoriespezifisch*, (b) *Flugzeugtypspezifisch* und (c) *Flughafenspezifisch* geführt werden. Auf eine Betrachtung routenspezifischer Metriken wird explizit verzichtet, da einzelne Routen wesentlich durch Entscheidungen einzelner Airlines beeinflusst werden und somit nur bedingt als Teil eines globalen Modells beschrieben werden können.¹

(a) Routenkategoriespezifisch

Die Untersuchung der Abbildungsqualität auf der Grundlage der Bildung von Routenkategorien erfolgt, um sicherzustellen, dass die grundsätzlichen Eigenschaften der Flugzeug-Routen-Zuordnung im LTS durch das zu entwickelnde Modell erfasst werden – dies umfasst z. B. das Wachstum der Flugzeuggröße mit der Einsatzdistanz sowie das Wachstum der Flugfrequenz mit der Passagiernachfrage bei gleichzeitig nur geringfügigem Wachstum der Flugzeuggröße (*Givoni und Rietveld*, 2009; *Vaze und Barnhart*, 2012). In Anlehnung an z. B. *Kölker et al.* (2016) werden die Flugrouten hierzu zum einen gemäß ihrer Distanz und zum anderen gemäß

¹Die in Abschnitt 4.6 präsentierten Validierungsergebnisse unterstützen dies, da bereits die aggregierten Ergebnisse für einzelne Flugzeugtypen mit geringer Flottengröße oder für einzelne Flughäfen den Einfluss individueller Airlines erkennen lassen.

ihrer angebotenen Sitzplatzkapazität kategorisiert. Für jede Routenkategorie sollen die durchschnittlichen Werte für die Sitzplatzanzahl pro Flug, die Anzahl an eingesetzten Flugzeugtypen pro Route sowie die Marktkonzentration der auf einer Route eingesetzten Flugzeugtypen nach HHI erfasst und mit empirischen Daten verglichen werden.²

(b) Flugzeugtypspezifisch

Für die Beantwortung von flugzeugtypspezifischen Forschungsfragen, wie der im Rahmen dieser Arbeit fokussierten Bewertung von Flugzeugentwürfen, gilt es für das zu entwickelnde Modell Anforderungen an die flugzeugtypspezifische Abbildungsqualität zu erfüllen. Konkret sollen hohe Übereinstimmungen mit empirischen Vergleichsdaten bei den folgenden Fragen erzielt werden:

1. Wie lang sind die Routen, auf denen die einzelnen Flugzeugtypen eingesetzt werden?
2. Wie hoch ist das gesamte Sitzplatzangebot auf den Routen, auf denen die einzelnen Flugzeugtypen eingesetzt werden?
3. Wie groß ist der Anteil der eingesetzten Flugzeugtypen am gesamten Sitzplatzangebot auf den Routen?

(c) Flughafenspezifisch

Auf der Ebene der Flughäfen soll das zu entwickelnde Modell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung insbesondere die Anzahl an Flugbewegungen pro Flughafen mit hoher Güte abbilden. Dies ist primär für kapazitätsbeschränkte Flughäfen relevant, d. h. für solche Flughäfen, an denen in der Praxis die Anzahl an Flugbewegungen durch die zur Verfügung stehende Infrastruktur und nicht durch die vorhandene Luftverkehrsnachfrage beschränkt wird. Denn für kapazitätsbeschränkte Flughäfen stellen die beschränkten Flughafenkapazitäten im Allgemeinen einen wesentlichen Einflussfaktor für die globale Flugzeug-Routen-Zuordnung dar, dessen Bedeutung zukünftig weiter ansteigen wird (*Gelhausen et al.*, 2013). Folglich ist eine hohe Abbildungsgüte in diesem Bereich für die Akzeptanz und Anwendbarkeit des zu entwickelnden Modells von hoher Bedeutung. Für nicht-kapazitätsbeschränkte Flughäfen ist die Anzahl an Flugbewegungen pro Flughafen eine zusätzliche Validierungsgröße für die Abbildungsqualität des zu entwickelnden Modells.

²Bei gegebener, statischer angebotener Sitzplatzanzahl pro Route (entspricht vereinfacht der durch angebotene Sitzplätze bedienten Passagiernachfrage) ist anhand der durchschnittlichen Sitzplatzanzahl pro Flug auch eine Aussage über die Abbildungsqualität hinsichtlich der durchschnittlichen Flugfrequenz möglich.

3.2 Wahl und Ausgestaltung des Modellierungsansatzes

Das Ziel der Wahl und Ausgestaltung des Modellierungsansatzes ist es, dass das zu entwickelnde Modell der Bewertung von Flugzeugentwürfen anhand der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung die im vorherigen Abschnitt 3.1 aufgestellten Anforderungen hinsichtlich Einsatzbereich und Abbildungsqualität erfüllt. Hierbei wird ein geeigneter Kompromiss zwischen (i) der Abstraktion der Problemstellung zur Reduktion der Problemkomplexität und zur Vereinfachung der Modellierung sowie (ii) dem Erhalten eines für die Beantwortung der Forschungsfrage geeigneten Detailgrads angestrebt (*Niklaß*, 2019). Nachfolgend wird zuerst basierend auf den Anforderungen hinsichtlich des Einsatzbereichs eine geeignete Methodik gewählt, bevor anschließend ein qualitativer Nachweis geführt wird, dass bei geeigneter Ausgestaltung der Modellierung mit der gewählten Methodik die Anforderungen hinsichtlich des Einsatzbereichs erfüllt werden. Ein quantitativer Nachweis über die Erfüllung der Anforderungen hinsichtlich des Einsatzbereichs und der Abbildungsqualität erfolgt in Abschnitt 4.6.

Methodisch sind für die Modellierung der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung vier verschiedene Modellierungsansätze naheliegend: mathematische Optimierung, Spieltheorie, Regressionsanalyse und maschinelles Lernen. Die ersten drei Methodiken entsprechen den meist verwendeten Methodiken in der Literatur für die Modellierung der Flugzeug-Routen-Zuordnung einzelner Airlines, mehrerer Airlines sowie im globalen LTS (Abschnitt 2.2). Das zusätzlich aufgeführte maschinelle Lernen ist für Airline-Planungsprozesse abseits der Flugzeug-Routen-Zuordnung aktiver Forschungsgegenstand; beispielsweise für die Crew-Planung (*Yaakoubi et al.*, 2020), die MRO-Planung (*Ruan et al.*, 2021) und das Störungsmanagement (*Lee et al.*, 2022).

Tabelle 3.1 vergleicht qualitativ, inwieweit die in Unterabschnitt 3.1.1 aufgeführten Modellanforderungen aus dem Einsatzbereich des zu entwickelnden Modells der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung durch die vier Methodiken erfüllt werden. Die mathematische Optimierung erfüllt potentiell alle sechs Anforderungen aus dem Einsatzbereich des zu entwickelnden Modells. Die Spieltheorie ist nicht für die Abbildung der Flugzeug-Routen-Zuordnung im globalen LTS geeignet, da für die Modellierung als kompetitives Spiel detaillierte Betrachtungen auf Airline-Ebene notwendig sind, sodass die Datenanforderungen zu hoch für eine globale Anwendung sind. Zusätzlich wären die Rechenanforderungen bei einer das globale LTS repräsentierenden Anzahl an Airlines (Spielern) sowie Flugzeugtypen und Routen (Strategiemöglichkeiten) höher als durch die Anforderungen vorgegeben. Die Regressionsanalyse besitzt den Nachteil einer begrenzten Szenariofähigkeit und Modelldynamik, da primär historische Daten in die Zukunft fortgeschrieben werden. Hieraus folgt z. B., dass neue, zukünftige Flugzeugentwürfe mit in

Tab. 3.1: Potentielle Erfüllung der Anforderungen aus dem Einsatzbereich der zu entwickelnden Modells durch verschiedene Modellierungsmethodiken

Modellanforderungen aus Einsatzbereich (Unterabschnitt 3.1.1)		Mathematische Optimierung	Spieltheorie	Regressions- analyse	Maschinelles Lernen
(a)	Abbildung der Flugzeug-Routen-Zuordnung im globalen LTS	•		•	◦
(b)	Erklärender Modellierungsansatz	•	•	•	
(c)	Szenariofähigkeit und Modelldynamik	•	•		•
(d)	Modellgültigkeit unabhängig vom betrachteten Zeitraum	•	•	•	•
(e)	Anwendbarkeit für die Bewertung von Flugzeugentwürfen	•	•	•	•
(f)	Geringe Rechenanforderungen bei Anwendung	•		•	•

•: erfüllt; ◦: Forschungslücke

den historischen Daten nicht enthaltenen Eigenschaften in der Flugzeug-Routen-Zuordnung nicht korrekt abgebildet werden können. Das maschinelle Lernen ist in der einschlägigen Literatur bisher nicht für relevante Fragestellungen der Flugzeug-Routen-Zuordnung demonstriert worden. Die Anwendbarkeit für die Abbildung der Flugzeug-Routen-Zuordnung im globalen LTS ist daher fraglich. Ergebnisse des maschinellen Lernens sind allerdings ohnehin i. d. R. für Menschen nur sehr begrenzt nachvollziehbar (*Barredo Arrieta et al., 2020*), sodass im Sinne der Definition von Anforderung (b) aus Unterabschnitt 3.1.1 kein erklärender Modellierungsansatz vorliegt. Folglich ist der Ansatz des maschinellen Lernens trotz der identifizierten Forschungslücke für die im Rahmen dieser Arbeit verfolgte Zielsetzung nicht geeignet.

Aufgrund der durch Tab. 3.1 beschriebenen Eigenschaften der vier verschiedenen Modellierungsmethodiken wird für das zu entwickelnde Modell der Flugzeug-Routen-Zuordnung im globalen LTS ein Ansatz der mathematischen Optimierung gewählt. Um die angegebene potentielle Erfüllung der Modellanforderungen durch die mathematische Modellierung zu erreichen, ist eine geeignete Ausgestaltung des Modellierungsansatzes erforderlich. Nachfolgend wird daher konzeptionell beschrieben, wie die mathematische Optimierung für die Abbildung der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung verwendet werden kann. Hierbei wird insbesondere qualitativ erläutert, warum der gewählte Modellierungsansatz der mathematischen Optimierung die gestellten Anforderungen an den Modellierungsansatz erfüllt. Zusätzliche quantitative Nachweise werden als Teil der Modellentwicklung in

Kapitel 4, insbesondere in der in Unterabschnitt 4.6.4 beschriebenen Validierung der Modelleigenschaften, erbracht.

Grundsätzlich wird die mathematische Optimierung zur Modellierung der Flugzeug-Routen-Zuordnung im globalen LTS ähnlich eingesetzt wie bei der Ermittlung der Flugzeug-Routen-Zuordnung einer einzelnen Airline (vgl. Unterabschnitt 2.2.1): Basierend auf der verfügbaren Flugzeugflotte werden den Routen eines angestrebten Flugplans Flugzeugtypen zugeordnet. Diese Zuordnung erfolgt anhand einer Zielfunktion, welche ökonomische Kriterien (wie die mit dem Betrieb der einzelnen Flugzeugtypen assoziierten Kosten und Umsätze) beschreibt, und Nebenbedingungen, welche logische, technische und operationelle Aspekte der Flugzeug-Routen-Zuordnung (wie die begrenzten Verfügbarkeiten von Flugzeugflotte und Flughafenkapazitäten) umfassen. Im Gegensatz zu den Ansätzen für einzelne Airlines, aber analog zu den Ansätzen von *Tetzloff und Crossley* (2009), *Randt* (2013, 2016) und *Randt et al.* (2015), wird das resultierende Optimierungsproblem für die Flugzeug-Routen-Zuordnung im globalen LTS allerdings airlineübergreifend formuliert. Dies bedeutet, dass eine globale airlineübergreifende Flugzeugflotte einem airlineübergreifenden Flugplan zugeordnet wird. Da das Ziel des zu entwickelnden Modells nicht die Optimierung der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung ist, sondern die Abbildung der im realen, globalen LTS zu beobachtenden Flugzeug-Routen-Zuordnung, sind zusätzliche Modifikationen des Optimierungsproblems notwendig (detailliert beschrieben in Unterabschnitt 4.3.8), um trotz des airlineübergreifenden Ansatzes die durch den Airline-Wettbewerb im realen LTS resultierenden Imperfektionen der Flugzeug-Routen-Zuordnung zu erfassen.

Insgesamt werden mit dem beschriebenen Modellierungsansatz auf Basis der mathematischen Optimierung die Einflussparameter der Flugzeug-Routen-Zuordnung einzelner Airlines in ein globales, airlineübergreifendes Modell der Flugzeug-Routen-Zuordnung überführt. Aus diesem Vorgehen folgt die Erfüllung der in Tab. 3.1 aufgeführten Modellanforderungen (b) *Erklärender Modellierungsansatz*, da der kausale Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen durch die Zielfunktion und die Nebenbedingungen der mathematischen Optimierung gegeben ist, sowie (c) *Szenariofähigkeit und Modelldynamik*, da der Modellierungsansatz flexibel und dynamisch auf veränderte Szenarien, welche Einfluss auf die Zielfunktion oder die Nebenbedingungen haben, reagieren kann.

Damit mit dem beschriebenen Modellierungsansatz die Anforderung aus dem Einsatzbereich (a) *Abbildung der Flugzeug-Routen-Zuordnung im globalen LTS* erfüllt wird, sollen die in der Modellentwicklung betrachteten Flugpläne und Flugzeugflotten nennenswerte Anteile der globalen ASK abdecken. Da zusätzlich die Anforderungen an die Abbildungsqualität (Unterabschnitt 3.1.2) des zu entwickelnden

Modells die Verwendung expliziter Flugzeugtypen (anstelle von z. B. Flugzeugkategorien, wie in der Literatur ebenfalls üblich, vgl. Unterabschnitt 2.2.3) einfordern, wird sich für den gewählten Modellierungsansatz auf die Abbildung der Flugzeug-Routen-Zuordnung von Großraumflugzeugen im kommerziellen, zivilen Passagierbetrieb fokussiert. Dies hat den Vorteil, dass mit einer begrenzten Anzahl an Flugzeugtypen ein signifikanter Anteil der globalen ASK abgedeckt wird, wodurch die Menge der benötigten flugzeugtypspezifischen Daten zur Beschreibung der Gesamtflotte reduziert wird.

Die Anforderung *(d) Modellgültigkeit unabhängig vom betrachteten Zeitraum* ist durch den ausgewählten Modellierungsansatz erfüllbar. Voraussetzung hierfür ist, dass die Zielfunktion und die Nebenbedingungen der mathematischen Optimierung unabhängig vom betrachteten Zeitraum die wesentlichen Einflussgrößen der Flugzeug-Routen-Zuordnung im globalen LTS erfassen. Hiervon ist bei geeigneter Wahl der Zielfunktion sowie der Nebenbedingungen auszugehen: Beispielsweise sind die mit dem Flugbetrieb einhergehenden Betriebskosten und Umsätze sowie die begrenzten Verfügbarkeiten von Flugzeugflotte und Flughafenskapazitäten unabhängig vom betrachteten Zeitraum betriebswirtschaftlich und operationell grundlegend für die Flugzeug-Routen-Zuordnung einer einzelnen Airline (Abara, 1989; Belobaba et al., 2009). Werden diese und weitere vergleichbare, grundlegende Einflussgrößen der Flugzeug-Routen-Zuordnung einzelner Airlines in das mathematische Optimierungsproblem der Flugzeug-Routen-Zuordnung im globalen LTS überführt, ist von der Modellgültigkeit unabhängig vom betrachteten Zeitraum auszugehen – unter der Annahme einer evolutionären Entwicklung der Marktstruktur im globalen LTS.

Die Anforderung *(e) Anwendbarkeit für die Bewertung von Flugzeugentwürfen* wird für den Modellierungsansatz der mathematischen Optimierung durch die Berücksichtigung von flugzeugtypspezifischen Leistungsparametern in der Zielfunktion (z. B. die mit dem Flugbetrieb einhergehenden Betriebskosten) und den Nebenbedingungen (z. B. die Reichweite) erfüllt. Zusätzlich sind mit den Betriebskosten und den darin enthaltenen Treibstoffverbräuchen zwei der wesentlichen Bewertungsmetriken für Flugzeugentwürfe (Unterabschnitt 2.1.2) inhärent Teil des Modellierungsansatzes.

Die Lösung großer Zuordnungsprobleme durch den Einsatz von mathematischer Optimierung kann im Allgemeinen sehr rechenaufwendig sein (Gu et al., 1994). Daher werden bei der Ausgestaltung des Ansatzes der mathematischen Optimierung zur Modellierung der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung zwei Vereinfachungen durchgeführt, damit die Anforderung *(f) Geringe Rechenanforderungen bei Anwendung* erfüllt ist. Erstens sind die Flugpläne, für die die Flugzeug-Routen-Zuordnungen durchgeführt werden, airlineübergreifend und für den betrachteten Zeitraum (i. d. R. ein Jahr) aggregiert. Hieraus folgt, dass das zu lösende Optimierungsproblem, unter Vernachlässigung etwaiger zeitlicher Veränderungen der

Flugzeug-Routen-Zuordnung innerhalb des betrachteten Zeitraums, im Vergleich zum Fall von nicht aggregierten Flugplänen, deutlich kleiner ist, da pro gerichtetem Flughafenpaar (Route) nur eine Entscheidungsvariable pro betrachtetem Flugzeugtyp benötigt wird. Zweitens erfolgt die Modellierung des Optimierungsproblems der Flugzeug-Routen-Zuordnung vereinfachend als LP. Dies hat den Vorteil, dass LPs algorithmisch sehr effizient lösbar sind. Eine genauere Diskussion der hieraus resultierenden Vor- und Nachteile erfolgt in Unterabschnitt 4.2.2.

4. Modellentwicklung

In diesem Kapitel erfolgt die Entwicklung eines Modells zur Abbildung der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung. Hierzu wird das im vorherigen Kapitel 3 präsentierte Modellkonzept konkret ausformuliert und vorgestellt. Das resultierende Modell mit dem Namen *FoAM-Dynamic*¹ beantwortet die Frage, welcher Flugzeugtyp auf einer Route für welchen Anteil der angebotenen Sitzplatzkapazität eingesetzt wird.

Die schematische Modellarchitektur ist in Abb. 4.1 dargestellt. Die Eingabegrößen des Modells umfassen das globale Routennetzwerk, die globale Flugzeugflotte, Flugleistungsparameter der in der Flugzeugflotte enthaltenen Flugzeugtypen sowie Daten zu den im Routennetzwerk enthaltenen Flughäfen. Der Kern des Modells ist ein mathematisches Optimierungsproblem. Die Zielfunktion dieses Optimierungsproblems bildet die Wirtschaftlichkeit der Flugzeug-Routen-Zuordnung ab, indem die direkten Betriebskosten und das Umsatzpotential, vereinfachend dargestellt als Passagierattraktivität mit den Einflussfaktoren Flugfrequenz und Blockzeit, gegenübergestellt werden. Die Nebenbedingungen des Optimierungsproblems umfassen logische Nebenbedingungen, wie die Abdeckung des Routennetzwerks; betriebliche Nebenbedingungen, wie endliche Flughafenkapazitäten; und technische Nebenbedingungen, wie die Nutzlast-Reichweiten-Eigenschaften der Flugzeugtypen. Das

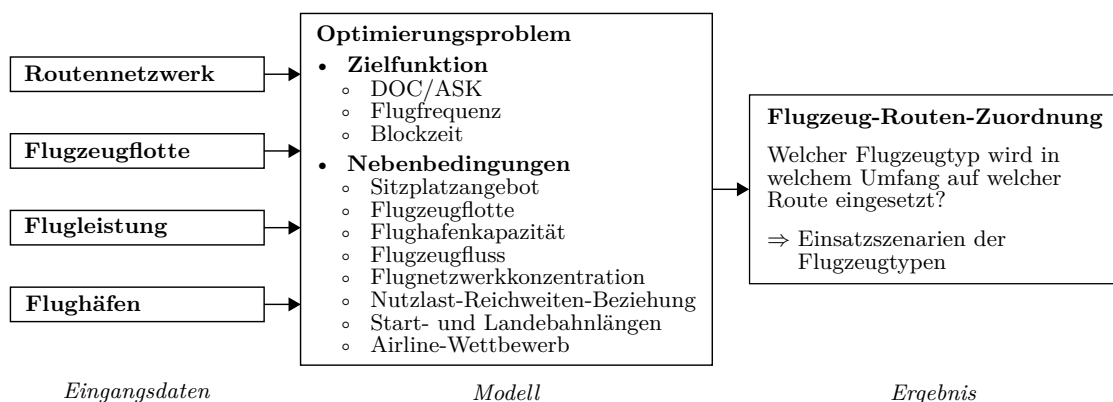


Abb. 4.1: Schematische Darstellung der allgemeinen Modellarchitektur

¹In Anlehnung an das Modell *FoAM* (Forecast of Aircraft Movements; Vorhersage von Flugbewegungen) aus *Kölker et al.* (2016), welches eine vergleichbare Zielsetzung verfolgt, aber einen rein statistischen Modellierungsansatz anwendet und in der Folge weniger dynamisch und umfangreich auf veränderte Untersuchungsszenarien reagiert als das hier entwickelte Modell.

Ergebnis des Modells ist die globale Flugzeug-Routen-Zuordnung, die angibt, welcher Flugzeugtyp für welchen Anteil der angebotenen Sitzplatzkapazität auf einer Route eingesetzt wird. Basierend auf der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung können u. a. die Einsatzszenarien einzelner Flugzeugtypen bestimmt werden.

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Aspekte des Modells detailliert vorgestellt. Hierzu wird in Abschnitt 4.1 die verwendete Datengrundlage präsentiert. Anschließend wird in Abschnitt 4.2 das Optimierungsproblem der Flugzeug-Routen-Zuordnung ausformuliert und diskutiert. In Abschnitt 4.3 werden weitere Submodelle für verschiedene Aspekte des Flugbetriebs und des Lufttransportsystems vorgestellt. Dies umfasst u. a. Betriebskosten, Flughafenkapazitäten, benötigte Start- und Landebahnlängen sowie den Airline-Wettbewerb. Die Kalibrierung des Gesamtmodells wird in Abschnitt 4.4 präsentiert. In Abschnitt 4.5 wird der konkrete Ablauf einer Berechnung mit dem entwickelten Modell zusammengefasst. Abschließend erfolgt in Abschnitt 4.6 die Verifizierung und Validierung des entwickelten Modells. Hierzu erfolgen Vergleiche der Modellergebnisse mit historischen Daten sowie der Modelleigenschaften mit den in Kapitel 3 erarbeiteten Anforderungen an den Modellentwurf.

4.1 Datengrundlage

Für die Entwicklung, Kalibrierung und Validierung des Modells der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung werden verschiedene Daten als Grundlage verwendet. Diese Daten umfassen die vier Bereiche (a) Routennetzwerk, (b) Flugzeugflotte, (c) Flugleistung sowie (d) Flughäfen.

Während die beschriebenen Daten grundsätzlich für eine Vielzahl an Flugzeugtypen zur Verfügung stehen, beschränkt sich die in diesem Kapitel beschriebene Modellentwicklung auf eine Auswahl von 37 Flugzeugtypen, welche im kommerziellen Passagierbetrieb mit Großraumflugzeugen besonders wichtig sind (vgl. Einsatzbereich des Modells, Unterabschnitt 3.1.1). Gemeinsam decken die berücksichtigten Flugzeugtypen im Zeitraum 2010–2019 69 % der Flugbewegungen und 92 % der ASK ab (*Sabre*, 2022), sodass eine repräsentative Auswahl an Flugzeugtypen vorliegt. Eine Auflistung der konkreten Flugzeugtypen kann Tab. A.1 in Anhang A.1 entnommen werden.

(a) Routennetzwerk

Für das Routennetzwerk werden Daten der kommerziellen Datenbank *Sabre Market Intelligence* verwendet (*Sabre*, 2022). Die entsprechenden Routennetzwerkdaten umfassen auf monatlicher Basis alle global kommerziell angesetzten Flüge für den Zeitraum 2010–2019. Hierbei sind jeweils Start- und Zielflughafen, Airline,

Identifikationscode des Flugzeugtyps nach dem Standard der internationalen Luftverkehrsvereinigung (engl. International Air Transport Association; IATA), Flugnummer, Datumsbereich der Flugdurchführung, Start- und Ankunftszeit, Flugdauer, Anzahl an Flugdurchführungen, angebotene Sitzplatzanzahl pro Flug sowie die Großkreisdistanz (engl. Great Circle Distance; GCD) zwischen Start- und Zielflughafen angegeben.

Für die Nutzung der initialen Routennetzwerkdaten werden diese aufbereitet und aggregiert. Zu den Aufbereitungsschritten zählen das Nachrechnen und eventuelle Korrigieren der GCD zwischen Start- und Zielflughafen, die Identifikation der IATA-Codes der Flugzeugtypen sowie das Überprüfen und Korrigieren der angegebenen Sitzplätze pro Flug. Die Datenaggregation beinhaltet die Bildung jährlicher Datensätze. Hierbei werden Einträge mit identischem Tupel aus Start- und Zielflughafen, Flugzeugtyp und Sitzplatzanzahl pro Flug zusammengefasst und die insgesamt angebotene Sitzplatzkapazität aller Flüge über alle Airlines aufsummiert. Außerdem werden pro Tupel aus Start- und Zielflughafen die Anzahl an Tagen mit Flugbetrieb, die Anzahl an Airlines und die Anzahl an Flugzeugtypen sowie die jeweilige Marktkonzentration der Airlines und Flugzeugtypen ermittelt. Die aufbereiteten und aggregierten Routennetzwerkdaten umfassen ca. 1,4 Millionen Einträge mit insgesamt mehr als 221 Millionen Flügen, 38 Milliarden angebotenen Sitzplätzen und 75 Billionen ASK.

(b) Flugzeugflotte

Für die Flugzeugflotte werden Daten der kommerziellen Datenbank *Cirium Fleets-Analyzer* verwendet (Cirium, 2022). Die Flugzeugflottendaten umfassen alle im Dienst befindlichen weltweiten Flugzeugeinheiten. Für jede Flugzeugeinheit sind u. a. Informationen zu Seriennummer, Registrierung, Betreiber, Inhaber, Alter, Triebwerken, Sitzplatzanzahl, Massen und Betriebsstunden im Jahr verfügbar. Für die betrachtete Auswahl von 37 Flugzeugtypen umfassen die Flugzeugflottendaten insgesamt ca. 25 000 Flugzeugeinheiten.

Für die Nutzung der Flugzeugflottendaten werden diese pro Flugzeugtyp aggregiert, wobei die Anzahl an Flugzeugeinheiten, die durchschnittliche Sitzplatzanzahl und das durchschnittliche Alter jeweils pro Flugzeugtyp ermittelt werden. Um die Entwicklung der Flugzeugflotte über das Jahr hinweg zu berücksichtigen (neue Flugzeuge werden produziert, alte Flugzeuge außer Dienst gestellt, Flugzeuge temporär stillgelegt), werden die Flugzeugflottendaten zur Mitte aller Quartale erhoben und für das Jahr gemittelt.

(c) Flugleistungen

Für die Flugleistung werden flugzeugtypspezifische Daten aus verschiedenen Quellen kombiniert. Für die Nutzlast-Reichweiten-Diagramme (NRD) sowie die benötigten Start- und Landebahnlängen werden Flugzeugeigenschaftsleitfäden (engl.

Aircraft Characteristics Manuals; ACMs) (*Airbus*, 2022a; *Boeing*, 2022a; *ATR*, 2023; *Embraer*, 2023) verwendet. Die Treibstoffverbräuche werden mittels Flugzeugdatenbasis (engl. Base of Aircraft Data; BADA) (*Eurocontrol*, 2022) ermittelt. Repräsentative und maximale Sitzplatzanzahlen werden aus Musterzulassungsdatenblättern (engl. Type Certificate Data Sheets; TCDS) (*European Union Aviation Safety Agency*, 2022) sowie *Cirium* (2022) entnommen. Sind für einen Flugzeugtyp einzelne Informationen nicht verfügbar, so werden diese in Analogie zu *Roskopf* (2013) und *Presto* (2023) anhand ähnlicher Flugzeugtypen angenähert.

(d) Flughäfen

Für die Flughäfen werden öffentlich verfügbare Daten aus verschiedenen Quellen kombiniert. Mittels eines Webcrawlers werden Daten aus *Wikipedia* (2023) automatisiert verarbeitet und grundlegende Flughafendaten gesammelt, wie IATA-Flughafencode, Stadt, Land, geografische Position, geografische Höhe, maximale Runway-Länge sowie die Anzahl an Runways. Für die 200 nach globalen ASK wichtigsten Flughäfen wird mittels Satellitenbildern (*Google*, 2023) manuell die geometrische Anordnung der Runways (Runway-Konfiguration) bestimmt (vgl. Tab. A.5 in Anhang A.2). Zusätzlich ist die Runway-Konfiguration für Flughäfen mit nur einer Runway trivialerweise ebenfalls gegeben. Insgesamt sind so für Flughäfen, welche ca. 95 % der globalen ASK abdecken, die Runway-Konfigurationen explizit gegeben. Für alle anderen Flughäfen wird die Runway-Konfiguration basierend auf der Anzahl an Runways konservativ abgeschätzt (Unterabschnitt 4.3.5). Um die korrekte Zuordnung von IATA-Flughafencodes und geografischen Positionen der Flughäfen sicherzustellen, werden die ermittelten Daten mit denen von *Sabre* (2022) und *OurAirports* (2023) abgeglichen und etwaige Abweichungen durch manuelle Online-Recherche korrigiert. Insgesamt werden so ca. 3400 Flughäfen berücksichtigt.²

4.2 Optimierungsproblem der Flugzeug-Routen-Zuordnung

Das Optimierungsproblem der Flugzeug-Routen-Zuordnung verfolgt das Ziel, durch eine geeignete Wahl von Zielfunktion und Nebenbedingungen die in der Realität vorherrschende globale Flugzeug-Routen-Zuordnung abzubilden. In den folgenden beiden Unterabschnitten wird zuerst die mathematische Formulierung des Optimierungsproblems vorgestellt, bevor Eigenschaften und Anwendung des Modells beschrieben werden.

²Zum Vergleich: In *Willems* (2020) werden weltweit insgesamt ca. 42 000 Flughäfen angegeben, von denen 9200 einen IATA-Flughafencode besitzen und nur 3700 von mehr als 100 kommerziellen Passagieren im Jahr genutzt werden (jeweils Stand 2018).

4.2.1 Mathematische Formulierung

Die mathematische Formulierung des entwickelten Optimierungsproblems der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung ist durch die Gleichungen (4.1) bis (4.29) gegeben. Nachfolgend werden diese Gleichungen, kategorisiert nach den sechs Bereichen (a) Zielfunktion und Entscheidungsvariablen, (b) Nebenbedingungen, (c) Kosten, (d) Flugzeugnutzung, (e) Marktkonzentration und (f) Hilfsmengen zur mathematischen Formulierung, vorgestellt. Die für die Formulierung des entwickelten Optimierungsproblems notwendigen Notationen sind zusätzlich in den Tabellen 4.1 bis 4.5 angegeben.

(a) Zielfunktion und Entscheidungsvariablen

Die Zielfunktion des formulierten Optimierungsproblems der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung minimiert die Kosten, um mit einer vorgegebenen Flugzeugflotte ein vordefiniertes Routennetzwerk mit statischem Sitzplatzangebot abzudecken (Gl. (4.1)).

$$\min \sum_{(o,d,c,t) \in ODCT} v_{o,d,c,t} \cdot x_{o,d,c,t} \quad (4.1)$$

Die globale Flugzeug-Routen-Zuordnung wird hierfür durch die Entscheidungsvariablen $x_{o,d,c,t}$ beschrieben, welche angeben, zu welchem Anteil das Sitzplatzangebot einer Airline c auf einer Route von Startflughafen o zu Zielflughafen d durch den Flugzeugtyp t bedient wird (Gl. (4.2)).

$$x_{o,d,c,t} = \frac{s_{o,d,c,t}}{s_{o,d,c}} \in [0, 1] \quad \forall (o, d, c, t) \in ODCT \quad (4.2)$$

Tab. 4.1: Notation für Zielfunktion und Entscheidungsvariablen

Notation	Bedeutung
c	Airline
d	Zielflughafen
o	Startflughafen
$ODCT$	Menge aller möglichen Kombinationen aus Routen, Airlines und Flugzeugtypen (s. Gl. (4.23))
$s_{o,d,c}$	Sitzplatzangebot von Airline c auf Route (o, d)
$s_{o,d,c,t}$	Sitzplatzangebot von Airline c auf Route (o, d) mit Flugzeugtyp t
t	Flugzeugtyp
$v_{o,d,c,t}$	Kosten für die Zuordnung von Flugzeugtyp t durch Airline c zu Route (o, d) (s. Gl. (4.8))

Notation	Bedeutung
$x_{o,d,c,t}$	Entscheidungsvariable zur Bestimmung des Anteils des Sitzplatzangebots von Airline c auf Route (o,d) , der von Flugzeugtyp t bedient wird

(b) Nebenbedingungen

Damit das Optimierungsproblem eine sinnvolle Lösung hervorbringt, gilt es, die folgenden Nebenbedingungen einzuhalten:

- *Sitzplatzangebot:* Für jede Kombination aus Route (o,d) und Airline c muss die Summe der angebotenen Sitzplatzkapazität aller Flugzeugtypen t mindestens der Sitzplatzkapazität $s_{o,d,c}$ der Airline c entsprechen (Gl. (4.3)).

$$\sum_{t \in T_{o,d}} x_{o,d,c,t} \geq 1 \quad \forall (o,d,c) \in OD \times C_{o,d} \quad (4.3)$$

- *Flugzeugflotte:* Für jeden Flugzeugtyp t muss die Anzahl der für die Flugzeug-Routen-Zuordnung verwendeten Flugzeuginheiten die Begrenzung durch die vorgeschriebene Flugzeugflotte u_t^{avail} einhalten (Gl. (4.4)).

$$\sum_{(o,d,c) \in OD_t \times C_{o,d}} u_{o,d,c,t} \cdot x_{o,d,c,t} \leq u_t^{avail} \quad \forall t \in T \quad (4.4)$$

- *Flughafenkapazitäten:* Für jeden Flughafen a muss die Anzahl der Flugbewegungen als Summe aus Starts und Landungen die individuelle Flughafenkapazität des Flughafens f_a^{avail} berücksichtigen (Gl. (4.5)).

$$\begin{aligned} \sum_{(o,d,c,t) \in ARR_a} f_{o,d,c,t} \cdot x_{o,d,c,t} + \\ \sum_{(o,d,c,t) \in DEP_a} f_{o,d,c,t} \cdot x_{o,d,c,t} \leq f_a^{avail} \quad \forall a \in A \end{aligned} \quad (4.5)$$

Soll die globale Flugzeug-Routen-Zuordnung hinsichtlich ausgewählter Flugzeugtypen t_f untersucht werden, können zusätzliche Nebenbedingungen hinzugezogen werden, die die Realitätsnähe der Ergebnisse für diese ausgewählten Flugzeugtypen verbessern, aber nicht auf die globale Flugzeug-Routen-Zuordnung anwendbar sind:

- *Flugzeugfluss:* Für die ausgewählten Flugzeugtypen t_f muss an jedem Flughafen a die Anzahl der Starts der Anzahl der Landungen entsprechen, sodass

der Fluss der Flugzeugeinheiten im Flugnetzwerk korrekt erfolgt (Gl. (4.6)). Da die als Datengrundlage verwendeten Routennetzwerkdaten Quellen und Senken hinsichtlich des Sitzplatzangebots pro Flughafen aufweisen, kann der Flugzeugfluss allerdings nicht für jeden Flugzeugtyp t korrekt erfolgen.

$$\begin{aligned} \sum_{(o,d,c,t) \in ARR_{a,t_f}} f_{o,d,c,t} \cdot x_{o,d,c,t} - \\ \sum_{(o,d,c,t) \in DEP_{a,t_f}} f_{o,d,c,t} \cdot x_{o,d,c,t} = 0 \quad \forall a \in A, \forall t_f \in T_f \end{aligned} \quad (4.6)$$

- *Flugnetzwerkkonzentration*: Für jede Kombination aus Flughafen a und den ausgewählten Flugzeugtypen t_f muss gelten, dass entweder keine oder eine Mindestanzahl an Flugzeugeinheiten $\mathbb{R}_{\geq u^{min,arr}}^+$ für Landungen am Flughafen a eingesetzt wird. Hieraus folgt, dass die Flugnetzwerke der ausgewählten Flugzeugtypen t_f nur Flughäfen mit einer Mindestanzahl an Landungen von t_f beinhalten und die Flugnetzwerke dementsprechend je nach Wert von $u^{min,arr}$ auf wenige Flughäfen konzentriert sind (Gl. (4.7)). Da die als Datengrundlage verwendeten Routennetzwerksdaten Flughäfen mit höchst unterschiedlicher Sitzplatzangebotsquantität aufweisen³, kann die Nebenbedingung zur Flugnetzwerkkonzentration allerdings nicht zielführend für alle Flugzeugtypen eingesetzt werden.

$$\left(\sum_{(o,d,c,t) \in ARR_{a,t_f}} u_{o,d,c,t} \cdot x_{o,d,c,t} \right) \in \{0\} \cup \mathbb{R}_{\geq u^{min,arr}}^+ \quad \forall a \in A, \forall t_f \in T_f \quad (4.7)$$

Tab. 4.2: Notation für die Nebenbedingungen

Notation	Bedeutung
a	Flughafen
A	Menge aller Flughäfen (s. Abschnitt 4.1)
ARR_a	Teilmenge von $ODCT$ mit Zielflughafen a (s. Gl. (4.26))
ARR_{a,t_f}	Teilmenge von $ODCT$ mit Zielflughafen a und Flugzeugtyp t_f (s. Gl. (4.28))
$C_{o,d}$	Menge aller Airlines auf Route (o, d) (s. Gl. (4.16))
DEP_a	Teilmenge von $ODCT$ mit Startflughafen a (s. Gl. (4.27))
DEP_{a,t_f}	Teilmenge von $ODCT$ mit Startflughafen a und Flugzeugtyp t_f (s. Gl. (4.29))
f_a^{avail}	Anzahl an verfügbaren Flugbewegungen am Flughafen a (Flughafenkapazität, s. Unterabschnitt 4.3.5)

³Zwischen dem minimalen und maximalen Sitzplatzangebot eines Flughafens in den Routennetzwerksdaten liegen bis zu sieben Größenordnungen.

Notation	Bedeutung
$f_{o,d,c,t}$	Flugfrequenz bei Zuordnung von Flugzeugtyp t für Route (o, d) durch Airline c (s. Gl. (4.10))
OD	Menge aller Routen (s. Abschnitt 4.1 und Gl. (4.21))
OD_t	Menge aller Routen, die Flugzeugtyp t gemäß Gl. (4.12) mit mindestens einem belegten Sitzplatz, bedienen kann (s. Gl. (4.24))
T	Menge aller Flugzeugtypen (s. Abschnitt 4.1)
t_f	ausgewählter Flugzeugtyp
T_f	Menge aller ausgewählten Flugzeugtypen
$T_{o,d}$	Menge aller Flugzeugtypen, die die Route (o, d) gemäß Gl. (4.12) mit mindestens einem belegten Sitzplatz, bedienen können (s. Gl. (4.25))
$u^{min,arr}$	Mindestanzahl an Flugzeugeinheiten eines Flugzeugtyps, die für Landungen an einem Flughafen eingesetzt werden sollen
$u_{o,d,c,t}$	Anzahl an Flugzeugeinheiten des Flugzeugtyps t , die benötigt werden, um das Sitzplatzangebot von Airline c auf Route (o, d) zu bedienen (s. Gl. (4.13))
u_t^{avail}	Anzahl an verfügbaren Flugzeugeinheiten des Flugzeugtyps t (s. Abschnitt 4.1)

(c) Kosten

Die Kosten für die Zuordnung von Flugzeugtyp t zu der durch Airline c bedienten Route (o, d) werden durch den Parameter $v_{o,d,c,t}$ beschrieben. Sie setzen sich aus der gewichteten Summe der DOC sowie dem finanziellen Gegenwert der Flugfrequenz und der Blockzeit der möglichen Flugzeug-Routen-Zuordnung zusammen (Gl. (4.8)). Die einzelnen Summanden werden in den Unterabschnitten 4.3.1 und 4.3.7 detailliert beschrieben; wobei auch das Konzept des *Schedule Delays* (Zeitplanverspätung) eingeführt wird, welches den Gegenwert von Flugfrequenzen für Passagiere erfasst. Die Gewichtungsparmeter β^{tsd} und β^{bt} für den finanziellen Gegenwert von Schedule Delay und Blockzeit können während der Modellkalibrierung (Abschnitt 4.4) bestimmt oder anhand von Literaturwerten festgelegt werden.

$$v_{o,d,c,t} = \left(doc_{o,d,t} + \beta^{tsd} \cdot tsd_{o,d,t} + \beta^{bt} \cdot \Delta bt_{o,d,t} \right) \cdot m_{o,d,c,t} \quad \forall (o, d, c, t) \in ODCT \quad (4.8)$$

Um die unterschiedlichen Kostenpositionen der Airlines, z.B. resultierend aus unterschiedlichen Geschäftsmodellen und Routennetzwerken, in der Flugzeug-Routen-Zuordnung berücksichtigen zu können, wird die ansonsten deterministisch

modellierte Kostensumme durch stochastische Parameter $m_{o,d,c,t}$ modifiziert (Unterabschnitt 4.3.8). Diese stochastischen Parameter folgen einer Normalverteilung mit einem Mittelwert von 1 und einer Standardabweichung von σ_m , wobei für jedes Tupel (o, d, c, t) unabhängige Realisierungen von $m_{o,d,c,t}$ generiert werden (Gl. (4.9)). Die Standardabweichung σ_m wird während der Kalibrierung des Gesamtmodells (Abschnitt 4.4) ermittelt.

$$m_{o,d,c,t} \sim \mathcal{N}(1, \sigma_m) \quad \forall (o, d, c, t) \in ODCT \quad (4.9)$$

Tab. 4.3: Notation für die Kosten

Notation	Bedeutung
β^{tsd}	Parameter zur Gewichtung des Schedule Delays (s. Unterabschnitt 4.3.7)
β^{bt}	Parameter zur Gewichtung der zusätzlichen Blockzeit (s. Unterabschnitt 4.3.7)
$\Delta bt_{o,d,t}$	Zusätzliche Blockzeit bei Zuordnung von Flugzeugtyp t für Route (o, d) im Vergleich zum schnellsten verfügbaren Flugzeugtyp (s. Unterabschnitt 4.3.7)
$doc_{o,d,t}$	DOC bei Zuordnung von Flugzeugtyp t für Route (o, d) (s. Unterabschnitt 4.3.1)
$m_{o,d,c,t}$	Faktor zur Modifikation der Kosten für Airline c bei Einsatz von Flugzeugtyp t auf Route (o, d) (s. Unterabschnitt 4.3.8)
σ_m	Standardabweichung der Normalverteilung zur Ermittlung von $m_{o,d,c,t}$ (s. Unterabschnitt 4.3.8)
$tsd_{o,d,t}$	Summe des Schedule Delays aller Passagiere bei Einsatz von Flugzeugtyp t auf Route (o, d) (s. Unterabschnitt 4.3.7)

(d) Flugzeugnutzung

Die Flugfrequenz $f_{o,d,c,t}$, die aus einer Zuordnung des Flugzeugtyps t durch Airline c für Route (o, d) folgt, wird durch den Quotienten aus Sitzplatzangebot $s_{o,d,c}$ und Passagieranzahl pro Flug $p_{o,d,t}$ bestimmt (Gl. (4.10)).

$$f_{o,d,c,t} = \frac{s_{o,d,c}}{p_{o,d,t}} \quad \forall (o, d, c, t) \in ODCT \quad (4.10)$$

Als Passagieranzahl pro Flug $p_{o,d,t}$ wird das Maximum der Menge aller möglichen Passagieranzahlen $P_{o,d,t}$, welche dem Flugzeugtyp t das Befliegen der Route (o, d) ermöglichen, verwendet (Gl. (4.11)).

$$p_{o,d,t} = \max(P_{o,d,t}) \quad \forall (o, d, t) \in ODT \quad (4.11)$$

Erlaubt sind hierbei alle streng positiven, natürlichen Passagierzahlen kleiner der maximalen Sitzplatzanzahl, mit denen der Flugzeugtyp t erstens eine ausreichende Reichweite $r_{t,p}$ besitzt, um die Distanz der Route $d_{o,d}$ zu fliegen, und zweitens ausreichend kurze benötigte Start- und Landebahnlängen aufweist, um am Flughafen o starten und am Flughafen d landen zu können (Gl. (4.12)). Die Menge $P_{o,d,t}$ kann hierbei explizit auch leer sein, wodurch eine Zuordnung des Flugzeugtyps t zur Route (o, d) ausgeschlossen wird.

$$P_{o,d,t} = \left\{ p \in \mathbb{N}_{\leq p_t^{max}}^+ \mid (r_{t,p} \geq d_{o,d}) \wedge \right. \\ \left. (tofl_{o,d,t,p}^{req} \leq rwl_o^{avail}) \wedge \right. \\ \left. (lfl_{o,d,t,p}^{req} \leq rwl_d^{avail}) \right\} \quad \forall (o, d, t) \in OD \times T \quad (4.12)$$

Die Anzahl an Flugzeugeinheiten $u_{o,d,c,t}$, die Airline c für die Zuordnung des Flugzeugtyps t für Route (o, d) benötigt, wird basierend auf der Flugfrequenz $f_{o,d,c,t}$, dem Gültigkeitszeitraum des Routennetzwerks Δt^{rn} (hier ein Jahr) sowie den mit dem Modell der Flugzeugnutzung (Unterabschnitt 4.3.4) bestimmten Größen Blockzeit $bt_{o,d,t}$, Turnaround-Zeit $tat_{o,d,t}$ und Nutzungsrate $utr_{o,d,t}$ bestimmt (Gl. (4.13)).

$$u_{o,d,c,t} = f_{o,d,c,t} \cdot \frac{bt_{o,d,t} + tat_{o,d,t}}{\Delta t^{rn} \cdot utr_{o,d,t}} \quad \forall (o, d, c, t) \in ODCT \quad (4.13)$$

Tab. 4.4: Notation für die Flugzeugnutzung

Notation	Bedeutung
$bt_{o,d,t}$	Blockzeit für einen Flug von Flugzeugtyp t auf Route (o, d) (s. Unterabschnitt 4.3.4)
$d_{o,d}$	Distanz der Route (o, d)
Δt^{rn}	Zeitraum der Gültigkeit der Flugzeug-Routen-Zuordnung
$lfl_{o,d,t,p}^{req}$	Benötigte Landebahnlänge von Flugzeugtyp t auf Route (o, d) bei p Passagieren (s. Unterabschnitt 4.3.6)
ODT	Menge aller möglichen Kombinationen aus Routen und Flugzeugtypen (s. Gl. (4.22))
p	Anzahl angebotener Sitzplätze
p_t^{max}	Anzahl der maximal anzubietenden Sitzplätze des Flugzeugtyps t (s. Unterabschnitt 4.3.3)
$p_{o,d,t}$	Anzahl der mit Flugzeugtyp t anzubietenden Sitzplätze auf Route (o, d)

Notation	Bedeutung
$P_{o,d,t}$	Menge der möglichen anzubietenden Sitzplätze durch Flugzeugtyp t auf Route (o, d)
$r_{t,p}$	Reichweite von Flugzeugtyp t bei p angebotenen Sitzplätzen (s. Unterabschnitt 4.3.3)
rwl_d^{avail}	Verfügbare Runway-Länge an Zielflughafen d (s. Abschnitt 4.1)
rwl_o^{avail}	Verfügbare Runway-Länge an Startflughafen o (s. Abschnitt 4.1)
$tat_{o,d,t}$	Turnaround-Zeit für Flugzeugtyp t auf Route (o, d) (s. Unterabschnitt 4.3.4)
$tofl_{o,d,t,p}^{req}$	Benötigte Startbahnlänge von Flugzeugtyp t auf Route (o, d) bei p Passagieren (s. Unterabschnitt 4.3.6)
$utr_{o,d,t}$	Nutzungsrate für Flugzeugtyp t auf Route (o, d) (s. Unterabschnitt 4.3.4)

(e) Marktkonzentration

Die Gleichungen (4.14) bis (4.20) beschreiben gemeinsam, wie das Sitzplatzangebot pro Route $s_{o,d}$ auf verschiedene Airlines c aufgeteilt wird.

Die Anzahl der auf der Route operierenden Airlines $c_{o,d}$ wird basierend auf einem empirischen Zusammenhang mit dem Sitzplatzangebot auf der Route $s_{o,d}$ bestimmt. Hierfür wird für jedes Tupel (o, d) eine unabhängige Realisierung $c_{o,d}^{rng}$ aus einer Normalverteilung gezogen (Gl. (4.15)), deren Mittelwert und Standardabweichung jeweils von dem Sitzplatzangebot pro Route $s_{o,d}$ abhängen und in Unterabschnitt 4.3.8 beschrieben werden. Da ein Wert für die Anzahl der auf der Route operierenden Airlines $c_{o,d}$ nur bei Ganzzahligkeit und mit einem Minimum von 1 plausibel ist, wird die Zufallsstichprobe $c_{o,d}^{rng}$ dahingehend modifiziert (Gl. (4.14)). Der Parameter β_{airl} ermöglicht hierbei die zusätzliche Kalibrierung des entwickelten Modells (Abschnitt 4.4) hinsichtlich der Anzahl an Airlines auf einer Route und der hieraus resultierenden Auswirkungen auf die Marktkonzentration der Flugzeug-Routen-Zuordnung (Unterabschnitt 4.3.8). Die Menge $C_{o,d}$ beinhaltet alle Airlines der Route (o, d) (Gl. (4.16)).

$$c_{o,d} = \left\lfloor \beta_{airl} \cdot (|c_{o,d}^{rng} - 1| + 1) \right\rfloor \quad \forall (o, d) \in OD \quad (4.14)$$

$$c_{o,d}^{rng} \sim \mathcal{N}(g_{c,\mu}(s_{o,d}), g_{c,\sigma}(s_{o,d})) \quad \forall (o, d) \in OD \quad (4.15)$$

$$C_{o,d} = \{c \in \mathbb{N}^+ \mid c \leq c_{o,d}\} \quad \forall (o, d) \in OD \quad (4.16)$$

Ausgehend von der Anzahl der auf der Route operierenden Airlines $c_{o,d}$ wird die Marktkonzentration nach HHI $h_{o,d}$ der auf der Route operierenden Airlines bestimmt. Hierfür wird ausgenutzt, dass der HHI per Definition (Gl. (2.1)) zwischen

dem Kehrwert der Anzahl an Marktteilnehmenden und 1 liegt.⁴ Konkret wird der Wert von $h_{o,d}$ durch die Addition des Betrags einer Zufallsstichprobe $|h_{o,d}^{rng}|$ zum theoretischen Minimum des HHI ($1/c_{o,d}$) berechnet und nach oben durch 1 begrenzt (Gl. (4.17)). Die entsprechende Zufallsstichprobe $h_{o,d}^{rng}$ ist normalverteilt mit dem Mittelwert 0 und einer statischen Standardabweichung σ_h (Gl. (4.18)), die basierend auf historischen Flugplandaten ermittelt wird (Unterabschnitt 4.3.8).

$$h_{o,d} = \min \left(1, \frac{1}{c_{o,d}} + |h_{o,d}^{rng}| \right) \quad \forall (o, d) \in OD \quad (4.17)$$

$$h_{o,d}^{rng} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_h) \quad \forall (o, d) \in OD \quad (4.18)$$

Da die Berechnung des HHI surjektiv ist – d. h., mehrere Aufteilungen der Marktanteile können zum selben HHI führen –, gilt es, für jede Route (o, d) eine Aufteilung des Sitzplatzangebots $s_{o,d}$ auf die einzelnen Airlines c auszuwählen. Hierfür wird zuerst für jede Route die Menge der Vektoren mit validen Sitzplatzangebotsaufteilungen $S_{o,d}^{val}$ bestimmt; wobei valide in diesem Fall bedeutet, dass die Anzahl an Airlines dem Wert von $c_{o,d}$, der HHI dem Wert von $h_{o,d}$ und die Summe des Sitzplatzangebots auf der Route dem Wert von $s_{o,d}$ entsprechen (Gl. (4.19)). Aus der Menge der Vektoren valider Sitzplatzangebotsaufteilungen $S_{o,d}^{val}$ wird dann zufällig (Notation $\in_R$) eine Sitzplatzangebotsaufteilung $S_{o,d}$ ausgewählt, die für die Flugzeug-Routen-Zuordnung weiterverwendet wird (Gl. (4.20)).

$$S_{o,d}^{val} = \left\{ \underline{s} \in (\mathbb{R}^+)^{c_{o,d}} \mid hhi(\underline{s}) = h_{o,d} \wedge \sum_{i=1}^{c_{o,d}} \underline{s}_i = s_{o,d} \right\} \quad \forall (o, d) \in OD \quad (4.19)$$

$$S_{o,d} = \left\{ \underline{s}_1, \dots, \underline{s}_{c_{o,d}} \mid \underline{s} = (\underline{s}_1, \dots, \underline{s}_{c_{o,d}}) \in_R S_{o,d}^{val} \right\} \quad \forall (o, d) \in OD \quad (4.20)$$

Tab. 4.5: Notation für die Marktkonzentration

Notation	Bedeutung
β_{airl}	Kalibrierungsparameter für die Anzahl an Airlines (s. Unterabschnitt 4.3.8)
$c_{o,d}$	Anzahl an Airlines auf Route (o, d)
$c_{o,d}^{rng}$	Zufallsstichprobe zur Ermittlung von $c_{o,d}$ (s. Unterabschnitt 4.3.8)
$g_{c,\mu}$	Funktion für die Berechnung des Mittelwerts der Normalverteilung zur Ermittlung von $c_{o,d}^{rng}$ (s. Unterabschnitt 4.3.8)
$g_{c,\sigma}$	Funktion für die Berechnung der Standardabweichung der Normalverteilung zur Ermittlung von $c_{o,d}^{rng}$ (s. Unterabschnitt 4.3.8)
$h_{o,d}$	HHI der Airlines auf Route (o, d)

⁴Aus $HHI = \sum_{i=1}^N a_i^2$ (Gl. (2.1)) mit den Marktanteilen a_i (Gl. (2.2)), für welche gilt $a_i \geq 0$ und $\sum_{i=1}^N a_i = 1$, folgt $\frac{1}{N} \leq HHI \leq 1$.

Notation	Bedeutung
$h_{o,d}^{rng}$	Zufallsstichprobe zur Ermittlung von $h_{o,d}$ (s. Unterabschnitt 4.3.8)
hhi	Funktion zur Ermittlung des HHI bei gegebener Sitzplatzangebotsaufteilung (s. Gl. (2.1))
s	Sitzplatzangebot
$\underline{s}$	Vektor mit Sitzplatzangeboten
$s_{o,d}$	Sitzplatzangebot auf Route (o, d) (s. Unterabschnitt 4.1)
$S_{o,d}$	Menge der Sitzplatzangebote aller Airlines auf Route (o, d)
$S_{o,d}^{val}$	Menge aller möglichen Sitzplatzangebotsaufteilungen für Route (o, d) gemäß Gl. (4.19)
σ_h	Standardabweichung der Normalverteilung zur Ermittlung von $h_{o,d}^{rng}$ (s. Unterabschnitt 4.3.8)

(f) Hilfsmengen für die mathematische Formulierung

Für die Formulierung der Gleichungen (4.1) bis (4.20) werden weitere Mengen verwendet, die nachfolgend eingeführt werden. Die Menge der Routen OD besteht aus den Tupeln (o, d) der Kombinationen aller Flughäfen a , für die eine positive Anzahl an Sitzplätzen $s_{o,d}$ angeboten wird und bei denen Startflughafen o und Zielflughafen d nicht identisch sind (Gl. (4.21)). Die Menge ODT der Tupel (o, d, t) beinhaltet alle möglichen Kombinationen aus Routen und Flugzeugtypen, bei denen der Flugzeugtyp t die Route gemäß Gl. (4.12) mit mindestens einem belegten Sitzplatz an Bord befliegen kann (Gl. (4.22)). Die Menge $ODCT$ der Tupel (o, d, c, t) beinhaltet alle Kombinationen der Mengen ODT und $C_{o,d}$ (Gl. (4.23)). Für jeden Flugzeugtyp t wird die individuelle Untermenge OD_t an Routen, die der Flugzeugtyp t befliegen kann, definiert (Gl. (4.24)). Gleichmaßen wird für jede Route (o, d) die individuelle Untermenge $T_{o,d}$ an Flugzeugtypen, die die Route (o, d) befliegen können, definiert (Gl. (4.25)).

$$OD = \{(o, d) \in A \times A \mid o \neq d \wedge s_{o,d} > 0\} \quad (4.21)$$

$$ODT = \{(o, d, t) \in OD \times T \mid P_{o,d,t} \neq \emptyset\} \quad (4.22)$$

$$ODCT = \{(o, d, c, t) \in ODT \times C_{o,d}\} \quad (4.23)$$

$$OD_t = OD \setminus \{(o, d) \in OD \mid P_{o,d,t} = \emptyset\} \quad \forall t \in T \quad (4.24)$$

$$T_{o,d} = T \setminus \{t \in T \mid P_{o,d,t} = \emptyset\} \quad \forall (o, d) \in OD \quad (4.25)$$

Für alle Flughäfen a beschreiben die Mengen ARR_a und DEP_a die Untermengen von $ODCT$ mit Routen, deren Start- bzw. Zielflughafen a entspricht (Gl. (4.26) und Gl. (4.27)). Hiervon ausgehend werden für alle etwaigen ausgewählten Flugzeugtypen t_f die Mengen ARR_{a,t_f} und DEP_{a,t_f} definiert, welche Untermengen von

ARR_a und DEP_a darstellen und nur die Tupel (o, d, c, t) beinhalten, bei denen der Flugzeugtyp t dem ausgewählten Flugzeugtyp t_f entspricht (Gl. (4.28) und Gl. (4.29)).

$$ARR_a = \{(o, d, c, t) \in ODCT \mid d = a\} \quad \forall a \in A \quad (4.26)$$

$$DEP_a = \{(o, d, c, t) \in ODCT \mid o = a\} \quad \forall a \in A \quad (4.27)$$

$$ARR_{a,t_f} = \{(o, d, c, t) \in ARR_a \mid t = t_f\} \quad \forall a \in A, \forall t_f \in T_f \quad (4.28)$$

$$DEP_{a,t_f} = \{(o, d, c, t) \in DEP_a \mid t = t_f\} \quad \forall a \in A, \forall t_f \in T_f \quad (4.29)$$

4.2.2 Eigenschaften und Anwendung

Die vorliegende Formulierung des mathematischen Optimierungsmodells der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung nutzt eine lineare Zielfunktion (Gl. (4.1)) und kontinuierliche Entscheidungsvariablen (Gl. (4.2)). Zusätzlich werden – die optionale Nebenbedingung für die Flugnetzwerkkonzentration (Gl. (4.7)) geringfügig vereinfachend außen vor gelassen – ausschließlich lineare Gleichungen und Ungleichungen als Nebenbedingungen (Gl. (4.3)–(4.6)) verwendet. Folglich handelt es sich um ein LP. Für ein solches LP garantiert der Innere-Punkte-Algorithmus eine exakte Lösung in polynomialer Laufzeit (*Karmarkar*, 1984); wobei in der Praxis mit Simplex-Algorithmen häufig noch schneller Lösungen gefunden werden (*Bertsimas und Tsitsiklis*, 1997). Dem Vorteil einer schnellen Lösung der LP-Formulierung steht allerdings der Nachteil gegenüber, dass die Entscheidungsvariablen (Gl. (4.2)) den durch einen Flugzeugtyp abgedeckten Anteil der Sitzplatzkapazität als Gleitkommazahl angeben, ohne dabei zu berücksichtigen, dass in der Realität pro Flugzeugtyp und Route nur eine ganzzahlige Anzahl an Flügen durchgeführt werden kann und somit nicht jegliche Anteile der Sitzplatzkapazität realisiert werden können. Für den konkreten Anwendungsfall der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung wird die LP-Formulierung dennoch als geeignet angesehen; zum einen, weil aus der airlineübergreifenden und jährlich aggregierten Betrachtung vergleichsweise hohe Flugfrequenzen pro Route und Flugzeugtyp resultieren, sodass die relativen Abweichungen einer Lösung mit Gleitkommazahlen im Vergleich zu einer Lösung mit ganzzahligen Flügen gering sind; zum anderen, weil eine ganzzahlige Variante des LP, trotz angepasster Algorithmen wie dem Schnittebenenverfahren oder dem Branch-and-Bound (Verzweigung und Schranke), erheblich schwerer zu lösen ist und ein Vielfaches an Rechenzeit benötigt (*Bertsimas und Tsitsiklis*, 1997).⁵

⁵Die Ergebnisse der Validierung der Modellgüte aus Unterabschnitt 4.6.2 für das Jahr 2019 weisen z. B. für weniger als 15 % (3 %) der Flugzeug-Routen-Zuordnungen Flugfrequenzen kleiner als 50 (10) Flüge pro Jahr auf, sodass der statistisch zu erwartende Fehler im Vergleich zur Ganzzahligkeit für 85 % (97 %) der Flugzeug-Routen-Zuordnungen kleiner als 1 % (5 %) ist. Wird für das entsprechende Optimierungsproblem Ganzzahligkeit hinsichtlich der Anzahl an Flügen gefordert, so wird bei im Vergleich zur LP-Lösung 800-facher Rechenzeit (zehn Stunden) kein

Die LP-Formulierung des Optimierungsproblems umfasst für die in Abschnitt 4.6 präsentierten Ergebnisse der jährlichen, globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung mit den historischen Flugplan- und Flottendaten 74–132 Tausend Nebenbedingungen, 1,7–4,6 Millionen Variablen und 6,6–18,5 Millionen von null abweichende Koeffizienten in der Variablen-Nebenbedingungen-Matrix. Auf einem konventionellen Laptop mit einem *Intel Core i7* Prozessor der neunten Generation (sechs physische Kerne; 2,6 GHz) und 32 GB RAM benötigt der State-of-the-Art-Solver *Gurobi Optimizer v9.5* (Gurobi, 2023) für die Lösung 10–45 Sekunden. Bei Verwendung der optionalen Nebenbedingungen für den Flugzeugfluss und die Flugnetzwerkkonzentration wird das LP durch zusätzliche binäre Variablen, welche für die Ausformulierung der Nebenbedingung der Flugnetzwerkkonzentration benötigt werden, zu einem gemischt-ganzzahligen linearen Optimierungsproblem. Für den Anwendungsfall aus Abschnitt 5.1, bei dem die Nebenbedingungen für den Flugzeugfluss (Gl. (4.6)) und die Flugnetzwerkkonzentration (Gl. (4.7)) für einen Flugzeugtyp mit 500 Flugzeugeinheiten verwendet werden, steigt die für die Lösung des Optimierungsproblems benötigte Zeit im Vergleich zur LP-Formulierung ceteris paribus von ca. 45 Sekunden auf ca. 430 Sekunden.⁶ Dies unterstreicht, dass die Nebenbedingungen für den Flugzeugfluss und die Flugnetzwerkkonzentration die Lösung des Optimierungsproblems erheblich erschweren und bereits eine geringe Anzahl zusätzlicher Nebenbedingungen einen erheblichen Einfluss auf die Rechenzeit des formulierten Optimierungsproblems haben kann.

Falls das Optimierungsproblem in Ausnahmefällen nicht lösbar ist, weil nicht alle Nebenbedingungen erfüllt werden können, werden alternative Lösungsversuche unternommen, bei denen unter der Einführung von Straftermen für die Zielfunktion verschiedene Nebenbedingungen gelockert werden:

- Sollte das Sitzplatzangebot nicht vollständig abgedeckt werden können (Gl. (4.3)), z. B. weil zu wenige Flugzeuge verfügbar sind oder die Flughafenkapazitäten nicht ausreichen, so wird der Zielfunktion ein Strafterm in Höhe des nicht vollständig bedienten Sitzplatzangebots hinzugefügt.
- Sollten die optionalen Nebenbedingungen für Flugzeugfluss (Gl. (4.6)) und Flugnetzwerkkonzentration (Gl. (4.7)) nicht erfüllt werden können, so wird für jede nicht eingehaltene Nebenbedingung der Zielfunktion ein Strafterm in Höhe von 1000 hinzugefügt.
- Sollten die benötigten Start- bzw. Landebahnlängen aller Flugzeugtypen nicht ausreichend kurz sein, um Flugrouten aus den Flugplandaten befiegen

Optimum gefunden. Die bei Abbruch verbleibende Abweichung der Zielfunktion beträgt 0,02 % im Vergleich zur LP-Lösung und unterstreicht die Eignung der LP-Lösung.

⁶Für das Lösen des gemischt-ganzzahligen Optimierungsproblems wird hier das Schnittebenenverfahren mit dem Abbruchkriterium einer Abweichung von $< 0,01\%$ im Vergleich zur LP-Lösung verwendet.

zu können, so wird für diese Flugrouten keinerlei Einschränkung durch die Start- bzw. Landebahnlänge angenommen, da zum einen von einem Fehler in den Eingangsdaten ausgegangen wird und zum anderen dies nur in sehr kleinem Umfang auftritt ($< 0,08\%$ der Routen und $< 0,001\%$ der ASK der Validierung).

Im Allgemeinen können nicht lösbare Flugzeug-Routen-Zuordnungen u. a. durch nicht zueinander passende Eingangsdaten oder durch unpassende Kalibrierungsparameter auftreten. Für die in Abschnitt 4.6 vorgestellte Validierung sowie die in Kapitel 5 untersuchten Anwendungsfälle sind keine alternativen Lösungsversuche notwendig.

4.3 Submodelle

Weitere Submodelle für verschiedene Aspekte des Flugbetriebs und des LTS sind notwendig, um die im Optimierungsproblem der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung benötigten Parameter zu bestimmen. Diese Submodelle werden nachfolgend vorgestellt. Sie behandeln u. a. Betriebskosten, Treibstoffverbräuche, die Flugzeugnutzung, Flughafenkapazitäten, Start- und Landebahnlängen sowie den Airline-Wettbewerb.

4.3.1 Betriebskosten

Die Betriebskosten einer Airline können in DOC und indirekte Betriebskosten (engl. Indirect Operating Costs; IOC) unterteilt werden (*Clark, 2017*). Die Kosten, welche unmittelbar durch den Betrieb eines Flugzeugs entstehen, werden als DOC bezeichnet. Die DOC umfassen u. a. die Kosten für Treibstoff, Flugzeugbesatzung, Flughafen- und Navigationsgebühren, MRO sowie das Flugzeug selbst. Dem gegenüber stehen die IOC, welche nicht unmittelbar mit dem Flugbetrieb im Zusammenhang stehen. Die IOC umfassen u. a. Kosten für Marketing und Verwaltung der Airline. Im Gegensatz zu den IOC werden die DOC durch den betriebenen Flugzeugtyp bestimmt. Daher sind die DOC entscheidend für die Flugzeug-Routen-Zuordnung (*Dantzig, 1963; Belobaba et al., 2009*).

Zur Modellierung der DOC existiert in der Literatur eine Vielzahl an Ansätzen (*Pohya et al., 2018*). Im Rahmen dieser Arbeit wird das Modell der TU Berlin verwendet, welches ebenfalls im zentralen Flugzeugdatenreferenzsystem (engl. Central Reference Aircraft Data System; CeRAS) der RWTH Aachen verwendet wird (*Thorbeck, 2013; Franz, 2014; Risse et al., 2016*). Im Vergleich zu den alternativ verfügbaren Modellen ist das Modell der TU Berlin verhältnismäßig detailliert und benötigt nur eine minimale Anzahl an Eingangsparametern (*Pohya et al., 2018*;

Presto, 2023). Zusätzlich erfolgte die letzte Aktualisierung der Parameter des TU-Berlin-Modells im Jahr 2010, sodass das Modell im Vergleich zu den sonstigen Modellen aus der Literatur verhältnismäßig aktuell ist (*Pohya et al.*, 2018).

Das Modell der TU Berlin modelliert die DOC als Summe aus Treibstoff-, Gebühren-, MRO-, Besatzungs- und Kapitalkosten (Gl. (4.30)).⁷

$$DOC = DOC_{fuel} + DOC_{fees} + DOC_{mro} + DOC_{crew} + DOC_{capital} \quad (4.30)$$

Nachfolgend wird insbesondere auf etwaige Ergänzungen und Anpassungen im Vergleich zum Standardmodell eingegangen. Eine vollständige Sammlung der DOC-Formeln und Parameter kann Tab. A.8 und Tab. A.9 in Anhang A.3 entnommen werden.

Die Treibstoffkosten DOC_{fuel} ergeben sich als Produkt aus dem Treibstoffpreis P_{fuel} , der Treibstoffmasse pro Flug m_{fuel} sowie der Anzahl an Flugbewegungen fc (Gl. (4.31)). Für den Treibstoffpreis werden die in Tab. A.7 in Anhang A.3 angegebenen, jährlich gemittelten Werte verwendet. Neben dem Treibstoff selbst (Spotpreis gemäß *U.S. Energy Information Administration* (2023b)) wird auch eine Betankungsdifferenz (engl. Into Plane Differential; IPD) von 50 €/t (*International Airlines Group*, 2020) berücksichtigt, welche vereinfachend sämtliche Kosten der Lieferung, Lagerung und Betankung darstellt (*Wolter*, 2025). Der missions- und flugzeugtypabhängige Treibstoffverbrauch wird anhand der in Unterabschnitt 4.3.2 beschriebenen Methodik ermittelt. Die Berechnung der Flugzyklen erfolgt basierend auf Gl. (4.39) aus Unterabschnitt 4.3.4 und den dort beschriebenen Modellen zur Flugzeugnutzung.

$$DOC_{fuel} = P_{fuel} \cdot m_{fuel} \cdot fc \quad (4.31)$$

Die Kosten für Gebühren DOC_{fees} werden durch die Summe aus Lande-, Abfertigungs- und Navigationsgebühren gebildet (Gl. (4.32)). Für die drei einzelnen Summanden stellt das DOC-Modell der TU Berlin parametrisierte Formeln bereit (s. Tab. A.8). Die in diese Formeln eingehenden MTOMs der einzelnen Flugzeugtypen, wie auch die weiteren flugzeugtypspezifischen Daten für andere Kostenanteile, können Tab. A.2 in Anhang A.1 entnommen werden.

$$DOC_{fees} = DOC_{land} + DOC_{ground} + DOC_{nav} \quad (4.32)$$

Die MRO-Kosten DOC_{mro} , welche sich aus Kostenanteilen für die Triebwerke sowie für Material und Personal für die Flugzeugzelle zusammensetzen (Gl. (4.33)), werden durch Eigenschaften des Flugzeugtyps (Leermasse, Anzahl und Schub der

⁷Die Aufteilung der berechneten DOC auf die einzelnen Kostenbestandteile ist in Abb. 2.2 (Unterabschnitt 2.1.2, S. 12) beispielhaft für einen Flug des Flugzeugtyps Airbus A320ceo von Hamburg (HAM) nach Lissabon (LIS) im Jahr 2019 gezeigt.

Triebwerke) sowie den Betrieb (Blockzeit und Flugzyklen) beeinflusst (s. Tab. A.8).

$$DOC_{mro} = DOC_{eng} + DOC_{af,mat} + DOC_{af,per} \quad (4.33)$$

Für die Besatzungskosten DOC_{crew} wird die Anzahl an Besatzungen pro Flugzeug CC (hier 5, s. Tab. A.9) mit der Summe des Gehalts einer Flugzeugbesatzung multipliziert (Gl. (4.34)). Während das Gehalt pro Cockpitbesatzung S_{fc} und pro Kabinenpersonal S_{fa} vereinfachend als einheitlich für alle Flugzeugtypen angenommen wird, hängt die Summe des Gehalts der Kabinenbesatzung von der Anzahl des Kabinenpersonals n_{fa} ab. Diese wird basierend auf der Betriebsvorschrift der US-Bundesluftfahrtverwaltung (engl. Federal Aviation Administration; FAA) (*Federal Aviation Administration*, 1992) als aufgerundeter Quotient aus Passagieranzahl und 50 ermittelt ($n_{fa} = \lceil p/50 \rceil$).

$$DOC_{crew} = CC \cdot (S_{fa} \cdot n_{fa} + S_{fc}) \quad (4.34)$$

Die Kapitalkosten $DOC_{capital}$ ergeben sich aus dem Produkt von Flugzeugpreis, Annuität CR_{ann} und Versicherungsrate CR_{ins} (Gl. (4.35)). Der Flugzeugpreis wird hierbei vereinfachend aus der Flugzeugleermasse OEM , der Triebwerksmasse m_{eng} und der Anzahl an Triebwerken n_{eng} ermittelt.

$$DOC_{capital} = (CR_{ann} + CR_{ins}) \cdot (P_{OEM} \cdot (OEM - m_{eng} \cdot n_{eng}) + P_{eng} \cdot m_{eng} \cdot n_{eng}) \quad (4.35)$$

4.3.2 Treibstoffverbrauch

Um die missionsabhängigen Treibstoffverbräuche der verschiedenen Flugzeugtypen zu modellieren, wird auf die bestehenden Flugleistungsmodelle der BADA-4-Datenbank (*Eurocontrol*, 2022) zurückgegriffen. Basierend auf den BADA-4-Daten werden mit dem Trajektorienberechnungsmodul (engl. Trajectory Calculation Module; TCM) (*Linke*, 2016; *Linke et al.*, 2017) für jeden Flugzeugtyp sowie für ausgewählte, diskrete Kombinationen aus Flugdistanzen und Ladefaktoren physikalisch sinnvolle Flugprofile einschließlich der entsprechenden Treibstoffverbräuche berechnet. Hierfür wird ein Flugphysikmodell mit drei Freiheitsgraden und vereinfachten Bewegungsgleichungen verwendet. Operationale Standardverfahren für Steig-, Reise- und Sinkflug werden berücksichtigt, z. B. entsprechende Flugeschwindigkeiten oder die stufenweise Anpassung der Reiseflughöhe (Step-Climbs) (*Kühlen et al.*, 2022).

Die berechneten diskreten, missionsabhängigen Treibstoffverbräuche der verschiedenen Flugzeugtypen werden durch kontinuierliche Funktionen angenähert. Für jeden Flugzeugtyp t wird die abhängige Variable Missionstreibstoffmasse $m_{fuel_{o,d,t}}$

basierend auf den unabhängigen Variablen Flugdistanz $d_{o,d}$ und Ladefaktor $lf_{o,d,t}$ beschrieben. Der gewählte Regressionsansatz ist durch Gl. (4.36) gegeben. Der Ladefaktor $lf_{o,d,t}$ ist hierbei als Verhältnis zwischen der Nutzlast $pl_{o,d,t}$ und der maximal zulässigen Nutzlast des Flugzeugtyps pl_{MZFM_t} definiert (Gl. (4.37)). Das minimale erzielte Bestimmtheitsmaß R^2 der Regressionen für die untersuchten Flugzeugtypen liegt bei 99,94 %. Die entsprechenden Regressionskoeffizienten der verschiedenen Flugzeugtypen können Tab. A.3 in Anhang A.1 entnommen werden.

$$m_{fuel_{o,d,t}} = a_{1,t} \cdot d_{o,d}^2 + a_{2,t} \cdot d_{o,d} + a_{3,t} \cdot d_{o,d} \cdot lf_{o,d,t} + a_{4,t} \quad (4.36)$$

$$lf_{o,d,t} = \frac{pl_{o,d,t}}{pl_{MZFM_t}} \quad (4.37)$$

4.3.3 Nutzlast-Reichweiten-Beziehung

Um die unterschiedlichen Nutzlast-Reichweiten-Beziehungen der verschiedenen Flugzeugtypen bei der Flugzeug-Routen-Zuordnung zu berücksichtigen, werden die NRD der verschiedenen Flugzeugtypen verwendet. Über die NRD wird abgebildet, wie viel Nutzlast maximal transportiert werden kann, wenn für einen Flug eine bestimmte Reichweite benötigt wird (*Schmitt und Gollnick, 2016*). Bei kurzen Reichweiten ist die maximale Nutzlast durch die Tragfähigkeit der Flugzeugstruktur beschränkt und durch zusätzlichen Treibstoff kann zusätzliche Reichweite erzielt werden, bis das MTOM erreicht wird (Punkt A in Abb. 4.2a). Für zusätzliche Reichweite ist es erforderlich, bei gleichbleibender Gesamtmasse (MTOM) die Nutzlast zu reduzieren, um zusätzlichen Treibstoff mitführen zu können, bis die maximale Treibstoffmasse erreicht wird (Bereich zwischen Punkt A und B in Abb. 4.2a). Nachfolgend sind nur noch geringfügig größere Reichweiten zu erreichen, indem die Nutzlast bei maximaler Treibstoffmasse weiter reduziert wird, bis schlussendlich nur noch Treibstoff, aber keine Nutzlast mitgeführt wird (Punkt C in Abb. 4.2a).

Die Modellierung der NRD erfolgt anhand der ACMs der Flugzeughersteller. Hierzu wird anhand der verfügbaren Flottendaten für jeden Flugzeugtyp eine repräsentative Untervariante (u. a. Triebwerks- und Gewichtsvariante) ausgewählt. Das entsprechende NRD wird dann durch seine Eckpunkte approximiert, wobei vereinfachend angenommen wird, dass die Eckpunkte durch Geraden verbunden sind. Hierdurch kann das NRD eines jeden Flugzeugtyps durch 3 Punkte vollständig beschrieben werden.⁸ Abbildung 4.2a visualisiert das beschriebene Vorgehen für einen einzelnen beispielhaften Flugzeugtyp. Die ermittelten Koordinaten für die

⁸Da die Nutzlast pl am Punkt C per Definition null ist, werden nur 5 Koordinaten zur Beschreibung der Punkte A, B und C benötigt.

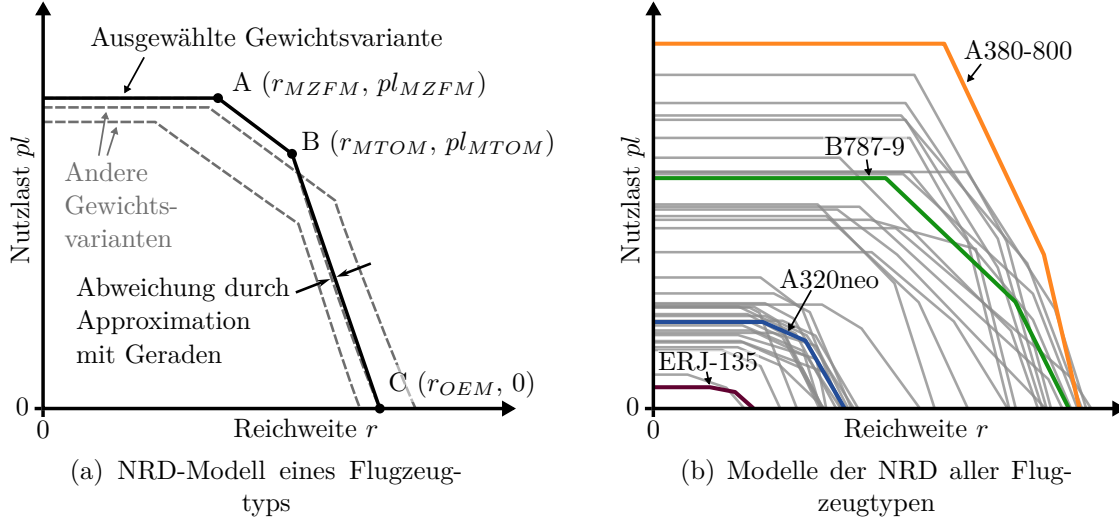


Abb. 4.2: Modellbildung der NRD

Punkte A, B und C aller Flugzeugtypen sind in Tab. A.2 in Anhang A.1 gegeben. Abbildung 4.2b zeigt die approximierten NRD aller im Modell berücksichtigten Flugzeugtypen (grau), wobei vier beispielhafte konkrete Flugzeugtypen farbig hervorgehoben sind.

In den Berechnungen zur Flugzeug-Routen-Zuordnung wird für jede Kombination aus Flugzeugtyp und Route geprüft, für welche maximale Nutzlast die Reichweite des Flugzeugtyps ausreicht, um die benötigte Flugdistanz zurückzulegen (Gl. (4.11) und Gl. (4.12)). Hierbei wird als Nutzlast ausschließlich die Masse der Passagiere samt ihres Gepäcks berücksichtigt (100 kg pro angebotenem Sitzplatz) und die Flugdistanz $d_{o,d}$ wird vereinfachend basierend auf der GCD zwischen Start- und Zielflughafen $gcd_{o,d}$ sowie dem in Gl. (4.38) gegebenen Zusammenhang (Dray, 2020) bestimmt. Hinsichtlich der Flugdistanz werden so auch Umwege durch die Flugführung berücksichtigt; während etwaige Einflüsse durch Wind vereinfachend unberücksichtigt bleiben.

$$d_{o,d} = 40,74 \text{ km} + 1,029 \cdot gcd_{o,d} \quad (4.38)$$

4.3.4 Flugzeugnutzung

Um die Flugzeugnutzung und die im Airline-Betrieb erbrachte Transportleistung eines einzelnen Flugzeugs zu beschreiben, wird ein Nutzungsmodell verwendet. Dieses beinhaltet Untermodelle für Blockzeit, Turnaround-Zeit und Nutzungsrate. Alle drei Untermodelle basieren auf Regressionen, wobei die wesentlichen Einflussgrößen, die Regressionsansätze und die Regressionskoeffizienten anhand von historischen Flugplan- und Flottendaten (Sabre, 2022; Cirium, 2022) ermittelt werden.

Basierend auf den so modellierten Blockzeiten $bt_{o,d,t}$, Turnaround-Zeiten $tat_{o,d,t}$ und Nutzungsraten $utr_{o,d,t}$ wird die Anzahl an Flugzyklen $fc_{o,d,t}$ im Zeitraum Δt für eine Flugzeug-Routen-Zuordnung basierend auf Gl. (4.39) bestimmt. Für ein reguläres Kalenderjahr nimmt Δt hierbei den Wert $365 \cdot 24 = 8760$ Stunden an.

$$fc_{o,d,t} = \frac{\Delta t \cdot utr_{o,d,t}}{bt_{o,d,t} + tat_{o,d,t}} \quad (4.39)$$

(a) Blockzeit

Die Blockzeit einer Flugmission ist definiert als die Zeit zwischen dem Entfernen der Bremsklötze vor dem Start und dem Anlegen der Bremsklötze nach der Landung (Clark, 2017). Sie wird maßgeblich durch die zurückzulegende Distanz zwischen Start- und Zielflughafen sowie die Fluggeschwindigkeit des Flugzeugs beeinflusst. Weitere Einflussgrößen sind u. a. der Wind entlang der Routenführung, die Taxi-Zeit an Start- und Zielflughafen sowie etwaige zu fliegende Umwege, z. B. durch das Luftverkehrsmanagement (engl. Air Traffic Management; ATM).

Um die benötigte Blockzeit für eine Flugzeug-Routen-Kombination zu ermitteln, wird die im Flugplan angesetzte Blockzeit $bt_{o,d,t}$ als abhängige Variable basierend auf den beiden unabhängigen Variablen Reiseflugmachzahl Ma_t^{cr} und GCD zwischen Start- und Zielflughafen $gcd_{o,d}$ modelliert. Da die in den historischen Flugplandaten (Sabre, 2022) angegebenen Blockzeiten bereits u. a. die Einflüsse von Wind, Taxi-Zeiten, Umwegen in der Flugführung sowie auch etwaige Pufferzeiten in der Flugplanung beinhalten, sind diese indirekt auch Teil des Regressionsmodells, auch wenn sie nicht explizit durch unabhängige Variablen beschrieben werden.

Der gewählte Regressionsansatz ist durch Gl. (4.40) gegeben. Eine Grenzwertbetrachtung unterstreicht die Idee des Regressionsansatzes: Für kleine Distanzen nähert sich der Grenzwert $\lim_{gcd_{o,d} \rightarrow 0} bt_{o,d,t}$ dem Wert a_7 , welcher als Taxi-Zeit und distanzunabhängiger Puffer interpretiert werden kann. Für zunehmende Distanzen steigt $bt_{o,d,t}$ unbegrenzt ($\lim_{gcd_{o,d} \rightarrow \infty} bt_{o,d,t} = \infty$). Die Steigung ($\partial bt_{o,d,t} / \partial gcd_{o,d}$) fällt von $a_2 / (Ma_t^{cr})^{a_2} + a_3 \cdot a_4 + a_5 \cdot a_6$ für kleine Distanzen ($\lim_{gcd_{o,d} \rightarrow 0}$) hin zu $a_1 / (Ma_t^{cr})^{a_2}$ für große Distanzen ($\lim_{gcd_{o,d} \rightarrow \infty}$) ab. Die Koeffizienten a_3 bis a_6 beschreiben demnach primär den Einfluss des Steig- und Sinkflugs auf die Blockzeit (dominant auf kleinen Flugdistanzen), während die Koeffizienten a_1 und a_2 vor allem den Einfluss des Reiseflugs erfassen (dominant auf großen Flugdistanzen). Die durchschnittliche Fluggeschwindigkeit, die unter Vernachlässigung etwaiger distanzabhängiger Puffer dem Kehrwert der Steigung von $bt_{o,d,t}$ entspricht, nimmt somit mit steigender Flugdistanz zu und wird für große Flugdistanzen durch den

Einfluss der Reiseflugmachzahl Ma_t^{cr} des Flugzeugtyps dominiert.

$$bt_{o,d,t} = \frac{a_1}{(Ma_t^{cr})^{a_2}} \cdot gcd_{o,d} - a_4 \cdot \exp(-a_3 \cdot gcd_{o,d}) + a_4 - a_6 \cdot \exp(-a_5 \cdot gcd_{o,d}) + a_6 + a_7 \quad (4.40)$$

Tabelle 4.6 gibt die Werte der Regressionskoeffizienten a_1 bis a_7 sowie das Bestimmtheitsmaß R^2 für Blockzeitdaten der drei Zeiträume 2010–2016, 2013–2019 und 2010–2019 an – diese drei Zeiträume werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit für die Modellkalibrierung und -validierung genutzt (Abschnitte 4.4 und 4.6). Da das Bestimmtheitsmaß für alle betrachteten Zeiträume ca. 99 % beträgt, wird der in Gl. (4.40) gegebene Regressionsansatz als geeignet angesehen.

Tab. 4.6: Werte der Koeffizienten der Regression für die Blockzeit; mit $bt_{o,d,t}$ in Stunden, Ma_t^{cr} dimensionslos und $gcd_{o,d}$ in Kilometern

Zeitraum	a_1 in h/km	a_2 —	a_3 in 1/km	a_4 in h	a_5 in 1/km	a_6 in h	a_7 in h	R^2 —
2010–2016	8,42E-04	0,641	6,75E-05	4,73	2,09E-03	0,166	0,466	99,04 %
2013–2019	7,78E-04	0,584	5,03E-05	7,81	1,76E-03	0,213	0,485	98,98 %
2010–2019	8,05E-04	0,597	5,48E-05	6,54	1,47E-03	0,187	0,500	99,00 %

Abbildung 4.3 visualisiert die Regression für den Zeitraum 2010–2019. Abbildung 4.3a unterstreicht, dass der gewählte Regressionsansatz den Verlauf der Datenpunkte sehr gut erfasst. Die Verteilung der Datenpunkte folgt aus den historischen Einsatzdistanzen sowie den Reiseflugmachzahlen der berücksichtigten Flugzeugtypen. Die ungleichmäßige Verteilung der Datenpunkte stellt im Rahmen dieser Arbeit keine Einschränkung dar, weil das Regressionsmodell – als Resultat der Reiseflugmachzahlen und Reichweiten der berücksichtigten Flugzeugtypen – vor allem im Bereich der Datenpunkte angewendet wird. Abbildung 4.3b vergleicht die resultierenden Blockzeiten für verschiedene beispielhafte Reiseflugmachzahlen.

(b) Turnaround-Zeit

Die Turnaround-Zeit einer Flugmission ist definiert als die Zeit zwischen dem Anlegen der Bremsklötze nach der Landung und dem Entfernen der Bremsklötze vor dem Start (*Belobaba et al.*, 2009). Während des Turnarounds wird unter anderem das Flugzeug betankt, das Aus- und Einsteigen der Passagiere durchgeführt, das Catering und die Fracht ent- und beladen, das Abwasser entsorgt, das Frischwasser aufgefüllt, die Kabine gereinigt und die Fluggastbrücke bzw. -treppe angebracht

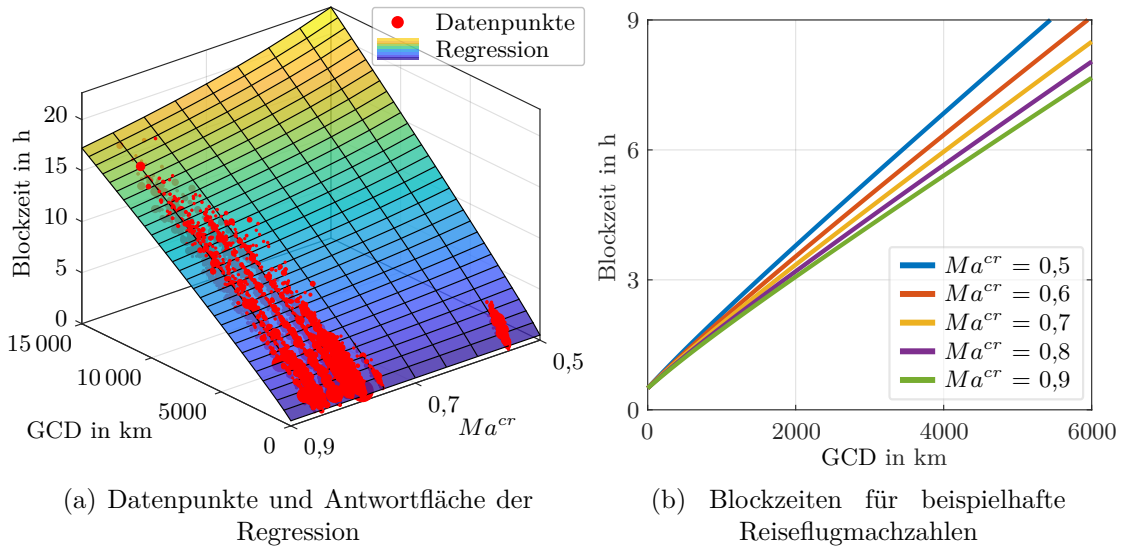


Abb. 4.3: Regression der Blockzeit für den Zeitraum 2010–2019

und entfernt. Da einige dieser Prozesse parallel durchgeführt werden können, während andere streng sequentiell erfolgen müssen, ist für die Turnaround-Zeit ausschließlich der kritische Pfad der Turnaround-Prozesse relevant. Laut Herstellerangaben besteht der kritische Pfad der Turnaround-Prozesse für die meisten Flugzeugtypen aus dem Aus- und Einsteigen der Passagiere, dem Ent- und Beladen des Caterings sowie dem Anbringen und Entfernen der Fluggastbrücke bzw. -treppe (vgl. ACMs). Abbildung 4.4 zeigt den beschriebenen zeitlichen Ablauf der verschiedenen Turnaround-Prozesse, inklusive des kritischen Pfads, am Beispiel der Flugzeugtypen A320ceo und A320neo (Airbus, 2022a).

Um die benötigte Turnaround-Zeit für eine Flugzeug-Routen-Kombination zu ermitteln, werden in einem ersten Schritt die Turnaround-Zeiten aus dem Flugplan (Sabre, 2022) extrahiert. Im Gegensatz zu den von den Herstellern angegebenen Turnaround-Zeiten in den ACMs sind so auch diverse operative Einflüsse, wie Puffer, Slots oder Flugwellen an Hubs, in den ermittelten Turnaround-Zeiten enthalten. In einem zweiten Schritt wird die im Flugplan angesetzte Turnaround-Zeit $tat_{o,d,t}$ als abhängige Variable basierend auf den beiden unabhängigen Variablen angebotene Sitzplätze pro Flug $p_{o,d,t}$ und Blockzeit $bt_{o,d,t}$ modelliert.

Der gewählte Regressionsansatz ist durch Gl. (4.41) gegeben. Der konstante Term a_{10} erfasst das Anbringen und Entfernen der Fluggastbrücke bzw. -treppe. Der Term $a_8 \cdot p_{o,d,t}$ beschreibt, dass mit zunehmender Sitzplatzanzahl sowohl das Aus- und Einsteigen der Passagiere als auch das Ent- und Beladen des Caterings mehr Zeit in Anspruch nimmt. Der Term $a_9 \cdot bt_{o,d,t}$ stellt dar, dass mit zunehmender Blockzeit das Ent- und Beladen des Caterings länger dauert, da die Passagiere mehr Verpflegung konsumieren.

$$tat_{o,d,t} = a_8 \cdot p_{o,d,t} + a_9 \cdot bt_{o,d,t} + a_{10} \quad (4.41)$$

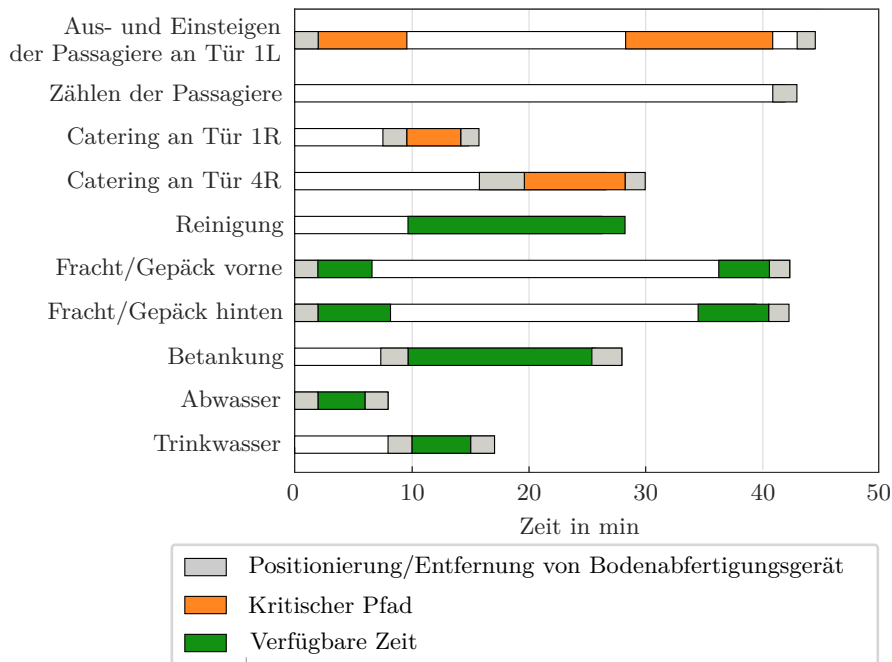


Abb. 4.4: Zeitlicher Ablauf der Turnaround-Prozesse für die Flugzeugtypen A320ceo und A320neo; eigene Darstellung nach Airbus (2022a)

Tabelle 4.7 gibt die Werte der Regressionskoeffizienten a_8 bis a_{10} sowie das Bestimmtheitsmaß R^2 für Turnaround-Zeit-Daten der drei Zeiträume 2010–2016, 2013–2019 und 2010–2019 an. Für die betrachteten Zeiträume weichen die Werte der Koeffizienten sowie das Bestimmtheitsmaß nur minimal voneinander ab. Dass das Bestimmtheitsmaß keinen größeren Wert als ca. 64 % erreicht, resultiert aus der Streuung der in die Regression eingehenden Turnaround-Zeiten (vgl. Abb. 4.5a).

Tab. 4.7: Werte der Koeffizienten der Regression für die Turnaround-Zeit; mit $tat_{o,d,t}$ in Minuten, $p_{o,d,t}$ dimensionslos und $bt_{o,d,t}$ in Stunden

Zeitraum	a_8 in min	a_9 in min/h	a_{10} in min	R^2 —
2010–2016	0,1134	5,920	17,84	63,74 %
2013–2019	0,1165	5,763	17,36	64,13 %
2010–2019	0,1165	5,807	17,39	63,89 %

Abbildung 4.5 visualisiert die Regression der Turnaround-Zeit für den Zeitraum 2010–2019. Die allgemeine Aussage der Regression, dass für längere Blockzeiten und mehr Sitzplätze längere Turnaround-Zeiten benötigt werden, wird sowohl durch Abb. 4.5a als auch durch Abb. 4.5b deutlich. Abbildung 4.5a unterstreicht ferner die Streuung der Eingangsdaten für die Regression. Ein Grund für diese Streuung der Eingangsdaten liegt im komplexen Einfluss der operativen Randbedingungen des Flugbetriebs auf die Turnaround-Zeit. So beeinflusst beispielsweise

das Geschäftsmodell der Airline die Turnaround-Zeiten unabhängig von der Flugroute (Blockzeit) und des Flugzeugtyps (Sitzplatzanzahl): Für FSNCs sind die Turnaround-Zeiten tendenziell länger als für LCCs, da mehr Zeit für das Catering, für das Aus- und Einsteigen über eine Fluggastbrücke anstatt über Flugzeugtreppen sowie für das Warten auf Anschlussflüge benötigt wird. Diese und weitere Einflüsse können durch den einfachen Regressionsansatz mit den zwei unabhängigen Variablen Sitzplätze pro Flug $p_{o,d,t}$ und Blockzeit $bt_{o,d,t}$ nicht erfasst werden. Der Nachweis, dass der in Gl. (4.41) gegebene Regressionsansatz trotzdem geeignet ist, um die Turnaround-Zeit als Teil der Flugzeugnutzung für die Flugzeug-Routen-Zuordnung zu beschreiben, erfolgt zweckgerichtet als Teil der Validierung des Gesamtmodells (Abschnitt 4.6).

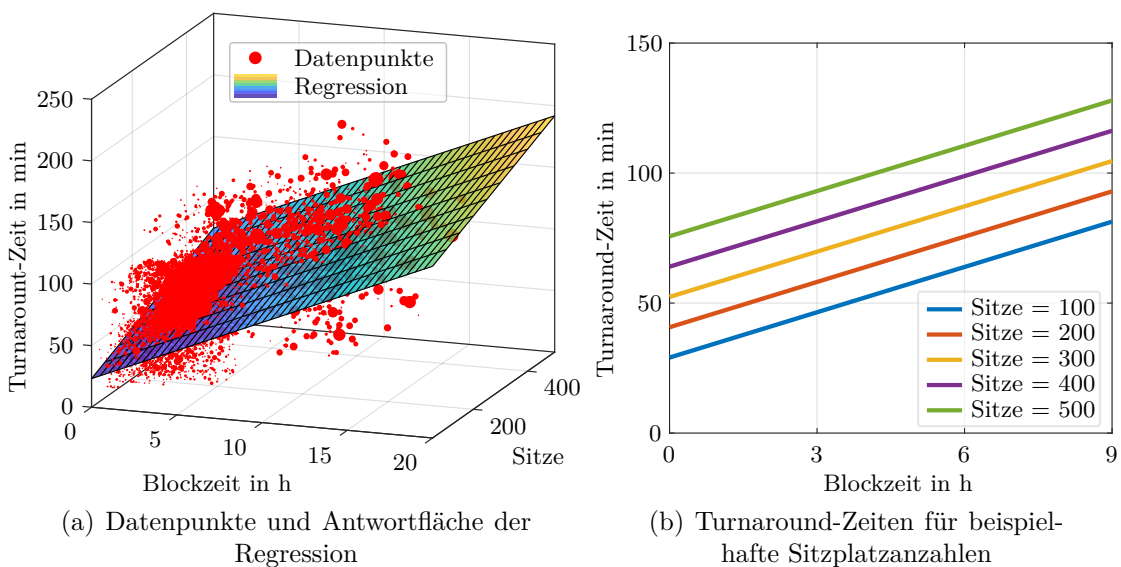


Abb. 4.5: Regression der Turnaround-Zeit für den Zeitraum 2010–2019

(c) Nutzungsrate

Die Nutzungsrate eines Flugzeugs ist im Rahmen dieser Arbeit als das Verhältnis zwischen der für Flugmissionen verwendeten Zeit und der gesamten verfügbaren Zeit definiert. In der für Flugmissionen verwendeten Zeit sind die Blockzeit und die Turnaround-Zeit enthalten. Nicht in der für Flugmissionen verwendeten Zeit enthalten sind sämtliche Einflüsse, in denen das Flugzeug nicht genutzt wird oder nicht genutzt werden kann. Dies umfasst u. a. MRO-Aktivitäten und Einflüsse der Flugplanerstellung wie z. B. saisonale oder tageszeitabhängige Nachfrageschwankungen oder Nachtflugverbote. Da das Flugzeug, während es nicht für Flugmissionen genutzt wird, Kosten verursacht, insbesondere Kapitalkosten, aber keine Umsätze generiert, ist aus Airline-Sicht eine möglichst hohe Nutzungsrate anzustreben (Bazargan, 2010).

Um die Nutzungsrate für eine Flugzeug-Routen-Kombination zu ermitteln, wird die in den Cirium (2022) Flottendaten angegebene jährliche Nutzung in eine Nutzungsrate $utr_{o,d,t}$ überführt und anschließend als abhängige Variable basierend auf

den beiden unabhängigen Variablen Blockzeit $bt_{o,d,t}$ und Alter des Flugzeugs age_t modelliert. In der so modellierten Nutzungsrate sind somit sämtliche operationellen Einflüsse enthalten.

Der gewählte Regressionsansatz ist durch Gl. (4.42) gegeben. Ausgehend von einer visuellen Untersuchung der Eingangsdaten (s. Abb. 4.6a) ist die Idee hinter dem gewählten Regressionsansatz, dass die Nutzungsrate $utr_{o,d,t}$ sich mit zunehmender Blockzeit $bt_{o,d,t}$ und abnehmendem Flugzeugalter age_t dem idealen Wert von 1 annähert. Dass kürzere Blockzeiten zu geringeren Nutzungsraten führen, kann z. B. durch den erhöhten MRO-Bedarf und den stärkeren negativen Einfluss von Nachtflugverboten und tageszeitbedingten Nachfrageschwankungen auf die Nutzungsrate bei Kurzstreckenflügen erklärt werden. Für ältere Flugzeuge gilt zudem, dass diese aufgrund von zunehmendem MRO-Bedarf zusätzliche Ausfallzeiten vorweisen sowie dass Airlines bei schwankender Passagiernachfrage bevorzugt ihre neueren, effizienteren statt ihrer älteren, ineffizienteren Flugzeuge einsetzen. Für eine Blockzeit $bt_{o,d,t}$ von 0 soll die Nutzungsrate $utr_{o,d,t}$ ebenfalls 0 sein, da keine Flugzeugnutzung vorliegt.⁹

$$utr_{o,d,t} = 1 - \exp\left(-a_{11} \cdot bt_{o,d,t}^{a_{12}}\right) - a_{13} \cdot age_t \quad (4.42)$$

Tabelle 4.8 gibt die Werte der Regressionskoeffizienten a_{11} bis a_{13} sowie das Bestimmtheitsmaß R^2 für Daten zur Nutzungsrate der drei Zeiträume 2010–2016, 2013–2019 und 2010–2019 an. Für die betrachteten Zeiträume weichen die Werte der Regressionskoeffizienten sowie das Bestimmtheitsmaß nur minimal voneinander ab. Da der verwendete Regressionsansatz die Zusammenhänge der Flugzeugnutzung vereinfachend nur anhand von zwei unabhängigen Variablen beschreibt und so die Streuung der in die Regression eingehenden Nutzungsraten nur bedingt erfasst werden kann, erreicht das Bestimmtheitsmaß keinen größeren Wert als ca. 48 %.

Tab. 4.8: Werte der Koeffizienten der Regression für die Nutzungsrate; mit $utr_{o,d,t}$ dimensionslos, $bt_{o,d,t}$ in Stunden und age_t in Jahren

Zeitraum	a_{11} in 1/h	a_{12} —	a_{13} in 1/a	R^2 —
2010–2016	0,7834	0,2179	5,447E-03	45,28 %
2013–2019	0,7729	0,2217	4,825E-03	48,03 %
2010–2019	0,7780	0,2179	4,946E-03	46,34 %

⁹Werte $utr_{o,d,t} < 0$, wie sie z. B. für $bt_{o,d,t} = 0$ und $age_t \neq 0$ auftreten können, werden im Software-Modell auf 0 gesetzt.

Abbildung 4.6 visualisiert die Regression der Nutzungsrate für den Zeitraum 2010–2019. In Abb. 4.6a wird deutlich, dass der gewählte Regressionsansatz den Verlauf der Datenpunkte erfasst, obwohl eine deutlich erkennbare Streuung der Daten vorliegt. Analog zur Turnaround-Zeit resultiert diese Streuung aus etwaigen operativen Einflüssen, welche nicht durch den hier verwendeten vereinfachenden Regressionsansatz erfasst werden. Der Nachweis, dass der in Gl. (4.42) gegebene Regressionsansatz dennoch für die Modellierung der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung geeignet ist, erfolgt, analog zur Turnaround-Zeit, als Teil der Validierung des Gesamtmodells (Abschnitt 4.6). In Abb. 4.6b werden die resultierenden Nutzungsraten für verschiedene beispielhafte Flugzeugalter verglichen. Wie auch durch Abb. 4.6a wird die allgemeine Aussage der Regression, dass für längere Blockzeiten und neuere Flugzeuge höhere Nutzungsraten resultieren, unterstrichen.

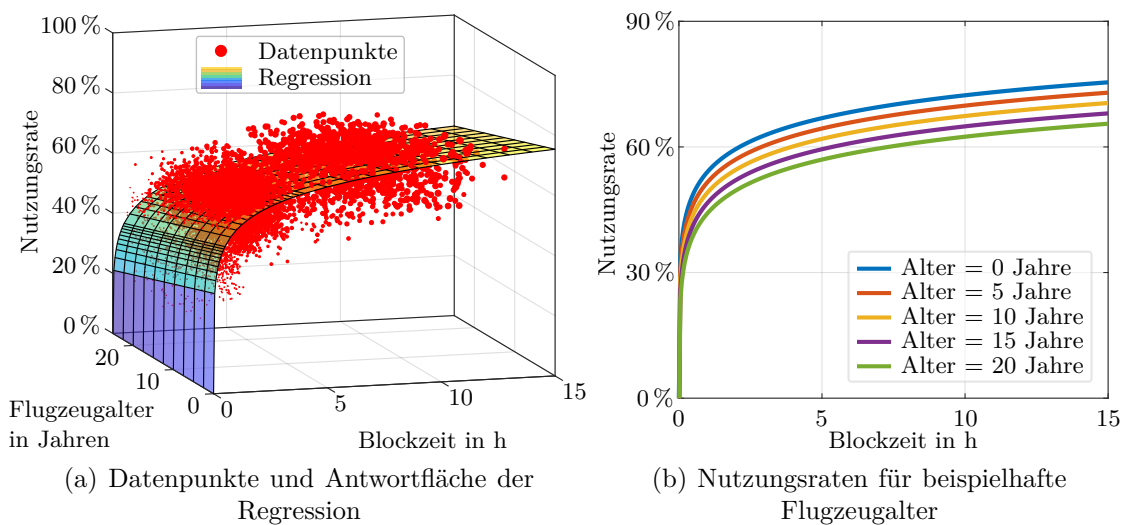


Abb. 4.6: Regression der Nutzungsrate für den Zeitraum 2010–2019

4.3.5 Flughafenkapazitäten

Die Methodik zur Modellierung der Flughafenkapazitäten basiert auf *Gelhausen et al.* (2013, 2020). Hierbei wird angenommen, dass die Runway-Kapazität die begrenzende Kapazität des Flughafens darstellt, während die Kapazitäten anderer Infrastrukturen, wie die Terminalkapazität, die Vorfeldkapazität oder die Luftraumkapazität, ausreichend groß sind (*Gelhausen et al.*, 2020). Zusätzlich wird die im Rahmen der Flughafenplanung übliche Annahme getroffen, dass in 95 % der Betriebsstunden eine ausreichend hohe Runway-Kapazität für die standardmäßige Abfertigung des Flugaufkommens zur Verfügung steht (*Matthews*, 1995; *Gelhausen et al.*, 2013). Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass ein Flughafen im Dauerbetrieb die Anzahl an Flugbewegungen pro Stunde seines oberen 5%-Quantils aller Betriebsstunden aufrechterhalten kann. Somit kann die Flughafenkapazität f_a^{avail} über das Produkt aus Betriebsstunden t_a^{ops} und 5%-Quantil der Flugbewegungen pro Stunde $fpt_a^{5\%}$ berechnet werden. Das 5%-Quantil der Flugbewegungen pro

Stunde $fpt_a^{5\%}$ wird in der Literatur auch als Kapazitätseckwert oder Koordinatiseckwert bezeichnet (*Bundesamt für Zivilluftfahrt*, 2005; *Kösters*, 2010; *Fraport*, 2016).

$$f_a^{avail} = t_a^{ops} \cdot fpt_a^{5\%} \quad (4.43)$$

Das 5%-Quantil der Flugbewegungen pro Stunde $fpt_a^{5\%}$ der Flughäfen wird mittels historischer Flugplandaten sowie Informationen über die Runway-Konfiguration der Flughäfen ermittelt. Hierfür werden die Flughäfen basierend auf ihrer Runway-Konfiguration gruppiert (vgl. Tab. A.5 in Anhang A.2); wobei als Runway-Konfiguration die relative Positionierung aller bei unterschiedlichen Windbedingungen im Regelbetrieb genutzten Start- und Landebahnen zueinander verstanden wird. Es werden Daten zum Ende des Jahres 2019 verwendet. Etwaige geplante Erweiterungen (z. B. in Dublin (DUB), Seoul (ICN), Moskau (SVO) oder Istanbul (IST)) werden nicht berücksichtigt. Gleiches gilt für Wasserbahnen (z. B. Malé (MLE)) sowie für Gras- und Schotterpisten (z. B. Land's End (LEQ)), da diese nicht für den Regelbetrieb mit den im Modell berücksichtigten Flugzeugtypen geeignet sind. Für jede Runway-Konfiguration wird das höchste 5%-Quantil der Flugbewegungen pro Stunde aller Flughäfen mit derselben Runway-Konfiguration als repräsentativ angenommen. Dies impliziert die vereinfachende Annahme, dass die Runway-Konfiguration die einzige und maßgebliche Einflussgröße auf die Runway-Kapazität ist. Für Flughäfen ohne manuell identifizierte Runway-Konfiguration (vgl. Abschnitt 4.1) wird die Konfiguration mit den niedrigsten Flugbewegungen bei korrekter Anzahl an Runways verwendet (Abschätzung zur sicheren Seite). Um realistische Verhältnisse der Kapazitäten verschiedener Runway-Konfigurationen zueinander zu erhalten, werden logische Bedingungen zwischen den verschiedenen Runway-Konfigurationen eingesetzt (Tab. A.6). So müssen z. B. zwei unabhängige parallele Runways eine größere Kapazität haben als zwei abhängige parallele Runways. Zusätzlich werden für das 5%-Quantil der Flugbewegungen pro Stunde der jeweiligen Runway-Konfigurationen keine über die verschiedenen Jahre abnehmenden Werte erlaubt, da von einer stetigen Verbesserung der eingesetzten Technologie und Betriebsverfahren ausgegangen wird.

Für die Betriebsstunden der Flughäfen t_a^{ops} wird eine untere Schranke von 15 Stunden pro Tag angenommen. Dies entspricht z. B. den Betriebszeiten 7–22 Uhr, wie sie für die Flughäfen Fukuoka (FUK) und Queenstown (ZQN) zutreffen (*Japan Schedule Coordination*, 2015; *Queenstown Airport*, 2025). Wenn historische Flugplandaten (*Sabre*, 2022) mehr Betriebsstunden erkennen lassen, werden diese flughafenspezifischen Betriebsstunden verwendet. Hierbei werden 5 Flugbewegungen pro Stunde als Kriterium dafür angenommen, dass der Flughafen sich innerhalb der Betriebszeit befindet und somit eine aktive Betriebsstunde vorliegt. Für das Jahr 2010 werden so in den Flugplandaten 226 Flughäfen mit mehr als 15 Betriebsstunden pro Tag identifiziert, für das Jahr 2019 sind es 296 Flughäfen. Dies umfasst vor allem nachfragestarke Flughäfen mit längeren Betriebszeiten

(z. B. Frankfurt (FRA), Zürich (ZRH) oder Sydney (SYD)) oder mit 24-Stunden-Betrieb (z. B. Dubai (DXB), Tokio-Haneda (HND) oder Bangkok (BKK)).

Abbildung 4.7 visualisiert das beschriebene Vorgehen anhand des Beispielflughafens Frankfurt (FRA) im Jahr 2019. Werden die Flugbewegungen pro Stunde, die in Grau über die Stunden des Jahres aufgetragen sind, absteigend sortiert, ergibt sich die orange Kurve. Anhand dieser können die benötigten Werte, das obere 5%-Quantil der Flugbewegungen pro Stunde $fpt_{FRA}^{5\%}$ und die Betriebsstunden t_{FRA}^{ops} , ermittelt werden. Für $fpt_{FRA}^{5\%}$ folgt als Wert bei Stunde 438 ($0,05 \cdot 365 \text{ Tage} \cdot 24 \text{ Stunden}$) 100 Flugbewegungen pro Stunde – zum Vergleich: Der offizielle Kapazitätseckwert im Jahr 2019 lag bei 104 Flugbewegungen pro Stunde (*aero.de*, 2018). Die Betriebsstunden t_{FRA}^{ops} ergeben sich als minimaler Abszissen-Abschnitt mit 5 Flugbewegungen pro Stunde zu 6720 Stunden bzw. 18,41 Stunden pro Tag. Dies stimmt in guter Näherung überein mit dem zu erwartenden Wert nach Berücksichtigung des Nachtflugverbots am Frankfurter Flughafen von 23 Uhr bis 5 Uhr (18 Stunden Betriebszeit) sowie etwaiger Ausnahmeregelungen, z. B. für verspätete Flugzeuge (*Fraport*, 2023). Für das Jahr 2019 ist $fpt_{FRA}^{5\%} = 100$ der maximale Wert für die Runway-Konfiguration des Frankfurter Flughafens (drei parallele Runways, von denen zwei abhängig voneinander sind, und eine kreuzende Runway; Konfiguration Nr. 17 in Tab. A.5 in Anhang A.2). Zusätzlich erfüllt $fpt_{FRA}^{5\%} = 100$ die logischen Bedingungen zu anderen Runway-Konfigurationen (s. Tab. A.6 in Anhang A.2). Da allerdings im Jahr 2018 mit 103 Flugbewegungen pro Stunde bereits ein höherer Wert für die Runway-Konfiguration 17 ermittelt wurde, wird dieser auch für die Berechnung im Jahr 2019 verwendet. Die modellierte Flughafenkapazität des Flughafens Frankfurt im Jahr 2019 ergibt sich somit zu $f_{FRA}^{avail} = 18,41 \cdot 103 \approx 1896$ Flugbewegungen pro Tag. Zum Vergleich: Mit der offiziellen Betriebszeit von 18 Stunden und dem offiziellen Kapazitätseckwert von 104 folgen $18 \cdot 104 = 1872$ Flugbewegungen pro Tag.

Für die Anwendung der ermittelten Flughafenkapazitäten im Modell der Flugzeug-Routen-Zuordnung werden zwei Skalierungen vorgenommen. Erstens werden nicht alle existierenden Flugzeugtypen im Modell berücksichtigt, sodass auch nur ein Teil aller Flugbewegungen im Modell abgebildet wird. Daher werden die ermittelten Flughafenkapazitäten flughafenspezifisch um den Anteil der Flugbewegungen, welche durch Flugzeugtypen geflogen werden, die im Modell enthalten sind, skaliert. Zweitens ist die beschriebene Methodik zur Ermittlung der Flughafenkapazitäten im Allgemeinen sehr optimistisch, da davon ausgegangen wird, dass die Flughäfen innerhalb ihrer Betriebszeiten konstant am Kapazitätseckwert betrieben werden. Dies ist per Definition in der Theorie möglich, in der Praxis allerdings, z. B. aufgrund von saisonalen und tageszeitlichen Nachfrageschwankungen, nicht der Fall, sodass die Anzahl an Flugbewegungen in den meisten Betriebsstunden unterhalb des Kapazitätseckwerts liegt. Im Kalibrierungsprozess (Abschnitt 4.4) wird daher ein zweiter Skalierungsfaktor ermittelt, welcher einheitlich für alle Flughäfen

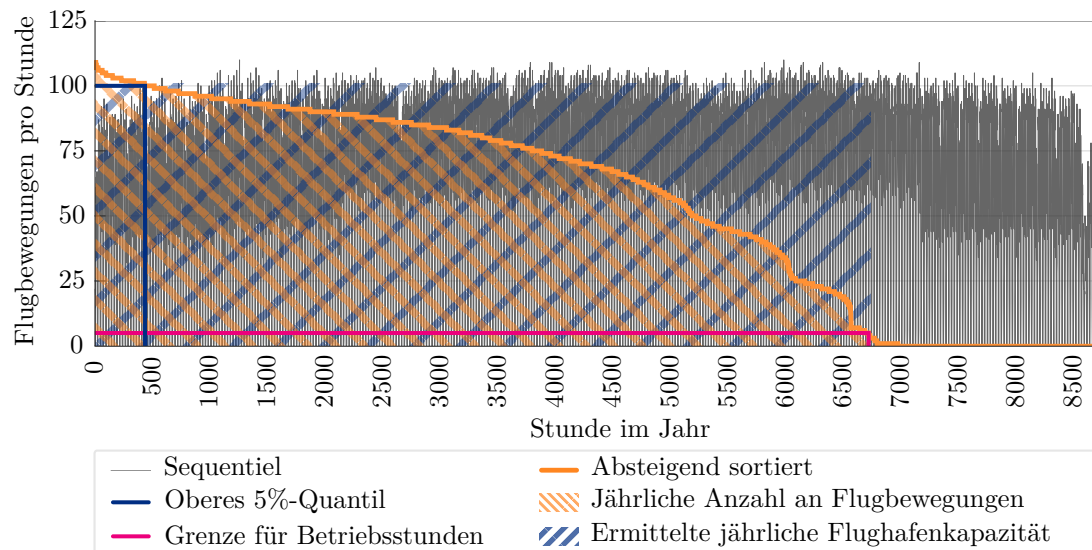


Abb. 4.7: Bestimmung der Flughafenkapazität am Beispiel FRA im Jahr 2019

im Modell die Flughafenkapazitäten so skaliert, dass ein hinsichtlich der Kalibrierungsfunktion geeignetes Niveau erreicht wird. Im Bezug auf das in Abb. 4.7 gezeigte Beispiel des Flughafens FRA wird die Notwendigkeit dieses zweiten Skalierungsfaktors durch den Vergleich der jährlichen Flugbewegungen (orange schraffierte Fläche) und der ermittelten, deutlich größeren jährlichen Flughafenkapazität (blau schraffierte Fläche) deutlich.

4.3.6 Start- und Landebahnlängen

Die Methodik zur Berücksichtigung der Start- und Landebahnlängen basiert auf dem Vergleich der flughafenspezifischen verfügbaren Runway-Längen mit den benötigten Start- und Landebahnlängen der verschiedenen Flugzeugtypen. Die flughafenspezifischen verfügbaren Runway-Längen werden hierbei den in Abschnitt 4.1 beschriebenen Flughafendaten entnommen. Die benötigten Start- und Landebahnlängen der verschiedenen Flugzeugtypen werden basierend auf den ACMs als Funktion der Abflug- bzw. Landemasse sowie der Druckhöhe des Flughafens modelliert. Hierfür werden die in den ACMs in Diagrammform gegebenen Daten für die benötigten Start- und Landebahnlängen punktwise abgelesen und durch eine zweidimensionale Regression mit den unabhängigen Variablen Masse des Flugzeugs und Druckhöhe des Flughafens approximiert. Als Datengrundlage werden die Daten der dominierenden Gewichts- und Triebwerksvariante eines jeden Flugzeugtyps verwendet. In Übereinstimmung mit den ACMs wird angenommen, dass die Start- bzw. Landebahn kein Gefälle aufweist, kein Wind vorliegt und die Vorflügel sowie Landeklappen ideal eingestellt sind. Für die Landung wird in konservativer Weise

eine nasse Landebahn angenommen.¹⁰ Auf die Modellierung des Einflusses etwaiger Temperaturabweichungen von der Standardatmosphäre (engl. International Standard Atmosphere; ISA) wird verzichtet.¹¹

Die für die Regressionen verwendeten Funktionsansätze sind in Gl. (4.44) und Gl. (4.45) angegeben. Die benötigte Startbahnlänge $tofl_{o,d,t,p}^{req}$ wird als Funktion der Startmasse $tom_{o,d,t,p}$ und der Druckhöhe am Startflughafen pa_o berechnet; die benötigte Landebahnlänge $lfl_{o,d,t,p}^{req}$ als Funktion der Landemasse $lm_{o,d,t,p}$ und der Druckhöhe am Zielflughafen pa_d . Die ermittelten Regressionskoeffizienten $a_{15,t}$ bis $a_{23,t}$ der verschiedenen Flugzeugtypen können Tab. A.4 in Anhang A.1 entnommen werden. Der Median des Bestimmtheitsmaßes R^2 der Regressionen liegt bei 99,23 %; mit einem Minimum von 95,53 % und einem Maximum von 99,97 %. In Abb. 4.8 und Abb. 4.9 sind beispielhaft für den Flugzeugtyp Boeing 787-9 die Regressionen für die benötigten Start- und Landebahnlängen visualisiert.

$$tofl_{o,d,t,p}^{req} = a_{15,t} \cdot \exp(a_{16,t} \cdot tom_{o,d,t,p} + a_{17,t} \cdot tom_{o,d,t,p} \cdot pa_o + a_{18,t} \cdot tom_{o,d,t,p} \cdot pa_o^2) + a_{19,t} \quad (4.44)$$

$$lfl_{o,d,t,p}^{req} = (a_{20,t} + a_{21,t} \cdot lm_{o,d,t,p}) \cdot \exp(a_{22,t} \cdot pa_d) + a_{23,t} \cdot lm_{o,d,t,p} \quad (4.45)$$

Die nachfolgenden Überlegungen stehen hinter den Funktionsansätzen. Sie decken sich mit den hergeleiteten analytischen Ansätzen zur Berechnung der Start- und Landestrecken, z. B. durch *Kundu* (2010).

- Mit zunehmender Druckhöhe pa nimmt die Dichte der Luft exponentiell ab (*Anderson*, 2016). Die abnehmende Luftdichte beeinflusst linear den Luftwiderstand und die Auftriebskraft sowie (vereinfachend) linear den (Umkehr-)Schub der Triebwerke (*Anderson*, 2017; *Bräunling*, 2015). Folglich sollte eine exponentielle Abhängigkeit der Druckhöhe in den Funktionsansätzen enthalten sein.
- Die benötigte Strecke, um eine Masse ausgehend von einer initialen Geschwindigkeit auf eine Zielgeschwindigkeit zu beschleunigen, ist bei konstanter Kraft linear von der Masse abhängig (zweites Newtonsches Gesetz). Da dies näherungsweise den Start- und Landevorgang beschreibt, sollte die Flugzeugmasse linear in den Funktionsansätzen enthalten sein.

¹⁰Bei Flugzeugtypen, für die nur Daten bei trockener Landebahn in den ACMs angegeben sind, wird übereinstimmend mit *Federal Aviation Administration* (1990) ein Faktor von 1,15 zur Umrechnung auf eine nasse Landebahn verwendet.

¹¹Die Validierungsergebnisse aus Abschnitt 4.6 rechtfertigen diese Vereinfachung, da der Einfluss der Start- und Landebahnlängen auf die globalen Ergebnisse sehr gering ist (Hubs und große Flughäfen mit ausreichenden Runway-Längen dominieren die ASK). In der Folge steht der zusätzliche Aufwand für die Modellierung des Einflusses etwaiger Temperaturabweichungen in keinem Verhältnis zur zusätzlichen Genauigkeit auf globaler Ebene, auch wenn lokale Besonderheiten speziell an hochgelegenen Flughäfen mit hohen Temperaturen, wie Mexiko-Stadt (MEX) oder Addis Abeba (ADD), so nicht berücksichtigt werden.

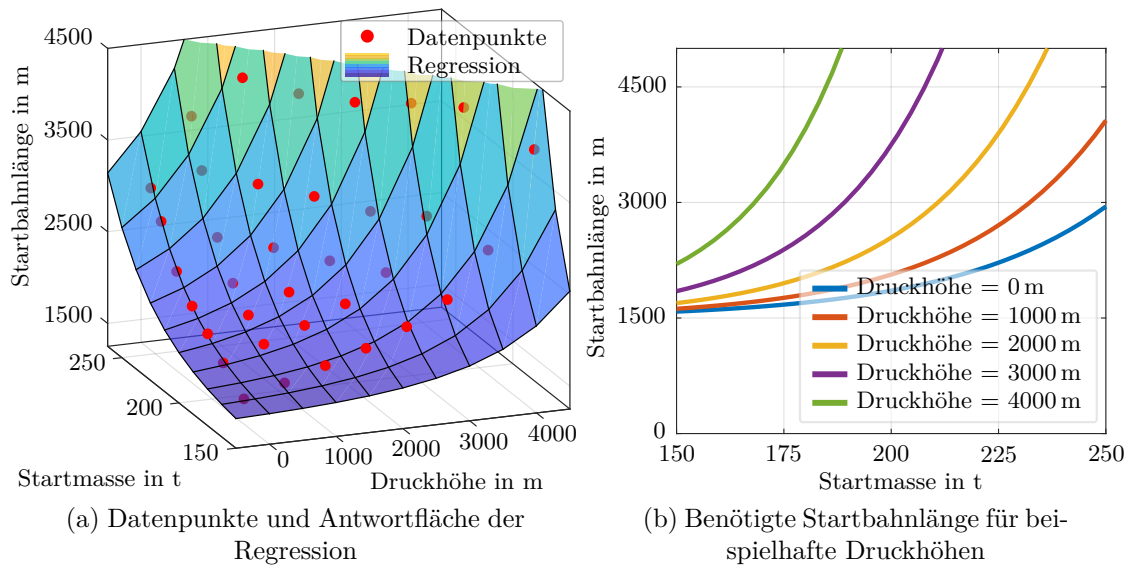


Abb. 4.8: Regression der benötigten Startbahnlänge für den Flugzeugtyp Boeing 787-9; Bestimmtheitsmaß $R^2 = 99,48\%$

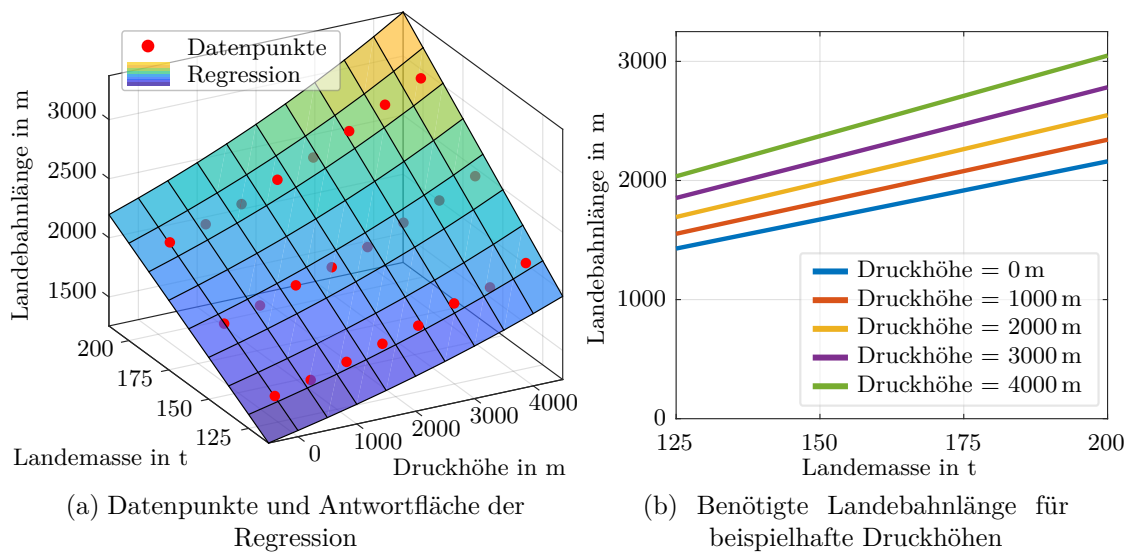


Abb. 4.9: Regression der benötigten Landebahnlänge für den Flugzeugtyp Boeing 787-9; Bestimmtheitsmaß $R^2 = 99,93\%$

- Um eine vektorisierbare Modellimplementierung zu ermöglichen, sollten die Funktionsansätze für die benötigten Start- und Landebahnlängen jeweils eine eindeutige, analytische Berechnung der maximalen Nutzlast als Teil der Start- und Landemasse bei gegebenen Start- und Landebahnlängen sowie Druckhöhe erlauben. Für die Startmasse bedingt dies aufgrund der Abhängigkeiten der Startmasse und der Treibstoffmasse von der Nutzlast (s. Gl. (4.36)) ein Gleichungssystem, welches eindeutig analytisch lösbar sein sollte.

Für die Berechnung der maximal möglichen Nutzlast pl^{pos} als Teil der Start- und Landemasse ergeben sich bei gegebener Runway-Länge rwl und gegebener Druckhöhe pa die Gleichungen (4.46) und (4.49). Gleichung (4.46) folgt hierbei aus den Gl. (4.36), Gl. (4.37) und Gl. (4.44) sowie der Annahme, dass die Startmasse der Summe aus Flugzeugleermasse, Nutzlast und Treibstoffmasse entspricht ($tom_{o,d,t,p} = oem_t + pl_{o,d,t,p} + m_{fuel_{o,d,t,p}}$). Gleichung (4.49) folgt mit der Annahme $lm_{o,d,t,p} = oem_t + pl_{o,d,t,p} + a_{4,t}$ direkt aus Gl. (4.45), wobei vereinfachend angenommen wird, dass die Summe aus Treibstoffreserven und Taxi-in-Treibstoff ungefähr dem distanzunabhängigen Anteil der Treibstoffregression $a_{4,t}$ (vgl. Gl. (4.36)) entspricht. Die ausführliche Herleitung der Gleichungen (4.46) und (4.49) ist in Anhang A.4 gegeben.

$$pl_{o,d,t}^{pos,to} = pl_{MZFM_t} \cdot \frac{tom_{o,d,t}^{pos,to} - oem_t - \xi_{o,d,t}}{a_{3,t} \cdot d_{o,d} + pl_{MZFM_t}} \quad (4.46)$$

$$tom_{o,d,t}^{pos,to} = \frac{\ln((rwl_o - a_{19,t})/a_{15,t})}{a_{16,t} + a_{17,t} \cdot pa_o + a_{18,t} \cdot pa_o^2} \quad (4.47)$$

$$\xi_{o,d,t} = a_{1,t} \cdot d_{o,d}^2 + a_{2,t} \cdot d_{o,d} + a_{4,t} \quad (4.48)$$

$$pl_{d,t}^{pos,l} = \frac{rwl_d - a_{20,t} \cdot \exp(a_{22,t} \cdot pa_d)}{a_{21,t} \cdot \exp(a_{22,t} \cdot pa_d) + a_{23,t}} - oem_t - a_{4,t} \quad (4.49)$$

4.3.7 Umsatzpotential und Passagierattraktivität

Um neben der Kostenperspektive und den operationellen Randbedingungen auch die Umsatzperspektive der Airlines im Modell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung abzubilden, werden die Attraktivität und das Umsatzpotential des Transportangebots aus Passagiersicht im Modell berücksichtigt. Die Attraktivität des Transportangebots aus Passagiersicht wird im Wesentlichen durch die Einflüsse Reisezeit, Flugfrequenz, Service-Qualität und Ticketpreis bestimmt (Belobaba *et al.*, 2009; Kölker *et al.*, 2015). Für das Modell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung werden die Reisezeit und die Flugfrequenz explizit als Teil der Zielfunktion des aufgestellten Optimierungsproblems berücksichtigt. Die Service-Qualität wird vereinfachend durch die Sitzplatzdichte der Kabine beschrieben, welche zusätzlich auch das Verhältnis von Umsatzpotential und Kosten des Transportangebots beschreibt. Der Ticketpreis wird im Modell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung nicht explizit berücksichtigt, da dieser zum einen stark mit den bereits im Modell enthaltenen DOC sowie der Sitzplatzdichte der Kabine korreliert und zum anderen primär durch das airlinespezifische Ertragsmanagement und weniger durch die Flugzeug-Routen-Zuordnung bestimmt wird. Nachfolgend werden die Aspekte (a) Reisezeit, (b) Flugfrequenz und (c) Sitzplatzdichte der Kabine für die Berücksichtigung des Umsatzpotentials und der Passagierattraktivität im Modell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung beschrieben.

(a) Reisezeit

Einer der wesentlichen Vorteile von Flugreisen aus Passagiersicht ist die im Vergleich zu anderen Verkehrsmitteln höhere Reisegeschwindigkeit, welche zu kürzeren Reisezeiten, insbesondere auf längeren Routen, führt (*Warburg et al.*, 2006; *Adler et al.*, 2010). Die Zahlungsbereitschaft eines Passagiers für die persönlichen Vorteile einer geringeren Reisezeit wird in der Literatur als Wert der Zeit (engl. Value of Time; VOT) bezeichnet (z. B. *Landau et al.* (2016)). Airlines können den VOT nutzen, um für aus Passagiersicht attraktivere, da schnellere Reiseverbindungen höhere Ticketpreise einzufordern bzw. um langsamere Reiseverbindungen über einen niedrigeren Ticketpreis trotzdem attraktiv anbieten zu können (*de Borger und Fosgerau*, 2008).

Basierend auf diesen Überlegungen wird im Modell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung die Attraktivität eines Transportangebots (einer Flugzeug-Routen-Zuordnung) u. a. anhand der für den Flug der Route benötigten Blockzeit modelliert. Hierfür erfolgt ein relativer Vergleich der Blockzeiten der verschiedenen möglichen Flugzeug-Routen-Zuordnungen, wobei die zusätzliche Blockzeit $\Delta bt_{o,d,t}$, welche benötigt wird, wenn Flugzeugtyp t statt des schnellsten Flugzeugs $\tilde{t}$ auf der Route (o, d) eingesetzt wird, mit VOT bepreist wird (Gl. (4.50) und Gl. (4.51)). Langsamen Flugzeugtypen werden somit zusätzliche Kosten in Höhe von $\gamma_{o,d,t}^{VOT}$ zugeordnet, welche die niedrigere Attraktivität des Transportangebots aus Passagiersicht abbilden.

$$\Delta bt_{o,d,t} = bt_{o,d,t} - \min_{\tilde{t} \in T_{o,d}} bt_{o,d,\tilde{t}} \quad (4.50)$$

$$\gamma_{o,d,t}^{VOT} = \beta^{VOT} \cdot \Delta bt_{o,d,t} \quad (4.51)$$

Für den exakten Wert β^{VOT} des VOT der zusätzlichen Blockzeit kann je nach untersuchter Fragestellung entweder ein Literaturwert verwendet werden¹² oder es wird im Kalibrierungsprozess (Abschnitt 4.4) ein Wert bestimmt, welcher laut Kalibrierungsmetrik zu der höchsten Übereinstimmung des Gesamtmodells mit den historischen Flugzeug-Routen-Zuordnungen aus *Sabre* (2022) führt.

(b) Flugfrequenz

Passagiere sind in ihren Reiseplanungen an die von den Airlines angebotenen Flugverbindungen, inklusive ihrer Abflug- und Ankunftszeiten, gebunden. Für die Reiseplanungen ist es vorteilhaft, wenn die gewünschte Flugverbindung mit einer hohen Frequenz angeboten wird, sodass eine möglichst große Auswahl an Reisezeitpunkten besteht und die Differenz zwischen gewünschtem und realisierbarem

¹²Für Freizeitreisende in der Economy-Klasse beispielsweise aus *Adler et al.* (2005) 26 €/h; aus *Meunier und Quinet* (2015) 52 €/h; aus *Landau et al.* (2016) 24 €/h; oder aus *Merkert und Beck* (2017) 60 €/h; Werte jeweils nach Umrechnung in €-2010.

Reisezeitpunkt minimiert werden kann. Folglich ist aus Passagiersicht ein Transportangebot (eine Flugzeug-Routen-Zuordnung) mit möglichst hoher Flugfrequenz attraktiv. Airlines können die mit der Attraktivität hoher Flugfrequenzen verbundene Zahlungsbereitschaft ihrer Passagiere nutzen, um mittels Flugverbindungen mit hohen Frequenzen (z. B. durch kleine Flugzeugtypen) höhere Ticketpreise oder höhere Marktanteile im Vergleich zu Wettbewerbern zu erzielen (*Belobaba et al.*, 2009). In der Literatur wird die Differenz zwischen gewünschtem und realisierbarem Reisezeitpunkt als *Schedule Difference* (Zeitplanabweichung) oder *Schedule Delay* (Zeitplanverspätung) bezeichnet (*Abrahams*, 1983; *Warburg et al.*, 2006).

Um die Attraktivität hoher Flugfrequenzen in das Modell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung einzubinden, wird das Konzept des Schedule Delays verwendet. In Analogie zu *Presto et al.* (2019) und *Presto* (2023) wird hierzu vereinfachend von einer zeitlich konstanten Verteilung der Passagiernachfrage sowie des Flugangebots ausgegangen.¹³ Ferner sei für die Passagierentscheidung die Flugfrequenz, aber nicht der genaue Flugzeitpunkt entscheidend (*Brueckner und Flores-Fillol*, 2007). Für den durchschnittlichen Schedule Delay $asd_{o,d,t}$ eines Passagiers auf der Flugroute (o, d) , die im Zeitraum $\Delta t_{o,d}$ mit der Frequenz $f_{o,d,t}$ befliegen wird, folgt dann Gl. (4.52). Für den gesamten Schedule-Delay $tsd_{o,d,t}$ aller Passagiere auf der Flugroute (o, d) beim Einsatz des Flugzeugtyps t mit $p_{o,d,t}$ Sitzplätzen pro Flug folgt Gl. (4.53).

$$asd_{o,d,t} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta t_{o,d}}{f_{o,d,t}} \quad (4.52)$$

$$\begin{aligned} tsd_{o,d,t} &= asd_{o,d,t} \cdot s_{o,d,t} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta t_{o,d}}{f_{o,d,t}} \cdot f_{o,d,t} \cdot p_{o,d,t} \\ &= \frac{1}{4} \cdot \Delta t_{o,d} \cdot p_{o,d,t} \end{aligned} \quad (4.53)$$

$$\gamma_{o,d,t}^{tsd} = \beta^{tsd} \cdot tsd_{o,d,t} \quad (4.54)$$

Zur Berechnung des finanziellen Gegenwerts $\gamma_{o,d,t}^{tsd}$ des Schedule Delays und damit der Flugfrequenz wird β^{tsd} im Kalibrierungsprozess (Abschnitt 4.4) bestimmt.

(c) Sitzplatzdichte der Kabine

Neben der Reisezeit und der Flugfrequenz ist auch der zu erwartende Komfort während des Flugs ein wesentlicher Faktor für die Attraktivität des Transportangebots aus Passagiersicht und die damit verbundene Zahlungsbereitschaft der Passagiere (*Kuo und Jou*, 2017). Der Komfort eines einzelnen Passagiers während des Flugs wird im Wesentlichen durch die gebuchte Beförderungsklasse (z. B. First,

¹³Die Vereinfachung wird an dieser Stelle, in Übereinstimmung mit *Presto* (2023), als geeignet für die Untersuchung des Schedule Delays angesehen, da Airlines in der Praxis ihr Flugangebot an der zeitlich variablen Passagiernachfrage ausrichten (*Brey und Walker*, 2011), woraus näherungsweise eine zeitlich gleichmäßige Verteilung des Schedule Delays resultiert; übereinstimmend mit der Annahme einer zeitlich konstanten Verteilung der Passagiernachfrage und des Flugangebots.

Business, Economy) und den Sitzabstand beeinflusst (*Balcombe et al.*, 2009). Für die Summe aller Passagiere eines Flugs kann dies vereinfachend in der Sitzplatzdichte der Kabine zusammengefasst werden.

Aus Sicht der Airline beeinflusst die Sitzplatzdichte der Kabine sowohl die Kosten als auch die Erlöse des Flugs. Während eine niedrige Sitzplatzdichte der Kabine die Kosten pro Sitzplatz erhöht, steigen die Erlöse infolge der sehr großen Zahlungsbereitschaft im Premiumsegment mitunter sogar überproportional an (*Hugon-Duprat und O’Connell*, 2015). Aufgrund der Korrelation von Flugzeuggröße, Einsatzdistanzen und Airline-Geschäftsmodellen, verfügen große Flugzeugtypen, die vorwiegend von Netzwerkfluggesellschaften auf Langstreckenverbindungen eingesetzt werden, häufig über größere Sitzabstände sowie mehr Sitzplätze in höheren Beförderungsklassen und somit über eine geringere Sitzplatzdichte (vgl. *Cirium* (2022)). Im reinen Kostenvergleich mit kleineren Kurzstreckenflugzeugen, die höhere Sitzplatzdichten vorweisen, sind größere Langstreckenflugzeuge daher bei Verwendung von durchschnittlichen Bestuhlungen strukturell benachteiligt.

Die typische Sitzplatzdichte der verschiedenen Flugzeugtypen wird daher in der Modellierung der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung berücksichtigt. Hierzu wird für jeden Flugzeugtyp zwischen der zugelassenen maximalen Sitzplatzanzahl (aus den TCDS) und der in der Praxis typischerweise verwendeten Sitzplatzanzahl, inklusive verschiedener Beförderungsklassen, unterschieden. Während die Berechnung der DOC mit der typischerweise verwendeten Sitzplatzanzahl $p_{o,d,t}$ erfolgt, wird bei der Quotientenbildung für die Kosten pro Sitzplatzkilometer, wie in Gl. (4.55) angegeben, die zugelassene maximale Sitzplatzanzahl $p_{o,d,t}^{max}$ verwendet. Somit werden die Betriebskosten näherungsweise ins Verhältnis zum Umsatzpotential der Kabinenfläche gesetzt. Die resultierenden Korrekturfaktoren $p_{o,d,t}/p_{o,d,t}^{max}$ der verschiedenen Flugzeugtypen können mit den Daten aus Tab. A.1 in Anhang A.1 bestimmt werden. Die Fünf-Punkte-Zusammenfassung der resultierenden Korrekturfaktoren in Tab. 4.9 unterstreicht, dass große Flugzeugtypen wie die Boeing 747-400 ($p^{max} = 624$) stärker betroffen sind als kleine Flugzeugtypen wie die ERJ-135 ($p^{max} = 37$).

$$(DOC/ASK)_{o,d,t} = DOC_{p_{o,d,t}}/ASK_{p_{o,d,t}^{max}} \quad (4.55)$$

Tab. 4.9: Fünf-Punkte-Zusammenfassung der Sitzplatzdichte

	Minimum	1. Quartil	Median	3. Quartil	Maximum
$p_{o,d,t}/p_{o,d,t}^{max}$	0,5801	0,6798	0,8484	0,8889	0,9459
Flugzeugtyp	B747-400	A330-200	A321neo	A220-100	ERJ-135

4.3.8 Airline-Wettbewerb

Das Submodell des Airline-Wettbewerbs zielt darauf ab, im Modell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung zu beschreiben, warum im realen Lufttransportsystem mehrere verschiedene Flugzeugtypen auf einer Flugroute eingesetzt werden. Einerseits ist dies eine Auswirkung der Existenz und Konkurrenz von individuellen Airlines mit z. B. jeweils eigenen Planungsprozessen, Geschäftsmodellen, Routennetzwerken und Flugzeugflotten. Andererseits werden mitunter auch innerhalb einer Airline verschiedene Flugzeugtypen für dieselbe Flugroute verwendet, u. a. um saisonale oder tageszeitabhängige Nachfrageschwankungen zu berücksichtigen (Kenan *et al.*, 2018; Sa *et al.*, 2020). Verallgemeinert sind somit Variationen der ökonomischen und operationellen Gegebenheiten, sowohl auf der Angebotsseite (Airlines) als auch auf der Nachfrageseite (Passagiere) der Flugzeug-Routen-Zuordnung, dafür verantwortlich, dass mehrere verschiedene Flugzeugtypen auf einer Flugroute eingesetzt werden (Belobaba *et al.*, 2009).

Um diese Zusammenhänge vereinfachend im Modell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung abzubilden, werden vier Modellierungsansätze kombiniert:

- (a) Für die Anzahl an Airlines pro Route wird anhand von historischen Flugplandaten (Abschnitt 4.1) ein Regressionsmodell aufgestellt.
- (b) Die Marktkonzentration der Airlines auf einer Route wird ebenfalls durch ein Regressionsmodell beschrieben.
- (c) Die Anzahl an Flugzeug-Routen-Zuordnungen pro Airline wird während der Gesamtmodellkalibrierung (Abschnitt 4.4) durch einen Faktor bestimmt.
- (d) Die Variation der ökonomischen und operationellen Gegebenheiten für die verschiedenen Airlines und Flugzeug-Routen-Zuordnungen wird anhand einer Kostenvariation mit einer Normalverteilung mit dem Mittelwert 1 und einer während der Gesamtmodellkalibrierung (Abschnitt 4.4) ermittelten Standardabweichung abgebildet.

Nachfolgend werden diese vier einzelnen Schritte zur Modellierung der Auswirkungen des Airline-Wettbewerbs auf die Flugzeug-Routen-Zuordnung detailliert beschrieben.

(a) Anzahl an Airlines pro Route

Für das Umsatzpotential einer Flugverbindung zwischen Startflughafen o und Zielflughafen d aus Sicht einer Airline ist neben der Passagiernachfrage auch das Flugangebot etwaiger konkurrierender Airlines entscheidend (Boguslaski *et al.*, 2004). Tendenziell ist eine Route hierbei mit steigender Passagiernachfrage für mehr Airlines attraktiv, da der kritische Marktanteil, um eine kommerziell erfolgreiche Flugverbindung anbieten zu können, kleiner wird. Folglich korreliert die Anzahl an

Airlines auf einer Route mit der Passagiernachfrage bzw. dem Sitzplatzangebot auf der Route.

Für die Modellierung der Anzahl der auf einer Route operierenden Airlines $c_{o,d}$ wird dieser beschriebene Zusammenhang genutzt. Basierend auf den historischen Flugplandaten (Abschnitt 4.1) wird mit den in Gl. (4.56) und Gl. (4.57) gegebenen Regressionsansätzen ein funktionaler Zusammenhang zwischen der abhängigen Variablen Anzahl an Airlines auf der Route $c_{o,d}$ und der unabhängigen Variablen Sitzplatzangebot auf der Route $s_{o,d}$ ermittelt. Hierbei wird, wie bereits durch Gl. (4.14) und Gl. (4.15) in Unterabschnitt 4.2.1 beschrieben, eine stochastische Modellierung anhand einer Normalverteilung $\mathcal{N}(g_{c,\mu}(s_{o,d}), g_{c,\sigma}(s_{o,d}))$ verwendet. Sowohl für die Funktion des Mittelwerts $\mu_c = g_{c,\mu}(s_{od})$ als auch für die Funktion der Varianz $\sigma_c^2 = g_{c,\sigma}(s_{od})^2$ dieser Normalverteilung basiert der Regressionsansatz auf einer S-Kurve, welche durch einen Tangens hyperbolicus dargestellt wird. Folglich sind μ_c und σ_c^2 nach unten wie oben beschränkt ($a_{27} < \mu_c < 2 \cdot a_{24} + a_{27}$ und $0 < \sigma_c^2 < 2 \cdot a_{28}$).

$$\mu_c = g_{c,\mu}(s_{od}) = a_{24} \cdot (\tanh(a_{25} \cdot (\log_{10}(s_{o,d}) - a_{26})) + 1) + a_{27} \quad (4.56)$$

$$\sigma_c^2 = g_{c,\sigma}(s_{od})^2 = a_{28} \cdot (\tanh(a_{29} \cdot (\log_{10}(s_{o,d}) - a_{30})) + 1) \quad (4.57)$$

Die Tabellen 4.10 und 4.11 geben die ermittelten Werte für die Regressionskoeffizienten a_{24} bis a_{30} sowie die Bestimmtheitsmaße R^2 an. Während für die drei Untersuchungszeiträume in beiden Tabellen nur geringfügige Unterschiede erkennbar sind, unterschieden sich die Bestimmtheitsmaße R^2 zwischen den Regressionen für die Mittelwerte und die Varianzen deutlich. Dies ist darin begründet, dass zuerst die Regression der Mittelwerte erfolgt und anschließend aus der verbleibenden Streuung der historischen Daten um die Regression der Mittelwerte abschnittsweise Varianzen berechnet werden, welche schlussendlich erneut als abhängige Variable für die Regression der Varianzen dienen. Da die Streuung der Daten den initialen Grund für die stochastische Modellierung darstellt, ist das geringere Bestimmtheitsmaß der Regression der Mittelwerte (s. Tab. 4.10) folgerichtig.

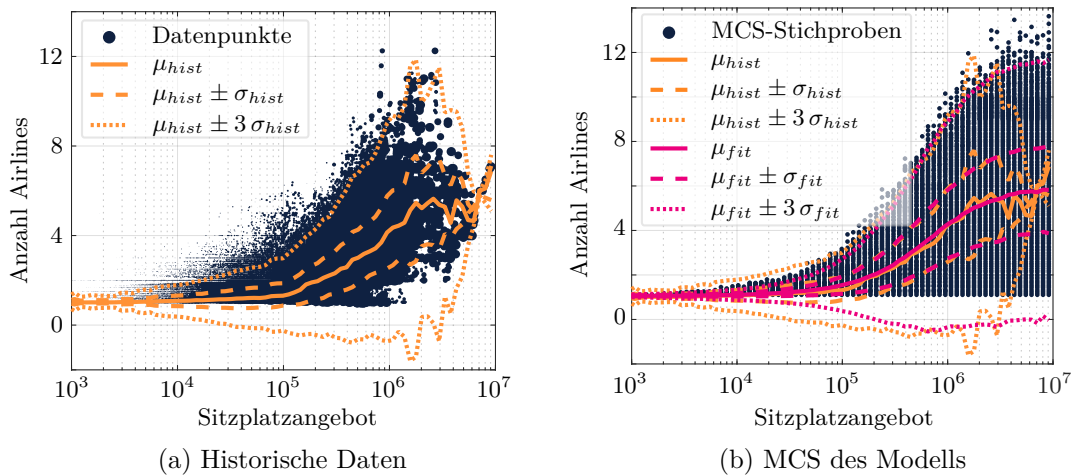
Tab. 4.10: Koeffizienten der Regression für den Mittelwert der Anzahl an Airlines; alle dimensionslos

	a_{24}	a_{25}	a_{26}	a_{27}	R^2
2010–2016	2,395	1,554	5,805	1,054	55,38 %
2013–2019	2,447	1,568	5,801	1,078	53,50 %
2010–2019	2,449	1,554	5,805	1,063	54,39 %

Tab. 4.11: Koeffizienten der Regression für die Varianz der Anzahl an Airlines; alle dimensionslos

	a_{28}	a_{29}	a_{30}	R^2
2010–2016	2,129	1,477	5,931	91,81 %
2013–2019	1,852	1,752	5,736	89,93 %
2010–2019	1,997	1,616	5,812	92,57 %

In Abb. 4.10 werden die historischen Daten dem entwickelten Modell für die Anzahl an Airlines pro Route für den Zeitraum 2010–2019 gegenübergestellt. Aufgrund der stochastischen Natur des entwickelten Modells wird eine Monte-Carlo-Simulation (MCS) verwendet, mit jeweils 5000 Zufallsstichproben je Abszissen-Abschnitt einer Schrittweite von 0,04 in logarithmischer Auftragung. Es ist zu erkennen, dass der grundlegende Zusammenhang zwischen dem Sitzplatzangebot $s_{o,d}$ und der Anzahl an Airlines $c_{o,d}$ erfasst wird. Die Modellierung der Streuung der empirischen Daten durch den stochastischen Ansatz gelingt, insbesondere für Routen mit mehr als 10^5 angebotenen Sitzplätzen pro Jahr. Für Routen mit mehr als $2 \cdot 10^6$ angebotenen Sitzplätzen pro Jahr liegen wenige empirische Daten vor, sodass der weitere Verlauf von Mittelwert und Standardabweichung eine Annahme darstellt. Dass die Zufallsstichproben anhand der Rechenvorschrift $c_{o,d} = |c_{o,d}^{rng} - 1| + 1$ modifiziert werden, um widersinnige Ergebnisse auszuschließen, d. h. solche, welche zu einer Anzahl an Airlines kleiner eins führen, schränkt die Güte des Modells nicht ein.

Abb. 4.10: Zusammenhang zwischen dem Sitzplatzangebot $s_{o,d}$ und der Anzahl an Airlines $c_{o,d}$ auf der Route für den Zeitraum 2010–2019

(b) Marktkonzentration der Airlines

Um die gesamte auf einer Flugroute angebotene Sitzplatzkapazität $s_{o,d}$ realitätsnah auf die im vorherigen Schritt ermittelte Anzahl an Airlines $c_{o,d}$ aufzuteilen, wird ein Modell für die Konzentration des Sitzplatzangebots dieser Airlines $s_{o,d,c}$

aufgestellt. Zur Quantifizierung der Marktkonzentration wird als Kennzahl der HHI verwendet. Da der HHI bei N Marktteilnehmenden per Definition zwischen $1/N$ und 1 liegt, ist die Anzahl an Airlines $c_{o,d}$ eine inhärente Einflussgröße für die Marktkonzentration der Airlines auf einer Route hinsichtlich des Sitzplatzangebots. Die Modelle zur Ermittlung der Anzahl an Airlines und deren Marktkonzentration sind somit verknüpft.

Für die Modellierung der Marktkonzentration der Airlines wird basierend auf den historischen Flugplandaten die Marktkonzentration des Sitzplatzangebots der verschiedenen Airlines gemäß HHI berechnet und die Differenz zum minimal möglichen HHI bei korrekt gegebener Anzahl an konkurrierenden Airlines bestimmt (Gl. (4.58)). Die Varianz σ_h^2 der beschriebenen Differenz fungiert als Parameter für das in Unterabschnitt 4.2.1 eingeführte Vorgehen, mit Gl. (4.17) und Gl. (4.18) die Marktanteile der einzelnen Airlines zu bestimmen. Für die drei Untersuchungszeiträume 2010–2016, 2013–2019 und 2010–2019 betragen die resultierenden Varianzen 6,372E-03; 6,283E-03 und 6,364E-03.

$$\sigma_h^2 = \text{Var} \left(hhi \left(s_{o,d,c}^{hist} \right) - \frac{1}{c_{o,d}^{hist}} \right) \quad (4.58)$$

In Abb. 4.11 werden die historischen Daten dem entwickelten Modell der Marktkonzentration der Airlines gegenübergestellt. Aufgrund der stochastischen Natur des entwickelten Modells wird eine MCS verwendet; mit jeweils 5000 Zufallsstichproben je Abszissen-Abschnitt einer Schrittweite von $1/12$. Es ist zu erkennen, dass der grundlegende Zusammenhang zwischen der Anzahl an Airlines $c_{o,d}$ und der Marktkonzentration gemäß HHI erfasst wird. Die Modellierung der Streuung der empirischen Daten durch den stochastischen Ansatz gelingt; insbesondere für Routen mit mehr als fünf konkurrierenden Airlines. Für Routen mit weniger als fünf konkurrierenden Airlines wird die Marktkonzentration tendenziell unterschätzt.

(c) Anzahl an Flugzeug-Routen-Zuordnungen pro Airline

Innerhalb einer Airline können verschiedene Flugzeugtypen auf einer Route eingesetzt werden, um ökonomische und operationelle Gegebenheiten, wie Nachfrageschwankungen, Flugzeugrotationen oder MRO-Aktivitäten, in der airlinespezifischen Flugzeug-Routen-Zuordnung zu berücksichtigen. Da eine Modellierung dieser airlinespezifischen Zusammenhänge für die Zielsetzung des entwickelten Modells der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung (Abschnitt 3.1) nicht geeignet ist, wird vereinfachend ein alternativer, airlineübergreifender Ansatz gewählt. Hierzu wird, ausgehend von der ermittelten Anzahl an Airlines pro Route, innerhalb der Gesamtmodellkalibrierung (Abschnitt 4.4) ein Faktor β^{airl} bestimmt, welcher

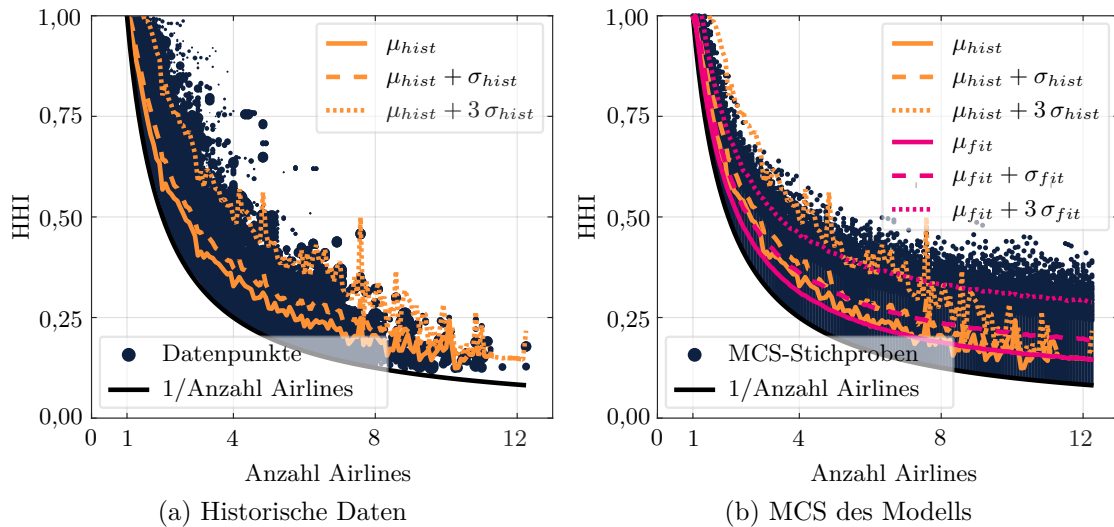


Abb. 4.11: Zusammenhang zwischen Anzahl an Airlines $c_{o,d}$ und der Marktkonzentration gemäß HHI auf der Route für den Zeitraum 2010–2019

als durchschnittliche Anzahl an Flugzeug-Routen-Zuordnungen pro Airline interpretiert werden kann. Durch Multiplikation mit der Anzahl an Airlines pro Route (Gl. (4.14)) kann so eine Anzahl an Flugzeug-Routen-Zuordnungen pro Route¹⁴ bestimmt werden, welche durch die modellierte Kostenvariation (Gl. (4.8)) zum Einsatz verschiedener Flugzeugtypen auf einer Route führt.

(d) Kostenvariation

Die Modellierung einer Kostenvariation für die verschiedenen Flugzeug-Routen-Zuordnungen auf einer Route soll nachbilden, dass basierend auf einer Vielzahl an Faktoren, wie z. B. dem Geschäftsmodell, der bestehenden Flugzeugflotte sowie der Marktposition im Vergleich zu Mitbewerbern und Flugzeugherstellern, unterschiedliche Airlines beim Befliegen der identischen Route unterschiedliche Kosten- und Umsatzpositionen besitzen. So kann das Vorhandensein einer Bestandsflotte eines Flugzeugtyps die Entscheidung, zusätzliche Einheiten des selben Flugzeugtyps auf zusätzlichen Flugrouten einzusetzen, unterstützen, da so Synergien bei der Crew- und MRO-Planung genutzt werden können (Bazargan, 2010; Cook, 2017). Gleichmaßen kann, wie im vorherigen Absatz beschrieben, auch für eine spezifische Airline die Kosten- und Umsatzposition zeitlich variabel sein und zu verschiedenen Flugzeug-Routen-Zuordnungen führen.

Da die konkrete Modellierung der zeitlich variablen Kosten- und Umsatzpositionen der verschiedenen Airlines nicht möglich und für die Zielsetzung des entwickelten

¹⁴Innerhalb der mathematischen Formulierung des entwickelten Optimierungsproblems der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung (Unterabschnitt 4.2.1) wird zu Gunsten der Verständlichkeit der Modellbeschreibung auf die Unterscheidung zwischen den Begriffen *Airlines pro Route* und *Flugzeug-Routen-Zuordnungen pro Route* verzichtet. Beide Begriffe sind im Kontext der mathematischen Formulierung des entwickelten Optimierungsproblems äquivalent und stellen lediglich eine unterschiedliche Interpretation der mathematischen Formulierung dar.

Modells ungeeignet ist, erfolgt die Modellierung der Kosten- und Umsatzvariation der Airlines anhand eines normalverteilten Faktors, welcher die Kosten im Optimierungsproblem der Flugzeug-Routen-Zuordnung beeinflusst (Gl. (4.8) und Gl. (4.9)). Die Varianz σ_m^2 dieses normalverteilten Faktors $m_{o,d,c,t}$ wird während der Kalibrierung des Gesamtmodells (Abschnitt 4.4) bestimmt. Die Validierung des gewählten Modellierungsansatzes erfolgt als Teil der Gesamtmodellvalidierung (Abschnitt 4.6).

4.4 Kalibrierung

Die Kalibrierung des Modells der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung dient dazu, die freien Parameter, welche zur Einstellung des Modells verwendet werden können, so zu wählen, dass die Abweichungen zwischen Modellergebnissen und historischen Flugzeug-Routen-Zuordnungen reduziert werden und für das Gesamtmodell folglich eine gute Übereinstimmung mit den historischen Daten erzielt wird. Die freien Parameter umfassen hierbei den finanziellen Gegenwert von Reisezeit und Schedule Delay, β^{VOT} und β^{tsd} , den Skalierungsfaktor des Flughafenkapazitätsmodells β^a , die Standardabweichung des Kostenmodifikators für die verschiedenen Flugzeug-Routen-Zuordnungen σ^m sowie die Anzahl an Flugzeug-Routen-Zuordnungen pro Airline auf einer Route β^{airl} .

Methodisch stellt die Kalibrierung eine mehrdimensionale Extremwertsuche einer Funktion dar, welche in Abhängigkeit der Kalibrierungsparameter (β^{VOT} , β^{tsd} , β^a , σ^m , β^{airl}) die Abweichungen zwischen den Modellergebnissen und den historischen Flugplandaten hinsichtlich der Flugzeug-Routen-Zuordnung quantifiziert (Gl. (4.59)).¹⁵

$$\min \sum_{Jahre} \Gamma \left(\text{Modell} \left(\beta^{VOT}, \beta^{tsd}, \beta^a, \sigma^m, \beta^{airl} \right), \text{historische Daten} \right) \quad (4.59)$$

$$\begin{aligned} \Gamma = & 25 \cdot \text{NWM}_{d,o,d}^t + 25 \cdot \text{NWM}_{s,o,d}^t + 10 \cdot \text{NWM}_{x,o,d}^t + 1 \cdot \text{RMSE}_{p,o,d}^{d^{cat}} \\ & + 1 \cdot \text{RMSE}_{p,o,d}^{s^{cat}} + 1 \cdot \text{RMSE}_{HHI_t}^{d^{cat}} + 1 \cdot \text{RMSE}_{HHI_t}^{s^{cat}} + 1 \cdot \text{RMSE}_f^a \\ & + 1 \cdot \sum_{(o,d) \in OD} \max \left(0, s_{o,d}^{hist} - s_{o,d}^{modell} \right) \end{aligned} \quad (4.60)$$

Die Abweichungsfunktion Γ , gegeben in Gl. (4.60), setzt sich, in Analogie zu den in Unterabschnitt 3.1.2 aufgestellten Anforderungen an die Abbildungsqualität

¹⁵ An dieser Stelle könnte statt des Begriffs *Kalibrierungsparameter* auch der Begriff *Kalibrierungsvariable* verwendet werden, um in den Fokus zu stellen, dass β^{VOT} , β^{tsd} , β^a , σ^m und β^{airl} im Kalibrierungsprozess die Variablen der durchgeführten Extremwertsuche sind. Für das Gesamtmodell der Flugzeug-Routen-Zuordnung sind β^{VOT} , β^{tsd} , β^a , σ^m und β^{airl} allerdings statische Parameter, sodass im Sinne einer durchgängig einheitlichen Bezeichnung ausschließlich der Begriff *Kalibrierungsparameter* verwendet wird.

des Gesamtmodells, als Summe aus neun flugzeugtyp-, routenkategorie- und flughafenspezifischen Abweichungsmaßen zusammen, welche in Tab. 4.12 angegeben sind. Unter anderem werden Abweichungen hinsichtlich der Einsatzdistanzen der Flugzeugtypen, der Sitzplatzanzahlen pro Flug, der Marktkonzentration auf den Routen sowie der Flugbewegungen an den Flughäfen erfasst. Ferner werden etwaige Sitzplätze, welche nicht durch die modellierte Flugzeug-Routen-Zuordnung angeboten werden können, in der Abweichungsfunktion berücksichtigt; primär, um nicht angestrebte Kalibrierungsergebnisse auszuschließen, bei denen die historische Flotte, z. B. aufgrund von zu niedrigen Flughafenkapazitäten im Modell, nicht ausreicht, um das historische Sitzplatzangebot zu erzielen. Die Gewichtungsfaktoren (25, 10 und 1) in Gl. (4.60) stellen sicher, dass die einzelnen Summanden eine vergleichbare Größenordnung haben und die Abweichungsfunktion als Ganzes die Anforderungen an die Abbildungsqualität des Gesamtmodells aussagekräftig erfasst. Tabelle 4.12 gibt einen zusätzlichen Überblick über die verschiedenen Summanden der Abweichungsfunktion. Die aufgelisteten Abbildungen veranschaulichen die verschiedenen erfassten Abweichungen, wobei die in den in Unterabschnitt 4.6.2 zu findenden Abbildungen jeweils die Ergebnisse des kalibrierten Modells visualisieren.

Tab. 4.12: Abweichungsmaße für die Kalibrierung; Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung (engl. Root Mean Square Error; RMSE) und normalisierte Wasserstein-Metrik (NWM) werden jeweils ASK-gewichtet berechnet

Nr.	Messgröße	Bezugsgröße	Kennzahl	Abbildung
1	Einsatzdistanz $d_{o,d}$	Flugzeugtyp t	NWM	Abb. 4.14a
2	Sitzplatzkapazität der Route $s_{o,d}$	Flugzeugtyp t	NWM	Abb. 4.14b
3	Sitzplatzkapazitätsanteil auf Route $x_{o,d}$	Flugzeugtyp t	NWM	Abb. 4.14c
4	Sitzplatzanzahl pro Flug $p_{o,d}$	Distanzkategorie $d_{o,d}^{cat}$	RMSE	Abb. 4.15a
5	Sitzplatzanzahl pro Flug $p_{o,d}$	Kapazitätskategorie $s_{o,d}^{cat}$	RMSE	Abb. 4.15b
6	HHI der Flugzeugtypen	Distanzkategorie $d_{o,d}^{cat}$	RMSE	Abb. 4.15c
7	HHI der Flugzeugtypen	Kapazitätskategorie $s_{o,d}^{cat}$	RMSE	Abb. 4.15d
8	Flugbewegungen f	Flughafen a	RMSE	Abb. 4.17a
9	Nicht angebotene Sitzplatzkapazität	—	Summe	—

Da die Modellergebnisse selbst als Ergebnis eines Optimierungsproblems bereits einer Vielzahl von Einflüssen, u. a. dem von Zufallszahlen, unterliegen, kann für die Abweichungsfunktion zwischen Modellergebnissen und historischen Flugplandaten keine geschlossene Form angegeben werden, sodass iterative, numerische Verfahren für die Extremwertsuche der Kalibrierung genutzt werden. Konkret wird ein zweistufiges Verfahren angewandt, welches die komplementären Eigenschaften zweier Algorithmen vorteilhaft kombiniert:

1. Mit einem genetischen Algorithmus wird ein weitläufiger Parameterraum durchsucht, um möglichst losgelöst vom Risiko eines lokalen Extremums eine initiale Kalibrierung in der Nähe des globalen Minimums zu bestimmen.¹⁶

¹⁶Konkret nutzt der implementierte genetische Algorithmus eine anfänglich zufällige Population von Werten für die Kalibrierungsparameter. Diese Werte werden durch Selektion, Kreuzung

2. Diese initiale Kalibrierung wird als Startlösung für ein Gradientenverfahren mit Differenzenquotienten verwendet, um die Kalibrierung bis hin zum globalen Minimum zu verfeinern.

Sowohl für den genetischen Algorithmus als auch für das Gradientenverfahren wird der Einfluss der für die Flugzeug-Routen-Zuordnung genutzten Zufallszahlen auf die Modellkalibrierung dadurch minimiert, dass die Abweichungsfunktion – im Stile einer MCS – mehrfach mit den gleichen Parameterwerten, aber unterschiedlichen Zufallszahlen ausgewertet und die resultierenden, streuenden Funktionswerte gemittelt werden. Für die initiale Kalibrierung mit dem genetischen Algorithmus werden 10 Wiederholungen der Auswertung der Abweichungsfunktion durchgeführt, für die finale Kalibrierung mit dem Gradientenverfahren, um eine höhere Genauigkeit zu erzielen, 20 Wiederholungen.

Die Ergebnisse der Kalibrierung für die drei Zeiträume 2010–2016, 2013–2019 und 2010–2019 sind in Tab. 4.13 und Abb. 4.12 zusammengefasst; wobei jeweils die individuellen Regressionsparameter der Submodelle (Abschnitt 4.3) für die drei Zeiträume berücksichtigt sind. Tabelle 4.13 zeigt die ermittelten Werte der Kalibrierungsparameter für die drei verschiedenen Kalibrierungszeiträume. Es ist zu erkennen, dass die Parameterwerte der verschiedenen Zeiträume nur geringfügig voneinander abweichen. Der Wert der Reisezeit β^{VOT} wird zu ca. 20 €/h bestimmt und ist somit kleiner als Werte aus der Literatur, welche gemäß beispielhafter Studien und Passagierumfragen für verschiedene Märkte (*Adler et al.*, 2005; *Meunier und Quinet*, 2015; *Landau et al.*, 2016; *Merkert und Beck*, 2017) für Privatreisende im Bereich von 24 €/h bis 62 €/h und für Geschäftsreisende im Bereich von 36 €/h bis 96 €/h liegen. Die Differenz zu Literaturwerten resultiert primär daraus, dass in der Literatur der VOT im Vergleich zu den Passagierticketpreisen ermittelt wird und im Modell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung der VOT im Zusammenhang mit den DOC im Fokus steht. Um diesen Effekt korrigiert¹⁷, stimmt der ermittelte VOT-Wert in guter Näherung mit dem Bereich der Literaturwerte überein. Der Wert des Schedule Delay β^{tsd} wird zu ca. 1,80 €/h bestimmt. Werte aus der Literatur (*Adler et al.*, 2005; *Warburg et al.*, 2006) liegen im Bereich von 5 €/h bis 12 €/h und somit auch nach Korrektur der Bezugsgröße von DOC zu Ticketpreis (in Analogie zum VOT) oberhalb der ermittelten Werte (ca. 3 €/h). Die Abweichungen innerhalb einer Größenordnung werden insgesamt aber als akzeptabel bewertet, da erstens die Literaturwerte bereits eine große Streuung zeigen und zweitens die Vergleichbarkeit zwischen den mit Passagierumfragen

und Mutation der Population iterativ weiterentwickelt, um die Abweichungsfunktion zu minimieren. Selektion, Kreuzung und Mutation erfolgen teils zufallsbasiert, teils basierend auf den Auswertungen der Abweichungsfunktion, um die Lösungen zu verbessern und zu verfeinern. Insgesamt resultiert so ein stochastisches und metaheuristisches Optimierungsverfahren.

¹⁷Mit den beispielhaften und vereinfachenden Abschätzungen, dass die DOC 60 % der Gesamtbetriebskosten ausmachen und die Ticketpreise zusätzlich eine Gewinnmarge von 3 % beinhalten, folgt ein für Ticketpreise relevanter VOT-Wert von $20 \text{ €/h} \cdot 1/0,6 \cdot 1,03 = 34,33 \text{ €/h}$.

Tab. 4.13: Werte der Kalibrierungsparameter für verschiedene Kalibrierungszeiträume

Parameter		2010–2016	2013–2019	2010–2019
Wert von Reisezeit	β^{VOT}	18,11 €/h	20,02 €/h	19,31 €/h
Wert von Schedule Delay	β^{tsd}	1,814 €/h	1,770 €/h	1,773 €/h
Flughafenkapazität	β^a	0,6582	0,6707	0,6621
Kostenmodifikator	σ^m	0,09708	0,08857	0,08929
Anzahl an Flugzeug-Routen-Zuordnungen pro Airline	β^{airl}	3,375	3,394	3,469

ermittelten Literaturwerten und den hier ermittelten, jährlich aggregierten und airlineübergreifenden Werten als Ergebnis der Kalibrierung des Modells der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung begrenzt ist. Für die Flughafenkapazitäten liegt der Kalibrierungsfaktor β^a bei ca. 0,66. Dies unterstreicht die bereits in Unterabschnitt 4.3.5 beschriebene Notwendigkeit dieses Kalibrierungsfaktors, welche aus der im Allgemeinen optimistischen Methodik zur Ermittlung der Flughafenkapazitäten resultiert (vgl. Abb. 4.17a in Unterabschnitt 4.6.2). Der Wert von ca. 0,66 passt gut zu dem in Unterabschnitt 4.3.5 diskutierten Beispiel des Flughafens Frankfurt (FRA), dessen individuelle Daten für 2019 zu einem Skalierungsfaktor zwischen der Anzahl der jährlichen Flugbewegungen und der ermittelten Flughafenkapazität von 0,70 führen, wie in Abb. 4.7 visualisiert.¹⁸ Die Standardabweichung σ^m des Kostenmodifikators m (vgl. Unterabschnitt 4.3.8 sowie Gl. (4.8) und (4.9)) in Höhe von ca. 0,090 bedeutet, dass, gemäß der Normalverteilung von m , 68,3% der Werte von m innerhalb von $[0,91; 1,09]$ liegen und 99,7% innerhalb von $[0,73; 1,27]$. Gemeinsam mit der ermittelten Anzahl an Flugzeug-Routen-Zuordnungen pro Airline β^{airl} von ca. 3,4 wird deutlich, dass das Submodell des Airline-Wettbewerbs (Unterabschnitt 4.3.8), gemäß der Abweichungsfunktion der Kalibrierung, zu einer Erhöhung der Gesamtmodellgüte führt.

Abbildung 4.12 visualisiert die aggregierten, nach der Kalibrierung verbleibenden Abweichungen zwischen historischen Flugplandaten und Modellergebnissen für die drei verschiedenen Kalibrierungszeiträume und die verschiedenen Auswertungsjahre. Dargestellt sind jeweils die mittleren Abweichungen (Datenpunkte) sowie die minimalen und maximalen Abweichungen (Fehlerbalken) bei 20 Wiederholungen. Es ist zu erkennen, dass die verbleibenden Werte der Abweichungsfunktion zeitlich konstant und für die verschiedenen Kalibrierungszeiträume ähnlich groß sind. Aufgrund der im Submodell des Airline-Wettbewerbs (Unterabschnitt 4.3.8) verwendeten Zufallszahlen schwanken die Werte der Abweichungsfunktion Γ , gegeben

¹⁸Im Jahr 2019 lagen laut Flugplandaten (*Sabre*, 2022) insgesamt 484 585 Flugbewegungen vor (orange schraffierte Fläche in Abb. 4.7), die ermittelte Flughafenkapazität liegt bei 1896 Flugbewegungen pro Tag (s. Unterabschnitt 4.3.5) bzw. 692 040 Flugbewegungen pro Jahr (blau schraffierte Fläche in Abb. 4.7). Hieraus folgt ein flughafenspezifischer Faktor im Jahr 2019 von $484\,585/692\,040 = 0,70$.

in Gl. (4.60), jeweils um ca. $\pm 10\%$. Ein Vergleich mit den Abweichungswerten ohne die Verwendung von Zufallszahlen¹⁹ zeigt, dass auch die maximalen Abweichungswerte bei Verwendung der Zufallszahlen (Werte bis ca. 55) deutlich geringer sind als solche Werte ohne die Zufallszahlen (Werte im Bereich von 125 bis 140; nicht visualisiert). Folglich ist die Verwendung von Zufallszahlen, trotz der hieraus resultierenden Volatilität der Ergebnisse, gemäß der Abweichungsfunktion der Kalibrierung für die Gesamtmodellgüte positiv.

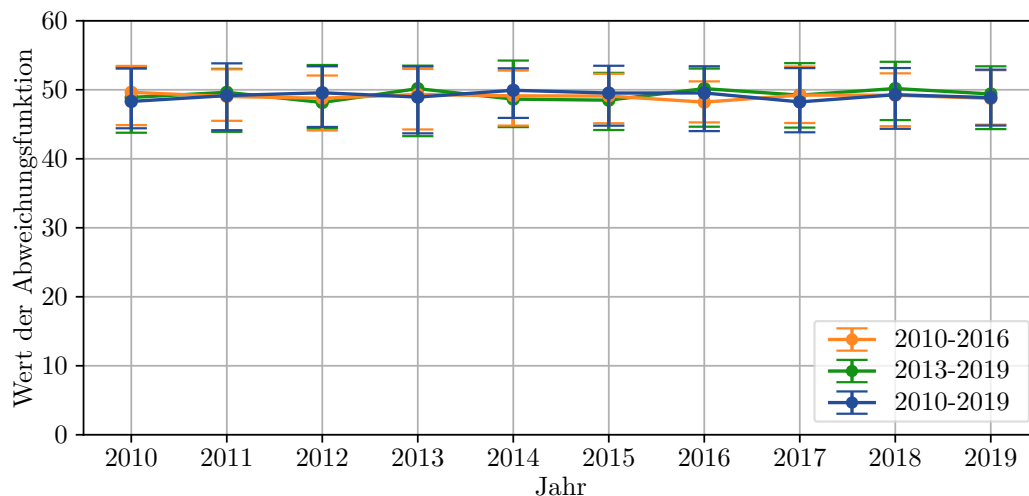


Abb. 4.12: Vergleich der Werte der Abweichungsfunktion Γ für unterschiedliche Kalibrierungszeiträume

Insgesamt zeigt der Vergleich der Kalibrierungen für die verschiedenen Zeiträume, dass erstens die Kalibrierungen mit verschiedenen Zeiträumen zu vergleichbaren Werten für die Kalibrierungsparameter führen (z. B. Vergleich der Kalibrierungen für 2010–2016 und 2013–2019; s. Tab. 4.13) und dass zweitens mit einer Kalibrierung auf einem Zeitraum auch gute Ergebnisse auf unbekannten Zeiträumen erzielt werden können (z. B. Kalibrierung 2010–2016 und Untersuchung 2017–2019, s. Abb. 4.12). Demnach ist die Kalibrierung hinsichtlich der Eingangsdaten robust und ermöglicht somit ausgehend von historischen Daten auch Aussagen über unbekannte Datensätze, z. B. für zukünftige Datensätze.

4.5 Berechnungsablauf mit dem Gesamtmodell

Um den Zusammenhang der bisherigen Modellbeschreibung, bestehend aus Datengrundlage (Abschnitt 4.1), Optimierungsproblem (Abschnitt 4.2), Submodellen (Abschnitt 4.3) und Kalibrierung (Abschnitt 4.4), zu verdeutlichen, wird im Folgenden der konkrete Ablauf einer Berechnung mit dem entwickelten Gesamtmodell

¹⁹Entspricht vereinfacht $\sigma^m = 0$ und betrifft ausschließlich das Submodell des Airline-Wettbewerbs (Unterabschnitt 4.3.8).

vorgestellt. Abbildung 4.13 zeigt eine grafische Zusammenfassung des Modellablaufs in der Form eines Aktivitätsdiagramms. Das Aktivitätsdiagramm orientiert sich am Darstellungsstandard der *Unified Modeling Language* (dt. vereinheitlichte Modellierungssprache; UML) (*Object Management Group*, 2005). Hierbei steht die wesentliche Funktionsweise des entwickelten Modells im Fokus. Einige Modellschritte, die nicht direkt Teil der vorgestellten Modelllogik sind, wie beispielsweise das Laden der Eingangsdaten oder das Visualisieren und Exportieren von Ergebnissen, sind daher nicht explizit dargestellt. Auch die wiederholte Durchführung von Modellberechnungen zur Quantifizierung des Einflusses der Zufallszahlen ist aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt. Durch die Referenzierung der in diesem Kapitel für die Modellbeschreibung eingeführten Gleichungen (Gl. (4.1)–(4.60)) wird ein direkter Bezug zur vorgestellten mathematischen Modellformulierung hergestellt. Nachfolgend werden die einzelnen Schritte der Berechnung – in Abb. 4.13 gekennzeichnet durch die Referenznummern 1 bis 25 – in knapper Form beschrieben:

1. Startknoten nach UML-Notation. Die Eingangsdaten des Modells, u. a. bezüglich Routennetzwerk, Flugzeugflotte, Flugleistung und Flughäfen (vgl. Abb. 4.1), sind an dieser Stelle bereits aufbereitet und geladen;
2. Überprüfung, ob als Teil der Modellberechnung eine Kalibrierung durchgeführt werden soll; wenn ja, weiter mit Schritt 3; wenn nein, weiter mit Schritt 6;
3. Den Kalibrierungsalgorithmus (genetischer Algorithmus oder Gradientenverfahren; Abschnitt 4.4) zur Minimierung der Abweichungsfunktion (Gl. 4.59) initialisieren und Startwerte für die Kalibrierungsparameter setzen;
4. Überprüfung, ob die Kalibrierung abgeschlossen ist, da die Abbruchbedingung des Kalibrierungsalgorithmus erfüllt ist; wenn ja, die Kalibrierung ist abgeschlossen, weiter mit Schritt 6; wenn nein, weiter mit Schritt 5;
5. Basierend auf dem Vorgehen des Kalibrierungsalgorithmus die nächste Menge an Werten der Kalibrierungsparameter bestimmen. Für den genetischen Algorithmus ist dies eine neue Population, welche durch Selektion, Kreuzung und Mutation aus den vorherigen Werten der Kalibrierungsparameter (Population) resultiert. Für das Gradientenverfahren sind dies die Stützstellen des nächsten Differenzenquotienten;
6. Überprüfung, ob für die gesamte Menge an Werten für die Kalibrierungsparameter Berechnungen durchgeführt wurden; wenn ja, die Berechnungen in dieser Iteration sind abgeschlossen, weiter mit Schritt 23; wenn nein, weiter mit Schritt 7;

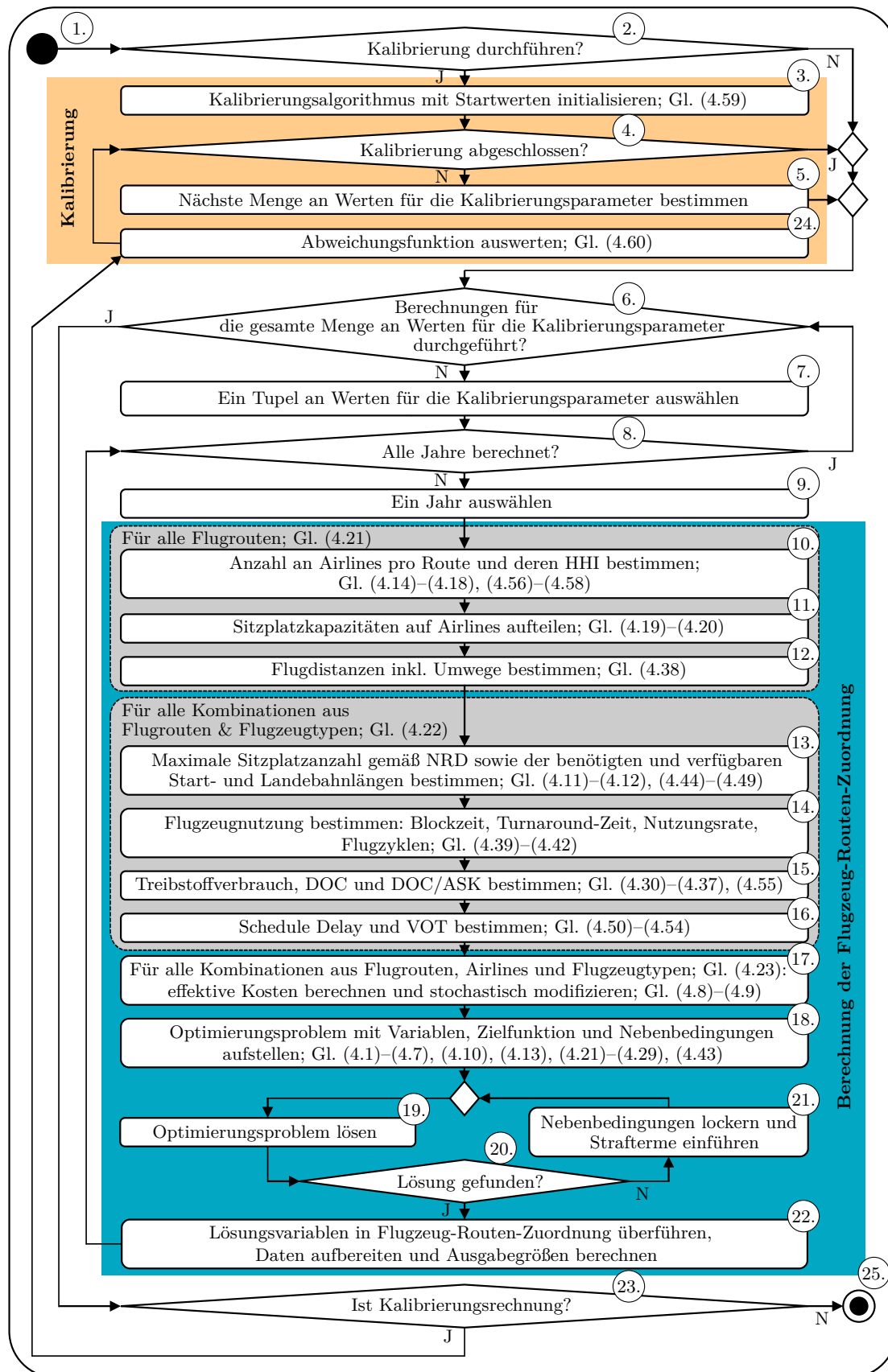


Abb. 4.13: Aktivitätsdiagramm des Modells der Flugzeug-Routen-Zuordnung

7. Aus der Menge der Werte für die Kalibrierungsparameter ein konkretes Tupel an Werten für die nachfolgende Berechnung auswählen. Im Falle einer Berechnung, welche nicht aktiv Teil einer Kalibrierung ist, entspricht dies z. B. den in Abschnitt 4.4 ermittelten Kalibrierungsparametern (Tab. 4.12);
8. Überprüfung, ob Berechnungen für alle Jahre des Untersuchungszeitraums durchgeführt wurden; wenn ja, zurück zu Schritt 6; wenn nein, weiter mit Schritt 9;
9. Aus dem Untersuchungszeitraum ein konkretes Untersuchungsjahr für die nachfolgende Berechnung auswählen;
10. Für die Menge aller Flugrouten OD (Gl. (4.21)) die Anzahl an Airlines pro Flugroute $c_{o,d}$ und die Marktkonzentration der Airlines auf der Flugroute $h_{o,d}$ ermitteln (Gl. (4.14)–(4.18), (4.56)–(4.58));
11. Für die Menge aller Flugrouten OD (Gl. (4.21)) die angebotene Sitzplatzkapazität pro Flugroute $s_{o,d}$ auf die im vorherigen Schritt ermittelte Anzahl an Airlines aufteilen (Gl. (4.19)–(4.20));
12. Für die Menge aller Flugrouten OD (Gl. (4.21)) die Flugdistanz einschließlich etwaiger Umwege durch die Flugführung bestimmen (Gl. (4.38));
13. Für die Menge aller Kombinationen $OD \times T$ aus Flugrouten OD und Flugzeugtypen T die maximale Sitzplatzanzahl $p_{o,d,t}$ gemäß der NRD und der benötigten Start- und Landebahnlängen der Flugzeugtypen sowie der verfügbaren Runway-Längen an den Start- und Zielflughäfen bestimmen (Gl. (4.11)–(4.12), (4.44)–(4.49));
14. Für die Menge der mit positiver Sitzplatzanzahl befliegbaren Kombinationen aus Flugrouten und Flugzeugtypen ODT (Gl. (4.22)) die Flugzeugnutzung bestimmen, d. h. Blockzeiten, Turnaround-Zeiten, Nutzungsraten und Flugzyklen (Gl. (4.39)–(4.42));
15. Für die Menge der mit positiver Sitzplatzanzahl befliegbaren Kombinationen aus Flugrouten und Flugzeugtypen ODT (Gl. (4.22)) die Treibstoffverbräuche, DOC und DOC pro ASK bestimmen (Gl. (4.30)–(4.37), (4.55));
16. Für die Menge der mit positiver Sitzplatzanzahl befliegbaren Kombinationen aus Flugrouten und Flugzeugtypen ODT (Gl. (4.22)) den finanziellen Gegenwert von Flugfrequenz (Schedule Delay) und Reisezeit (VOT) bestimmen (Gl. (4.50)–(4.54));
17. Für die Menge der mit positiver Sitzplatzanzahl befliegbaren Kombinationen aus Flugrouten, Airlines und Flugzeugtypen $ODCT$ (Gl. (4.23)) den Kostenwert als Summe aus DOC und den finanziellen Gegenwerten von Schedule

Delay und VOT berechnen, zusätzlich den Kostenwert stochastisch modifizieren (Gl. (4.8)–(4.9));

18. Das Optimierungsproblem der Flugzeug-Routen-Zuordnung aufstellen mit Variablen, Zielfunktion und Nebenbedingungen basierend auf den zuvor berechneten Größen (Gl. (4.1)–(4.7), (4.10), (4.13), (4.21)–(4.29), (4.43));
19. Das aufgestellte Optimierungsproblem lösen;
20. Überprüfung, ob eine Lösung des Optimierungsproblems gefunden wurde; wenn ja, weiter mit Schritt 22; wenn nein, weiter zu Schritt 21;
21. Einige Nebenbedingungen unter der Einführung von Straftermen lockern, um die Lösbarkeit des Optimierungsproblems zu verbessern (Abschnitt 4.2.2);
22. Die Lösung des Optimierungsproblems in eine auswertbare Flugzeug-Routen-Zuordnung überführen, Ergebnisdaten aufbereiten und Ausgabegrößen berechnen;
23. Überprüfung, ob eine Kalibrierungsrechnung vorliegt; wenn ja, weiter mit Schritt 24; wenn nein, weiter mit Schritt 25;
24. Basierend auf den Ergebnissen der Flugzeug-Routen-Zuordnungen für die Menge an Werten für die untersuchten Kalibrierungsparameter die Abweichungsfunktion der Kalibrierung auswerten (Gl. (4.60));
25. Endknoten nach UML-Notation. Die Ausgabegrößen umfassen die Flugzeug-Routen-Zuordnung im globalen LTS für alle Jahre des Untersuchungszeitraums sowie, falls eine Kalibrierung durchgeführt wurde, die ermittelten Kalibrierungsparameter.

Insgesamt existieren im dargestellten Berechnungsablauf des Gesamtmodells vier Schleifen, die zu einem wiederholten Ausführen von Berechnungsschritten führen können: (i) eine Schleife für das iterative Vorgehen des genetischen Algorithmus bzw. des Gradientenverfahrens in der Kalibrierung (Schritt 4); (ii) eine Schleife über die unterschiedlichen Tupel von Kalibrierungsparametern, welche aus der Population des genetischen Algorithmus bzw. aus dem Differenzenquotienten des Gradientenverfahrens folgen (Schritt 6); (iii) eine Schleife über die unterschiedlichen Jahre des Untersuchungszeitraums (Schritt 8); und (iv) eine Schleife für mögliche alternative Lösungsversuche des Optimierungsproblems (Schritt 20).

4.6 Verifizierung und Validierung

Bei der Verifizierung und Validierung des entwickelten Modells der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung wird überprüft, ob das Modell inhaltlich korrekt ist

(Verifizierung: Richtigkeit) und ob es den Anforderungen der Anwendungsfälle entspricht (Validierung: Gültigkeit) (*Kleijnen*, 1995). Die Verifizierung ist hierbei auf die im Gesamtmodell verwendeten Submodelle fokussiert (Unterabschnitt 4.6.1), da eine Verifizierung des Gesamtmodells aufgrund der Komplexität und der verwendeten Zufallszahlen nur bedingt möglich ist. Für die Validierung werden die in Abschnitt 3.1 erarbeiteten Modellanforderungen mit den Eigenschaften des Gesamtmodells verglichen (Unterabschnitt 4.6.4). Angesichts der besonderen Bedeutung der Eigenschaften *Modellgüte* und *Modelldynamik* erfolgt die diesbezügliche Validierung in eigenen Unterabschnitten (Unterabschnitte 4.6.2 und 4.6.3).

4.6.1 Verifizierung der Submodelle

Die Verifizierung der Submodelle erfolgt anhand des Vergleichs von Ergebnissen aus den Submodellen mit Referenzdaten aus anderen Datenquellen. Die für diesen Vergleich verwendeten Metriken verfolgen das Ziel, nachzuweisen, dass die Submodelle inhaltlich korrekt formuliert und implementiert sind, indem einerseits möglichst unmittelbar die Ergebnisse der Submodelle widergespiegelt werden (d. h. ohne Einflüsse des Gesamtmodells oder anderer Submodelle) und andererseits ein möglichst breiter Einsatzbereich der Submodelle eingefangen wird.

Tabelle 4.14 fasst die für die Verifizierung der Submodelle verwendeten Metriken sowie die entsprechenden Modellergebnisse und Referenzdaten zusammen; wobei für die Modellergebnisse beispielhaft die Kalibrierung für den Zeitraum 2010–2016 und das Untersuchungsjahr 2016 verwendet werden. Es ist zu erkennen, dass die Ergebnisse der Submodelle sehr gut mit den verschiedenen Referenzdaten übereinstimmen. Dies umfasst u. a. die gemittelten Betriebskosten $\overline{DOC/ASK}$, den gemittelten Treibstoffverbrauch $\overline{m_{fuel}/ASK}$, die gemittelte verfügbare Sitzplatzanzahl auf kurzen, mittleren und langen Distanzen $\overline{p_{@Xkm}}$, die insgesamt genutzte Anzahl an Flugzeugeinheiten $\sum u$, die beispielhaft für den Flughafen Frankfurt am Main (FRA) untersuchte Flughafenkapazität f_{FRA} , die gemittelte Anzahl an operierenden Airlines auf einer Route $\overline{c_{o,d}}$ sowie deren Marktkonzentration $\overline{h_{o,d}^{airl}}$. Der Vergleich der modellierten benötigten Start- und Landebahnlängen am Flughafen Frankfurt am Main (FRA) mit der dort verfügbaren maximalen Runway-Länge zeigt, dass die vom Modell berechneten Start- und Landebahnlängen in der korrekten Größenordnung liegen und einen zusätzlichen Sicherheitspuffer aufweisen, z. B. für ungünstige Witterungsbedingungen oder für höhere (Fracht-)Nutzlasten. Für das Submodell *Umsatzpotential und Passagierattraktivität* erfolgt keine dedizierte Verifizierung, da das Submodell ausschließlich (Kalibrierungs-)Faktoren umfasst, welche die Kosten in der Zielfunktion des Optimierungsproblems der Flugzeug-Routen-Zuordnung anpassen. Die Werte dieser Faktoren können Unterabschnitt 4.3.7 sowie Tab. 4.13 in Abschnitt 4.4 entnommen werden.

Insgesamt unterstreichen die vorgestellten Ergebnisse, dass von einer inhaltlich korrekten Formulierung und Implementierung der Submodelle auszugehen ist.

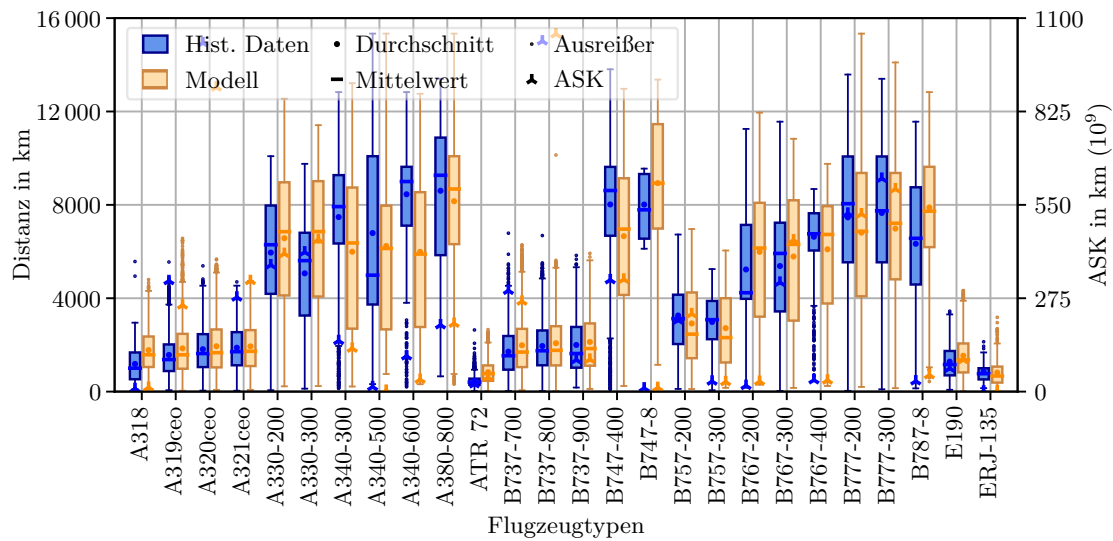
Tab. 4.14: Verifizierung der Submodelle anhand eines Vergleichs mit Referenzdaten

Submodell	Metrik	Modell	Referenz	Anmerkungen zur Referenz
Betriebskosten (Unterabschnitt 4.3.1)	$\overline{DOC/ASK}$	6,67 €/100km	6,84 €/100km	aus <i>Deutsche Lufthansa AG</i> (2016); DOC für Passagierverkehr der Lufthansa Gruppe in 2016
Treibstoffverbrauch (Unterabschnitt 4.3.2)	$\overline{m_{fuel}/ASK}$	2,86 kg/100km	2,70 kg/100km	aus <i>European Union Aviation Safety Agency</i> (2019); Mittelwert für Flüge mit Start in der europäischen Union und der europäischen Freihandelsassoziation im Jahr 2017
Nutzlast-Reichweiten- Beziehung (Unterabschnitt 4.3.3)	$\overline{p_{@1500km}}$ $\overline{p_{@4000km}}$ $\overline{p_{@10000km}}$	233 245 306	233 252 299	jeweils berechnet aus Routennetzwerk-, Flugzeugflotten- und Flugleistungsdaten gemäß Abschnitt 4.1
Flugzeugnutzung (Unterabschnitt 4.3.4)	$\sum u$	16 511	17 297	
Flughafenkapazität (Unterabschnitt 4.3.5)	f_{FRA}	1048 1/d	1027 1/d	
Runway-Länge (Unterabschnitt 4.3.6)	$tofl_{max,FRA}^{req}$ $lfl_{max,FRA}^{req}$	2678 m 2195 m	4000 m 4000 m	maximale Runway-Länge aus <i>Deutsche Flugsicherung</i> (2017)
Umsatzpotential und Passagierattraktivität (Unterabschnitt 4.3.7)	—	—	—	—
Airline-Wettbewerb (Unterabschnitt 4.3.8)	$\overline{c_{o,d}}$ $\overline{h_{o,d}^{airl}}$	2,51 0,629	2,47 0,639	jeweils berechnet aus Routennetzwerkdaten gemäß Abschnitt 4.1

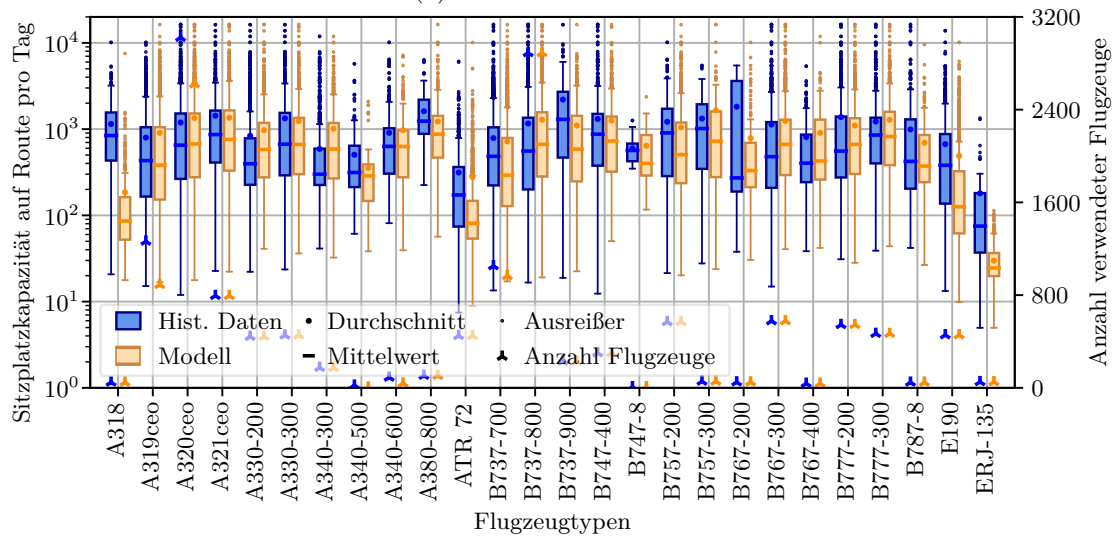
4.6.2 Validierung der Modellgüte

Die Validierung der Güte des entwickelten Modells der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung stellt sicher, dass die in Unterabschnitt 3.1.2 aufgestellten Anforderungen und die Abbildungsqualität erfüllt werden. Hierzu erfolgt ein Vergleich zwischen Flugzeug-Routen-Zuordnungen aus historischen Flugplänen und dem entwickelten Gesamtmodell für die Jahre 2010–2019. Für die nachfolgenden Abbildungen 4.14 bis 4.17 wird für das Gesamtmodell jeweils der Kalibrierungszeitraum 2010–2016 verwendet. Für die Kalibrierungszeiträume 2013–2019 und 2010–2019 sind vergleichbare Abbildungen in Anhang B.1 gegeben.

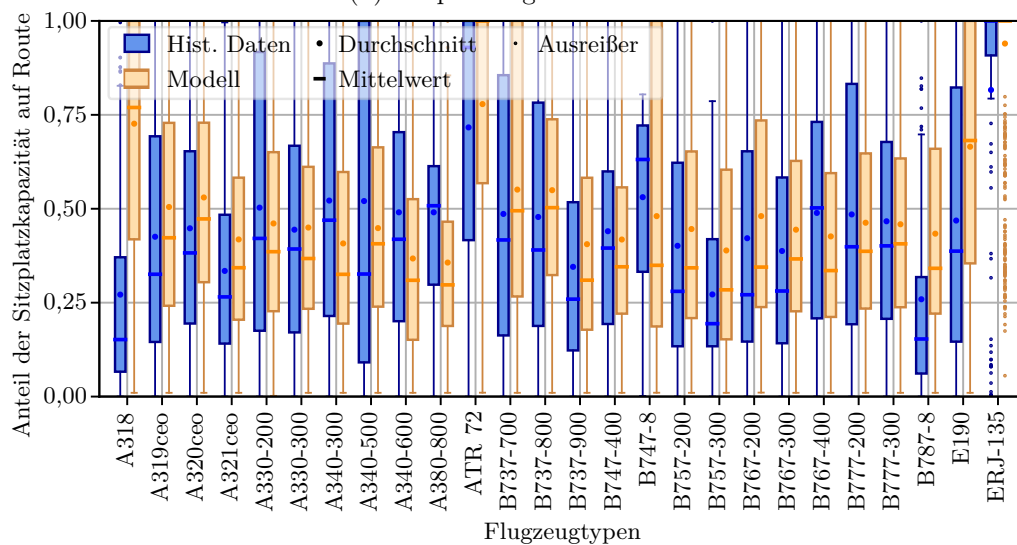
In Abb. 4.14 werden die Flugzeug-Routen-Zuordnungen für die verschiedenen Flugzeugtypen im Jahr 2013 als Boxplots visualisiert. Hierbei zeigt Abb. 4.14a die Verteilung der Einsatzdistanzen (aufgetragen auf der linken Ordinate) sowie die ASK je Flugzeugtyp als dreizackige Sterne (aufgetragen auf der rechten Ordinate). Es ist zu erkennen, dass sowohl für die Einsatzdistanzen als auch für die ASK je Flugzeugtyp insgesamt eine gute Übereinstimmung zwischen historischen Daten (blau) und Modellergebnissen (orange) vorliegt. Insbesondere für Kurzstreckenflugzeugtypen wie die der Airbus A320- oder Boeing 737-Familie weisen die Modellergebnisse nur geringfügige Abweichungen zu den historischen Daten auf. Die verbleibenden Abweichungen in den Einsatzdistanzen treten vermehrt bei Flugzeugtypen auf, welche wenige ASK abdecken (z. B. A318 und B747-8). Dies resultiert aus zweierlei Effekten. Erstens werden bei den Regressionen in der Modellentwicklung sowie bei der Optimierung in der Modellkalibrierung Gewichtungen nach ASK vorgenommen, sodass die Reduzierung von Abweichungen von ASK-starken Flugzeugtypen im Sinne der Gesamtmodellgüte verstärkt berücksichtigt wird. Zweitens wird die globale Flugzeug-Routen-Zuordnung von Flugzeugtypen, welche wenige ASK abdecken, stärker durch einzelne Airlines und Flugrouten beeinflusst. Diese Einflüsse sind für das hier untersuchte airlineübergreifende Modell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung nicht zu erfassen und können infolgedessen zu Abweichungen führen. Die in Abb. 4.14a für einige wenige Flugzeugtypen zu erkennenden Unterschiede in den ASK resultieren aus Imperfektionen des Modells der Flugzeugnutzung (Unterabschnitt 4.3.4). Einerseits überschätzt das Modell der Flugzeugnutzung geringfügig die jährliche Transportleistung, sodass nicht alle Flugzeugeinheiten der globalen Flugzeugflotte benötigt werden, um das globale Routennetzwerk zu befiegen (z. B. verbleiben ungenutzte A319ceo-Einheiten, s. rechte Ordinate von Abb. 4.14b). Andererseits führen Unterschiede in der Einsatzdistanz bei gleicher Anzahl der verwendeten Flugzeugeinheiten zu unterschiedlichen ASK, da die Nutzungsrate der Flugzeuge mit zunehmender Flugdistanz bzw. Blockzeit steigt (Unterabschnitt 4.3.4).



(a) Distanzen der Routen



(b) Sitzplatzangebot auf den Routen



(c) Sitzplatzangebotsanteil auf den Routen

Abb. 4.14: Charakteristika der Routen, auf denen die Flugzeugtypen im Jahr 2013 eingesetzt werden, für den Kalibrierungszeitraum 2010–2016

Abbildung 4.14b stellt für das Jahr 2013 dar, wie groß die insgesamt angebotene Sitzplatzkapazität auf den Routen ist, auf denen die verschiedenen Flugzeugtypen eingesetzt werden (Boxplots, linke Ordinate, logarithmisch), und wie viele Einheiten der Flugzeugtypen eingesetzt werden (dreizackige Sterne, rechte Ordinate). Es ist zu erkennen, dass die meisten Flugzeugtypen auf Routen eingesetzt werden, welche sich hinsichtlich der angebotenen Sitzplatzkapazität pro Tag um zwei bis drei Größenordnungen unterscheiden. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Flugzeugtypen sind dagegen weit weniger stark ausgeprägt als bei den Verteilungen der Einsatzdistanzen aus Abb. 4.14a. So sind beispielsweise die angebotenen Sitzplatzkapazitäten auf den Routen, auf denen die Flugzeugtypen A321ceo und B777-300 eingesetzt werden, gemäß Abb. 4.14b sehr ähnlich, obwohl die beiden Flugzeugtypen z. B. hinsichtlich ihrer Sitzplatzanzahl und Reichweite sehr unterschiedlich sind (maximal 240 bzw. 550 Sitzplätze und ca. 4400 km bzw. 14 500 km Reichweite). Insgesamt erreichen die Modellergebnisse eine gute Übereinstimmung mit den historischen Daten. Sowohl in den historischen Daten als auch in den Modellergebnissen werden die größeren Varianten einer Flugzeugfamilie tendenziell auf Routen mit einer höheren angebotenen Sitzplatzkapazität eingesetzt (z. B. Airbus A320- und Boeing 777-Familie). Für besonders kleine Flugzeugtypen (A318, ATR 72, E190 und ERJ-135) ist dieser Trend in den Modellergebnissen zu stark ausgeprägt, sodass deutlichere Abweichungen zu den historischen Daten auftreten. Die Werte der verwendeten Flugzeugeinheiten auf der rechten Ordinate zeigen, dass, wie bereits im vorherigen Absatz beschrieben, für die Modellergebnisse von einigen Flugzeugtypen eine geringere Anzahl an Flugzeugeinheiten benötigt wird.

In Abb. 4.14c ist aufgetragen, zu welchen Anteilen im Jahr 2013 die angebotene Sitzplatzkapazität auf den Flugrouten durch die verschiedenen Flugzeugtypen bereitgestellt wird. Es ist zu erkennen, dass sowohl in den historischen Daten als auch in den Modellergebnissen für fast alle Flugzeugtypen Routen existieren, auf denen diese die gesamte Sitzplatzkapazität abdecken (Wert von 1) oder nur im geringfügigsten Maße (Wert nahe 0) eingesetzt werden. Für die meisten Flugzeugtypen liegen die Mittelwerte der dargestellten Anteile der Sitzplatzkapazität auf einer Route im Bereich von 0,25 bis 0,5. Dies bedeutet, dass auf den meisten Routen mehr als ein Flugzeugtyp eingesetzt wird. Insgesamt lassen die historischen Daten und die Modellergebnisse hierbei, trotz der verbleibenden Abweichungen, dieselben Schlussfolgerungen zu. Dass die beiden Flugzeugtypen ATR 72 und ERJ-135 in den historischen Daten wie auch den Modellergebnissen vermehrt als einziger Flugzeugtyp auf Routen eingesetzt werden, resultiert zum einen daraus, dass diese Flugzeugtypen mit ihrer geringen Sitzplatzanzahl vermehrt auf nachfrageschwachen Routen, die nur von einem Flugzeugtyp bedient werden, eingesetzt werden (Abb. 4.14b), und zum anderen sind in dem betrachteten Datensatz (Abschnitt 4.1) wenige vergleichbare Flugzeugtypen enthalten, sodass etwaige Flüge

nicht-enthaltener, vergleichbarer Flugzeugtypen auf denselben Routen nicht berücksichtigt werden können und das erfasste und dargestellte Einsatzmuster künstlich beeinflusst wird.

Abbildung 4.15 visualisiert die Flugzeug-Routen-Zuordnungen basierend auf einer Kategorisierung der Routen hinsichtlich der Distanzen und der angebotenen Sitzplatzkapazitäten beispielhaft für das Jahr 2013. Aufgetragen sind jeweils die durchschnittliche Sitzplatzanzahl pro Flug (Abb. 4.15a und 4.15b), die durchschnittliche Marktkonzentration der eingesetzten Flugzeugtypen nach HHI (Abb. 4.15c und 4.15d) sowie die durchschnittliche Anzahl an verschiedenen Flugzeugtypen pro Route (Abb. 4.15e und 4.15f). Zusätzlich wird für jede Routenkategorie auf der oberen Abszisse der Anteil an den gesamten ASK sowie der gesamten Anzahl an Flugbewegungen (Abflügen) visualisiert, um die Wichtigkeit der verschiedenen Routenkategorien aufzuzeigen. Es ist zu erkennen, dass die Modellergebnisse (orange) insgesamt sehr gut die historischen Daten (blau) widerspiegeln; wobei die distanz- und kapazitätsabhängigen Sitze pro Flug sowie die kapazitätsabhängige Anzahl an Flugzeugtypen auf einer Route besonders genau erfasst werden.

Die Anzahl der Sitze pro Flug nimmt mit zunehmender Distanz der Flugroute von ca. 150 Sitzen auf Routen bis 400 km auf ca. 330 Sitze auf Routen mit mehr als 9500 km zu (Abb. 4.15a). Hinsichtlich der insgesamt auf der Route angebotenen Sitzplatzkapazität nehmen die Sitze pro Flug bis hin zu einer angebotenen Kapazität von ca. 480 Sitzen pro Tag zu und verbleiben bei weiterem Kapazitätsanstieg bei ca. 240 Sitzen pro Flug. Die durchschnittliche Marktkonzentration der Flugzeugtypen auf einer Route nach HHI beträgt gemäß den historischen Flugplandaten auf Routen bis 400 km ca. 0,6; auf Routen zwischen 900 km und 4800 km ca. 0,5 und auf Routen mit mehr als 9500 km ca. 0,7. Die Modellergebnisse weichen geringfügig ab und weisen eine nahezu distanzunabhängige durchschnittliche Marktkonzentration der Flugzeugtypen von 0,5 auf. Wird, wie in Abb. 4.15d, die durchschnittliche Marktkonzentration der Flugzeugtypen auf einer Route nach HHI gegenüber den Kapazitätskategorien aufgetragen, ergibt sich für die historischen Daten und die Modellergebnisse ein mit zunehmender Sitzplatzkapazität auf einer Route abnehmender Verlauf des HHI von ca. 0,9 auf Routen bis 60 angebotenen Sitzplätzen pro Tag bis hin zu ca. 0,3 auf Routen mit mehr als 3840 angebotenen Sitzplätzen pro Tag. Hierbei unterschätzt das Modell den HHI der Flugzeugtypen, insbesondere auf Routen mit 120 bis 1920 angebotenen Sitzplätzen pro Tag, um bis zu ca. 0,15. Die Anzahl der durchschnittlich auf den einzelnen Flugrouten eingesetzten Flugzeugtypen beträgt in den historischen Daten auf der Kurz- und Mittelstrecke bis zu 4,8 und auf der Langstrecke ca. 2,4 (Abb. 4.15e). Für die Modellergebnisse liegen die entsprechenden Werte ca. im Bereich von 3,0 bis 4,0. Folglich wird die Anzahl der unterschiedlichen Flugzeugtypen auf der Kurz- und Mittelstrecke unterschätzt und auf der Langstrecke überschätzt. Für die Routenkategorien mit unterschiedlicher angebotener Sitzplatzkapazität stimmen die historischen Daten und die Modellergebnisse hinsichtlich der Anzahl der durchschnittlich

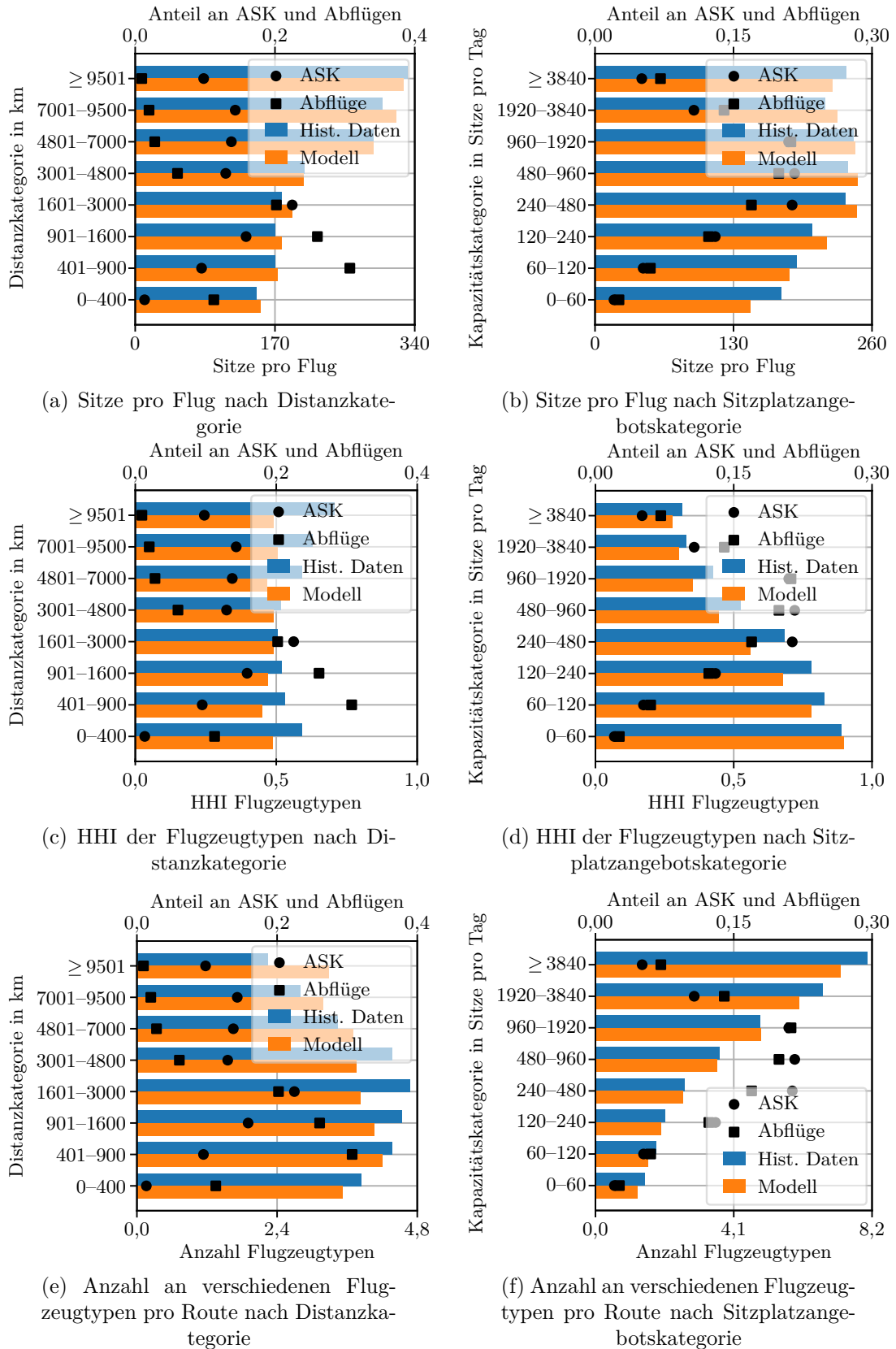


Abb. 4.15: Validierungsergebnisse nach Routenkategorien für das Jahr 2013 und den Kalibrierungszeitraum 2010–2016; durchschnittliche Werte je Kategorie; Anteile der Kategorien an Flugbewegungen und ASK auf oberer Abszisse

eingesetzten Flugzeugtypen auf einer Flugroute sehr gut überein. Von etwa einem Flugzeugtyp auf Routen mit bis zu 60 angebotenen Sitzplätzen pro Tag bis hin zu etwa acht eingesetzten Flugzeugtypen auf Routen mit mehr als 3840 angebotenen Sitzplätzen pro Tag liegen nur minimale Abweichungen zwischen historischen Daten und Modellergebnissen vor.

Abbildung 4.16 fasst die in Abb. 4.14 und Abb. 4.15 beispielhaft für das Jahr 2013 gezeigten Validierungsergebnisse für den gesamten Zeitraum 2010–2019 zusammen. Um die Abweichungen in den Flugzeug-Routen-Zuordnungen zwischen historischen Flugplänen und Modellergebnissen zu quantifizieren, werden für die flugzeugtypspezifischen Ergebnisse aus Abb. 4.14 die NWM und für die routenkategorie-spezifischen Ergebnisse aus Abb. 4.15 der normalisierte mittlere absolute Fehler (engl. Normalized Mean Absolute Error; NMAE) verwendet.²⁰ Dargestellt sind jeweils die Mittelwerte sowie die minimalen und maximalen Werte (Fehlerbalken) aus 20 Rechnungen, um den Einfluss der für die Modellierung genutzten Zufallszahlen abzubilden. Die Ergebnisse der Flugzeugtypen (Abb. 4.16a) zeigen, dass die Abweichungen der Routendistanzen über den gesamten betrachteten Zeitraum im Bereich von 12 % bis 13 % liegen und um ± 1 % zwischen den verschiedenen Berechnungsdurchläufe variieren. Die Ergebnisse hinsichtlich der Sitzplatzkapazität pro Route und des Anteils der Sitzplatzkapazität pro Route zeigen größere Abweichungen und liegen im Bereich von 18 % bis 23 % bzw. 12 % bis 33 %. Während der Einfluss der Zufallszahlen auch hier größtenteils gering ist, sind die Ergebnisse für den Anteil der Sitzplatzkapazität pro Route zeitlich volatil und weisen für die Jahre 2012, 2015 und 2016 um bis zu 10 % größere Abweichungen als in den anderen Jahren auf. Die Ursache hierfür liegt in nicht näher erklärbar Änderungen in den historischen Daten, welche für die Jahre 2012, 2015 und 2016 für nahezu alle betrachteten Flugzeugtypen kleinere Anteile der angebotenen Sitzplatzkapazitäten pro Route aufweisen.

Die aggregierten Ergebnisse der Routenkategorien (Abb. 4.16b) zeigen, dass die höchste Modellgenauigkeit mit Abweichungen < 5 % für die Abbildung der Sitze pro Flug vorliegt. Die Abweichungen in der Anzahl der durchschnittlich auf einer Flugroute eingesetzten Flugzeugtypen je Distanz- und Kapazitätskategorie liegen für die Jahre 2010 bis 2015 im Bereich von 12 % bis 15 % bzw. von 3 % bis 5 %. Bis zum Jahr 2019 wachsen die Abweichungen dann auf bis zu 21 % und 14 % an. Dies wird darin begründet, dass von den 37 im Modell betrachteten Flugzeugtypen 10 ab 2016 eingeführt werden. Folglich wird die Schwierigkeit, die korrekte Anzahl an Flugzeugtypen abzubilden, ab 2016 zunehmend größer. Die Abweichungen bei der Abbildung des HHI der Flugzeugtypen werden hiervon nicht beeinträchtigt und liegen zeitlich nahezu konstant im Bereich von 12 % bis 15 %.

²⁰Die Normalisierung erfolgt je Flugzeugtyp bzw. je Routenkategorie anhand des (durchschnittlichen) Werts der historischen Flugpläne. Um die Werte der verschiedenen Flugzeugtypen (NWM) und Kategorien (NMAE) zu aggregieren, werden diese ASK-gewichtet gemittelt.

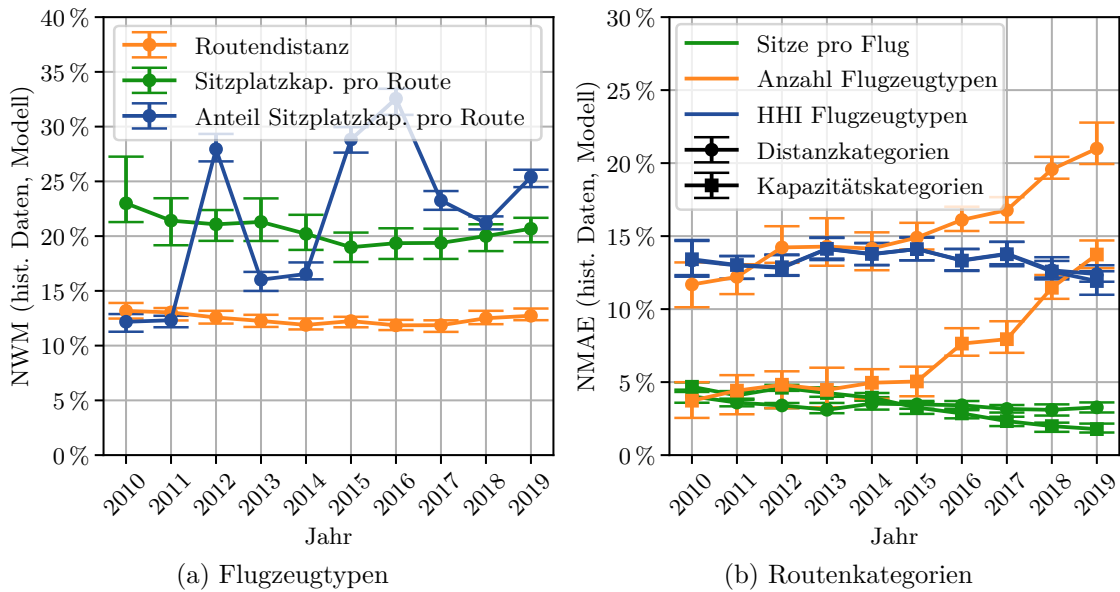


Abb. 4.16: Aggregierte Validierungsergebnisse nach Routenkategorien und Flugzeugtypen für den Kalibrierungszeitraum 2010–2016

Insgesamt unterstreicht Abb. 4.16, insbesondere auch im Vergleich mit den entsprechenden Abb. B.1 und Abb. B.5 in Anhang B.1 für die Kalibrierungszeiträume 2013–2019 und 2010–2019, dass die Wahl des Kalibrierungszeitraums keinen nennenswerten Einfluss auf die Modellgenauigkeit hat. Sowohl die Mittelwerte als auch die Streuung sowie der zeitliche Verlauf der verbleibenden Modellabweichungen sind für alle drei betrachteten Kalibrierungszeiträume, wie es auch Abb. 4.12 in Abschnitt 4.4 zusammenfasst, sehr vergleichbar. Auch die beiden beschriebenen Auffälligkeiten – die Volatilität der Abweichungen im Anteil der Sitzplatzkapazität in Abb. 4.16a sowie der Anstieg der Abweichungen in der Anzahl der Flugzeugtypen ab 2016 in Abb. 4.16b – treten auch für die Kalibrierungszeiträume 2013–2019 und 2010–2019 auf, was die gegebenen Erklärungen zusätzlich unterstützt.

Abbildung 4.17 fasst die Validierungsergebnisse hinsichtlich der Flughäfen zusammen. In Abb. 4.17a sind für das Jahr 2013 die 12 Flughäfen mit der höchsten Auslastung der modellierten Flughafenkapazität dargestellt. Für jeden Flughafen sind die historischen Flugbewegungen (blau), die Flugbewegungen in der Flugzeug-Routen-Zuordnung des Gesamtmodells (orange) sowie die modellierte Flughafenkapazität des Flughafenkapazitätsmodells (FKM, rot, Abschnitt 4.3.5) aufgezeigt. Zum einen ist zu erkennen, dass im Gesamtmodell nur an 9 Flughäfen die Anzahl an Flugbewegungen in der Flugzeug-Routen-Zuordnung durch die Flughafenkapazität begrenzt ist. Zum anderen wird deutlich, dass die Modellergebnisse insgesamt hinsichtlich der Anzahl der Flugbewegungen gut mit den historischen Daten übereinstimmen. Für einzelne Flughäfen sind dennoch deutliche Abweichungen zu erkennen. An den Flughäfen Peking-Hauptstadt (PEK) und London Heathrow (LHR) ist das Flughafenkapazitätsmodell zu einschränkend, so dass die Anzahl der Flugbewegungen im Gesamtmodell unterschätzt wird. An den

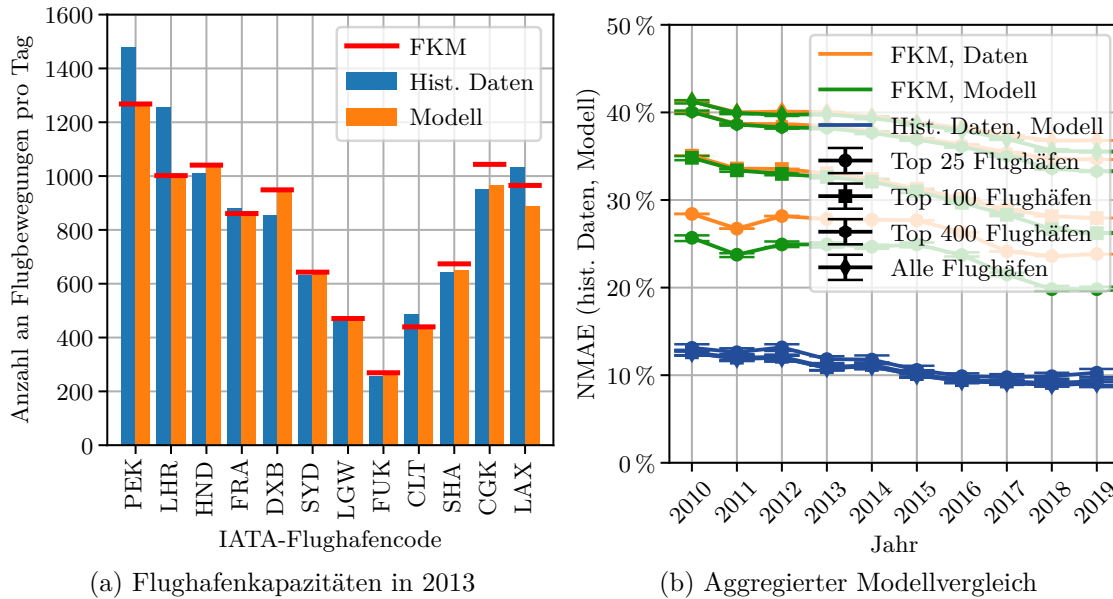


Abb. 4.17: Aggregierte Validierungsergebnisse nach Flughäfen für den Kalibrierungszeitraum 2010–2016

Flughäfen Dubai International (DXB) und Los Angeles International (LAX) wird die Anzahl der Flugbewegungen aufgrund von im Modell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung unberücksichtigten lokalen bzw. regionalen Besonderheiten nicht korrekt erfasst. Als Hub-Flughafen des größten Betreibers des Flugzeugtyps Airbus A380, *Emirates*, treten am Flughafen DXB vermehrt Flugbewegungen mit der A380, dem größten Passagierflugzeug der Welt, auf (*Sabre*, 2022; *Kühlen et al.*, 2022). Konkret starten oder landen 38 % der globalen Flugbewegungen des Flugzeugtyps Airbus A380 im betrachteten Jahr 2013 am Flughafen DXB (*Sabre*, 2022). Da das airlineübergreifende Gesamtmodell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung keinen Anlass hat, eine solche Konzentration der Flugbewegungen eines Flugzeugtyps an einem Flughafen anzunehmen, werden durchschnittlich kleinere Flugzeugtypen am Flughafen DXB eingesetzt, sodass folglich die Anzahl an Flugbewegungen am Flughafen DXB überschätzt wird. Umgekehrt zeichnet sich der nordamerikanische Markt durch den vermehrten Einsatz kleiner Flugzeugtypen sowie dünner Kabinenbestuhlungen aus (*Sabre*, 2022; *Presto*, 2023), sodass im Vergleich zum globalen Durchschnitt eine kleinere durchschnittliche Sitzplatzanzahl am Flughafen LAX auftritt und die Anzahl der Flugbewegungen vom Gesamtmodell folglich unterschätzt wird.

Abbildung 4.17b quantifiziert die in Abb. 4.17a beispielhaft für 12 Flughäfen im Jahr 2013 dargestellten Abweichungen aggregiert und für den gesamten Zeitraum 2010–2019. Dargestellt sind die Abweichungen zwischen den historischen Daten und den Modellergebnissen (blau), zwischen den historischen Daten und den modellierten Flughafenkapazitäten (grün) sowie zwischen den Modellergebnissen und den modellierten Flughafenkapazitäten (orange). Zusätzlich erfolgt eine Klassifizierung der Flughäfen nach den ASK sowie die Darstellung von Fehlerbalken,

welche die Variation der Ergebnisse durch den Einfluss von Zufallszahlen zusammenfassen. Es ist erkennbar, dass die Abweichungen zwischen den historischen Daten und den Modellergebnissen im Bereich von 9 % bis 13 % liegen und dass weder ein nennenswerter Einfluss der Zufallszahlen noch der Flughafenklassifizierung nach ASK besteht. Zwischen dem Submodell der Flughafenkapazitäten und den historischen Daten nehmen die Abweichungen mit abnehmenden ASK an den Flughäfen zu. Dies liegt zum einen daran, dass bei der Kalibrierung des Gesamtmodells den ASK-starken Flughäfen mehr Gewicht zufällt, und zum anderen operieren ASK-schwache Flughäfen im realen LTS nur selten an ihren Kapazitätsgrenzen (Gelhausen *et al.*, 2020), sodass eine Abweichung zwischen historischen Flugbewegungen und modellierter Flughafenkapazität für solche Flughäfen folgerichtig ist. Die Abweichungen zwischen dem Submodell der Flughafenkapazitäten und den Flugbewegungen des Gesamtmodells verhalten sich insgesamt ähnlich. Für die 25 ASK-starken Flughäfen sind allerdings geringe Abweichungen festzustellen. Dies zeigt, dass für solche Flughäfen die Flugbewegungen des Gesamtmodells besonders nah an den begrenzenden Flughafenkapazitäten liegen. Hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs zeigt Abb. 4.17b, dass die dargestellten Abweichungen auch über den Kalibrierungszeitraum 2010–2016 hinaus geringfügig zurückgehen. Dies stimmt mit den Ergebnissen der anderen Kalibrierungszeiträume überein (s. Abb. B.2b und Abb. B.6a) und unterstreicht, dass das Gesamtmodell nicht überangepasst an die Kalibrierungsdaten ist.

Insgesamt unterstreichen die präsentierten Validierungsergebnisse, dass die Abbildungsqualität des entwickelten Modells der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung die in Unterabschnitt 3.1.2 definierten Anforderungen erfüllt.

4.6.3 Validierung der Modelldynamik

Die Validierung der Modelldynamik stellt sicher, dass das Gesamtmodell in geeigneter Art und Weise auf Veränderungen in den Eingangsdaten reagiert. Um dies für das Modell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung nachzuweisen, werden, ausgehend von einem Referenzszenario, Szenarien mit alternativen Eingangsdaten untersucht und deren Ergebnisse mit den Ergebnissen des Referenzszenarios verglichen. Konkret werden in den verschiedenen Szenarien (a) das Sitzplatzangebot, (b) die Flugzeugflotte, (c) die Betriebskosten, (d) die Flughafenkapazitäten und (e) die verfügbare Runway-Länge variiert und die jeweiligen Auswirkungen auf die Flugzeug-Routen-Zuordnung analysiert. Um den Einfluss der für die Modellierung der Flugzeug-Routen-Zuordnung verwendeten Zufallszahlen zu minimieren, erfolgt der Vergleich von Referenz- und Eingangsdatenszenarien anhand der Mittelwerte über jeweils 100 Wiederholungen.

Tabelle 4.15 fasst die Ergebnisse der Validierung der Modelldynamik zusammen; wobei analog zur Verifizierung der Submodelle (Unterabschnitt 4.6.1) beispielhaft die Kalibrierung für den Zeitraum 2010–2016 und das Untersuchungsjahr 2016

verwendet wird. Für jedes Szenario sind die konkrete Veränderung der Eingangsdaten, die ausgewählte Auswertungsmetrik sowie die zugehörigen Ergebnisse angegeben. Es ist zu erkennen, dass, wenn die angebotene Sitzplatzkapazität pro Route reduziert wird, bei der Flugzeug-Routen-Zuordnung zusätzliche Flugzeuge ungenutzt bleiben. Die Reaktion des Modells auf zusätzliche Flugzeugeinheiten hängt von den Eigenschaften der hinzugefügten Flugzeuge ab. Das Hinzufügen neuer, effizienter Flugzeugeinheiten (z. B. A320neo, A350-900) führt dazu, dass zusätzliche Einheiten älterer Flugzeugtypen nicht mehr genutzt werden. Im Gegensatz dazu bleiben zusätzliche Flugzeugeinheiten von älteren, weniger effizienten Flugzeugtypen (z. B. A319ceo, A340-600) bei der Flugzeug-Routen-Zuordnung unberücksichtigt. Wird die Zusammensetzung der Betriebskosten variiert, führt dies zu einem angepassten Einsatz der einzelnen Flugzeugtypen. So resultiert beispielsweise aus einer Veränderung des Treibstoffpreises, dass treibstoffeffiziente Flugzeugtypen (z. B. A321ceo, B787-9) im Mittel auf längeren Flugrouten eingesetzt werden als weniger treibstoffeffiziente Flugzeugtypen (z. B. A319ceo, A340-300). Die Reduktion der Flughafenkapazität führt im Modell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung zu einer größeren durchschnittlichen Sitzplatzanzahl pro Flug an kapazitätsbeschränkten Flughäfen, da die statische Nachfrage mit weniger Flugbewegungen bedient werden muss. Umgekehrt ermöglicht eine höhere Flughafenkapazität an kapazitätsbeschränkten Flughäfen den Einsatz kleinerer Flugzeugtypen. Die Verkürzung der verfügbaren Runway-Längen führt an Flughäfen, welche bereits über besonders kurze Runway-Längen verfügen, z. B. SDU (Rio de Janeiro-Santos Dumont) oder LCY (London City Airport), zu weniger angebotenen Sitzplätzen pro Flug, da geringere Nutzlasten oder kleinere Flugzeugtypen mit kürzeren benötigten Start- und Landebahnlängen erforderlich sind, um die zusätzlich verkürzten verfügbaren Runway-Längen einzuhalten. Umgekehrt ermöglicht eine Verlängerung der verfügbaren Runway-Längen an Flughäfen mit bisher besonders kurzen Runway-Längen höhere Sitzplatzanzahlen pro Flug. Flughäfen mit mittleren, z. B. LGA (New York LaGuardia), oder langen verfügbaren Runway-Längen, z. B. NRT (Tokio-Narita), werden durch veränderte verfügbare Runway-Längen nicht beeinflusst, da die Flugzeug-Routen-Zuordnung an diesen Flughäfen nicht durch die Runway-Länge eingeschränkt wird.

Insgesamt zeigen die in Tab. 4.15 vorgestellten Ergebnisse, dass das Gesamtmodell auf die untersuchten veränderten Eingangsgrößen dynamisch und sinnvoll reagiert.

Tab. 4.15: Ergebnisse der Validierung der Modelldynamik

Szenario	Auswertungs- metrik	Veränderung der Eingangsdaten	Metrikwert bzw. Veränderung des Metrikwerts				
(a) Sitzplatz- angebot	Anzahl nicht genutzter Flugzeuge	Referenz -20 % angebotene Sitzplätze	786 +472 %				
(b) Flugzeug- flotte	Anzahl nicht genutzter Flugzeuge	Flugzeugtyp	A319ceo	A320ceo	A340-600	B737-800	
		Referenz	204	340	28	212	
		500 zusätzliche A320neo & 200 zusätzliche A350-900	+62,7 %	+110 %	+40,9 %	+194 %	
		500 zusätzliche A319ceo & 200 zusätzliche A340-600	+246 %	-1,93 %	+704 %	+3,38 %	
(c) Betriebs- kosten	Durchschnittsdistanz von Flugzeugtypen	Flugzeugtyp	A319ceo	A321ceo	A340-300	B787-9	
		Referenz	1230	1330	3636	5829	
		-50 % Treibstoffpreis +50 % Treibstoffpreis	+1,11 % -1,13 %	+0,11 % +0,10 %	+1,91 % -2,29 %	-7,28 % +7,89 %	
(d) Flughafen- kapazität	Sitzplatzanzahl pro Flug an kapazitäts- beschränkten Flughäfen*	Referenz	210				
		-10 % Flughafenkapazität +10 % Flughafenkapazität	+8,39 % -3,49 %				
(e) Runway- Länge	Sitzplatzanzahl pro Flug	Flughafen	SDU	LCY	LGA	NRT	
		Runway-Länge in m	1323	1508	2135	4000	
		Referenz	111	131	180	220	
		-10 % Runway-Länge +10 % Runway-Länge ohne Beschränkung durch die Runway-Länge	-13,7 % +26,7 % +49,4 %	-16,7 % +6,38 % +9,40 %	-0,17 % +0,04 % -0,57 %	+0,26 % +0,01 % +0,09 %	

* beinhaltet Flughäfen, deren modellierte Kapazität im Referenzfall zu mindestens 90 % genutzt wird;
konkret CGK, CLT, DXB, FRA, FUK, HKG, HND, LGW, LHR, MUC, PEK, SAW und SYD.

4.6.4 Validierung der Modelleigenschaften

Die Validierung des entwickelten Modells der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung stellt sicher, dass die in Unterabschnitt 3.1.1 aufgestellten Kriterien für den gewünschten Einsatzbereich des Modells erfüllt werden. Nachfolgend wird für jedes der sechs Kriterien ein Nachweis erbracht.

(a) Abbildung der Flugzeug-Routen-Zuordnung im globalen LTS

Für die Modellierung, Kalibrierung und Validierung des vorliegenden Modells werden Daten von 37 Flugzeugtypen verwendet, welche gemeinsam 92 % der ASK im globalen LTS abdecken (Abschnitt 4.1). Für diese als repräsentativ betrachtete Auswahl an Flugzeugtypen zeigt das Modell eine zufriedenstellende Modellgüte (Unterabschnitt 4.6.2). Beispielsweise werden im Mittel die Verteilungen der Routendistanzen der einzelnen Flugzeugtypen mit $< 13\%$ Abweichung abgebildet (Abb. 4.16a), die Marktkonzentrationen der Flugzeugtypen auf Routen unterschiedlicher Kapazitätskategorien mit $< 15\%$ (Abb. 4.16b) und die Anzahl an Flugbewegungen je Flughafen mit $< 13\%$ (Abb. 4.17b). Mit dem vorliegenden Modellumfang und der vorliegenden Abbildungsqualität ist die Modellgültigkeit für den globalen, kommerziellen Passagierluftverkehr folglich gegeben.

(b) Erklärender Modellierungsansatz

Das entwickelte Modell zur Abbildung der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung basiert auf einem LP mit einer Zielfunktion, welche die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Flugzeugtypen beschreibt, und Nebenbedingungen, welche u. a. logische, betriebliche oder technische Einschränkungen im Einsatz der Flugzeugtypen beschreiben (Unterabschnitt 4.2.1). Für die Zielfunktion, die Nebenbedingungen sowie die zusätzlich verwendeten Parameter (z. B. zu den DOC oder der Flugzeugnutzung) sind mathematische Ausdrücke wie Gleichungen, Ungleichungen oder Funktionen angegeben, welche auf Literaturrecherchen oder eigenständigen Analysen empirischer Daten basieren. Insgesamt kann somit ein kontrollierbarer und nachvollziehbarer Zusammenhang zwischen den Eingangsgrößen und den Modellergebnissen erzielt werden und die Anforderung nach einem erklärenden Modellansatz ist erfüllt.

(c) Szenariofähigkeit und Modelldynamik

Die Modellierung der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung anhand eines LP führt zu einem dynamischen Zusammenhang zwischen Eingangsgrößen und Modellergebnissen. In Unterabschnitt 4.6.3 ist dargelegt, dass das Modell auf Veränderungen des Sitzplatzangebots, der Flugzeugflotte, der Betriebskosten, der Flughafenkapazitäten sowie der verfügbaren Runway-Längen in geeigneter Form reagiert. Folglich ist die Anforderung an die Szenariofähigkeit und Modelldynamik erfüllt.

und das Gesamtmodell geeignet, um die globale Flugzeug-Routen-Zuordnung bei veränderten Eingangsgrößen zu beschreiben.

(d) Modellgültigkeit unabhängig vom betrachteten Zeitraum

Für die Modellierung, Kalibrierung und Validierung des vorliegenden Modells werden Daten des Zeitraums 2010–2019 verwendet (Abschnitt 4.1). Der Vergleich der Kalibrierungen sowie der Validierungsergebnisse, wenn verschiedene Untermengen dieser Daten genutzt werden – konkret die drei Zeiträume 2010–2016, 2013–2019 und 2010–2019 –, zeigt, dass der gewählte Kalibrierungszeitraum innerhalb des Datenzeitraums 2010–2019 keinen wesentlichen Einfluss auf die Modellgüte hat (Unterabschnitt 4.6.2). Folglich ist die Modellgültigkeit unabhängig vom betrachteten Zeitraum gegeben. Für die Anwendung des Modells auf Zeiträume vor 2010 oder nach 2019 ist allerdings die Gültigkeit der getroffenen Annahmen sowie der enthaltenen Submodelle zu überprüfen. Dies betrifft insbesondere etwaige historische oder mögliche zukünftige disruptive Veränderungen im LTS, wie neue Airline-Geschäftsmodelle oder eine veränderte Regulierung des Luftverkehrs.

(e) Anwendbarkeit für die Bewertung von Flugzeugentwürfen

Das entwickelte Modell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung berücksichtigt einerseits flugzeugtypspezifische Leistungsparameter, wie Treibstoffverbrauch, DOC, Nutzlast-Reichweiten-Beziehung und benötigte Start- und Landebahnlängen, und stellt hierdurch andererseits geeignete Metriken für die Bewertung von Flugzeugentwürfen bereit. Insgesamt wird somit die Anwendbarkeit für die Bewertung von Flugzeugentwürfen sichergestellt, indem flugzeugtypspezifische Einsatzszenarien ermittelt und anhand verschiedener Bewertungsmetriken verglichen werden können.

(f) Geringe Rechenanforderungen bei Anwendung

Das entwickelte Modell benötigt auf einem konventionellen Laptop²¹ 60–180 Sekunden, um die globale Flugzeug-Routen-Zuordnung für ein Jahr zu bestimmen. Hiervon entfallen bei der umgesetzten Implementierung in der Programmiersprache *Python v3.7* (*Python Software Foundation*, 2018) 20–45 Sekunden auf das Einlesen und Vorbereiten von Eingangsdaten, 30–90 Sekunden für das Aufbauen des LP sowie 10–45 Sekunden auf das Lösen des LP (vgl. Unterabschnitt 4.2.2). Sollen Rechnungen für mehrere Jahre durchgeführt werden, so lassen sich diese, ausreichend Prozessorkerne und Arbeitsspeicher vorausgesetzt, parallelisieren, um die Laufzeit des Modells zu reduzieren. Einzig für die Modellkalibrierung (Abschnitt 4.4) wird mehr Rechenzeit bzw. Rechenleistung benötigt, da hier bis zu mehrere Tausend Modelldurchläufe durchgeführt werden, um den besten Satz an

²¹Die Ausstattung umfasst: Intel Core i7 Prozessor der neunten Generation (sechs physische Kerne mit 2,6 GHz), 32 GB RAM und State-of-the-Art-Solver *Gurobi Optimizer v9.5* (*Gurobi*, 2023); analog zu Unterabschnitt 4.2.2.

Kalibrierungsparametern zu bestimmen. Da die Modellkalibrierung allerdings nur als Teil der Modellentwicklung durchgeführt wird, werden die Rechenanforderungen für die Anwendung des Gesamtmodells hierdurch nicht beeinflusst. Folglich ist die Anforderung einer Rechenzeit des entwickelten Modells von wenigen Minuten auf üblicher Bürohardware erfüllt.

5. Anwendung

In diesem Kapitel wird das entwickelte Modell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung zur Beantwortung zweier unabhängiger Fragestellungen angewendet. In Abschnitt 5.1 wird untersucht, ob für ein zukünftiges Kurzstreckenflugzeug aus Airline-Sicht ein Antrieb mit Turbofan- oder Turboprop-Triebwerken vorteilhafter ist. In Abschnitt 5.2 werden die Auswirkungen der Markteinführung eines zukünftigen Mittelstreckenflugzeuges auf das globale LTS analysiert. Anhand dieser beiden beispielhaften Anwendungsfälle wird gezeigt, dass das Gesamtmodell zur Beantwortung verschiedener relevanter Fragestellungen im Bereich der Bewertung von Flugzeugentwürfen unter Berücksichtigung des Flugzeugeinsatzes im LTS geeignet ist.

5.1 Triebwerksbauart für ein Kurzstreckenflugzeug

Die Wahl der Triebwerkeigenschaften ist ein zentraler Bestandteil des Flugzeugentwurfsprozesses (*Raymer, 2018*). Bereits in der ersten Phase des Flugzeugentwurfs, dem konzeptionellen Flugzeugentwurf, werden die Größe und die Bauart der Triebwerke festgelegt, da neben der Flugzeuggeometrie auch die Flugleistung inklusive der ökonomischen wie ökologischen Eigenschaften des Flugzeugentwurfes wesentlich durch die Wahl der Triebwerke beeinflusst wird (*Anderson, 1999*).¹

In der aktuell bestehenden Flugzeugflotte des kommerziellen Luftverkehrs dominieren Flugzeugtypen mit Turbofan-Triebwerken, lediglich im Bereich der Regional-, Zubringer- und Kleinflugzeuge werden Turboprop-Triebwerke eingesetzt (*Cirium, 2022; Sabre, 2022*). Während Turbofan-Triebwerke höhere Fluggeschwindigkeiten und somit kürzere Flugzeiten ermöglichen, zeichnen sich Turboprop-Triebwerke durch höheren Schub am Boden, was zu kürzeren Startstrecken führt, sowie durch höhere Wirkungsgrade und folglich geringere Treibstoffverbräuche aus (*Bräunling, 2015*). Demnach verspricht der vermehrte Einsatz von Turboprop-Triebwerken im kommerziellen Luftverkehr Einsparpotential hinsichtlich Treibstoffverbrauch

¹Die Größe und die Bauart der Triebwerke beeinflussen hinsichtlich der Flugzeuggeometrie z. B. die Positionierung der Leitwerke und die Länge des Fahrwerks; hinsichtlich der Flugleistung z. B. die Reiseflugmachzahl und die Reichweite; hinsichtlich der Ökonomie den Treibstoffverbrauch sowie die Kosten für Anschaffung und MRO; und hinsichtlich der Ökologie z. B. die Emissionen und die Klimawirkung (*Mattingly et al., 2002; Bräunling, 2015; Kellari et al., 2017*).

und Emissionen (*Kundu*, 2010). Zusätzlich resultieren aus der treibstoffeffizienten Auslegung und Einsatzplanung von Turboprop-Flugzeugen tendenziell auch niedrigere Flughöhen (*Atanasov et al.*, 2023), sodass beim Einsatz von Turboprop-Triebwerken aufgrund der verminderten Bildung von Kondensstreifen-Zirren in niedrigeren Flughöhen eine über die Emissionseinsparungen hinausgehende Reduzierung der Klimawirkung zu erwarten ist (*Williams et al.*, 2002; *Søvde et al.*, 2014; *Dahlmann et al.*, 2016). Im Gegensatz dazu führen die langsameren Fluggeschwindigkeiten der Turboprop-Flugzeuge allerdings zu längeren Flugzeiten und einer geringeren Transportleistung. Hieraus folgen u. a. eine reduzierte Attraktivität für Passagiere, da diese schnelle Reiseverbindungen bevorzugen (VOT) (*Adler et al.*, 2005; *Kölker et al.*, 2024), und eine steigende Bedeutung der Betriebsfixkosten, da diesen weniger ASK als bei einem Turbofan-Flugzeug gegenüberstehen (*Ryerson und Hansen*, 2010).

Das Ziel der nachfolgenden Untersuchung ist es, zwei Entwürfe für zukünftige Kurzstreckenflugzeuge mit Turbofan- und mit Turboprop-Triebwerken ökonomisch zu bewerten. Hierbei wird das Modell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung verwendet, um die unterschiedlichen Charakteristiken der Flugzeugentwürfe in Einsatzszenarien zu überführen, auf deren Grundlage die ökonomische Bewertung erfolgen kann. Da die ökonomischen Vor- oder Nachteile von Turbofan- und Turboprop-Triebwerken u. a. von den äußeren Faktoren Treibstoffpreis und VOT der Passagiere abhängen, werden die Sensitivitäten der Ergebnisse in Bezug auf diese beiden Einflüsse untersucht, um zu bestimmen, in welchen Szenarien welche Triebwerksbauart vorteilhaft ist.

Nachfolgend wird in Unterabschnitt 5.1.1 zuerst das Untersuchungsszenario mit- samt der betrachteten Flugzeugentwürfe und der getroffenen Annahmen definiert. Anschließend erfolgt in Unterabschnitt 5.1.2 die Flugzeug-Routen-Zuordnung. Aus dieser resultieren die Einsatzszenarien für die in Unterabschnitt 5.1.3 durchge- führte Ergebnisauswertung. Abschließend erfolgt ein Vergleich der erzielten Be- wertungsergebnisse mit solchen, die mit anderen, in der Literatur beschriebenen Bewertungsansätzen erzielt werden (Unterabschnitt 5.1.4).

5.1.1 Untersuchungsszenario

Das Untersuchungsszenario wird gebildet durch sämtliche Annahmen, welche die ermittelten Ergebnisse beeinflussen. Im Kern umfasst dies die betrachteten Flug- zeugentwürfe, das verwendete Luftverkehrsszenario sowie die ökonomischen Rand- bedingungen des Flugbetriebs.

(a) Flugzeugentwürfe

Es werden zwei Flugzeugentwürfe verwendet, welche innerhalb des Projekts Er- forschung elektrischer Flugzeugkonzepte und -technologien (engl. Exploration of Electric Aircraft Concepts and Technologies; EXACT) des Deutschen Zentrums

für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelt wurden und u. a. in *Atanasov et al.* (2023) veröffentlicht sind. Die grundsätzlichen Entwurfsannahmen resultieren aus dem Projektziel, mögliche Antriebstechnologien für klimaverträgliche Nachfolgeflugzeuge in der Größe der Airbus A320- und Boeing 737-Familien zu bewerten. Für die vorliegende Arbeit ist allerdings weniger die konkrete Wahl der Entwurfsannahmen relevant, sondern viel mehr, dass für beide Flugzeugentwürfe identische Technologieannahmen, dieselbe Auslegungsmission und dieselbe Entwurfsmethodik verwendet wurden. Zusätzlich ist die verfügbare Datenbasis einheitlich und sehr umfangreich. Insgesamt sind die beiden Flugzeugentwürfe und ihre Flugleistungen daher sehr gut miteinander vergleichbar.

Konkret handelt es sich um zwei konzeptionelle Entwürfe eines zukünftigen Kurzstreckenflugzeuges in konventioneller *Tube-and-Wing*-Konfiguration² und mit Eintritt in den Dienst (engl. Entry Into Service; EIS) in 2040. Für beide Flugzeugentwürfe werden nahezu identische TLARs verwendet. Diese sind in Tab. 5.1 zusammengefasst. Einzig die Bauart der Triebwerke (Turbofan bzw. Turboprop) und die damit verbundene Reiseflugmachzahl (0,78 bzw. 0,66) unterscheiden sich. Als Energieträger wird fossiles Kerosin bzw. SAF verwendet. Die Auslegungsmission umfasst eine Reichweite von 2778 km (1500 nm) mit einer Nutzlast von 23 750 kg (z. B. 250 Passagiere mit je 95 kg).³ Die weiteren Nutzlast-Reichweite-Eigenschaften, welche ein Ergebnis des konzeptionellen Flugzeugentwurfs darstellen, sind in Abb. 5.1 visualisiert. Es ist zu erkennen, dass neben der Auslegungsmission auch die maximale Nutzlast der beiden untersuchten Flugzeugentwürfe identisch ist (25 000 kg). Ferner wird durch die geringere Steigung im mittleren Segment des NRD deutlich, dass der Turboprop-Entwurf eine höhere Treibstoffeffizienz aufweist.⁴ Trotzdem erzielt der Turboprop- im Vergleich zum Turbofan-Entwurf eine geringere Überführungsreichweite (8150 km gegenüber 8700 km), da der Turboprop-Entwurf eine geringere Flügelfläche und folglich ein geringeres Tankvolumen besitzt (*Atanasov et al.*, 2023). Weitere Daten zu den Flugzeugentwürfen, welche für das Modell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung benötigt werden, können den Tabellen A.1 bis A.3 in Anhang A.1 entnommen werden. Details zum Entwurfsprozess sind *Atanasov et al.* (2023) zu entnehmen.

²Die *Tube-and-Wing*-Konfiguration (dt. *Röhre und Flügel*) entspricht der konventionellen Flugzeugkonfiguration mit einem röhrenförmigen Rumpf und einem Flügel.

³Im Vergleich zu den Airbus A320- und Boeing 737-Familien wurde im EXACT-Projekt bewusst eine kürzere Auslegungsmission gewählt, um auf den hauptsächlichen Einsatz der Airbus A320- und Boeing 737-Familien deutlich unterhalb ihrer Auslegungsreichweite (vgl. Abb. 1.2) zu reagieren.

⁴Das Mitführen von inkrementell mehr Treibstoff und weniger Nutzlast ermöglicht für den Turboprop-Entwurf mehr zusätzliche Reichweite als für den Turbofan-Entwurf (vgl. Unterabschnitt 4.3.3).

Parameter	Wert
EIS	2040
Energieträger	Kerosin/SAF
Auslegungsreichweite	2778 km
Auslegungsnutzlast	23 750 kg
Max. Sitzplätze	250
Max. Nutzlast	25 000 kg
Reiseflug- machzahl	Turbofan 0,78 Turboprop 0,66
Max. Flughöhe	40 000 ft
Startstrecke	< 1900 m
Steigrate	> 300 ft/min
Spannweitenlimit	≤ 36 m
Anfluggeschwindigkeit	< 140 kts

Tab. 5.1: TLARs der untersuchten Kurzstreckenflugzeuge

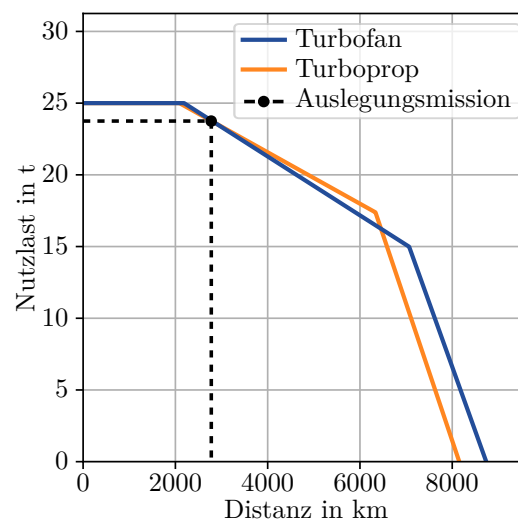
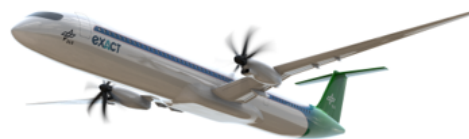


Abb. 5.1: NRD der untersuchten Kurzstreckenflugzeuge

Abbildung 5.2 zeigt 3D-Renderings der untersuchten Flugzeugentwürfe und gibt einen Überblick über die jeweiligen Geometrien. Beide Entwürfe sind als Tiefdecker mit unterhalb der Flügel montierten Triebwerken ausgeführt. Abseits der Triebwerke unterscheiden sich die Flugzeugentwürfe visuell u. a. durch die unterschiedlichen Leitwerke (konventionell für den Turbofan und T-Leitwerk für den Turboprop) sowie die unterschiedliche Flügelform und -größe.



(a) Turbofan



(b) Turboprop

Abb. 5.2: 3D-Renderings der untersuchten Kurzstreckenflugzeuge (*Silberhorn, 2024*)

(b) Luftverkehrsszenario

Das verwendete Luftverkehrsszenario basiert auf einer Vorhersage der Passagiernachfrage, der Flugzeugflotte und der Flughafenkapazitäten für den kommerziellen Luftverkehr im globalen LTS für das Jahr 2040.⁵ Hierzu wird ausgehend von einer Prognose der zukünftigen sozioökonomischen Entwicklungen die Passagiernachfrage vorhergesagt und diese unter Berücksichtigung der erwarteten Flottenentwicklung und der erwarteten Flughafenkapazitäten in Flüge zwischen Flughafenpaaren

⁵In Analogie zu den Flugzeugentwürfen stammt auch das hier verwendete Luftverkehrsszenario aus dem DLR-Projekt EXACT. Weitere Studien auf Grundlage des Luftverkehrsszenarios sind u. a. *Grimme und Braun (2022)*, *Papantoni et al. (2022)*, *Wehrspohn et al. (2022)* und *Atanasov et al. (2023)*.

überführt (*Gelhausen et al.*, 2020, 2022). Eine Zusammenfassung des resultierenden Luftverkehrsszenarios mit Informationen zu Routennetzwerk, Sitzplatzangebot und Flugzeugflotte ist in Tab. B.1 in Anhang B.2 gegeben.

(c) ökonomischen Randbedingungen des Flugbetriebs

Die ökonomischen Randbedingungen des Flugbetriebs für die Bewertung der zwei Entwürfe eines zukünftigen Kurzstreckenflugzeuges umfassen insbesondere die angenommenen Treibstoffpreise sowie die angenommenen Werte für den VOT der Passagiere. Für beide Parameter werden jeweils ein niedriger, ein mittlerer sowie ein hoher Wert ausgewählt, um so die Unsicherheiten in der Vorhersage bzw. der Messung der Parameter abzudecken. Für den zukünftigen Treibstoffpreis in 2040 werden als niedriger Wert 0,3 €/kg (niedriges Szenario für fossiles Kerosin aus *U.S. Energy Information Administration* (2023a)), als mittlerer Wert 0,9 €/kg (hohes Szenario für fossiles Kerosin aus *U.S. Energy Information Administration* (2023a)) und als hoher Wert 1,8 €/kg (hohes Szenario für SAF aus *McKinsey & Company* (2020)) angenommen. Für den VOT der Passagiere werden als niedriger Wert 0 €/h (zeitinsensitiver Passagiere), als mittlerer Wert 20 €/h (*Landau et al.* (2016); entspricht in guter Näherung dem Wert der Modellkalibrierung aus Abschnitt 4.4) und als hoher Wert 40 €/h (niedriger Wert aus *Merkert und Beck* (2017)) verwendet. Die Werte für den Treibstoffpreis und den VOT sind dabei in €-2010 angegeben, um konsistent mit den Berechnungen im Modell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung zu sein.⁶ Alle weiteren ökonomischen Parameter, beispielsweise für die Betriebskosten oder die Bepreisung des Schedule Delays, werden gemäß der Beschreibung in Kapitel 4 gewählt. Zusätzlich wird vereinfachend angenommen, dass keine wesentliche Veränderung der Kaufkraft der Passagiere auftritt und keine Rückkopplung der unterschiedlichen ökonomischen Randbedingungen des Flugbetriebs auf das Luftverkehrsszenario, z. B. in der Form von Nachfrageelastizitäten, existiert. Ein wesentlicher Einfluss dieser Annahmen auf die nachfolgend vorgestellten Ergebnisse ist nicht zu erwarten, da primär relative Unterschiede zwischen den Ergebnissen für den Turbofan- und den Turboprop-Flugzeugentwurf bewertet werden.

5.1.2 Flugzeug-Routen-Zuordnung

Die Flugzeug-Routen-Zuordnungen stellen die Einsatzszenarien dar, anhand derer die untersuchten Flugzeugentwürfe bewertet werden. Zur Ermittlung dieser Einsatzszenarien werden die in Unterabschnitt 5.1.1 aufgestellten Untersuchungsszenarien als Eingangsdaten für das in Kapitel 4 vorgestellte Modell der globalen

⁶Die Diskontierungsfaktoren, um die €-2010-Werte in €-2025-Werte bzw. €-2040-Werte zu überführen, sind 1,37 bzw. 1,84 (bei einer angenommenen Inflationsrate von 2 % p.a. für den Zeitraum 2025–2040).

Flugzeug-Routen-Zuordnung eingesetzt.^{7,8} Neben den ökonomischen Randbedingungen (jeweils drei Werte für Treibstoffpreis und VOT) und den zwei Flugzeugentwürfen mit ihren individuellen Eigenschaften wird zusätzlich auch die Anzahl der für die Flugzeug-Routen-Zuordnung berücksichtigten Flugzeugeinheiten variiert (500 oder 2000 Flugzeuge), um unterschiedliche Phasen der Marktdurchdringung der untersuchten Flugzeugentwürfe abzubilden.⁹ Insgesamt werden somit 36 Szenarien ($3 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 2$) untersucht.

Tabelle 5.2 fasst die Einsatzdistanzen von 8 der insgesamt 36 untersuchten Szenarien anhand der 10%-, 50%- und 90%-Quantile zusammen. Neben den Szenarien mit den kürzesten und längsten Einsatzdistanzen (Szenario 6 und 13) sind insbesondere solche Szenarien in Tab. 5.2 enthalten, welche die Dynamik der Flugzeug-Routen-Zuordnung beschreiben; die Ergebnisse aller weiteren untersuchten Szenarien sind in Tab. B.2 in Anhang B.2 aufgeführt und unterstützen die nachfolgend beschriebenen Beobachtungen und Schlussfolgerungen. Es ist zu erkennen, dass die 90%-Quantile und damit ein Großteil der Einsatzdistanzen deutlich unterhalb der Auslegungsdistanz von 2778 km liegen. Für die meisten Szenarien liegt der Median (50%-Quantil) sogar unterhalb der halben Auslegungsdistanz. Dies stimmt überein mit dem beobachtbaren Einsatzverhalten für bestehende Kurzstreckenflugzeugtypen¹⁰ und resultiert daraus, dass oberhalb der Auslegungsdistanz die mögliche Nutzlast abfällt (s. Abb. 5.1), sodass die DOC pro ASK deutlich steigen und ein Einsatz weniger wirtschaftlich wird. Ferner ist zu erkennen, dass die Einsatzdistanzen des Turboprop-Entwurfs kürzer sind als die des Turbofan-Entwurfs. Dies resultiert daraus, dass der Turboprop-Antrieb insbesondere auf kurzen Distanzen wirtschaftlich vorteilhaft ist, da mit zunehmender Distanz der Einfluss einer langsameren Reisefluggeschwindigkeit auf die Blockzeit immer größer wird, sodass die Transportleistung im Vergleich zu schnelleren Flugzeugtypen abnimmt und die DOC pro ASK zunehmend durch die Betriebsfixkosten negativ beeinflusst werden. Dieser Effekt wird zusätzlich verstärkt, wenn mittels des VOT die Passagierpräferenz für kurze Reisezeiten in der ökonomischen Betrachtung berücksichtigt wird. Folglich ist nachvollziehbar, dass ein Anstieg des VOT zu kürzeren Einsatzdistanzen für den Turboprop-Entwurf führt (vgl. Szenarien 14 und 18),

⁷Hierbei wird das Modell mit den Parametern des Kalibrierungszeitraums 2010–2019 angewendet (Abschnitt 4.4).

⁸Auf die Berücksichtigung der benötigten Start- und Landebahnlängen der Flugzeugtypen im Vergleich zu den verfügbaren Runway-Längen an den Flughäfen muss hierbei in der Flugzeug-Routen-Zuordnung verzichtet werden, da sowohl für die untersuchten Flugzeugtypen als auch für die zukünftigen Flughafeninfrastrukturen keine Datengrundlagen vorliegen. Für die durchgeführte Flugzeugentwurfsbewertung wird der Einfluss hieraus als vernachlässigbar gering eingestuft, da für beide untersuchten Flugzeugentwürfe identische Anforderungen an die Startstrecke und die Anfluggeschwindigkeit gestellt werden (s. Tab. 5.1).

⁹Zum Vergleich: Die Airbus A320neo-Familie erreichte 500 ausgelieferte Flugzeugeinheiten nach drei Jahren und 2000 Einheiten nach sechs Jahren (*Cirium*, 2022).

¹⁰Beispielsweise liegen die Einsatzdistanzen für den Flugzeugtyp A320ceo im Jahr 2019 im Median bei 1100 km, während die Auslegungsreichweite größer als 5000 km ist (*Sabre*, 2022; *Airbus*, 2022a); s. Abb. 1.2 und Abb. 4.14a.

während der Turbofan-Entwurf deutlich geringfügiger beeinflusst wird (vgl. Szenarien 13 und 17). Dass ein höherer Treibstoffpreis zu längeren Einsatzdistanzen führt (vgl. Szenarien 5, 6, 17 und 18), resultiert daraus, dass die zukünftigen Flugzeugentwürfe in einem Luftverkehrsszenario mit einer Bestandsflotte aus älteren Flugzeugtypen untersucht werden und die neuen zukünftigen Flugzeugtypen so aufgrund des technologischen Fortschritts Treibstoffeinsparungen versprechen. Der wirtschaftliche Vorteil dieser Treibstoffeinsparungen ist bei hohen Treibstoffkosten besonders ausgeprägt, sodass die neuen Flugzeuge dann auf längeren Routen eingesetzt werden, da dort mehr Transportleistung erbracht werden kann (vgl. Unterabschnitt 4.3.4) und die Treibstoffeinsparungen so möglichst groß sind. Insgesamt passt die in Tab. 5.2 erkennbare Dynamik der Flugzeug-Routen-Zuordnung somit sehr gut zur Modellierung aus Kapitel 4. Da die Anzahl an Flugzeugeinheiten keinen nennenswerten Einfluss auf die Einsatzdistanzen hat, sind die Ergebnisse des Vergleichs der beiden Kurzstreckenflugzeugentwürfe unabhängig von der getroffenen Annahme über die Anzahl an Flugzeugeinheiten.

Tab. 5.2: Auswahl an Untersuchungsszenarien mit den 10%-, 50%- und 90%-Quantilen der ermittelten Einsatzdistanzen

Szenario	Flugzeug	Treibstoff- preis in €/kg	VOT in €/h	Anzahl Flugzeuge	Distanz in km		
					10 %	50 %	90 %
5	Turbofan	0,3	40	500	403	1094	2055
6	Turboprop	0,3	40	500	309	567	1214
13	Turbofan	1,8	0	500	690	1525	2685
14	Turboprop	1,8	0	500	620	1380	2518
17	Turbofan	1,8	40	500	647	1492	2623
18	Turboprop	1,8	40	500	355	872	1754
23	Turbofan	0,3	40	2000	404	1070	2117
24	Turboprop	0,3	40	2000	309	645	1336

Abbildung 5.3 visualisiert vier der in Tab. 5.2 enthaltenen Einsatzszenarien als Histogramme der Einsatzdistanzen. Wie bereits durch Tab. 5.2 angedeutet, ist zu erkennen, dass die unterschiedlichen Szenarien zu sehr verschiedenen Einsatzdistanzverteilungen führen; wobei tendenziell mit zunehmender mittlerer Einsatzdistanz die Spannweite, der Interdezilabstand sowie der Modalwert steigen, während die Schiefe der Verteilung abnimmt. Ferner wird deutlich, dass, begünstigt durch die Rechtsschiefe der Verteilungen, die maximalen Einsatzdistanzen deutlich oberhalb der 90%-Quantile liegen. Für die nachfolgend in Unterabschnitt 5.1.3 aufgeführten gemittelten Ergebnisse pro Szenario können die in Abb. 5.3 gezeigten Histogramme näherungsweise als Gewichtungsfaktoren der verschiedenen Einsatzdistanzbereiche interpretiert werden. Folglich werden die distanzabhängigen Vor- und Nachteile der beiden untersuchten Flugzeugentwürfe in den verschiedenen Szenarien unterschiedlich stark berücksichtigt.

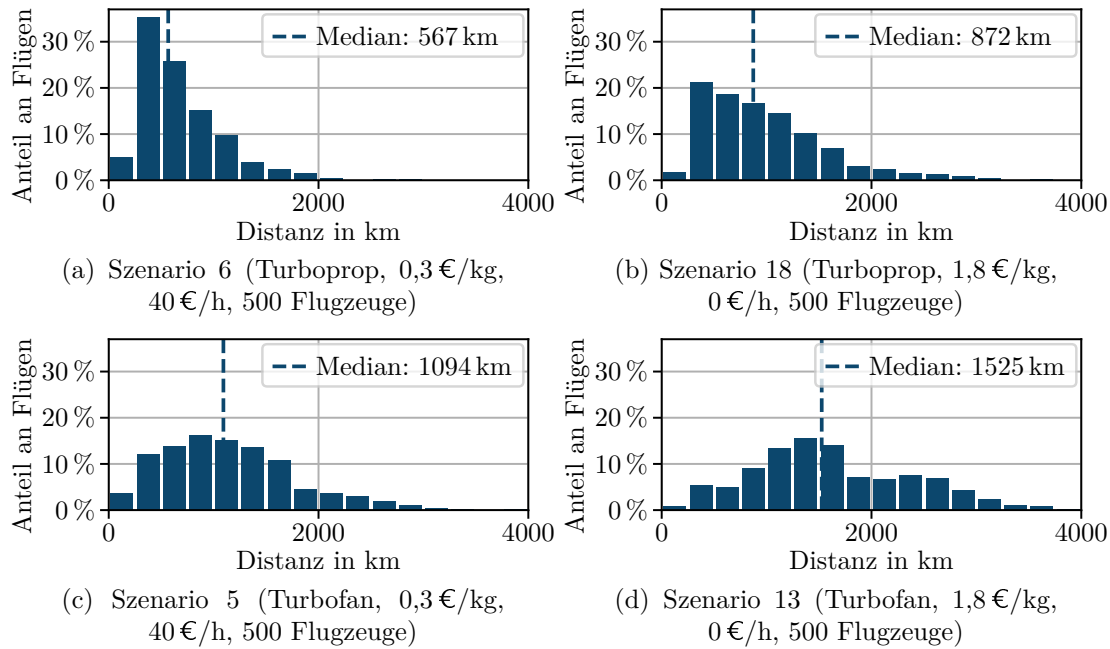


Abb. 5.3: Distanzverteilungen der verschiedenen Einsatzszenarien; mit Angabe des verwendeten Flugzeugtyps, des Treibstoffpreises, des VOT und der Anzahl an Flugzeuginheiten (vgl. Tab. 5.2)

Die in Abb. 5.3 dargestellten Histogramme folgen aus der Aggregation der diskreten Flugrouten der Flugzeug-Routen-Zuordnung mit dem Ziel der ökonomischen Auswertung. Für eine zusätzliche ökologische Untersuchung wäre insbesondere die Betrachtung der räumlichen Verteilungen der Flugrouten der Einsatzszenarien relevant, um so die Treibstoffverbräuche in Emissionen und Klimawirkungen zu überführen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird auf eine derartige ökologische Untersuchung verzichtet und stattdessen auf veröffentlichte Anwendungsbeispiele für vergleichbare Fragestellungen in *Papantoni et al. (2022)*; *Wehrspohn et al. (2022)*; *Atanasov et al. (2023)*; *Ramm et al. (2024)* verwiesen.

5.1.3 Ergebnisauswertung

Mit dem Ziel eines möglichst umfassenden ökonomischen Vergleichs werden die beiden betrachteten Flugzeugentwürfe anhand der zuvor bestimmten Einsatzszenarien hinsichtlich der vier Bewertungsmetriken Anzahl an benötigten Flugzeugen, Treibstoffverbrauch, DOC und Kostenwert verglichen. Der Kostenwert umfasst hierbei neben den DOC auch das vereinfacht als gewichtete Summe des Schedule Delays (Wert von Flugfrequenzen) und der zusätzlich benötigten Blockzeit (VOT) modellierte Umsatzpotential der Flugzeug-Routen-Zuordnung.

Abbildung 5.4 zeigt die relative Veränderung in den vier Bewertungsmetriken, wenn zur Befliegung der ermittelten Einsatzszenarien – unabhängig davon, für welchen Flugzeugentwurf das Einsatzszenario berechnet wurde – der Turboprop-Entwurf statt des Turbofan-Entwurfs eingesetzt wird.¹¹ Die Ergebnisse sind hierbei jeweils im Bezug auf die mittlere Distanz der Einsatzszenarien aufgetragen.

Hinsichtlich der Anzahl der verwendeten Flugzeuge ist in Abb. 5.4a zu erkennen, dass zwischen 4 % (geringe mittlere Einsatzdistanz) und 7 % (hohe mittlere Einsatzdistanz) mehr Einheiten des Turboprop-Entwurfs benötigt werden, um dieselbe Transportleistung wie mit dem Turbofan-Entwurf zu erreichen. Dies zeigt, dass die Reduktion der Reiseflugmachzahl in Höhe von 15,4 % ($0,66/0,78 - 1$) nur in gedämpfter Form einen Einfluss auf die Transportleistung hat, u. a. da in anderen Flugphasen sowie insbesondere während der Bodenabfertigung ein kleinerer bzw. kein Unterschied zwischen den Flugzeugentwürfen vorliegt.

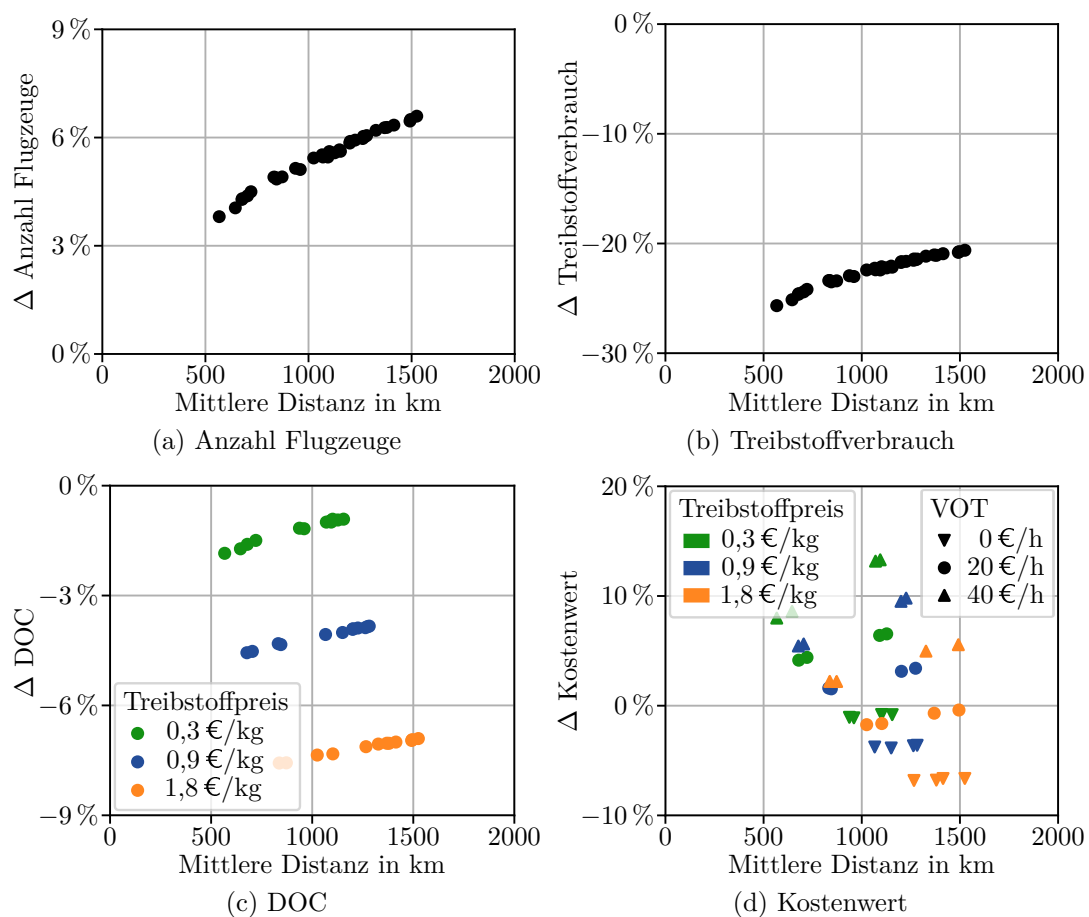


Abb. 5.4: Veränderung der Bewertungsmetriken beim Wechsel von Turbofan zu Turboprop

¹¹Da die ASK der Einsatzszenarien für beide Flugzeugtypen in sehr guter Näherung identisch sind – marginale Unterschiede existieren nur für Routen, welche länger als die Auslegungsdistanz sind (vgl. Abb. 5.1) –, gelten die Ergebnisse aus Abb. 5.4 sowohl für die absoluten Metriken als auch bei Bezug auf die ASK.

Abbildung 5.4b zeigt, dass der Treibstoffverbrauch durch den Turboprop-Entwurf im Fall geringer mittlerer Einsatzdistanz um 25 % und im Fall hoher mittlerer Einsatzdistanzen um 20 % reduziert wird. Es kann geschlussfolgert werden, dass der Turboprop-Entwurf in den Flugphasen von Start und Landung sowie im Steig- und Sinkflug höhere Treibstoffeinsparungen als im Reiseflug erzielen kann.

Inwieweit die Treibstoffeinsparungen zu geringeren DOC führen, ist in Abb. 5.4c visualisiert. Für den niedrigen Treibstoffpreis von 0,3 €/kg werden zwischen 0,9 % und 1,8 % DOC eingespart, für den mittleren Treibstoffpreis von 0,9 €/kg zwischen 3,8 % und 4,6 % und für den hohen Treibstoffpreis von 1,8 €/kg zwischen 6,9 % und 7,6 %. Die Treibstoffeinsparungen führen folglich nur im reduzierten Maße zu Einsparungen in den DOC. Dies resultiert zum einen daraus, dass die Treibstoffkosten nur einen mit dem Treibstoffpreis ansteigenden Anteil der DOC darstellen (in den untersuchten Szenarien ca. zwischen 7 % und 39 %), sodass, selbst wenn alle anderen Kostenanteile konstant blieben, die DOC prozentual geringfügiger sinken als die Treibstoffkosten. Zum anderen sind insbesondere die von der Transportleistung unabhängigen DOC-Anteile, wie die Besatzungskosten, nicht konstant, sondern steigen mit der Anzahl der benötigten Flugzeuge an.

Wird zusätzlich zur reinen Kostenperspektive auch die Passagierattraktivität berücksichtigt, so folgt die in Abb. 5.4d dargestellte Betrachtung der Kostenwerte. In Abhängigkeit von Treibstoffpreis und VOT liegt die Bewertung des Turboprop-Entwurfs zwischen $-6,8\%$ (attraktiver) und $+13,3\%$ (weniger attraktiv) im Vergleich zum Turbofan-Entwurf. Während der Kostenwert für einen VOT von 0 €/h (in Analogie zur reinen DOC-Betrachtung) zu Gunsten des Turboprop-Entwurfs ausfällt, zeigt der Kostenwert für einen VOT von 40 €/h Vorteil für den Turbofan-Entwurf an. Bei einem VOT von 20 €/h führt ein hoher Treibstoffpreis zu Vorteilen für den Turboprop-Entwurf, bei einem mittleren oder niedrigen Treibstoffpreis ist der Turbofan-Entwurf hinsichtlich der Definition des Kostenwerts vorteilhaft. Dementsprechend ist in der Betrachtung des Kostenwerts zu erkennen, dass die Vorteile des Turboprop-Entwurfs hinsichtlich Treibstoffverbrauch und DOC bei Berücksichtigung eines VOT (über-)kompensiert werden. Bereits bei einem VOT-Wert von 20 €/h, wie er für wenig zeitsensitive Passagiere in der Economy-Klasse typisch ist (Landau et al., 2016), führt der Turbofan-Entwurf eines zukünftigen Kurzstreckenflugzeuges zu einer besseren Kombination aus Betriebskosten und Umsatzpotential, solange der Treibstoffpreis, inklusive möglicher CO₂-Bepreisung für fossiles Kerosin, in Zukunft mit 1,8 €/kg nicht um ein Vielfaches höher liegt als in der Vergangenheit und Gegenwart.

Insgesamt zeigt der Vergleich der beiden untersuchten Kurzstreckenflugzeugentwürfe mit Turbofan- und Turboprop-Triebwerken, dass, obwohl die Turboprop-Triebwerke zu deutlich reduziertem Treibstoffverbrauch sowie reduzierten DOC führen, der Flugzeugentwurf mit Turbofan-Triebwerken bei Berücksichtigung der Passagierperspektive anhand des VOT in der Mehrzahl der untersuchten Szenarien aus rein ökonomischer Perspektive attraktiver ist. Die potentiell geringere Klimawirkung eines Turboprop-Entwurfs, wie sie u. a. in *Atanasov et al.* (2023) beschrieben ist, wird hierbei allerdings nicht berücksichtigt. Demnach könnten zukünftige Maßnahmen zur Internalisierung der Umweltkosten, z. B. durch die Bepreisung von Nicht-CO₂-Effekten, wie sie aktuell auf europäischer Ebene diskutiert wird (*European Commission*, 2023), oder durch Klimamautgebiete (*Niklaß*, 2019), dennoch für den Entwurf eines Kurzstreckenflugzeuges auf Basis von Turboprop-Triebwerken sprechen.

5.1.4 Vergleich mit anderen Bewertungsansätzen

Um die Vorteile der entwickelten Methodik zur Bewertung von Flugzeugentwürfen anhand der Flugzeug-Routen-Zuordnung im globalen LTS zu unterstreichen, werden die erzielten Bewertungsergebnisse nachfolgend mit Ergebnissen verglichen, welche aus der Verwendung anderer Einsatzszenarien für die Bewertung resultieren. Konkret erfolgt diese vergleichende Bewertung der Kurzstreckenflugzeuge mit Turbofan- und mit Turboprop-Triebwerken auf Basis der Auslegungsmission, einer kürzeren Einzelmission und den historischen Einsatzszenarien zweier Airlines. Ausgehend von den in Unterabschnitt 2.1.3 präsentierten Literaturansätzen zur Ermittlung von Einsatzszenarien für die Flugzeugentwurfsbewertung bieten sich die Auslegungsmission, die Einzelmission und die historischen Einsatzszenarien aufgrund der Einfachheit ihrer Anwendung besonders für den angestrebten beispielhaften Vergleich zur entwickelten Methodik an.

Die Auslegungsmission der untersuchten Flugzeugentwürfe beträgt 2778 km mit einer Nutzlast von 23 750 kg (s. Tab. 5.1). Als Einzelmission wird kontrastierend eine Flugdistanz von 500 km mit der identischen Nutzlast von 23 750 kg untersucht. Die ausgewählten historischen Einsatzszenarien umfassen die Routennetzwerke der Flugzeugtypen Airbus A321ceo und Airbus A321neo von Lufthansa und easyJet aus 2019 (*Sabre*, 2022). In Abb. 5.5 sind die Distanzverteilungen sowie die geografische Aufteilung dieser Routennetzwerke visualisiert. Für Lufthansa ist im Jahr 2019 der Einsatz der Airbus A321ceo- und Airbus A321neo-Flugzeuge auf vergleichsweise kurzen, innerdeutschen Flügen prägnant, z. B. zwischen Hamburg und Frankfurt, Berlin und Frankfurt sowie Frankfurt und München. Ergänzt durch verschiedene Flugziele im europäischen Ausland sowie in angrenzenden Regionen, etwa in Georgien, Israel und Marokko, ergibt sich eine mittlere Routendistanz von 722 km, mit einzelnen Routen unter 200 km und über 3000 km. Für easyJet ist das Routennetzwerk dominiert von Flügen von den Flughäfen Bristol (BRS) und London Gatwick (LGW) in die Mittelmeerregion sowie auf die Kanaren. Die

Routendistanz beträgt im Median 2205 km mit einzelnen Routen unter 500 km und bis zu 4000 km. Als Nutzlast für die untersuchten Flugzeugentwürfe wird auf den beiden Airline-Routennetzwerken ebenfalls 23 750 kg angenommen; bzw. auf Distanzen größer der Auslegungsreichweite die maximal mögliche Nutzlast gemäß NRD (vgl. Abb. 5.1).

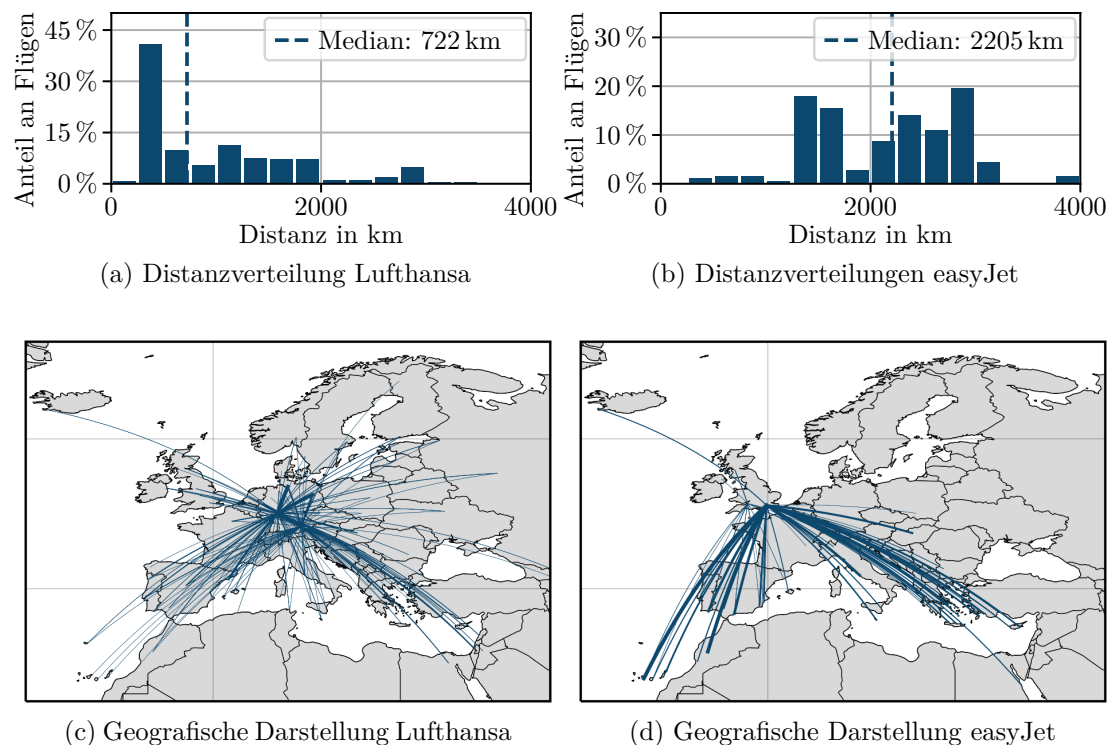


Abb. 5.5: Routennetzwerke von Lufthansa und easyJet mit den Flugzeugtypen Airbus A321ceo und Airbus A321neo in 2019; Daten von *Sabre* (2022)

Für den Vergleich zwischen der in dieser Arbeit entwickelten Bewertungsmethodik und den Ansätzen aus der Literatur (Auslegungsmission, Einzelmission und historische Einsatzszenarien) stehen zwei ökonomische Untersuchungsszenarien im Fokus: (i) ein Treibstoffpreis von 0,3 €/kg und 40 €/h als VOT und (ii) ein Treibstoffpreis von 1,8 €/kg und 0 €/h als VOT. Diese beiden ökonomischen Untersuchungsszenarien führen hinsichtlich der ermittelten Flugzeug-Routen-Zuordnungen in Unterabschnitt 5.1.2 und den Bewertungsergebnissen in Unterabschnitt 5.1.3 jeweils zu den minimalen respektive maximalen Ergebnissen und werden daher als Einhüllende der anderen ökonomischen Untersuchungsszenarien angesehen (s. Tab. 5.2, Abb. 5.3 und Abb. 5.4).

Tabelle 5.3 zeigt, in Anlehnung an Abb. 5.4, die Veränderung der Bewertungsmetriken Anzahl Flugzeuge, Treibstoffverbrauch, DOC und Kostenwert beim Wechsel von Turbofan- zu Turboprop-Flugzeugentwurf bei Verwendung unterschiedlicher Einsatzszenarien. Neben den Ergebnissen für die Auslegungsmission, die Einzelmission und die Routennetzwerke von Lufthansa und easyJet sind zum Vergleich

auch die Ergebnisse der mit der in dieser Arbeit entwickelten Methodik ermittelten Routennetzwerke für den Turbofan- und den Turboprop-Entwurf angegeben (Unterabschnitt 5.1.3). Wenn die beiden für den Vergleich verwendeten ökonomischen Untersuchungsszenarien zu unterschiedlichen Ergebnissen führen, ist auch diese Unterscheidung angegeben.

Tab. 5.3: Veränderung der Bewertungsmetriken beim Wechsel von Turbofan- zu Turboprop-Flugzeugentwurf bei unterschiedlichen Einsatzszenarien

Bewertungs- metrik	Treibstoff- preis in €/kg	VOT in €/h	Turboprop- Netzwerk	Turbofan- Netzwerk	Auslegungs- mission	Einzel- mission	Lufthansa- netzwerk	easyJet- netzwerk
Distanz in km	0,3	40	651	1132	2778	500	722	2205
(Median)	1,8	0	1390	1470				
Δ Anzahl Flugzeuge	0,3	40	+4,2 %	+5,6 %	+7,6 %	+2,7 %	+4,8 %	+7,1 %
	1,8	0	+6,3 %	+6,5 %				
Δ Treibstoff- verbrauch	0,3	40	-25 %	-22 %	-23 %	-41 %	-30 %	-24 %
	1,8	0	-21 %	-20 %				
Δ DOC	0,3	40	-1,7 %	-0,9 %	+0,6 %	-2,9 %	-1,6 %	$\pm 0\%$
	1,8	0	-7,0 %	-6,9 %	-6,6 %	-9,7 %	-8,4 %	-7,0 %
Δ Kosten- wert	0,3	40	+9,2 %	+14 %	+15 %	+8,7 %	+10 %	+17 %
	1,8	0	-6,8 %	-6,7 %	-5,2 %	-6,4 %	-7,9 %	-6,5 %

Es ist zu erkennen, dass qualitativ alle Einsatzszenarien zu ähnlichen Aussagen führen: Der Wechsel von Turboprop- zu Turbofan-Flugzeugentwurf führt zu einem Mehrbedarf an Flugzeuginheiten, zu geringeren Treibstoffverbräuchen, je nach Treibstoffpreis zu unterschiedlich stark sinkenden DOC und je nach Treibstoffpreis und VOT zu einem niedrigeren oder höheren Kostenwert. Quantitativ existieren allerdings teils erhebliche Unterschiede. So wird beispielsweise die relative Veränderung in der Anzahl der benötigten Flugzeuge durch den Turboprop-Entwurf bei Verwendung der Einzelmission als Einsatzszenario (+2,7 %) nur ca. ein Drittel so groß bewertet wie bei Verwendung der Auslegungsmission (+7,6 %) und die relative Veränderung im Treibstoffverbrauch ca. doppelt so groß (-41 % für die Einzelmission, -23 % für die Auslegungsmission). Dies unterstreicht, dass die Verwendung einer einzelnen Routendistanz zur Flugzeugentwurfsbewertung zu sehr großen Unsicherheiten in den Bewertungsergebnissen führen kann.

Die Ergebnisse für die Lufthansa- und easyJet-Routennetzwerke zeigen geringere Unterschiede zueinander – trotz der sehr unterschiedlichen mittleren Einsatzdistanzen (722 km und 2205 km) –, da für beide Airlines eine große Bandbreite verschiedener Routendistanzen kombiniert und in den Ergebnissen gemittelt wird.

(vgl. Abb. 5.5a und Abb. 5.5b). Wie auch für die Auslegungs- und die Einzelmission existiert allerdings auch für die Lufthansa- und easyJet-Routennetzwerke keine Dynamik zwischen den Distanzen des Einsatzszenarios und den untersuchten Flugzeugentwürfen oder den ökonomischen Randbedingungen. Die Auslegungs- und Einzelmission sowie auch die Airline-Routennetzwerke stellen somit statische Untersuchungspunkte dar, welche punktuell gültige Ergebnisse liefern und für spezifische Fragestellungen von großer Bedeutung sein können. Für eine allgemeinere, globale Aussage über die Leistungsfähigkeit der untersuchten Flugzeugentwürfe sind insbesondere die Auslegungs- und Einzelmission allerdings ungeeignet. Aber auch mit dem Ansatz der Airline-Routennetzwerke können keine Aussagen darüber getroffen werden, inwieweit erstens ein Turboprop-Flugzeug von Airlines anders eingesetzt werden würde als ein Turbofan-Flugzeug und wie zweitens dies die ökonomische Bewertung beeinflusst. Das entwickelte Modell der Flugzeug-Routen-Zuordnung im globalen LTS adressiert genau diese Nachteile, indem erstens die modellierten Untersuchungsszenarien allgemeiner gültig sind (globale Daten und keine manuelle Vorauswahl von Routen(-netzwerken)) und zweitens die Dynamik zwischen Einsatzdistanzverteilung, Flugzeugleistungsfähigkeit und den ökonomischen Randbedingungen erfasst wird.

5.2 Markteinführung eines Mittelstreckenflugzeugs

Die Übereinstimmung der Auslegungspunkte und der Einsatzprofile der Flugzeugtypen im LTS beeinflusst die Effizienz des Flugbetriebs (*Martinez-Val et al.*, 2011; *Yutko*, 2014). Während für die Kurz- und Langstrecke eine Vielzahl an modernen, dedizierten Flugzeugtypen für die Airlines zur Verfügung steht, existiert auf der Mittelstrecke seit dem Auslaufen der zivilen Produktion der Boeing 757 und 767 in den Jahren 2005 und 2014 kein aktuelles Flugzeugprogramm (*Wöhler et al.*, 2018; *Cirium*, 2022). Folglich setzten Airlines – abseits der noch verfügbaren, alternden Mittelstreckenflugzeuge¹² – entweder kleinere Flugzeugtypen, wie die der Airbus A320- oder Boeing 737-Familien, auf der Mittelstrecke ein, oder sie nutzen Langstreckenflugzeuge, wie die der Airbus A330- oder Boeing 787-Familien (*Desai et al.*, 2019). Einerseits führt dies insbesondere in letzterem Fall dazu, dass die verwendeten Flugzeuge deutlich abseits ihres Auslegungspunkts eingesetzt werden, sodass im Vergleich zu einem dedizierten Mittelstreckenflugzeug zusätzliche Ineffizienzen hinsichtlich Treibstoffverbrauch, Betriebskosten und Emissionen entstehen (*Kühlen et al.*, 2023). Andererseits führt jeder zusätzliche Flugzeugtyp im Angebot der Hersteller und in den Flotten der Airlines anteilig zu höheren Betriebskosten,

¹²Ende 2019 waren noch 750 Flugzeuge der Boeing 757- und 767-Familien mit einem mittleren Alter von 21,0 Jahren im zivilen Passagierbetrieb; Ende des Jahres 2023 noch deren 459 mit einem mittleren Alter von 24,8 Jahren (*Cirium*, 2022).

abseits der Treibstoffkosten, da herstellerseitig zusätzliche Entwicklungs- und Industrialisierungskosten anfallen, die sich betreiberseitig im Kaufpreis und schlussendlich in den Kapitalkosten niederschlagen (Clark, 2017). Zusätzlich nimmt betreiberseitig ggf. die Komplexität in der Planung des Flugbetriebs zu und die Kosten für MRO und Personal, da mehr vorrätige Ersatzteile und mehr flugzeugtypsspezifische Ausbildung des Personals erforderlich sind (Brüggen und Klose, 2010; Clark, 2017). Aufgrund dieses komplexen Zusammenhangs und der daraus resultierenden ökonomischen wie ökologischen Implikationen wird das Mittelstreckensegment in der wissenschaftlichen Literatur, z. B. in Jansen und Perez (2019); Linke et al. (2020); Grimme et al. (2021); Silberhorn et al. (2022); Wöhler et al. (2022), diskutiert.

Um die Angebotslücke im Mittelstreckensegment in Zukunft zu beheben, verfolgen die beiden Flugzeughersteller Airbus und Boeing unterschiedliche Strategien. Während Airbus zwei neue Untervarianten der A320-Familie, die A321LR und A321XLR, mit Zusatztanks und vergrößerter Reichweite von bis zu 8700 km seit 2018 bzw. 2024 zur Auslieferung anbietet (Airbus, 2023), untersuchte Boeing laut Medienberichten zwischen 2015 und 2022 den Entwurf eines gänzlich neuen Mittelstreckenflugzeugs, ohne das weitere Vorgehen diesbezüglich öffentlich bekanntzugeben (The Seattle Times, 2015; Reuters, 2020; Bloomberg, 2022).

Das Ziel der nachfolgenden Untersuchung ist es, zu bewerten, inwieweit ein neues Mittelstreckenflugzeug bei Markteinführung die Einsatzbereiche bestehender sowie neuer Flugzeugtypen beeinflusst und wie groß die zu erwartenden Treibstoffeinsparungen sind. Hierzu wird das Modell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung verwendet, um Einsatzszenarien für das untersuchte, neue Mittelstreckenflugzeug zu identifizieren und die mögliche Verschiebung in den Einsatzszenarien anderer Flugzeugtypen zu quantifizieren. Auch wird eine vereinfachende ökonomische Betrachtung aus Airline-Sicht durchgeführt. Durch den Einsatz verschiedener Flottenszenarien wird der Einfluss des Auslegungspunktes des untersuchten Mittelstreckenflugzeuges im Vergleich zu Verbesserungen durch Technologieentwicklung hervorgehoben.

Nachfolgend wird in Unterabschnitt 5.2.1 zuerst das Untersuchungsszenario mit- samt der betrachteten Flottenszenarien und der getroffenen Annahmen beschrieben. Im Anschluss wird in Unterabschnitt 5.2.2 die Flugzeug-Routen-Zuordnung vorgestellt. Aus dieser resultieren die Einsatzszenarien für die in Unterabschnitt 5.2.3 durchgeführte Ergebnisauswertung. Ein Vergleich der so erzielten Ergebnisse mit solchen anderer Bewertungsansätze (in Analogie zu Abschnitt 5.1) ist nicht zielführend, da die im Fokus stehende Verschiebung in den Einsatzszenarien anderer Flugzeugtypen von den in Abschnitt 5.1 für einen solchen Vergleich herangezogenen Bewertungsansätzen nicht erfasst werden kann.

5.2.1 Untersuchungsszenario

Das Untersuchungsszenario wird, in Übereinstimmung mit Unterabschnitt 5.1.1, gebildet durch sämtliche Annahmen, welche die ermittelten Ergebnisse beeinflussen. Im Kern umfasst dies die betrachteten Flugzeugentwürfe, das verwendete Luftverkehrsszenario, insbesondere die Flottenszenarien, sowie die ökonomischen Randbedingungen.

(a) Flugzeugentwürfe

Die im betrachteten Untersuchungsszenario berücksichtigten Flugzeugentwürfe entsprechen im Wesentlichen denen aus Kühlen *et al.* (2023): Für den Neuentwurf eines Mittelstreckenflugzeugs wird das Referenzflugzeug *ARB2028* aus Hartmann *et al.* (2018), Wöhler *et al.* (2018) und Lange (2019) verwendet. Dieses verfügt bei 257 angebotenen Sitzplätzen in einer Zwei-Klassen-Konfiguration und einer Reiseflugmachzahl von 0,83 über eine Reichweite von 8520 km (Hartmann *et al.*, 2018). Für andere zukünftige Flugzeugtypen (vgl. (b) *Luftverkehrsszenario*) wird ausgehend von ihren Vorgängerflugzeugen bei identischem Auslegungspunkt eine inkrementelle Treibstoffverbesserung basierend auf einer jährlichen Verbesserungsrate von 1,3 % angenommen (Lee *et al.*, 2001; Kharina und Rutherford, 2015).¹³ Um ein stimmiges Gesamtszenario hinsichtlich des Technologieniveaus und der damit einhergehenden Treibstoffeffizienz der verschiedenen Flugzeugentwürfe zu erhalten, wird der Treibstoffverbrauch des *ARB2028*-Entwurfs, wie in Kühlen *et al.* (2023) begründet, um 8 % angehoben. Die sonstigen Charakteristiken der Bestandsflotte entsprechen denen der Modellierung aus Kapitel 4 und können gemeinsam mit weiteren Daten zu den zusätzlichen Flugzeugentwürfen den Tabellen A.1 bis A.3 in Anhang A.1 entnommen werden.

(b) Luftverkehrsszenario

Das für die Untersuchung der Einführung eines neuen Mittelstreckenflugzeuges verwendete Luftverkehrsszenario basiert auf Annahmen zu dem Routennetzwerk, dem Sitzplatzangebot auf den Routen, der Flugzeugflotte sowie den Flughafenkapazitäten. Das Routennetzwerk, das Sitzplatzangebot und die Flughafenkapazitäten entsprechen denen aus Unterabschnitt 5.1.1. Das Untersuchungsjahr ist 2040. Für die Flugzeugflotte werden vier verschiedene Szenarien untersucht:

Szenario 1: Zwischen 2019 und 2040 werden keine weiteren Flugzeugtypen zusätzlich zu denen in der Bestandsflotte aus 2019 eingeführt. Das Flottenwachstum in diesem Zeitraum wird durch die Produktion von sechs Flugzeugtypen abgedeckt; einem Flugzeugtyp pro im Gesamtmodell enthaltener

¹³Beispielhafte Technologien, um diese durchschnittliche jährliche Verbesserungsrate zu erreichen, sind u. a. der vermehrte Einsatz von Verbundwerkstoffen, die Erhöhung der Flügelstreckung, die Einführung von Triebwerken mit sehr hohem Nebenstromverhältnis oder die Verwendung von Laminarhaltung (Abbas *et al.*, 2013; Kharina und Rutherford, 2015; Kellari *et al.*, 2017; Bravo *et al.*, 2022).

Sitzplatz- und Reichweitenkategorie.¹⁴ Szenario 1 stellt somit das Basiszenario ohne zusätzliche Veränderungen dar.

Szenario 2: In 2028 werden zwei neue Flugzeugtypen für die Kurzstrecke (*A321neo-suc*) und für die Langstrecke (*A350-900-suc*) als direkte Nachfolger der bestehenden Flugzeugtypen eingeführt. Zeitgleich endet die Produktion der Vorgängerflugzeuge sowie der Boeing 787-8, für die kein Nachfolgeflugzeug eingeführt wird. Szenario 2 ist somit ein Vergleichsszenario, in dem der Mittelstreckenmarkt nach 2028 vermehrt durch Kurz- und Langstreckenflugzeuge bedient werden muss.

Szenario 3: Zusätzlich zu den beiden neuen Flugzeugtypen für die Kurz- und Langstrecke aus Szenario 2 wird im Jahr 2028 eine aktualisierte Variante der Boeing 787-8 eingeführt (*B787-8-suc*). Szenario 3 stellt somit ein Vergleichsszenario dar, in dem der Auslegungspunkt eines neuen Mittelstreckenflugzeugs dem der bestehenden Boeing 787-8 entspricht.

Szenario 4: Zusätzlich zu den beiden neuen Flugzeugtypen für die Kurz- und Langstrecke aus Szenario 2 wird im Jahr 2028 das Mittelstreckenflugzeug (*ARB2028*) eingeführt. Szenario 4 ist somit das hauptsächliche Untersuchungsszenario, dessen Performanz durch den Vergleich mit den Szenarien 1, 2 und 3 quantifiziert werden soll.

In den vier Flottenszenarien sind die Summe der in der Flotte befindlichen Sitzplätze (ca. 8,21 Millionen), die durchschnittliche Anzahl an Sitzplätzen pro Flugzeug (248) sowie das durchschnittliche Alter der Flugzeugeinheiten (10,43) identisch, um den Einfluss des zu untersuchenden Effekts der Übereinstimmung von Auslegungspunkt und Flugzeug-Routen-Zuordnung bestmöglich zu isolieren. Die detaillierte Flottenzusammensetzung der verschiedenen Szenarien kann Tab. B.3 in Anhang B.3 entnommen werden. Das starke Wachstum der durchschnittlichen Sitzplatzanzahl pro Flugzeug von 196 in 2019 auf 248 in 2040 ist hierbei ein Resultat aus dem erwarteten starken Wachstum der Passagiernachfrage bei nur begrenztem Wachstum der Flughafenkapazitäten zwischen 2019 und 2040 (*Gelhausen et al.*, 2020, 2022).

(c) ökonomische Randbedingungen des Flugbetriebs

Die ökonomischen Randbedingungen des Flugbetriebs für die Bewertung der Einführung eines neuen Mittelstreckenflugzeuges umfassen den Treibstoffpreis, welcher für 2040 zu 0,618 €/kg angenommen wird (*U.S. Energy Information Administration*, 2023a), sowie die Passagierpräferenzen, welche gemäß der Modellkalibrierung (Zeitraum 2010–2019) aus Abschnitt 4.4 angenommen werden. Die Betriebskosten werden gemäß der Definition in Unterabschnitt 4.3.1 berechnet.

¹⁴Konkret sind dies die Flugzeugtypen E190-E2, A320neo, A321neo, B787-8, A350-900 und B777-9.

5.2.2 Flugzeug-Routen-Zuordnung

Der Vergleich der Flugzeug-Routen-Zuordnungen der verschiedenen Flottenszenarien verdeutlicht, wie das neu eingeführte Mittelstreckenflugzeug eingesetzt wird und wie die anderen neu eingeführten oder bereits bestehenden Flugzeugtypen darauf reagieren. Zusätzlich stellt die mit dem in dieser Arbeit entwickelten Modell ermittelte globale Flugzeug-Routen-Zuordnung die Grundlage für die anschließende ökonomische Auswertung dar.

Abbildung 5.6 visualisiert die Einsatzdistanzverteilungen sieben verschiedener Flugzeugtypen jeweils als Histogramm (linke Ordinate) sowie als kumulierten Verlauf (rechte Ordinate). In Abb. 5.6a und Abb. 5.6b sind die Einsatzdistanzverteilungen des Kurzstreckenflugzeugtyps A321neo und des in den Szenarien 2, 3 und 4 nachfolgenden Flugzeugtyps A321neo-suc dargestellt. Beide Flugzeugtypen werden auf Distanzen bis zu ca. 4500 km eingesetzt, wobei die Modi im Bereich von 1000 km bis 1250 km liegen und die Mediane bei ca. 1500 km. Während die Histogramme für beide Flugzeugtypen geringfügige, zufällige Unterschiede zwischen den verschiedenen Flottenszenarien zeigen, verdeutlichen die kumulierten Verläufe, dass es weder zwischen den verschiedenen Szenarien noch zwischen dem Vorgänger (A321neo) und dem Nachfolger (A321neo-suc) systematische Unterschiede in den Einsatzdistanzverteilungen gibt. In Abb. 5.6c ist die Einsatzdistanzverteilung des Flugzeugtyps B787-8 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Einsatzprofil der B787-8 in Szenario 1 und 3 sehr ähnlich ist, während der Flugzeugtyp in Szenario 2 und insbesondere in Szenario 4 vermehrt, statt auf kurzen Routen, auf längeren Routen im Bereich von 5000 km bis 9000 km (Szenario 2) bzw. von 8500 km bis 13 500 km (Szenario 4) eingesetzt wird. Hinsichtlich Szenario 2 ist dies darin begründet, dass neue, insgesamt effizientere Flugzeugtypen für die Kurz- und Langstrecke verfügbar sind und zusätzlich die Kapazitäten der in 2028 endenden Produktion der B787-8 zugunsten dieser neuen Flugzeugtypen eingesetzt werden. In der Folge gibt es in Szenario 2 mehr und effizientere dedizierte Kurz- und Langstreckenflugzeuge, sodass die B787-8 zunehmend in das Mittelstreckensegment verdrängt wird, da der Flugzeugtyp hier im relativen Vergleich zu den anderen Flugzeugtypen der Flotte die beste Effizienz aufweist. Hinsichtlich Szenario 4 ist die Verschiebung der Einsatzdistanzverteilung der B787-8 durch das zusätzlich zu den neuen Kurz- und Langstreckenflugzeugen eingeführte neue Mittelstreckenflugzeug ARB2028 begründet. Dieses wird hauptsächlich auf Routen der Kurz- und Mittelstrecke eingesetzt (s. Abb. 5.6d) und verdrängt somit in diesem Distanzbereich die B787-8. In der Folge wird die B787-8 vermehrt im Langstreckensegment eingesetzt.

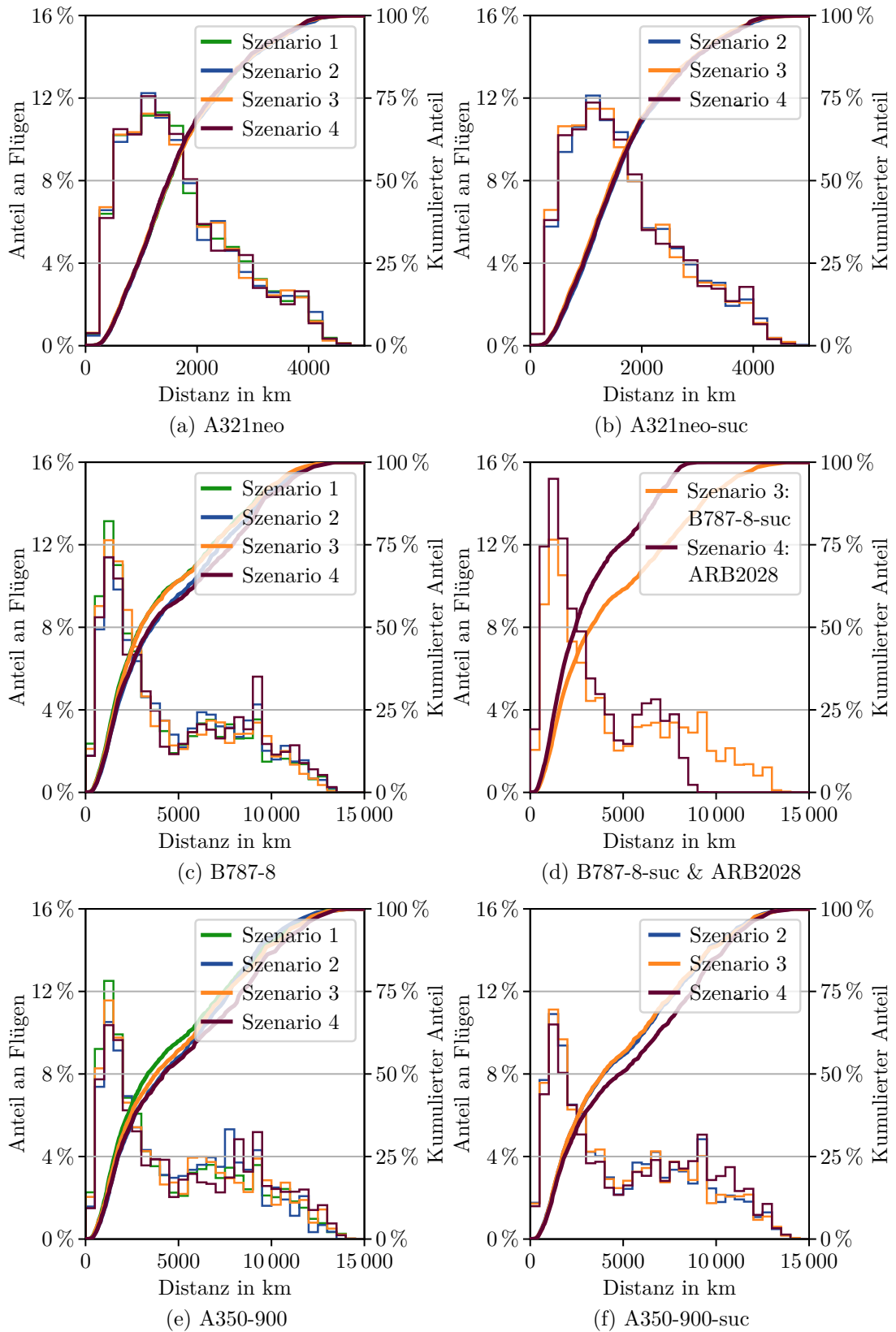


Abb. 5.6: ASK-gewichtete Einsatzdistanzverteilungen unterschiedlicher Flugzeugtypen in den untersuchten Szenarien

Der Vergleich der Einsatzdistanzverteilungen der Flugzeugtypen B787-8-suc und ARB2028 aus Szenario 3 und 4 in Abb. 5.6d unterstreicht die Bedeutung der Auslegungsdistanz für die Einsatzdistanzverteilungen. Beide Flugzeugtypen verfügen über ein identisches Technologieniveau, eine nahezu identische Anzahl an Sitzplätzen (259 bzw. 257) und in ihren jeweiligen Szenarien einen identischen Anteil an dem Sitzplatzangebot der gesamten Flugzeugflotte. Dennoch unterscheiden sich die Einsatzdistanzverteilungen aufgrund der Reichweiteigenschaften erheblich: Das Mittelstreckenflugzeug ARB2028 wird im Median auf Routen mit ca. 2450 km eingesetzt und zu 80 % auf Routen im Bereich von 850 km bis 6850 km; der Flugzeugtyp B787-8-suc wird im Median auf Routen mit ca. 3250 km eingesetzt und zu 80 % auf Routen im Bereich von 950 km bis 9600 km. In Abb. 5.6e und Abb. 5.6f sind die Einsatzdistanzverteilungen des Langstreckenflugzeugtyps A350-900 und des in den Szenarien 2, 3 und 4 nachfolgenden Flugzeugtyps A350-900-suc dargestellt. Es wird deutlich, dass beide Flugzeugtypen durch die Einführung des neuen Mittelstreckenflugzeugs (Szenario 4) vermehrt auf längeren Routen eingesetzt werden; der Median der Einsatzdistanzen verschiebt sich um bis zu 900 km. Im Gegensatz dazu hat die Einführung des Flugzeugtyps B787-8-suc (Szenario 3) nur einen geringfügigen Einfluss auf die Einsatzdistanzen des Flugzeugtyps A350-900 und keinen wesentlichen Einfluss auf die Einsatzdistanzen des Flugzeugtyps A350-900-suc.

5.2.3 Ergebnisauswertung

Basierend auf den im vorherigen Unterabschnitt 5.2.2 vorgestellten Flugzeug-Routen-Zuordnungen der verschiedenen Flottenszenarien erfolgt nachfolgend eine distanzabhängige sowie aggregierte Auswertung hinsichtlich der Metriken durchschnittliche Sitzplatzanzahl pro Route sowie Treibstoffverbrauch, DOC und Kostenwert. Der Kostenwert beschreibt hierbei, wie bereits in Unterabschnitt 5.1.3, vereinfachend das Umsatzpotential der Flugzeug-Routen-Zuordnung als gewichtete Summe aus DOC, Schedule Delay (Wert von Flugfrequenzen) und der zusätzlich benötigten Blockzeit (VOT).

Abbildung 5.7 zeigt die distanzabhängige Auswertung der Einsatzszenarien. Routen ähnlicher Distanz werden hierbei, in Analogie zu der Klassenaufteilung der Daten in den Histogrammen der Abb. 5.6, zusammengefasst, sodass Datenpunkte mit einer Schrittweite von 500 km resultieren. Da mit zunehmender Distanz immer weniger Routen pro Datenpunkt zusammengefasst werden, wird der Einfluss einzelner Datenausreißer und folglich das Rauschen der visualisierten Daten zunehmend größer. Auf der Ordinate sind jeweils die relativen Veränderungen im Vergleich zu Szenario 2 aufgetragen, welches mit der Einführung eines neuen Kurz- und eines neuen Langstreckenflugzeugs als Referenz dient.

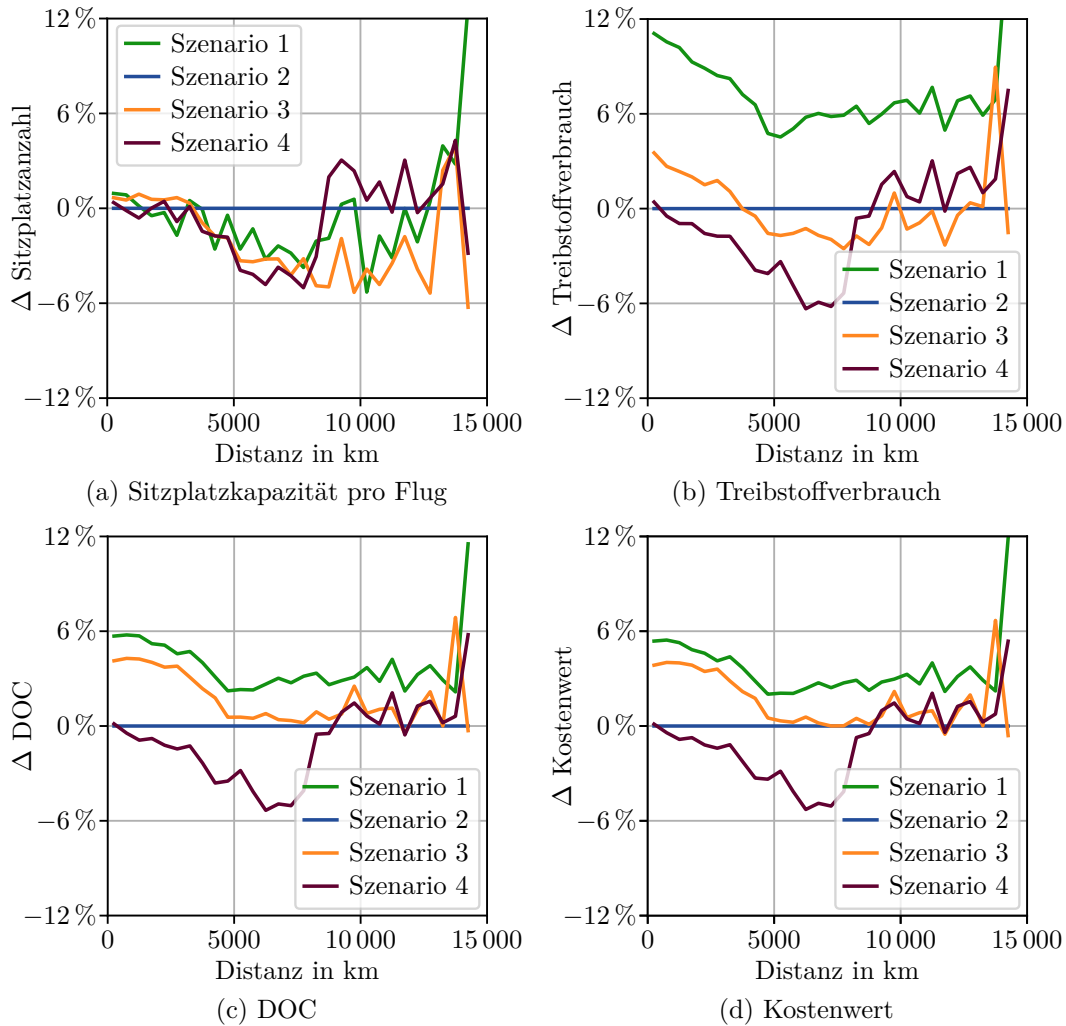


Abb. 5.7: Distanzabhängige Auswertung der Einsatzszenarien hinsichtlich der Sitzplatzkapazität pro Flug, des Treibstoffverbrauchs, der DOC und des Kostenwerts

In Abb. 5.7a ist die Abweichung der durchschnittlichen Sitzplatzanzahl pro Routenkategorie im Vergleich zu Szenario 2 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass auf Routen bis ca. 4000 km alle vier Szenarien ähnlich große Flugzeugtypen einsetzen. Auf längeren Flugrouten lassen Szenario 1 und 3 im Vergleich zu Szenario 2 bis zu 5 % kleinere Sitzplatzanzahlen erkennen. Szenario 4 zeigt bis zu 5 % kleinere Sitzplatzanzahlen im Bereich von 4000 km bis 8000 km und ca. 1 % größere Sitzplatzanzahlen jenseits der 8000 km.

Die Unterschiede im Treibstoffverbrauch der verschiedenen Szenarien sind in Abb. 5.7b dargestellt. Es ist erkennbar, dass in Szenario 1 der Treibstoffverbrauch am höchsten ist, mit einem Mehrverbrauch je nach Distanzbereich von 6 % bis 11 % im Vergleich zu Szenario 2. Dies ist wenig überraschend, da in Szenario 1 keinerlei neue Flugzeugtypen eingeführt werden. Für Szenario 3 wird im Vergleich zu Szenario 2 auf kurzen Routen mehr Treibstoff verbraucht und im Bereich von 4000 km bis 9000 km liegen Treibstoffeinsparungen von ca. 2 % vor. Dies ist stimmig zum

Flottenszenario, da in Szenario 3 durch die Einführung der B787-8-suc weniger Einheiten neuer Kurzstreckenflugzeuge zur Verfügung stehen als in Szenario 2, stattdessen aber von der höheren Treibstoffeffizienz der B787-8-suc im mittleren Reichweitensegment im Vergleich zum in Szenario 2 vermehrt eingeführten neun Langstreckenflugzeug profitiert wird. Für Szenario 4 ist eine von ca. 0 % bis auf 6 % zunehmende Treibstoffersparnis für Routen bis ca. 7500 km zu erkennen, welche direkt aus der Einführung des neuen Mittelstreckenflugzeugs resultiert. Für größere Routen liegt ein um ca. 2 % größerer Treibstoffverbrauch als in Szenario 2 vor, da weniger Einheiten des neuen Langstreckenflugzeugs in Szenario 4 enthalten sind.

Die in Abb. 5.7c dargestellten Veränderungen der DOC zeigen, dass die Szenarien 1 und 3 nahezu im gesamten Distanzbereich zu höheren DOC führen. Die Unterschiede zwischen Szenario 1 und 2 sind allerdings weniger deutlich als beim Vergleich der Treibstoffverbräuche. Allerdings ist Szenario 2, ähnlich wie beim Treibstoffverbrauch, besonders auf kurzen Distanzen vorteilhaft, da in Szenario 2 mehr Einheiten des neuen Kurzstreckenflugzeugs zur Verfügung stehen. Im Gegensatz zu den Szenarien 1 und 3 führt Szenario 4 übereinstimmend mit den Treibstoffeinsparungen auf weiten Teilen des Distanzbereichs auch zu Einsparungen in den DOC. Im Bereich des Kurz- und Mittelstreckensegments betragen die Kosteneinsparungen bis zu 5 %, während im Langstreckensegment nur Kostensteigerungen im Vergleich zu Szenario 2 von ca. 1 % auftreten. Abbildung 5.7d für den Vergleich der Kostenwerte unterstreicht die Aussagen der Betrachtung der Veränderungen der DOC. Folglich ist auch hinsichtlich des Kostenwertes Szenario 4 in weiten Teilen des Distanzbereichs das vorteilhafte Szenario.

Tabelle 5.4 fasst die Treibstoffverbräuche, die DOC und die Kostenwerte jeweils pro ASK für die verschiedenen Szenarien zusammen. Die Werte für Szenario 2, welches erneut als Referenz dient, sind absolut angegeben. Für die anderen Szenarien sind jeweils die relativen Veränderungen im Vergleich zu Szenario 2 angegeben. Insgesamt unterstreichen die aggregierten Werte aus Tab. 5.4 hierbei die distanzabhängige Visualisierung aus Abb. 5.7. Da keine Unterschiede in der durchschnittlichen Flugzeuggröße oder den Reiseflugmachzahlen der eingesetzten Flugzeugtypen zwischen den verschiedenen Szenarien vorliegen, gibt es nur geringfügige Abweichungen zwischen den Ergebnissen für die DOC und die Kostenwerte. Der Vergleich der absoluten Werte für Szenario 2 mit den Werten zur Verifizierung aus Tab. 4.14 zeigt, dass in den untersuchten Szenarien für 2040 geringere Treibstoffverbräuche und DOC anfallen. Dies resultiert unmittelbar aus den Annahmen des Untersuchungsszenarios für die Technologie- und Flottenentwicklung, welche hinsichtlich der DOC auch den Anstieg des Treibstoffpreises von 0,317 €/kg in 2016 auf 0,618 €/kg in 2040 überkompensieren. Im Vergleich zu Szenario 2 zeigt Szenario 1 8,12 % höhere Treibstoffkosten und 4,70 % höhere DOC; eine direkte Konsequenz aus dem Einsatz neuer Kurz- und Langstreckenflugzeugtypen in

Szenario 2. Dennoch liegen auch die Ergebnisse von Szenario 1, welches keine neuen Flugzeugtypen beinhaltet, deutlich unterhalb der Werte zur Verifizierung aus Tab. 4.14. Dies unterstreicht, dass bereits die fortschreitende Flottendurchdringung der aktuellsten Flugzeugtypen (z. B. A320neo- und A350-Familie), wie sie in Szenario 1 auftritt, zu einer Reduzierung des Treibstoffverbrauchs führt (*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*, 2024). Die Annahmen für die Flugzeugflotte aus Szenario 3 führen zu einer Erhöhung des Treibstoffverbrauchs und der DOC um 0,74 % respektive 3,12 %. Hierdurch wird deutlich, dass die zusätzliche Einführung des Flugzeugtyps B787-8-suc in Szenario 3 zu keinen Vorteilen führt. Einzig Szenario 4, in dem das neue dedizierte Mittelstreckenflugzeug eingeführt wird, führt hinsichtlich Treibstoffverbrauch, DOC und Kostenwert zu besseren, da niedrigeren Werten als Szenario 2.

Tab. 5.4: Vergleich der Auswertung der untersuchten Flottenszenarien hinsichtlich verschiedener Metriken

Szenario	Treibstoff- verbrauch pro ASK	DOC pro ASK	Kostenwert pro ASK
2	0,0186 kg	0,0576 €	0,0627 €
Relative Veränderung			
1	8,12 %	4,70 %	4,37 %
3	0,74 %	3,12 %	2,92 %
4	−1,54 %	−1,18 %	−1,14 %

Insgesamt zeigt die Untersuchung der Markteinführung eines neuen Mittelstreckenflugzeugs, dass bei identischer Flottenerneuerung und identischem Technologieniveau durch die verbesserte Übereinstimmung von Auslegungs- und Betriebspunkten in der Flugzeug-Routen-Zuordnung eine geringfügige Reduzierung des Treibstoffverbrauchs und der DOC von 1 % bis 2 % im LTS erreicht werden kann. Einerseits sind dies kleine relative Verbesserungen, andererseits beziehen sich die kleinen relativen Verbesserungen auf das gesamte LTS, sodass ihnen dennoch nennenswerte absolute Einsparungen gegenüberstehen. So belaufen sich die Treibstoffeinsparungen in Szenario 4 im Vergleich zu Szenario 2 auf ca. 5,3 Mio. t pro Jahr und die Einsparungen in den DOC auf ca. 12,6 Mrd. € pro Jahr. Insbesondere die Kostensicht ist jedoch stark vereinfacht, da die bereits in der Einleitung zu Abschnitt 5.2 beschriebenen potentiellen Mehrkosten für Hersteller und Betreiber bei Einführung eines zusätzlichen Flugzeugtyps nicht berücksichtigt sind. Außerdem sind aufgrund der Vielzahl an getroffenen Annahmen in der Modellierung sowie im Untersuchungsszenario, etwa hinsichtlich des Treibstoffpreises, der Technologieverbesserungen sowie der Nachfrage- und Flottenentwicklung, die konkreten Ergebniswerte mit zusätzlichen Unsicherheiten behaftet und dementsprechend mit Bedacht zu interpretieren. In einer Erweiterung des vorgestellten Anwendungsfalls könnten diese Unsicherheiten, analog zum Vorgehen in *Kühlen*

et al. (2023), z. B. durch eine Sensitivitätsanalyse quantifiziert werden. Unabhängig von dieser möglichen Erweiterung unterstreichen die vorgestellten Ergebnisse (i) die Dynamik des entwickelten Modells der Flugzeug-Routen-Zuordnung sowie dessen Anwendbarkeit auf eine komplexe und relevante Fragestellung, welche Interaktionen zwischen diversen Flugzeugtypen beinhaltet, und (ii) das grundsätzliche Potential, durch ein neues Mittelstreckenflugzeug und die daraus resultierende verbesserte Übereinstimmung von Auslegungs- und Betriebspunkten die Effizienz im LTS zu steigern.

6. Diskussion

In diesem Kapitel erfolgt die Diskussion der in den vorherigen Kapiteln erzielten Ergebnisse. Zuerst wird eine übergeordnete Interpretation der Ergebnisse (Abschnitt 6.1) vorgenommen, wobei insbesondere im Fokus steht, inwieweit aus den vorgestellten Ergebnissen die Erfüllung der Zielsetzung sowie die Beantwortung der Forschungsfrage (Abschnitt 1.2) hervorgeht. Anschließend erfolgt in Abschnitt 6.2 ein Vergleich der in dieser Arbeit präsentierten Modellformulierung mit der bereits vorab in einer wissenschaftlichen Fachzeitschrift veröffentlichten Modellformulierung aus Kühlen *et al.* (2022). Abschließend wird in Abschnitt 6.3 aus den in dieser Arbeit präsentierten Ergebnissen weiteres Verbesserungs- und Anwendungspotential abgeleitet.

6.1 Interpretation der Ergebnisse

Mit dem Ziel herauszufinden, inwieweit die modellhafte Beschreibung des Flugzeugeinsatzes im globalen LTS für die Bewertung neuer Flugzeugentwürfe samt ihrer Auswirkungen auf das LTS verwendet werden kann, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Modell der Flugzeug-Routen-Zuordnung im globalen LTS entwickelt.

Die Verifizierung und Validierung des entwickelten Modells (Abschnitt 4.6) zeigen, dass der verfolgte Modellierungsansatz eines airlineübergreifenden mathematischen Optimierungsmodells grundsätzlich geeignet ist, um die Flugzeug-Routen-Zuordnung im globalen LTS zu erfassen. Zum einen erfüllt der gewählte und ausgestaltete Modellierungsansatz vollständig die Anforderungen an die Modelleigenschaften, welche aus dem erwarteten Einsatzbereich des entwickelten Modells resultieren (Unterabschnitt 4.6.4). Zum anderen liegen die verbleibenden Abweichungen in den für die Abbildungsqualität relevanten flugzeugtypspezifischen, routenkategoriespezifischen und flughafenspezifischen Metriken (Unterabschnitt 3.1.2) beim Vergleich von Modellergebnissen und historischen Vergleichsdaten zumeist in einem Bereich, der als akzeptabel für die Aussagekraft des Modells angesehen wird. So belaufen sich die routenkategoriespezifischen Abweichungen der durchschnittlichen Sitzplatzanzahl pro Flug auf $< 5\%$ und die flughafenspezifischen Abweichungen in den täglichen Flugbewegungen auf 9% bis 13% . Die Abweichungen in den für die Bewertung von Flugzeugentwürfen besonders relevanten flugzeugtypspezifischen Verteilungen der Einsatzdistanzen betragen nach

Wasserstein-Metrik ca. 12 % bis 13 % des ASK-gewichteten Mittelwerts der historischen Daten (Abb. 4.16a). Dies entspricht in absoluten Werten je nach Flugzeugtyp wenigen Hundert Kilometern. Unter Berücksichtigung, dass i. d. R. sowohl die Auslegungsdistanzen der Flugzeugtypen als auch die Spannweite der Verteilungen ihrer Einsatzdistanzen mehrere Tausend Kilometer betragen (s. Abb. 1.2 und Abb. 4.14a), sind Abweichungen nach Wasserstein-Metrik von wenigen Hundert Kilometern akzeptabel, um flugzeugtypspezifische Einsatzdistanzverteilungen, z. B. für die Bewertung von Flugzeugentwürfen, zu bestimmen. Mit ähnlicher Argumentation sind auch die Abweichungen im Bereich von 18 % bis 23 % in den flugzeugtypspezifischen Verteilungen der Sitzplatzkapazitäten der Routen, auf denen die jeweiligen Flugzeugtypen eingesetzt werden, zu erklären, da die Spannweite der historischen Vergleichswerte mehrere Größenordnungen umfasst (vgl. Abb. 4.14b).

Die Verwendung des entwickelten Modells zur Untersuchung der zwei vorgestellten Anwendungsfälle (Kapitel 5) unterstreicht, dass das Modell hilfreiche Ergebnisse zur Untersuchung neuer Flugzeugentwürfe liefert. Beim Vergleich zweier Kurzstreckenflugentwürfe mit identischer Auslegungsmission, aber unterschiedlicher Triebwerksbauart (Abschnitt 5.1), ergeben sich aus den unterschiedlichen Flugleistungscharakteristiken der beiden untersuchten Flugzeugentwürfe verschiedene Einsatzszenarien. Diese werden zusammen mit den im Gesamtmodell enthaltenen ökonomischen Bewertungsmetriken für die Bewertung der Flugzeugentwürfe verwendet. Der Mehrwert des entwickelten Modells liegt hierbei insbesondere in zwei Punkten. Erstens werden für die untersuchten Flugzeugentwürfe flugleistungsspezifische Einsatzszenarien bestimmt, wobei auch ökonomische Randbedingungen sowie die Luftverkehrsszenarien, in denen die Flugzeugentwürfe operieren, berücksichtigt werden. Zweitens werden durch die resultierenden Einsatzdistanzverteilungen diverse Betriebspunkte, insbesondere abseits des Auslegungspunkts, aggregiert. In der Folge stellen die ermittelten Einsatzszenarien eine gleichermaßen realitätsnahe wie umfangreiche Bewertungsgrundlage dar, welche über die in der Literatur beschriebenen Verfahren zur Berücksichtigung von Einsatzszenarien bei der Bewertung von Flugzeugentwürfen hinausgeht (vgl. Unterabschnitt 2.1.3 und Unterabschnitt 5.1.4). Bei der Bewertung der potentiellen Markteinführung eines neuen Mittelstreckenflugzeugs (Abschnitt 5.2) liegt der Fokus auf der Ermittlung und Bewertung der Leistungsfähigkeit der Gesamtflotte im globalen LTS in Abhängigkeit von der Flottenzusammensetzung. Der Mehrwert des entwickelten Modells besteht hierbei insbesondere darin, ganzheitlich die Flugzeug-Routen-Zuordnung für alle Flugzeugtypen in der globalen Flotte zu bestimmen (Bestandsflotte und neue szenarienspezifische Flugzeugtypen) und dabei die Abhängigkeiten sowohl von der Flottenzusammensetzung als auch von den Flugleistungscharakteristiken zu berücksichtigen. Durch den Vergleich mit einem Referenzszenario, z. B. einem Luftverkehrsszenario mit ausschließlich der Bestandsflotte, werden so Verdrängungseffekte in der Flugzeug-Routen-Zuordnung ersichtlich, wie sie mit den in

der Literatur beschriebenen statistischen Modellen der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung (Unterabschnitt 2.2.3) nicht abzubilden sind.

Durch den gewählten Modellierungsansatz für das entwickelte Modell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung entstehen allerdings auch Limitationen für die Anwendbarkeit und die erreichbare Modellgüte. Diese Limitationen beziehen sich einerseits auf die Abbildung regionaler und lokaler Effekte sowie andererseits auf die zeitliche Auflösung der Flugzeug-Routen-Zuordnung. Wie in den Validierungsergebnissen für die Modellgüte des entwickelten Modells beschrieben (Unterabschnitt 4.6.2) werden durch den globalen und airlineübergreifenden Modellierungsansatz etwaige Einflüsse von einzelnen Airlines oder regionale Besonderheiten auf die Flugzeug-Routen-Zuordnung in Teilen nicht erfasst. Dies zeigt sich z. B. in den ermittelten Einsatzdistanzen von Flugzeugtypen, welche nur von wenigen Airlines eingesetzt werden (vgl. Flugzeugtyp Boeing 767-400, welcher nur von *United Airlines* und *Delta Air Lines* betrieben wird, in Abb. 4.14a), oder in der ermittelten Anzahl an Flugbewegungen an Flughäfen, welche als Hub einer Airline maßgeblich durch die airlinespezifischen Besonderheiten der Flottenzusammensetzung beeinflusst werden (vgl. Flughafen DXB als Hub von *Emirates* in Abb. 4.17a).

Hinsichtlich der zeitlichen Auflösung werden in dem entwickelten Modell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung ausschließlich jährlich aggregierte Flugpläne betrachtet. In der Folge wird der zeitliche Verlauf der angebotenen Sitzplatzkapazität auf einer Route, sowohl saisonal als auch tageszeitlich, nicht berücksichtigt. Zum einen ist das entwickelte Modell hierdurch für Anwendungsfälle, welche die globale Flugzeug-Routen-Zuordnung in deutlich kleineren als jährlichen Intervallen fokussieren, nicht zielführend. Dies umfasst auch die Betrachtung von zeitlich fixierten Einzelflügen mit Start- und Ankunftsuhzeiten, wie sie für die der Flugplanerstellung nachgelagerten Flugzeug-Routen-Zuordnung einer einzelnen Airline üblich ist. Zum anderen können saisonale und tageszeitliche Effekte in der Flugzeug-Routen-Zuordnung (z. B. der saisonale Einsatz von größeren Flugzeugen auf touristischen Flugrouten oder der Einsatz von größeren Flugzeugen am Morgen und Abend auf Flugrouten mit vermehrtem Geschäftsreiseverkehr) nicht explizit modelliert werden. Implizit werden solche Effekte vereinfachend als Teil der Submodelle der Passagierattraktivität (Unterabschnitt 4.3.7) sowie des Airline-Wettbewerbs (Unterabschnitt 4.3.8) erfasst: Bei der Berechnung der Schedule Delays, welcher die Attraktivität hoher Flugfrequenzen aus Passagiersicht in das Modell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung einbindet, wird für saisonale Flugrouten als Referenzzeitraum $\Delta t_{o,d}$ nicht das gesamte Jahr verwendet, sondern ausschließlich der Zeitraum, in dem die Flugroute angeboten wird (s. Gl. (4.53)). Bei der Modellierung des Airline-Wettbewerbs deckt der als Teil der Gesamtmodellkalibrierung (Abschnitt 4.4) ermittelte Faktor β^{airl} , welcher die durchschnittliche Anzahl an Flugzeug-Routen-Zuordnungen pro Airline und Route darstellt, die mitunter aus dem zeitlichen Verlauf der angebotenen Sitzplatzkapazität resultierende Variation der Flugzeug-Routen-Zuordnungen einer einzelnen Airline ab.

Insgesamt stellt das in dieser Arbeit entwickelte Modell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung einen neuartigen Ansatz dar, welcher die identifizierte Forschungslücke der Bewertung von Flugzeugentwürfen anhand der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung schließt. Der entwickelte Ansatz ist positioniert zwischen den für die Flugzeugentwurfsbewertung verfügbaren Ansätzen zur Berücksichtigung von Einsatzszenarien (Unterabschnitt 2.1.3), welche sich meist auf einzelne Missionen oder Routennetzwerke einzelner Airlines fokussieren, und den zumeist statistischen Ansätzen der Beschreibung der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung (Unterabschnitt 2.2.3). Die Anwendung der Methode der mathematischen Optimierung, die im Kontext der Flugzeug-Routen-Zuordnung ansonsten primär für einzelne Airlines eingesetzt wird, auf das globale LTS ermöglicht die Bestimmung von flugleistungsorientierten und globalen Einsatzszenarien unter Berücksichtigung einer Vielzahl technischer, operationeller sowie ökonomischer Randbedingungen und Einflüsse. Erstmals können so die diversen Dynamiken der Flugzeug-Routen-Zuordnung – etwa zwischen Routennetzwerk, Flugzeugflotte, Flugleistungen, Passagierpräferenzen und Flughafenkapazitäten – auf der Ebene des globalen LTS in die Flugzeugentwurfsbewertung integriert werden. In der Folge ermöglicht das entwickelte Modell eine umfangreiche Gesamtbewertung der untersuchten Flugzeugentwürfe, welche deren Auswirkungen auf die gesamte Flugzeug-Routen-Zuordnung im globalen LTS miteinschließt.

Der mit dem entwickelten Modell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung erreichbare Detailgrad bedingt allerdings, im Vergleich zu den alternativen, in der Literatur verfügbaren statistischen Ansätzen, höhere Anforderungen an die zur Verfügung stehende Datengrundlage und die verfügbare Rechenleistung. Während beispielsweise die in Unterabschnitt 2.2.3 beschriebenen statistischen Ansätze von *Kölker et al.* (2016) sowie *Dray et al.* (2019) und *Dray* (2020) pro Route nur zwei respektive neun Eingangsgrößen verwenden, um bei Modellanwendung die voraussichtlich auf einer Route eingesetzten Flugzeuggrößenkategorien zu ermitteln, verwendet das in dieser Arbeit vorgestellte Modell allein für die Flugleistungsbeschreibung eines einzelnen Flugzeugtyps mehr als 25 Parameter (vgl. Anhang A.1) aus verschiedenen Datenquellen (Abschnitt 4.1); hinzu kommen u. a. diverse routen-, flughafen- und flottenspezifische Eingangsgrößen. Für den im Rahmen dieser Arbeit thematisierten Anwendungsfall der Bewertung von Flugzeugentwürfen anhand der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung wird der Umfang der Eingangsdaten und Rechenanforderungen des entwickelten Modells dennoch als angemessen angesehen: Einerseits, da der Flugzeugentwurf im Allgemeinen bereits daten- und zeitintensiv ist, sodass keine Echtzeitanforderungen an ein etwaiges Bewertungsverfahren gestellt werden; und andererseits, da die Bedeutung der aus den Bewertungsergebnissen hervorgehenden Entscheidungen – welcher Flugzeugvorentwurf ist vorteilhaft und sollte weiterverfolgt werden? – den Detailgrad und die damit verbundenen Daten- und Rechenleistungsanforderungen rechtfertigt.

6.2 Vergleich mit vorläufiger Modellformulierung

Im Vergleich zu einer in *Kühlen et al.* (2022) veröffentlichten, vorläufigen Variante der Modellierung der Flugzeug-Routen-Zuordnung anhand von mathematischer Optimierung zeichnet sich der in dieser Arbeit präsentierte Modellierungsansatz im Wesentlichen durch drei Verbesserungen aus:

1. Das Submodell des Airline-Wettbewerbs (Unterabschnitt 4.3.8) wurde grundlegend überarbeitet, um eine erweiterte Szenariofähigkeit und kürzere Rechenzeiten zu ermöglichen.
2. Die Formulierung des mathematischen Optimierungsproblems wurde um optionale Nebenbedingungen zur Einhaltung des Flugzeugflusses und einer realitätsnahen Flugnetzwerkkonzentration ergänzt.
3. Die Datenbasis wurde durch zusätzliche Flugzeugtypen erweitert.

Hinsichtlich des Airline-Wettbewerbs bildet in *Kühlen et al.* (2022) ein Regressionsmodell den Zusammenhang zwischen der auf einer Route angebotenen Sitzplatzkapazität $s_{o,d}$ und einer maximalen Marktkonzentration $\overline{h_{o,d}}$ der auf dieser Route eingesetzten Flugzeugtypen ab. Diese maximale Marktkonzentration $\overline{h_{o,d}}$ wird, wie in Gl. (6.1) unter der Verwendung der Notation aus Unterabschnitt 4.2.1 angegeben, als obere Grenze für die aus den Entscheidungsvariablen $x_{o,d,t}$ der Flugzeug-Routen-Zuordnung resultierenden Marktkonzentrationen $h_{o,d}$ verwendet.

$$\sum_{t \in T_{o,d}} x_{o,d,t}^2 = h_{o,d} \leq \overline{h_{o,d}} \quad \forall (o, d) \in OD \quad (6.1)$$

Dieses Vorgehen besitzt zwei Nachteile, welche durch das in dieser Arbeit verwendete Submodell des Airline-Wettbewerbs behoben werden. Erstens resultieren aus der Verwendung der Entscheidungsvariablen $x_{o,d,t}$ in Gl. (6.1) quadratische Nebenbedingungen, sodass die Lösung des Optimierungsproblems im Vergleich zu einer Formulierung mit ausschließlich linearen Nebenbedingungen erschwert wird und zu längeren Rechenzeiten führt. Zweitens werden die routenspezifischen angebotenen Sitzplatzkapazitäten $s_{o,d}$ über das Regressionsmodell zur Ermittlung von $\overline{h_{o,d}}$ und die durch Gl. (6.1) gegebenen Nebenbedingungen mit den aus den Entscheidungsvariablen $x_{o,d,t}$ resultierenden Marktkonzentrationen $h_{o,d}$ gekoppelt. Dies entspricht dem in den historischen Daten zu beobachtenden Zusammenhang, dass eine steigende angebotene Sitzplatzkapazität auf einer Route zum Einsatz von einer steigenden, weniger konzentrierten Anzahl an Flugzeugtypen führt. Die entsprechende Modellierung vernachlässigt jedoch den Einfluss der verfügbaren Flugzeugflotte auf die Flugzeug-Routen-Zuordnung, da durch die Verwendung des

Regressionsmodells indirekt eine statische Flottenzusammensetzung angenommen wird. In der Folge würde das sich auf den Zeitraum 2010–2019 beziehende Submodell des Airline-Wettbewerbs aus *Kühlen et al.* (2022) für ein hypothetisches Zukunftsszenario, bei dem die Flugzeugflotte aus deutlich weniger Flugzeugtypen besteht als im Zeitraum 2010–2019, aber die routenspezifischen, angebotenen Sitzplatzkapazitäten größer sind als beim Aufstellen des Regressionsmodells, den Einsatz von einer steigenden, weniger konzentrierten Anzahl an Flugzeugtypen angeben. Dies ist jedoch aufgrund der veränderten Zusammensetzung der Flugzeugflotte mit weniger Flugzeugtypen nicht realistisch. In der Folge ist die Szenariofähigkeit des Ansatzes von *Kühlen et al.* (2022), insbesondere im Hinblick auf eine veränderte Luftverkehrsnachfrage oder eine veränderte Flottenzusammensetzung, eingeschränkt. Der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz für das Submodell des Airline-Wettbewerbs behebt diese Schwachstelle und ermöglicht, wie in Kapitel 5 anhand der untersuchten Anwendungsfälle demonstriert, die Untersuchung von Szenarien mit veränderter Luftverkehrsnachfrage oder veränderter Flottenzusammensetzung.

Als zweite Verbesserung im Vergleich zu *Kühlen et al.* (2022) ist die Formulierung des mathematischen Optimierungsproblems um optionale Nebenbedingungen zur Einhaltung des Flugzeugflusses und einer realitätsnahen Flugnetzwerkkonzentration erweitert (Unterabschnitt 4.2.1). Dies ermöglicht, bei ausreichender zur Verfügung stehender Rechenleistung sowie ausreichender Qualität der Eingangsdaten, die Ermittlung von Einsatzszenarien mit sinnvoll zusammenhängenden Routennetzwerken (beispielhaft im Anwendungsfall aus Abschnitt 5.1 demonstriert). Zusätzlich sind mit dieser Arbeit als dritte Verbesserung im Vergleich zu *Kühlen et al.* (2022) vier zusätzliche Flugzeugtypen im Modell der Flugzeug-Routen-Zuordnung im globalen LTS berücksichtigt (ATR 72, ERJ-135, E190, E190-E2). Durch die entsprechenden Flugzeugtypen sind erstmals Daten von Regionalflugzeugen und einem Turboprop-Flugzeug im Gesamtmodell sowie in den zugehörigen Submodellen enthalten, wodurch die Anwendbarkeit für Fragestellungen mit kleineren Flugzeugtypen (Regionalflugzeuge) oder langsameren Flugzeugtypen (Turboprops) sichergestellt wird.

Der Vergleich der Ergebnisse zwischen *Kühlen et al.* (2022) und den in dieser Arbeit präsentierten Ergebnissen hinsichtlich der Güte des entwickelten Modells (Unterabschnitt 4.6.2) zeigt, dass insgesamt sehr ähnliche Modellgüten erzielt werden. Einzig für die Abbildung des flugzeugtypspezifischen Anteils der Sitzplatzkapazität auf einer Route (Abb. 4.14c und Abb. 4.16a) sind deutliche Unterschiede zu erkennen, da durch den in dieser Arbeit verwendeten Ansatz im Submodell des Airline-Wettbewerbs (Unterabschnitt 4.3.8) die entsprechenden Modellabweichungen in diesem Bereich im Vergleich zu *Kühlen et al.* (2022) näherungsweise halbiert werden konnten.

6.3 Weiteres Verbesserungs- und Anwendungspotential

Die im Rahmen dieser Arbeit erzielten Ergebnisse zeigen, dass für die Bewertung von Flugzeugentwürfen anhand der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung weiteres Verbesserungs- und Anwendungspotential besteht. Das Verbesserungspotential teilt sich hierbei in zwei Bereiche auf: erstens die weitere Verbesserung der Modellgüte und -anwendbarkeit; zweitens die Verbesserung der Anbindung des entwickelten Modells an außenstehende Modelle. Das weitere Anwendungspotential resultiert aus Fragestellungen der Luftfahrtforschung, welche zukünftig durch das entwickelte Modell adressiert werden können.

Das weitere Verbesserungspotential für die Modellgüte und -anwendbarkeit folgt primär aus den getroffenen Annahmen und Vereinfachungen bei der Entwicklung des Modells der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung. Während die getroffenen Annahmen und Vereinfachungen für die in dieser Arbeit präsentierten Validierungsergebnisse der Modellgüte (Unterabschnitt 4.6.2) und Anwendungsfälle (Kapitel 5) geeignet sind (Abschnitt 6.1), existieren dennoch Aspekte der Flugzeug-Routen-Zuordnung, welche bisher nicht ausreichend genau berücksichtigt werden, um diese bei möglichen zukünftigen alternativen Anwendungsfällen miteinzubeziehen.

Ein Beispiel hierfür ist, dass bisher ausschließlich der Passagierluftverkehr, nicht aber der Luftfrachtverkehr betrachtet wird. Dies ist für die Anwendungsfälle in dieser Arbeit (Kapitel 5) oder ähnliche alternative Anwendungsfälle keine Einschränkung. Für die Bewertung eines Frachtflugzeugentwurfs oder eines neuartigen Passagierflugzeugkonzepts mit deutlich veränderten Bellyfracht¹-Eigenschaften ist das in dieser Arbeit vorgestellte Modell hierdurch allerdings nicht geeignet. Da der Luftfrachtverkehr mit dedizierten Frachtflugzeugen sich in vielen wesentlichen Aspekten vom Passagierluftverkehr unterscheidet, z. B. bei der Flugzeugnutzung, dem Airline-Wettbewerb sowie den Kosten- und Umsatztreibern, ist eine Adaption des in dieser Arbeit entwickelten Modells auf diesen Anwendungsfall nicht trivial; u. a. wären eine überarbeitete Zielfunktion sowie deutlich modifizierte Submodelle notwendig. Im Gegensatz dazu kann Bellyfracht, welche immerhin ca. 50 % des globalen Luftfrachtaufkommens ausmacht (*International Air Transport Association*, 2015; *Boeing*, 2022c), zukünftig mit überschaubarem Aufwand im Modell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung berücksichtigt werden, indem erstens die Zielfunktion um die mit der Bellyfracht assoziierten Kosten und Umsätze erweitert wird und zweitens die zusätzliche Nutzlast der Bellyfracht in der Berechnung des Treibstoffverbrauchs, der Nutzlast-Reichweiten-Beziehung sowie der Start- und

¹Luftfracht, welche auf regulären Passagierflügen zusätzlich zu den Passagieren und deren Gepäck im Frachtraum, i. d. R. unterhalb der Passagiere im „Bauch“ (engl. *belly*) des Flugzeugs, transportiert wird.

Landestrecken berücksichtigt wird. Entsprechende Eingangsdaten für die Nachfrage nach Transportkapazität auf Flugrouten sowie für die Bellyfracht-Kapazität der einzelnen Flugzeugtypen vorausgesetzt, könnte so bei der Bewertung von Flugzeugentwürfen anhand der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung der Einfluss der Bellyfracht berücksichtigt werden.

Ein weiteres Beispiel für das Verbesserungspotential hinsichtlich der Modellgüte und -anwendbarkeit bezieht sich darauf, dass das in dieser Arbeit entwickelte Modell bisher sowohl bei der Bestimmung der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung als auch bei der Bewertung von Flugzeugentwürfen von einer flugzeugtypspezifischen, gemittelten Sitzplatzanzahl ausgeht (unter der Berücksichtigung des NRD). Im Allgemeinen ist die Vereinfachung gemittelter Sitzplatzanzahlen geeignet, um die Einsatzprofile der Flugzeugtypen zu beschreiben, da die verwendeten Sitzplatzanzahlen der einzelnen Flugzeugtypen häufig in einem schmalen Bereich liegen, sodass die Variationen der Sitzplatzanzahlen deutlich kleiner sind als die in den Einsatzdistanzen (*Sabre*, 2022). Für eine höhere Modellgenauigkeit ist es dennoch interessant, verschiedene angebotene Sitzplatzanzahlen und damit Kabinenkonfigurationen zu berücksichtigen; zum einen, um den insbesondere in Asien zu beobachtenden Einsatz von Langstreckenflugzeugen mit hoher Bestuhlungsdichte auf vergleichsweise kurzen Routen in der Flugzeug-Routen-Zuordnung abbilden zu können²; zum anderen, um die Auswirkungen verschiedener Sitzplatzkonfigurationen auf die Einsatzszenarien und damit auf die Bewertung von Flugzeugentwürfen zu berücksichtigen. Insbesondere für Letzteres wäre für das entwickelte Modell anzustreben, eine Unterscheidung der Passagiere nach Beförderungsklassen (z. B. Economy und Business) einzuführen, sodass die eingesetzten Sitzplatzkonfigurationen in der Flugzeug-Routen-Zuordnung die unterschiedliche Nachfrage und Zahlungsbereitschaft der Passagiere je nach Beförderungsklasse einfangen. Hierzu werden detaillierte Eingangsdaten benötigt, u. a. die routen- und beförderungsklassenspezifischen angebotenen Sitzplatzkapazitäten, wie sie für diese Arbeit nicht zur Verfügung standen und wie sie die allgemeine Anwendbarkeit des Modells aufgrund höherer Datenanforderungen erschweren.

Die Anbindung des in dieser Arbeit entwickelten Modells der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung an außenstehende Modelle ist bereits beispielhaft erprobt (*Papantoni et al.*, 2022; *Wehrspohn et al.*, 2022; *Atanasov et al.*, 2023; *Burschik et al.*, 2023; *Kühlen et al.*, 2023; *Ramm et al.*, 2024). Primär werden die Schnittstellen zu außenstehenden Modellen hierbei unidirektional für die Bereitstellung der

²Beispielsweise im Jahr 2019 die Flüge über 404 km zwischen den Flughäfen Tokio-Haneda (HND) und Osaka-Itami (ITM) von *All Nippon Airways* mit Flugzeugen des Typs B777-300 und 514 Sitzplätzen (im Vergleich zu 374 Sitzplätzen für diesen Flugzeugtyp im globalen Durchschnitt) oder die Flüge über 692 km zwischen den Flughäfen Bangkok-Don Muang (DMK) und Phuket (HKT) von *Thai Lion Air* mit Flugzeugen des Typs A330-300 und 365 Sitzplätzen (im Vergleich zu 299 Sitzplätzen für diesen Flugzeugtyp im globalen Durchschnitt) (*Cirium*, 2022; *Sabre*, 2022).

zu untersuchenden Flugzeugentwürfe sowie für die Berechnung weiterer Bewertungsmetriken verwendet, welche auf der Flugzeug-Routen-Zuordnung aufbauen; z. B. für die Berechnung von Emissionen, Klimawirkung, LCA und NPV. Einzig in der Studie von Kühlen *et al.* (2023) wird eine bidirektionale Schnittstelle verwendet, um in Kombination mit einem *Discrete-Choice*-Modell mit den Einflussfaktoren Reisedauer, Ticketpreise und Anzahl der Umstiege (Kölker *et al.*, 2024) iterativ die Flugzeug-Routen-Zuordnung sowie die Passagierreiserouten zwischen Start- und Zielflughafen der Passagierreiseketten zu bestimmen. Weiteres Verbesserungspotential hinsichtlich der Anbindung des in dieser Arbeit entwickelten Modells der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung an außenstehende Modelle besteht demnach durch das Etablieren weiterer bidirektionaler Schnittstellen. Von besonderem Interesse ist hierbei die Schnittstelle zum Flugzeugentwurf, da die gekoppelte Optimierung von Flugzeugentwurf und Flugzeug-Routen-Zuordnung im Vergleich zur voneinander unabhängigen Betrachtung einen größeren Lösungsraum abdeckt und damit höherwertige Lösungen verspricht (vgl. Unterabschnitt 2.1.1 und Unterabschnitt 2.1.3). Zusätzlich kann für Untersuchungen von zukünftigen Flugzeugentwürfen eine bidirektionale Schnittstelle zwischen der Luftverkehrsprognose und der Flugzeug-Routen-Zuordnung die Qualität der Luftverkehrsprognose und damit auch der Flugzeugentwurfsbewertung steigern, indem z. B. die elastische Reaktion der Passagiernachfrage auf die Qualität und die Kosten des durch die Flugzeug-Routen-Zuordnung dargestellten Transportangebots eingefangen wird. Um die Etablierung von Schnittstellen zu dem in dieser Arbeit entwickelten Modell zu vereinfachen, ist eine softwaretechnische Standardisierung des Datenformats von Ein- und Ausgangsgrößen anzustreben. Hierfür bietet sich z. B. das XML-basierte Open-Source-Datenformat des einheitlichen parametrischen Luftfahrzeugkonfigurationsschemas (engl. Common Parametric Aircraft Configuration Schema; CPACS) an (Alder *et al.*, 2020).

Das weitere Anwendungspotential für den in dieser Arbeit entwickelten und vorgestellten Ansatz zur Bewertung von Flugzeugentwürfen anhand der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung ist vielfältig und folgt u. a. aus der Untersuchung neuer Flugzeugentwürfe und/oder der Modifikation des entwickelten Modells für Fragestellungen abseits der realitätsnahen Abbildung der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung. Da der entwickelte Bewertungsansatz unabhängig vom Flugzeugentwurf ist, können grundsätzlich diverse Flugzeugtypen bewertet werden. Insbesondere für Flugzeugtypen, für die aufgrund der verwendeten Technologien oder des verwendeten Auslegungspunktes nicht in guter Näherung das historische Einsatzprofil eines bestehenden Flugzeugtyps für die Gesamtbewertung des Entwurfs verwendet werden kann, ist die flugleistungsbasierte Ermittlung von flugzeugtypspezifischen Einsatzszenarien wichtig. Dies umfasst beispielsweise, wie in Kapitel 5, die Bauart der Triebwerke und die Sitzplatz-Reichweiten-Kombination oder, wie in

Wehrspohn *et al.* (2022) und Burschyk *et al.* (2023), den verwendeten Energieträger (z. B. SAF, Wasserstoff oder Batterie). Auch die Ermittlung von Einsatzszenarien für Studien von *Blended-Wing-Body*³-Flugzeugentwürfen oder zivilen Überschallflugzeugen ist mit dem entwickelten Modell möglich. Für solche und andere Technologien, aerodynamische Konfigurationen oder Betriebskonzepte, welche von denen der für die Entwicklung und Kalibrierung des präsentierten Modells verwendeten konventionellen Großraumflugzeuge abweichen, ist allerdings die Gültigkeit der verwendeten Submodelle zur Ermittlung von z. B. den Betriebskosten, der Flugzeugnutzung und der Passagierattraktivität sicherzustellen (ggf. durch Anpassungen).

Ein anderes Anwendungspotential des in dieser Arbeit entwickelten und vorgestellten Modellierungsansatzes ist, idealisierte Flugzeug-Routen-Zuordnungen zu ermitteln; beispielsweise kosten-, treibstoff- oder klimawirkungsoptimal. Hierzu gilt es, die Zielfunktion des mathematischen Optimierungsproblems auszutauschen sowie routen- und flugzeugtypspezifische Koeffizienten entsprechend der Zielmetrik für das Optimierungsproblem zur Verfügung zu stellen. Solch idealisierte Flugzeug-Routen-Zuordnungen können z. B. verwendet werden, um das maximale Potential für Einsparungen durch eine hinsichtlich der Zielmetrik effiziente Flugzeug-Routen-Zuordnung bei gegebenem Flugangebot und gegebener Flugzeugflotte zu quantifizieren.

³Flugzeugkonzept, bei dem Flügel und Rumpf übergangslos miteinander verbunden sind, sodass der Flugzeugrumpf in wesentlichen Teilen zur Auftriebserzeugung beiträgt.

7. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Forschungsfrage untersucht, wie der Flugzeugeinsatz im globalen LTS modellhaft beschrieben werden kann, um dies für die ökonomische und ökologische Bewertung neuer Flugzeugentwürfe samt ihrer Auswirkungen auf das LTS zu verwenden. Hierzu wurde ein neuartiges, über den Stand der Wissenschaft hinausgehendes Modell entwickelt, welches aufbauend auf einer mathematischen Optimierung die Flugzeug-Routen-Zuordnung im globalen LTS beschreibt. Zur Demonstration des entwickelten Modells wurden zwei beispielhafte Anwendungsfälle untersucht: die Wahl der Triebwerksbauart für ein Kurzstreckenflugzeug und die Markteinführung eines Mittelstreckenflugzeugs. Basierend auf den erzielten Ergebnissen lautet die Antwort auf die untersuchte Forschungsfrage:

Die Flugzeug-Routen-Zuordnung im globalen LTS kann als mathematisches Optimierungsproblem beschrieben werden, welches die wesentlichen ökonomischen, operationellen und technischen Aspekte der Einsatzplanungen einzelner Airlines in eine erklärende, globale Modellierung überführt. Für die Bewertung von Flugzeugentwürfen kann so ausgehend von den individuellen Flugleistungseigenschaften das zu erwartende Einsatzprofil im globalen LTS bestimmt und bei der Berechnung weiterer ökonomischer und ökologischer Bewertungsmetriken berücksichtigt werden.

Als Motivation für die Forschungsfrage fungierte die Ausgangssituation, dass Flugzeuge auf sehr unterschiedlichen Distanzen, hauptsächlich deutlich unterhalb ihrer Auslegungsmmission, eingesetzt werden, während viele Leistungseigenschaften von Flugzeugen, wie z.B. der Treibstoffverbrauch, einsatzdistanzabhängig sind (Kapitel 1). In der Folge sind für präzise Bewertungen von Flugzeugentwürfen die möglichen späteren Einsatzszenarien von großer Bedeutung.

Die Untersuchung der relevanten Literatur zeigte, dass für die beiden die Forschungsfrage betreffenden Gebiete – die Bewertung von Flugzeugentwürfen unter Berücksichtigung von Einsatzszenarien sowie die Modellierung der Flugzeug-Routen-Zuordnung – eine Vielzahl unterschiedlicher Methodiken existiert (Kapitel 2). Für die Berücksichtigung von Einsatzszenarien in der Bewertung von Flugzeugentwürfen werden beispielsweise repräsentative Einzelmissionen, historische Einsatzszenarien existierender Flugzeugtypen oder die Betrachtung des Einsatzes durch einzelne Airlines verwendet. Die Modellierung der Flugzeug-Routen-Zuordnung erfolgt je nach Anwendungsfall vor allem mit mathematischer Optimierung (Einsatzplanung einzelner Airlines), spieltheoretisch (Untersuchung des Wettbewerbs mehrerer Airlines) oder statistisch (globale Vorhersage der Entwicklung des LTS). Ein Ansatz, welcher die Bewertung von Flugzeugentwürfen unter Berücksichtigung globaler Einsatzszenarien durchführt und hierfür die globale Flugzeug-Routen-Zuordnung anhand flugzeugtypspezifischer Flugleistungseigenschaften bestimmt, existierte bisher nicht.

Um diese Forschungslücke zu schließen, erfolgte die Entwicklung eines Modellkonzepts für die Bewertung von Flugzeugentwürfen anhand der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung (Kapitel 3). Hierzu wurden zuerst Anforderungen an ein zu entwickelndes Modell formuliert, wie z. B. eine hohe Szenariofähigkeit, geringe Rechenanforderungen und ein erklärender, nachvollziehbarer Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen. Mit diesen Anforderungen erfolgte die Wahl und Ausgestaltung eines geeigneten Modellierungsansatzes basierend auf der Methode der mathematischen Optimierung: Ausgehend von der verfügbaren globalen Flugzeugflotte werden den Routen eines globalen Flugplans Flugzeugtypen zugeordnet. Diese Zuordnung basiert auf einer Zielfunktion und mehreren Nebenbedingungen. Die Zielfunktion beschreibt ökonomische Kriterien wie die mit dem Betrieb der einzelnen Flugzeugtypen assoziierten Kosten und Umsätze. Die Nebenbedingungen berücksichtigen logische, technische und operationelle Aspekte der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung wie die begrenzte Verfügbarkeit von Flugzeugflotte und Flughafenkapazitäten.

Die detaillierte Beschreibung der Modellentwicklung (Kapitel 4) umfasste die Darlegung der verwendeten Datengrundlage, die mathematische Formulierung des Optimierungsproblems der Flugzeug-Routen-Zuordnung im globalen LTS sowie die Einführung und Entwicklung weiterer Submodelle, die verschiedene durch das Optimierungsproblem abgedeckte Aspekte des Flugbetriebs oder des LTS, wie Betriebskosten, Start- und Landestrecken oder Airline-Wettbewerb, beschreiben. Da das entwickelte Gesamtmodell mehrere freie Parameter besitzt, welche für die Einstellung des Modells verwendet werden können, beispielsweise den finanziellen Gegenwert von kürzeren Reisezeiten aus Passagiersicht, erfolgte eine Kalibrierung anhand historischer Flugplandaten des Zeitraums 2010–2019. Abschließend für die Modellentwicklung wurde eine Verifizierung und Validierung durchgeführt, welche zum einen die korrekte Funktionsweise des Modells und zum anderen die Erfüllung

der während der Entwicklung des Modellkonzepts aufgestellten Anforderungen an den Einsatzbereich und die Abbildungsqualität des Gesamtmodells nachweist. Hinsichtlich der Abbildungsqualität wurden im Vergleich zu historischen Flugplandaten Abweichungen der flugzeugtypspezifischen Verteilungen der Einsatzdistanzen von $< 15\%$ und Abweichungen der durchschnittlichen Sitzplatzanzahl pro Flug, wenn Routen gemäß ihrer Distanzen oder der angebotenen Sitzplatzanzahl kategorisiert werden, von $< 5\%$ erreicht.

Mit den zwei beispielhaft untersuchten Anwendungsfällen wurde demonstriert, wie das entwickelte Modell der Flugzeug-Routen-Zuordnung im globalen LTS für die Bewertung von Flugzeugentwürfen verwendet werden kann (Kapitel 5). Für die Untersuchung, ob für ein zukünftiges Kurzstreckenflugzeug aus Airline-Sicht ein Antrieb mit Turbofan- oder Turboprop-Triebwerken vorteilhafter ist, wurden verschiedene flugzeugtypspezifische und von den ökonomischen Randbedingungen abhängige Einsatzszenarien mit mittleren Einsatzdistanzen zwischen ca. 600 km und ca. 1500 km ermittelt. Während die Turboprop-Triebwerke zu deutlich reduziertem Treibstoffverbrauch und damit auch zu geringeren DOC führen, werden diese Kosteneinsparungen in der Mehrzahl der Einsatzszenarien durch die erhöhte Zahlungsbereitschaft der Passagiere für Flugverbindungen mit den Turbofan-Triebwerken, welche höhere Fluggeschwindigkeiten und damit kürzere Reisezeiten ermöglichen, überkompensiert. In der Summe erwies sich der Flugzeugentwurf mit Turbofan-Triebwerken daher unter Berücksichtigung der Passagier- bzw. Umsatzperspektive aus rein ökonomischer Sicht als attraktiver. Die Untersuchung der Auswirkungen der Markteinführung eines neuen Mittelstreckenflugzeugs auf das globale LTS zeigte, dass das entwickelte Modell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung nicht nur Einsatzszenarien für neu eingeführte Flugzeugtypen ermittelt, sondern auch etwaige Verdrängungseffekte im Einsatz der Bestandsflotte abbildet. Unter Berücksichtigung solcher Verdrängungseffekte konnte gezeigt werden, dass die verbesserte Übereinstimmung von Auslegungs- und Betriebspunkten in der Flugzeug-Routen-Zuordnung durch die Markteinführung eines neuen Mittelstreckenflugzeugs zu einer geringfügigen Reduzierung des Treibstoffverbrauchs und der DOC im Bereich von 1 % bis 2 % im LTS führt (im Vergleich zu einem Flottenszenario ohne Mittelstreckenflugzeug, aber dennoch mit identischer Flottenerneuerung und identischem Technologieniveau).

Um die in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse im Kontext der Modellierung der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung sowie der Bewertung von Flugzeugentwürfen einzuordnen, erfolgte eine übergeordnete, kritische Diskussion einschließlich des weiteren Verbesserungs- und Anwendungspotentials (Kapitel 6). Als Mehrwert des entwickelten Modells im Vergleich zu den in der Literatur beschriebenen Ansätzen für die Modellierung der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung wurde die Bestimmung von flugleistungsorientierten Einsatzszenarien unter Berücksichtigung einer Vielzahl an technischen, operationellen sowie ökonomischen Randbedingungen und Einflüssen identifiziert. Konkret beeinflussen neben dem globalen

Routennetzwerk, der globalen Flugzeugflotte und den Flughafenkapazitäten auch die Reiseflugmachzahlen, die Sitzplatzanzahlen, die Reichweiten, die Treibstoffverbräuche, die DOC sowie die benötigten Start- und Landebahnlängen der einzelnen Flugzeugtypen und der untersuchten Flugzeugentwürfe direkt die ermittelten Einsatzszenarien. Für die Bewertung von Flugzeugentwürfen kann so eine realitätsnahe und umfassende Bewertungsgrundlage geschaffen werden, die zum einen die Randbedingungen und Einflüsse aus dem Betrieb im globalen LTS berücksichtigt und zum anderen die Leistungseigenschaften der Flugzeugentwürfe abseits ihrer Auslegungsmissionen erfasst.

In zukünftigen Arbeiten kann das entwickelte Modell der globalen Flugzeug-Routen-Zuordnung einerseits weiterentwickelt werden, um die Modellgüte und -anwendbarkeit zu steigern, und andererseits für die Untersuchung weiterer Anwendungsfälle im Bereich der Flugzeugentwurfs- und LTS-Bewertung verwendet werden. Innerhalb der Modellierung der Flugzeug-Routen-Zuordnung können beispielsweise die Einflüsse von Bellyfracht oder von verschiedenen Kabinenkonfigurationen pro Flugzeugtyp berücksichtigt werden, um sowohl die allgemeine Modellgüte zu steigern als auch die Untersuchung zusätzlicher Forschungsfragen zu ermöglichen. Als weitere Anwendungsfälle des entwickelten Modells in zukünftigen Arbeiten sind grundsätzlich Bewertungen verschiedenster neuer Flugzeugentwürfe von Interesse. Dies umfasst sowohl konventionelle Flugzeugentwürfe als auch solche mit revolutionären Technologien, aerodynamischen Konfigurationen oder Betriebskonzepten. Für Flugzeugentwürfe, welche deutlich von denen der für die Entwicklung und Kalibrierung des präsentierten Modells verwendeten konventionellen Großraumflugzeuge abweichen, gilt es hierbei allerdings die Modellgültigkeit sicherzustellen, ggf. durch Anpassungen z. B. in der Berechnung der Betriebskosten oder der Passagierattraktivität.

A. Weitere Daten und Details zur Modellierung

A.1 Daten zu den Flugzeugtypen

Tab. A.1: Allgemeine Daten zu den Flugzeugtypen; T_{eng} in kN, m_{eng} in kg und P_{eng} in kW

Flugzeugtyp	Familie	EIS	Sitze	Eco. Sitze	Ma_{cr}	T_{eng}	m_{eng}	#Eng	P_{eng}
A220-100	A220	2016	120	135	0,78	97,72	2177	2	0
A220-300	A220	2016	142	160	0,78	108,53	2177	2	0
A318	A320	2003	121	136	0,78	102,2	2380	2	0
A319ceo	A320	1996	142	160	0,78	120,11	2380	2	0
A320ceo	A320	1988	166	189	0,78	120,11	2380	2	0
A320neo	A320	2016	174	195	0,78	130,3	2800	2	0
A321ceo	A320	1994	198	230	0,78	133,45	2404	2	0
A321neo	A320	2017	210	244	0,78	143,1	2850	2	0
A321neo-suc	A320	2028	210	244	0,78	143,1	2850	2	0
A330-200	A330	1998	276	406	0,82	300	5092	2	0
A330-300	A330	1994	299	440	0,82	300	5092	2	0
A340-300	A340	1993	255	375	0,82	151,25	2644	4	0
A340-500	A340	2003	255	375	0,82	251,9	4990	4	0
A340-600	A340	2002	299	440	0,82	263,9	4990	4	0
A350-1000	A350	2018	326	480	0,85	436,7	7549	2	0
A350-900	A350	2015	299	440	0,85	379	7277	2	0
A350-900neo	A350	2028	299	440	0,85	379	7277	2	0
A380-800	A380	2007	495	853	0,85	332,39	6712	4	0
ARB2028	ARB	2028	257	329	0,83	230,8	7000	2	0
ATR 72	ATR	1989	72	78	0,55	42,3	860	2	2148
B737 Max 8	B737	2017	178	200	0,785	124,7	2780	2	0
B737 Max 9	B737	2018	196	220	0,785	130,4	2780	2	0

Flugzeugtyp	Familie	EIS	Sitze	Eco. Sitze	Ma_{cr}	T_{eng}	m_{eng}	#Eng	P_{eng}
B737-700	B737	1997	133	149	0,785	117	2370	2	0
B737-800	B737	1998	168	189	0,785	117	2370	2	0
B737-900	B737	2001	189	220	0,785	117	2370	2	0
B747-400	B747	1989	362	624	0,86	272,53	4470	4	0
B747-8	B747	2012	392	675	0,86	299,8	5623	4	0
B757-200	B757	1992	186	239	0,8	178,4	3449	2	0
B757-300	B757	1999	230	295	0,8	191,7	3449	2	0
B767-200	B767	1980	226	290	0,8	254,35	4440	2	0
B767-300	B767	1988	274	351	0,8	267,2	4440	2	0
B767-400	B767	2000	293	375	0,8	267,03	4440	2	0
B777-200	B777	1995	299	440	0,84	390,1	6078	2	0
B777-300	B777	1998	374	550	0,84	492,7	8762	2	0
B777-9	B777	2024	388	570	0,84	492,7	9600	2	0
B787-10	B787	2018	299	440	0,85	349,2	6114	2	0
B787-8	B787	2013	259	381	0,85	321,6	6114	2	0
B787-8-suc	B787	2028	259	381	0,85	321,6	6114	2	0
B787-9	B787	2014	286	420	0,85	341,2	6114	2	0
D250-TF	D250	2040	250	250	0,78	125,52	3170,6	2	0
D250-TP	D250	2040	250	250	0,66	123,34	3179,2	2	13 729
E190	EJet	2005	105	114	0,78	77,4	1700	2	0
E190-E2	EJet	2018	105	114	0,78	92,79	2177	2	0
ERJ-135	ERJ	1997	35	37	0,75	34,91	760	2	0

Tab. A.2: Massen- und Nutzlast-Reichweiten-Daten zu den Flugzeugtypen; Distanzen in km; Massen in kg

Flugzeugtyp	MTOM	OEM	pl_{MZFM}	pl_{MTOM}	r_{MZFM}	r_{MTOM}	r_{OEM}
A220-100	60 781	35 221	15 127	7915	3593	7167	7964
A220-300	67 585	36 106	18 711	12 859	3685	6241	6954
A318	68 000	38 374	14 800	8800	3704	6200	7050
A319ceo	70 000	40 729	16 500	11 000	3500	6800	7200
A320ceo	78 000	41 613	19 300	16 000	4074	5371	7000
A320neo	79 000	45 270	19 500	15 200	4537	6334	7950
A321ceo	89 000	48 140	22 800	21 600	3981	4400	5950
A321neo	89 000	50 600	23 000	19 750	4167	5180	6890
A321neo-suc	89 000	50 600	23 000	18 250	3500	4900	5950
A330-200	242 000	119 430	46 000	6350	8612	16 575	17 131
A330-300	242 000	121 930	45 360	35 000	7686	10 200	16 390
A340-300	275 000	129 900	43 000	36 287	9075	13 520	15 186
A340-500	373 000	170 792	54 000	22 500	13 150	16 853	18 150
A340-600	370 000	179 191	66 000	32 000	10 556	14 446	16 300
A350-1000	316 000	133 100	67 000	33 000	10 371	15 686	17 964
A350-900	273 660	119 700	53 500	26 000	10 464	15 927	17 780
A350-900neo	273 660	119 700	53 500	26 000	10 464	14 700	17 780
A380-800	550 000	270 500	83 500	35 000	12 186	16 390	17 872
ARB2028	140 000	81 200	30 000	17 300	7130	10 100	12 370
ATR 72	23 000	13 600	7400	4400	1370	3000	3700
B737 Max 8	82 190	45 070	20 882	16 430	4630	6389	8334
B737 Max 9	88 314	47 170	23 817	20 330	4630	5834	7964

Flugzeugtyp	MTOM	OEM	pl_{MZF}	pl_{MTOM}	r_{MZF}	r_{MTOM}	r_{OEM}
B737-700	70 080	37 650	17 552	11 600	4050	6390	7780
B737-800	79 016	41 413	21 319	16 587	3890	5463	7038
B737-900	85 139	44 677	23 044	16 823	3520	5926	7593
B747-400	397 000	184 242	61 831	38 758	10 742	13 149	14 909
B747-8	447 696	218 957	76 332	38 043	10 927	14 816	16 668
B757-200	115 600	59 230	26 070	21 770	5000	6520	8241
B757-300	122 470	65 512	29 738	22 488	4444	6204	7815
B767-200	175 540	82 377	35 557	19 623	9130	12 594	14 816
B767-300	186 880	89 966	43 851	24 034	7223	11 112	13 149
B767-400	204 116	103 147	46 541	28 395	6852	10 093	11 760
B777-200	290 320	140 988	54 056	20 012	10 742	15 927	17 501
B777-300	354 534	167 829	69 853	38 671	10 556	14 446	16 483
B777-9	354 534	167 829	69 853	38 671	10 556	14 446	16 483
B787-10	254 011	135 500	57 276	17 500	7778	15 001	16 112
B787-8	227 930	119 950	41 075	6602	10 149	17 557	18 335
B787-8-suc	227 930	119 950	41 075	6602	10 149	17 557	18 335
B787-9	254 012	128 850	52 586	24 150	9723	15 186	17 409
D250-TF	80 828	47 727	25 000	14 988	2188	7066	8737
D250-TP	75 986	44 898	25 000	17 383	2088	6337	8152
E190	50 300	27 736	13 063	9350	2815	4445	5241
E190-E2	56 400	33 000	13 700	9600	3482	5241	7075
ERJ-135	20 000	11 501	4499	3400	2315	3370	4074

Tab. A.3: Koeffizienten der Regression für die Treibstoffverbräuche der Flugzeugtypen bei Verwendung des Ansatzes aus Gl. (4.36); Distanzen in km, Ladefaktoren dimensionslos und resultierende Treibstoffverbräuche in kg

Flugzeugtyp	$a_{1,t}$ in kg/km ²	$a_{2,t}$ in kg/km	$a_{3,t}$ in kg/km	$a_{4,t}$ in kg
A220-100	4,474E-05	1,427E+00	4,964E-01	4,877E+02
A220-300	4,978E-05	1,516E+00	7,530E-01	4,606E+02
A318	5,390E-05	1,720E+00	5,980E-01	5,876E+02
A319ceo	5,656E-05	1,723E+00	8,557E-01	5,234E+02
A320ceo	6,354E-05	1,851E+00	8,846E-01	5,982E+02
A320neo	5,464E-05	1,592E+00	7,607E-01	5,145E+02
A321ceo	7,063E-05	2,004E+00	1,063E+00	6,014E+02
A321neo	6,215E-05	1,764E+00	9,357E-01	5,292E+02
A321neo-suc	5,297E-05	1,503E+00	7,975E-01	4,510E+02
A330-200	1,065E-04	3,897E+00	1,618E+00	1,613E+03
A330-300	1,044E-04	4,103E+00	1,374E+00	1,615E+03
A340-300	1,373E-04	4,315E+00	1,754E+00	1,768E+03
A340-500	1,734E-04	5,475E+00	1,844E+00	2,258E+03
A340-600	1,845E-04	5,584E+00	2,535E+00	2,175E+03
A350-1000	9,946E-05	4,933E+00	1,548E+00	1,663E+03
A350-900	8,961E-05	4,444E+00	1,394E+00	1,499E+03
A350-900neo	7,527E-05	3,733E+00	1,171E+00	1,259E+03
A380-800	2,414E-04	8,187E+00	3,070E+00	3,350E+03
ARB2028	4,216E-05	2,528E+00	7,490E-01	8,094E+02
ATR 72	2,397E-05	8,307E-01	3,275E-01	1,021E+02
B737 Max 8	5,620E-05	1,568E+00	9,154E-01	6,489E+02
B737 Max 9	6,277E-05	1,667E+00	9,872E-01	6,016E+02
B737-700	5,578E-05	1,577E+00	7,726E-01	6,223E+02
B737-800	5,979E-05	1,668E+00	9,738E-01	6,903E+02
B737-900	6,975E-05	1,852E+00	1,097E+00	6,685E+02
B747-400	2,494E-04	5,992E+00	3,136E+00	2,740E+03
B747-8	2,344E-04	5,632E+00	2,948E+00	2,576E+03
B757-200	8,541E-05	2,366E+00	9,853E-01	9,003E+02
B757-300	1,073E-04	2,692E+00	1,517E+00	8,668E+02
B767-200	1,100E-04	2,790E+00	1,589E+00	1,278E+03
B767-300	1,095E-04	2,981E+00	1,842E+00	1,240E+03
B767-400	1,271E-04	3,542E+00	1,992E+00	1,228E+03
B777-200	1,434E-04	4,099E+00	2,451E+00	2,109E+03
B777-300	1,599E-04	5,241E+00	2,651E+00	1,905E+03
B777-9	1,448E-04	4,140E+00	2,475E+00	2,130E+03
B787-10	9,142E-05	3,788E+00	1,510E+00	1,517E+03

Flugzeugtyp	a_{1,t} in kg/km ²	a_{2,t} in kg/km	a_{3,t} in kg/km	a_{4,t} in kg
B787-8	9,753E-05	3,198E+00	1,573E+00	1,292E+03
B787-8-suc	8,193E-05	2,686E+00	1,321E+00	1,085E+03
B787-9	8,707E-05	3,607E+00	1,438E+00	1,445E+03
D250-TF	2,474E-05	1,509E+00	6,805E-01	8,699E+02
D250-TP	1,839E-05	1,289E+00	5,892E-01	4,558E+02
E190	4,790E-05	1,506E+00	6,114E-01	4,447E+02
E190-E2	3,976E-05	1,250E+00	5,075E-01	3,691E+02
ERJ-135	5,340E-05	7,952E-01	2,740E-01	2,543E+02

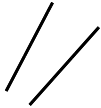
Tab. A.4: Koeffizienten der Flugzeugtypen zur Berechnung der benötigten Start- und Landebahnlängen bei Verwendung der Regressionsansätze aus Gl. (4.45) und Gl. (4.46); Start- und Landemassen in kg, Druckhöhen in m sowie Start- und Landebahnlängen in m

Flugzeugtyp	$a_{15,t}$ in m	$a_{16,t}$ in 1/kg	$a_{17,t}$ in 1/(kg m)	$a_{18,t}$ in 1/(kg m ²)	$a_{19,t}$ in m	$a_{20,t}$ in m	$a_{21,t}$ in m/kg	$a_{22,t}$ in 1/m	$a_{23,t}$ in m/kg
A220-100	2,99E+00	9,49E-05	6,19E-09	6,20E-13	8,78E+02	3,66E+02	2,35E-02	7,68E-05	9,30E-09
A220-300	1,33E+01	6,78E-05	3,72E-09	1,01E-12	7,70E+02	3,59E+02	2,35E-02	8,00E-05	1,12E-08
A318	1,00E-01	1,27E-04	3,28E-09	1,37E-12	1,20E+03	3,11E+02	2,23E-02	7,81E-05	4,74E-08
A319ceo	2,40E-02	1,41E-04	8,24E-09	2,28E-13	1,21E+03	1,22E+02	3,34E-03	2,81E-04	2,11E-02
A320ceo	8,72E-02	1,21E-04	4,77E-10	1,76E-12	1,20E+03	3,40E+01	1,90E-03	4,68E-04	2,52E-02
A320neo	1,09E+00	8,34E-05	2,25E-09	7,00E-13	1,19E+03	3,34E+01	1,87E-03	4,67E-04	2,47E-02
A321ceo	2,27E-01	9,29E-05	7,06E-09	1,02E-12	1,18E+03	6,52E+01	4,34E-03	2,96E-04	2,03E-02
A321neo	1,65E-01	9,19E-05	6,99E-09	9,95E-13	1,29E+03	6,40E+01	4,26E-03	2,96E-04	1,99E-02
A321neo-suc	1,65E-01	9,19E-05	6,99E-09	9,95E-13	1,29E+03	6,40E+01	4,26E-03	2,96E-04	1,99E-02
A330-200	1,00E-01	4,15E-05	3,55E-09	3,07E-13	1,60E+03	2,56E-09	6,92E-03	9,47E-05	4,25E-03
A330-300	1,00E-01	4,15E-05	3,55E-09	3,07E-13	1,60E+03	2,56E-09	6,92E-03	9,47E-05	4,25E-03
A340-300	1,19E+01	1,79E-05	1,08E-09	2,14E-13	1,51E+03	1,23E-07	4,53E-03	1,54E-04	7,51E-03
A340-500	3,36E+01	1,08E-05	8,37E-10	6,00E-14	1,29E+03	1,34E-07	6,12E-03	1,31E-04	3,53E-03
A340-600	5,83E+01	9,61E-06	9,56E-10	6,96E-21	1,10E+03	3,31E+02	8,72E-03	8,58E-05	1,89E-07
A350-1000	2,30E+00	2,04E-05	1,75E-09	2,65E-13	1,61E+03	7,95E+02	6,90E-03	9,48E-05	6,06E-10
A350-900	4,85E-01	2,83E-05	1,30E-09	4,77E-13	1,58E+03	8,80E+02	6,22E-03	9,87E-05	3,33E-04
A350-900neo	4,85E-01	2,83E-05	1,30E-09	4,77E-13	1,58E+03	8,80E+02	6,22E-03	9,87E-05	3,33E-04
A380-800	3,97E-01	1,42E-05	1,08E-09	1,78E-14	1,62E+03	4,32E+02	4,52E-03	8,25E-05	1,19E-11
ARB2028	4,47E-01	3,60E-05	2,85E-09	2,82E-13	1,48E+03	3,86E+02	8,61E-03	8,53E-05	7,16E-11
ATR 72	1,92E+01	1,68E-04	7,11E-09	4,04E-12	5,76E+02	5,45E+02	2,71E-02	8,33E-05	3,10E-09
B737 Max 8	8,00E+00	6,54E-05	5,79E-09	5,17E-13	8,48E+02	3,23E+02	1,77E-02	8,92E-05	3,21E-03

Flugzeugtyp	$a_{15,t}$ in m	$a_{16,t}$ in 1/kg	$a_{17,t}$ in 1/(kg m)	$a_{18,t}$ in 1/(kg m ²)	$a_{19,t}$ in m	$a_{20,t}$ in m	$a_{21,t}$ in m/kg	$a_{22,t}$ in 1/m	$a_{23,t}$ in m/kg
B737 Max 9	1,57E+01	5,69E-05	4,26E-09	6,46E-13	7,86E+02	3,93E+02	2,02E-02	7,94E-05	6,90E-10
B737-700	7,71E+00	6,30E-05	6,01E-09	3,20E-13	9,55E+02	2,33E+02	9,58E-03	1,45E-04	1,45E-02
B737-800	1,34E+01	5,64E-05	6,07E-09	1,16E-13	9,60E+02	1,56E+02	1,30E-02	1,34E-04	1,33E-02
B737-900	3,89E+00	6,81E-05	6,59E-09	4,55E-13	1,17E+03	1,93E+02	2,41E-02	7,27E-05	1,09E-08
B747-400	1,20E+02	7,28E-06	4,98E-10	9,87E-14	7,40E+02	1,40E+02	6,06E-03	1,13E-04	1,87E-03
B747-8	4,95E+01	8,24E-06	5,12E-10	1,26E-13	1,14E+03	2,80E+02	4,79E-03	1,02E-04	1,56E-03
B757-200	2,44E+01	3,60E-05	2,25E-09	4,80E-13	6,79E+02	3,27E+01	5,21E-03	2,20E-04	1,27E-02
B757-300	4,56E+00	4,68E-05	5,09E-09	3,91E-21	1,07E+03	4,36E+02	1,52E-02	7,94E-05	2,78E-11
B767-200	1,88E+00	3,79E-05	2,39E-09	2,66E-13	1,21E+03	3,03E+02	4,07E-03	1,45E-04	7,14E-03
B767-300	3,96E+01	2,15E-05	1,67E-09	1,86E-13	6,77E+02	2,43E+02	8,79E-03	9,49E-05	2,16E-03
B767-400	1,04E+02	1,61E-05	1,60E-09	2,14E-14	4,21E+02	4,75E+02	1,07E-02	8,16E-05	4,12E-09
B777-200	1,03E+00	2,57E-05	1,93E-09	3,34E-13	1,37E+03	3,02E+02	2,31E-03	1,60E-04	5,09E-03
B777-300	1,14E+02	8,82E-06	7,57E-10	1,23E-13	5,60E+02	4,29E+02	5,29E-03	9,10E-05	1,12E-03
B777-9	1,14E+02	8,82E-06	7,57E-10	1,23E-13	5,60E+02	4,29E+02	5,29E-03	9,10E-05	1,12E-03
B787-10	3,04E+00	2,51E-05	1,86E-09	2,57E-13	1,32E+03	3,65E+02	5,87E-03	1,06E-04	2,94E-03
B787-8	4,47E-01	3,60E-05	2,85E-09	2,82E-13	1,48E+03	3,86E+02	8,61E-03	8,53E-05	7,16E-11
B787-8-suc	4,47E-01	3,60E-05	2,85E-09	2,82E-13	1,48E+03	3,86E+02	8,61E-03	8,53E-05	7,16E-11
B787-9	1,39E+00	2,78E-05	1,89E-09	3,86E-13	1,49E+03	2,08E+02	5,67E-03	1,27E-04	4,09E-03
D250-TF	1,65E-01	9,19E-05	6,99E-09	9,95E-13	1,29E+03	6,40E+01	4,26E-03	2,96E-04	1,99E-02
D250-TP	1,65E-01	9,19E-05	6,99E-09	9,95E-13	1,29E+03	6,40E+01	4,26E-03	2,96E-04	1,99E-02
E190	1,20E+01	9,38E-05	7,45E-09	6,55E-13	6,30E+02	5,61E+02	1,98E-02	7,11E-05	3,44E-09
E190-E2	5,71E+00	8,98E-05	6,43E-09	5,63E-13	7,80E+02	5,98E+01	1,13E-02	1,55E-04	1,66E-02
ERJ-135	6,20E+00	2,41E-04	3,45E-09	3,92E-12	1,04E+03	2,80E+02	3,52E-11	4,28E-04	6,81E-02

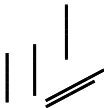
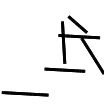
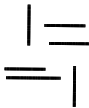
A.2 Flughafenkapazitäten

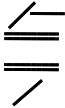
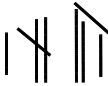
Tab. A.5: Beschreibung der Runway-Konfigurationen; Flugbewegungen oberes 5%-Quantil pro Stunde in 2019

Code	Anzahl Runways	Beschreibung	Piktogramm	Beispielflughäfen	Flug- bewegungen
RK1	1	Einzelne Runway		FUK (Fukuoka)	53
RK2	2	Zwei abhängige parallele Runways		DUS (Düsseldorf)	74
RK3	2	Zwei sich kreuzende Runways		MEL (Melbourne)	75
RK4	2	Zwei angewinkelte Runways		AGP (Malaga)	75
RK5	2	Zwei unabhängige parallele Runways		LHR (London)	88
RK6	3	Drei sich kreuzende Runways		TLV (Tel Aviv)	75
RK7	3	Drei abhängige parallele Runways		SEA (Seattle)	80

Code	Anzahl Runways	Beschreibung	Piktogramm	Beispielflughäfen	Flugbewegungen
RK8	3	Zwei abhängige parallele Runways und eine kreuzende Runway		SYD (Sydney)	82
RK9	3	Zwei unabhängige parallele Runways und eine kreuzende Runway		BCN (Barcelona)	88
RK10	3	Drei parallele Runways, von denen zwei abhängig voneinander sind		CGK (Jakarta)	90
RK11	3	Drei unabhängige parallele Runways		PEK (Peking)	91
RK12	4	Drei abhängige parallele Runways und eine kreuzende Runway		PHL (Philadelphia)	84
RK13	4	Zwei sich kreuzende Paare abhängiger paralleler Runways		SFO (San Francisco)	85
RK14	4	Zwei unabhängige parallele Runways und zwei kreuzende abhängige parallele Runways		JFK (New York)	88

Code	Anzahl Runways	Beschreibung	Piktogramm	Beispielflughäfen	Flug- bewegungen
RK15	4	Zwei sich kreuzende Paare unabhängiger paralleler Runways		HND (Tokyo)	88
RK16	4	Zwei abhängige parallele Runways, eine kreuzende und eine angewinkelte Runway		MSP (Minneapolis)	100
RK17	4	Drei parallele Runways, von denen zwei abhängig voneinander sind, und eine kreuzende Runway		FRA (Frankfurt)	103
RK18	4	Vier parallele Runways, von denen zwei abhängig voneinander sind		MCO (Orlando)	122
RK19	4	Drei unabhängige parallele Runways und eine kreuzende Runway		IAD (Washington)	105
RK20	4	Zwei unabhängige Paare von abhängigen parallelen Runways		CDG (Paris)	122

Code	Anzahl Runways	Beschreibung	Piktogramm	Beispielflughäfen	Flug- bewegungen
RK21	5	Drei parallele Runways, von denen zwei abhängig voneinander sind, und ein kreuzendes Paar abhängiger paralleler Runways		YYZ (Toronto)	103
RK22	5	Drei unabhängige parallele Runways und ein kreuzendes Paar abhängiger paralleler Runways		IAH (Houston)	119
RK23	5	Zwei unabhängige Paare von abhängigen parallelen Runways und eine zusätzliche unabhängige parallele Runway		ATL (Atlanta)	198
RK24	6	Drei unabhängige parallele Runways und drei kreuzende Runways		AMS (Amsterdam)	119
RK25	6	Vier parallele Runways, von denen zwei abhängig voneinander sind, und zwei kreuzende unabhängige parallele Runways		DEN (Denver)	143

Code	Anzahl Runways	Beschreibung	Piktogramm	Beispielflughäfen	Flug- bewegungen
RK26	7	Zwei unabhängige Paare von abhängigen parallelen Runways, eine zusätzliche unabhängige parallele Runway und zwei kreuzende unabhängige parallele Runways		DFW (Dallas/Fort Worth)	198
RK27	8	Sechs parallele Runways, bestehend aus zwei unabhängigen Sätzen zu je zwei abhängigen und einer unabhängigen Runway, und zwei kreuzende unabhängige parallele Runways		ORD (Chicago)	198

Tab. A.6: Beziehung zwischen den Runway-Konfigurationen hinsichtlich der Anzahl an Flugbewegungen

$RK2 \geq RK1$	(A.1)	$RK12 \geq RK8$	(A.19)	$RK19 \geq RK17$	(A.37)
$RK3 \geq RK1$	(A.2)	$RK13 \geq RK2$	(A.20)	$RK20 \geq RK5$	(A.38)
$RK4 \geq RK3$	(A.3)	$RK13 \geq RK8$	(A.21)	$RK20 \geq RK17$	(A.39)
$RK5 \geq RK2$	(A.4)	$RK14 \geq RK9$	(A.22)	$RK21 \geq RK14$	(A.40)
$RK5 \geq RK4$	(A.5)	$RK14 \geq RK13$	(A.23)	$RK21 \geq RK17$	(A.41)
$RK6 \geq RK3$	(A.6)	$RK15 \geq RK14$	(A.24)	$RK22 \geq RK19$	(A.42)
$RK7 \geq RK2$	(A.7)	$RK16 \geq RK4$	(A.25)	$RK22 \geq RK21$	(A.43)
$RK8 \geq RK2$	(A.8)	$RK16 \geq RK6$	(A.26)	$RK23 \geq RK18$	(A.44)
$RK8 \geq RK3$	(A.9)	$RK16 \geq RK8$	(A.27)	$RK23 \geq RK22$	(A.45)
$RK9 \geq RK5$	(A.10)	$RK17 \geq RK9$	(A.28)	$RK24 \geq RK22$	(A.46)
$RK9 \geq RK8$	(A.11)	$RK17 \geq RK10$	(A.29)	$RK25 \geq RK15$	(A.47)
$RK10 \geq RK7$	(A.12)	$RK17 \geq RK12$	(A.30)	$RK25 \geq RK20$	(A.48)
$RK11 \geq RK5$	(A.13)	$RK17 \geq RK16$	(A.31)	$RK25 \geq RK24$	(A.49)
$RK11 \geq RK6$	(A.14)	$RK18 \geq RK11$	(A.32)	$RK26 \geq RK23$	(A.50)
$RK11 \geq RK9$	(A.15)	$RK18 \geq RK15$	(A.33)	$RK26 \geq RK25$	(A.51)
$RK11 \geq RK10$	(A.16)	$RK18 \geq RK17$	(A.34)	$RK27 \geq RK26$	(A.52)
$RK12 \geq RK3$	(A.17)	$RK18 \geq RK20$	(A.35)		
$RK12 \geq RK7$	(A.18)	$RK19 \geq RK11$	(A.36)		

A.3 Betriebskostenmodellierung

Tab. A.7: Jährliche effektive Kerosinpreise inklusive IPD von 50 €/t und in €-2010 (*U.S. Energy Information Administration*, 2023b; *International Airlines Group*, 2020)

Jahr	effektiver Kerosinpreis in €/kg
2010	0,5842
2011	0,7223
2012	0,7657
2013	0,6977
2014	0,6360
2015	0,4426
2016	0,3672
2017	0,4251
2018	0,5085
2019	0,4882

Tab. A.8: Sammlung der DOC-Formeln (*Thorbeck, 2013; Franz, 2014*)

$$DOC = DOC_{fuel} + DOC_{fees} + DOC_{mro} + DOC_{crew} + DOC_{capital} \quad (4.30)$$

$$DOC_{fuel} = P_{fuel} \cdot m_{fuel} \cdot fc \quad (4.31)$$

$$DOC_{fees} = DOC_{land} + DOC_{ground} + DOC_{nav} \quad (4.32)$$

$$DOC_{land} = MTOM \cdot K_{land} \cdot fc \quad (A.53)$$

$$DOC_{ground} = m_{pl} \cdot K_{ground} \cdot fc \quad (A.54)$$

$$m_{pl} = m_{pax} \cdot n_{pax} \quad (A.55)$$

$$DOC_{nav} = \frac{d}{100} \cdot \sqrt{\frac{MTOM}{50 \cdot 1000}} \cdot K_{nav} \cdot fc \quad (A.56)$$

$$DOC_{mro} = DOC_{eng} + DOC_{af,mat} + DOC_{af,per} \quad (4.33)$$

$$DOC_{eng} = n_{eng} \cdot \left(1,5 \cdot \frac{SLST}{9,81} + 30,5 \cdot ft + 10,6 \right) \cdot fc \quad (A.57)$$

$$DOC_{af,mat} = \left(\frac{OEM}{1000} \cdot (0,21 \cdot ft + 13,7) + 57,5 \right) \cdot fc \quad (A.58)$$

$$DOC_{af,per} = LR \cdot (1 + B) \cdot \left(\left(0,655 + 0,01 \cdot \frac{OEM}{1000} \right) \cdot ft + 0,254 + 0,01 \cdot \frac{OEM}{1000} \right) \cdot fc \quad (A.59)$$

$$DOC_{crew} = CC \cdot (S_{fa} \cdot n_{fa} + S_{fc}) \quad (4.34)$$

$$DOC_{capital} = (CR_{ann} + CR_{ins}) \cdot (P_{OEM} \cdot (OEM - m_{eng} \cdot n_{eng}) + P_{eng} \cdot m_{eng} \cdot n_{eng}) \quad (4.35)$$

$$CR_{ann} = IR \cdot \frac{1 - RV \cdot \left(\frac{1}{1+IR} \right)^{DP}}{1 - \left(\frac{1}{1+IR} \right)^{DP}} \quad (A.60)$$

Tab. A.9: Parameter des Modells der DOC sowie ihre nominellen Werte
(Thorbeck, 2013; Franz, 2014)

Parameter	Beschreibung	Wert	Einheit
B	Kostenbelastung	2	—
CC	Anzahl an Crews pro Flugzeug	5	—
CR_{ins}	Versicherungsrate	0,5 %	—
d	Distanz	f (Mission)	km
DP	Abschreibungszeitraum	14	a
fc	Flugzyklen	f (AC, Mission)	—
ft	Flugzeit	f (AC, Mission)	h
IR	Zinsrate	5 %	—
K_{ground}	Rate der Abfertigungsgebühren	0,1	€/kg
K_{land}	Rate der Landegebühren	0,01	€/kg
K_{nav}	Rate der Navigationsgebühren	100	€/km
LR	Arbeitskosten	50	€/h
m_{eng}	Triebwerksmasse	f (AC)	kg
m_{fuel}	Blocktreibstoffmasse	f (AC, Mission)	kg
m_{pax}	Nutzlast pro Passagier:in inklusive Gepäck	100	kg
m_{pl}	Masse der Nutzlast	f (AC, Mission)	kg
$MTOM$	Maximale Abflugmasse	f (AC)	kg
n_{eng}	Anzahl an Triebwerken	f (AC)	—
n_{fa}	Anzahl an Flugbegleiter:innen	f (AC)	—
n_{pax}	Anzahl an Passagier:innen pro Flug	f (AC, Mission)	—
OEM	Operationelle Flugzeugleermasse	f (AC)	kg
P_{eng}	Preis pro Triebwerksmasse	2500	€/kg
P_{fuel}	Treibstoffpreis	f (Jahr)	€/kg
P_{OEM}	Preis pro operationeller Flugzeugleermasse	1150	€/kg
RV	Faktor für den Restwert nach Abschreibungszeitraum	10 %	—
S_{fa}	Jährliches Gehalt pro Flugbegleiter:in	60 000	€
S_{fc}	Jährliches Gehalt pro Cockpitbesatzung (2 Pilot:innen)	300 000	€
$SLST$	Bodenstandschub	f (AC)	kN

A.4 Herleitung zu den benötigten Start- und Landebahnlängen

Es folgen die Herleitungen von Gl. (4.46) und Gl. (4.49) aus Unterabschnitt 4.3.6.

Herleitung von Gl. (4.46):

Für die Herleitung von Gl. (4.46) sind Gl. (4.36), Gl. (4.37) und Gl. (4.44) gegeben.

$$m_{fuel_{o,d,t}} = a_{1,t} \cdot d_{o,d}^2 + a_{2,t} \cdot d_{o,d} + a_{3,t} \cdot d_{o,d} \cdot lf_{o,d,t} + a_{4,t} \quad (4.36)$$

$$lf_{o,d,t} = \frac{pl_{o,d,t}}{pl_{MZFM_t}} \quad (4.37)$$

$$\begin{aligned} tofl_{o,d,t,p}^{req} = a_{15,t} \cdot \exp(a_{16,t} \cdot tom_{o,d,t,p} + a_{17,t} \cdot tom_{o,d,t,p} \cdot pa_o \\ + a_{18,t} \cdot tom_{o,d,t,p} \cdot pa_o^2) + a_{19,t} \end{aligned} \quad (4.44)$$

Zusätzlich wird gemäß Unterabschnitt 4.3.6 die Annahme getroffen, dass die Startmasse $tom_{o,d,t,p}$ der Summe aus Flugzeugleermasse oem_t , Nutzlast $pl_{o,d,t,p}$ und Treibstoffmasse $m_{fuel_{o,d,t,p}}$ entspricht.

$$tom_{o,d,t,p} = oem_t + pl_{o,d,t,p} + m_{fuel_{o,d,t,p}} \quad (A.61)$$

Die Umformung von Gl. (4.44) nach der Startmasse $tom_{o,d,t,p}$ führt zu Gl. (A.62).

$$\begin{aligned} tofl_{o,d,t,p}^{req} &= a_{15,t} \cdot \exp(a_{16,t} \cdot tom_{o,d,t,p} + a_{17,t} \cdot tom_{o,d,t,p} \cdot pa_o \\ &\quad + a_{18,t} \cdot tom_{o,d,t,p} \cdot pa_o^2) + a_{19,t} \quad (4.44) \\ \Leftrightarrow \ln\left(\frac{tofl_{o,d,t,p}^{req} - a_{19,t}}{a_{15,t}}\right) &= a_{16,t} \cdot tom_{o,d,t,p} + a_{17,t} \cdot tom_{o,d,t,p} \cdot pa_o \\ &\quad + a_{18,t} \cdot tom_{o,d,t,p} \cdot pa_o^2 \\ &= tom_{o,d,t,p} \cdot (a_{16,t} + a_{17,t} \cdot pa_o + a_{18,t} \cdot pa_o^2) \\ \Leftrightarrow tom_{o,d,t,p} &= \frac{\ln((tofl_{o,d,t,p}^{req} - a_{19,t}) / a_{15,t})}{a_{16,t} + a_{17,t} \cdot pa_o + a_{18,t} \cdot pa_o^2} \quad (A.62) \end{aligned}$$

Wird statt der benötigten Startbahnlänge $tofl_{o,d,t,p}^{req}$ bei Startmasse $tom_{o,d,t,p}$ die konkrete Runway-Länge am Abflugflughafen rwl_o in Gl. (A.62) eingesetzt, folgt unmittelbar Gl. (4.47) zur Berechnung der maximal möglichen Startmasse $tom_{o,d,t}^{pos,to}$.

$$tom_{o,d,t}^{pos,to} = \frac{\ln((rwl_o - a_{19,t}) / a_{15,t})}{a_{16,t} + a_{17,t} \cdot pa_o + a_{18,t} \cdot pa_o^2} \quad (4.47)$$

Durch Einsetzen von Gl. (4.36) und Gl. (4.37) in Gl. (A.61) folgt unter Verwendung der Hilfsvariablen $\xi_{o,d,t}$ (gemäß Gl. (4.48)) die Gl. (A.63).

$$\begin{aligned}
 tom_{o,d,t,p} &= oem_t + pl_{o,d,t,p} + a_{1,t} \cdot d_{o,d}^2 + a_{2,t} \cdot d_{o,d} + a_{3,t} \cdot d_{o,d} \cdot \frac{pl_{o,d,t,p}}{pl_{MZFM_t}} + a_{4,t} \\
 &= pl_{o,d,t,p} \cdot \left(1 + \frac{a_{3,t} \cdot d_{o,d}}{pl_{MZFM_t}} \right) + oem_t + \underbrace{a_{1,t} \cdot d_{o,d}^2 + a_{2,t} \cdot d_{o,d} + a_{4,t}}_{:=\xi_{o,d,t} \text{ (gemäß Gl. (4.48))}} \\
 &= pl_{o,d,t,p} \cdot \left(\frac{pl_{MZFM_t} + a_{3,t} \cdot d_{o,d}}{pl_{MZFM_t}} \right) + oem_t + \xi_{o,d,t} \quad (A.63)
 \end{aligned}$$

Die Umformung von Gl. (A.63) nach der Nutzlast $pl_{o,d,t,p}$ führt zu Gl. (4.46), mit der die maximal mögliche Nutzlast $pl_{o,d,t}^{pos,to}$ unter Einhaltung der verfügbaren Runway-Länge am Abflugflughafen rwl_o berechnet werden kann.

$$pl_{o,d,t}^{pos,to} = pl_{MZFM_t} \cdot \frac{tom_{o,t}^{pos,to} - oem_t - \xi_{o,d,t}}{a_{3,t} \cdot d_{o,d} + pl_{MZFM_t}} \quad (4.46)$$

Herleitung von Gl. (4.49):

Für die Herleitung von Gl. (4.49) wird der Regressionsansatz der benötigten Landebahnlänge $lfl_{o,d,t,p}^{req}$ (Gl. (4.45)) umgeformt und mit der Annahme aus Unterabschnitt 4.3.6, dass die Landemasse $lm_{o,d,t,p}$ der Summe aus der Leermasse oem_t , der Nutzlast $pl_{o,d,t,p}$ und dem distanzunabhängigen Anteil der Treibstoffregression $a_{4,t}$ entspricht (Gl. (A.64)), nach der Nutzlast aufgelöst. Zusätzlich wird, analog zur Herleitung von Gl. (4.46), statt der benötigten Landebahnlänge $lfl_{o,d,t,p}^{req}$ die konkrete Runway-Länge am Abflugflughafen rwl_d eingesetzt, um die maximal mögliche Nutzlast für die Landung am Flughafen d zu bestimmen.

$$lm_{o,d,t,p} = oem_t + pl_{o,d,t,p} + a_{4,t} \quad (A.64)$$

$$\begin{aligned}
 lfl_{o,d,t,p}^{req} &= (a_{20,t} + a_{21,t} \cdot lm_{o,d,t,p}) \cdot \exp(a_{22,t} \cdot pa_d) + a_{23,t} \cdot lm_{o,d,t,p} \quad (4.45) \\
 &= a_{20,t} \cdot \exp(a_{22,t} \cdot pa_d) + lm_{o,d,t,p} \cdot (a_{21,t} \cdot \exp(a_{22,t} \cdot pa_d) + a_{23,t}) \\
 &= a_{20,t} \cdot \exp(a_{22,t} \cdot pa_d) \\
 &\quad + (oem_t + pl_{o,d,t,p} + a_{4,t}) \cdot (a_{21,t} \cdot \exp(a_{22,t} \cdot pa_d) + a_{23,t}) \\
 \Leftrightarrow pl_{d,t}^{pos,l} &= \frac{rwl_d - a_{20,t} \cdot \exp(a_{22,t} \cdot pa_d)}{a_{21,t} \cdot \exp(a_{22,t} \cdot pa_d) + a_{23,t}} - oem_t - a_{4,t} \quad (4.49)
 \end{aligned}$$

B. Weitere Ergebnisse

B.1 Validierung der Modellgüte

In Analogie zu den in den Abb. 4.14–4.17 vorgestellten Ergebnisse der Validierung der Modellgüte für den Kalibrierungszeitraum 2010–2016 werden nachfolgend die Ergebnissen der Validierung der Modellgüte für die beiden anderen Kalibrierungszeiträume 2013–2019 und 2010–2019 vorgestellt.

(a) Zeitraum 2013–2019

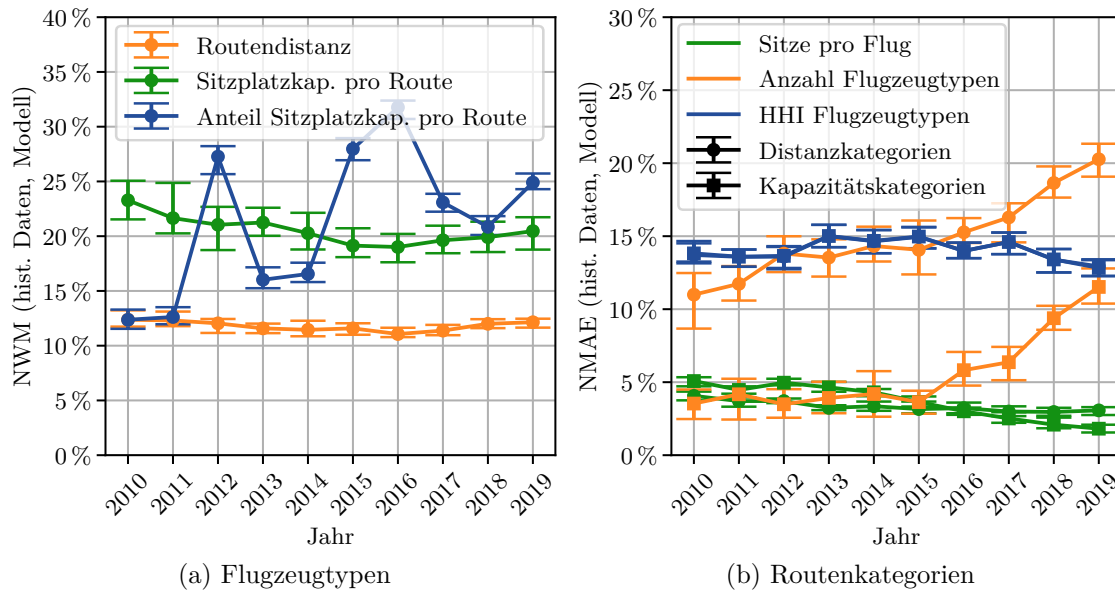


Abb. B.1: Aggregierte Validierungsergebnisse nach Routenkategorien und Flugzeugtypen für den Kalibrierungszeitraum 2013–2019

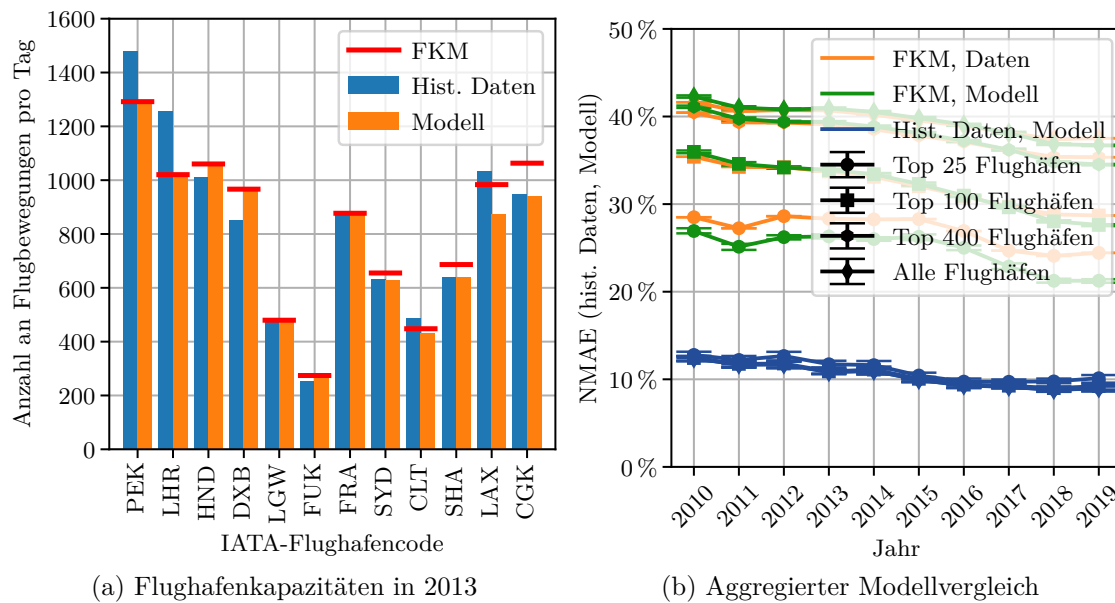


Abb. B.2: Aggregierte Validierungsergebnisse nach Flughäfen für den Kalibrierungszeitraum 2013–2019

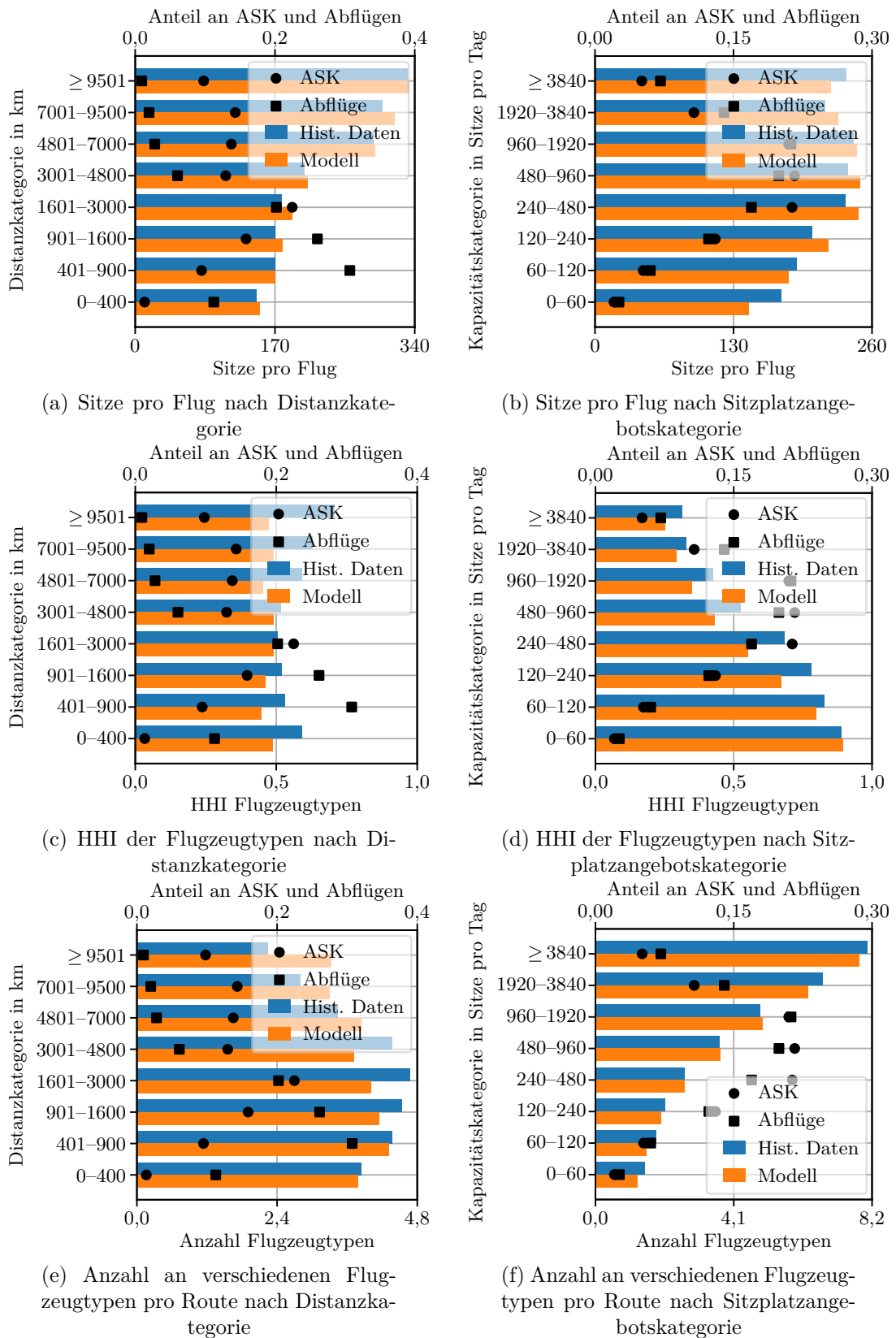
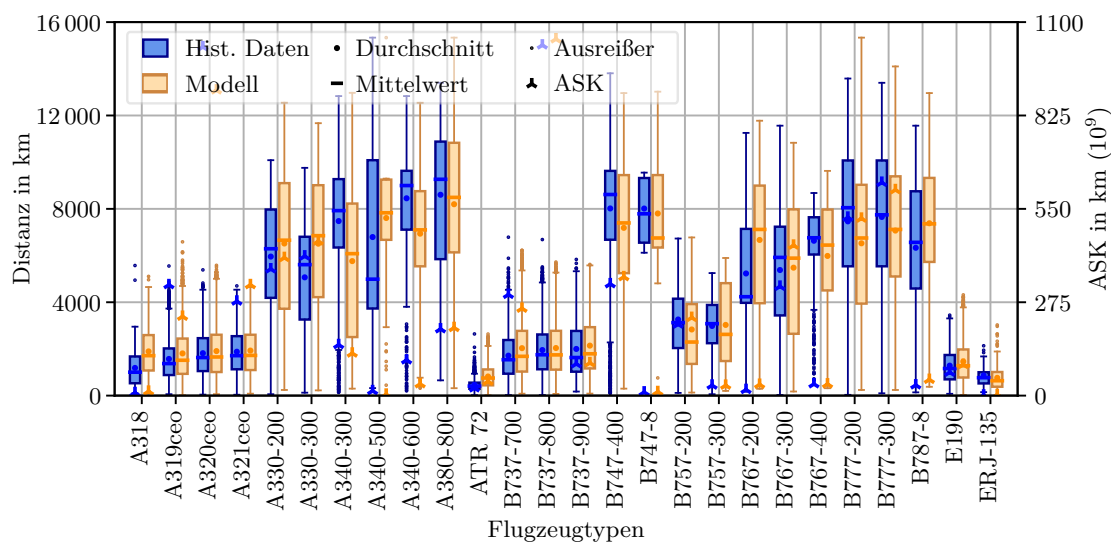
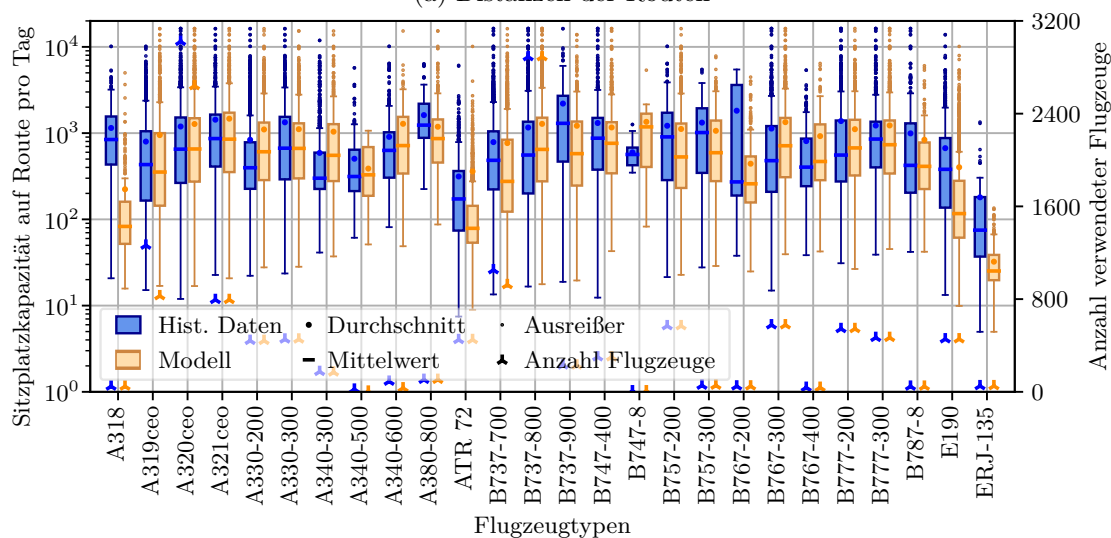


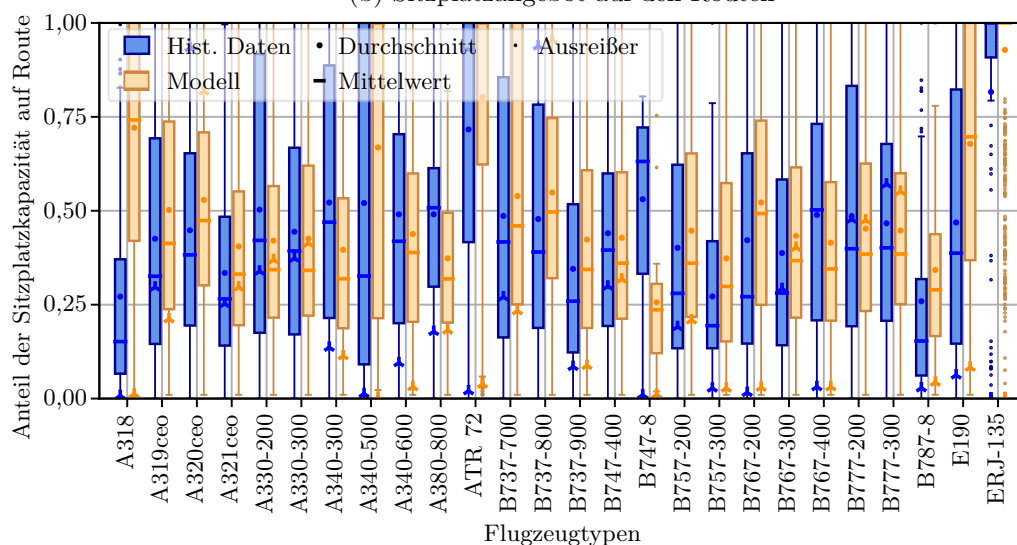
Abb. B.3: Validierungsergebnisse nach Routenkategorien für das Jahr 2013 und den Kalibrierungszeitraum 2013–2019; durchschnittliche Werte je Kategorie; Anteile der Kategorien an Flugbewegungen und ASK auf oberer Abszisse



(a) Distanzen der Routen



(b) Sitzplatzangebot auf den Routen



(c) Sitzplatzangebotsanteil auf den Routen

Abb. B.4: Charakteristika der Routen, auf denen die Flugzeugtypen im Jahr 2013 eingesetzt werden, für den Kalibrierungszeitraum 2013–2019

(b) Zeitraum 2010–2019

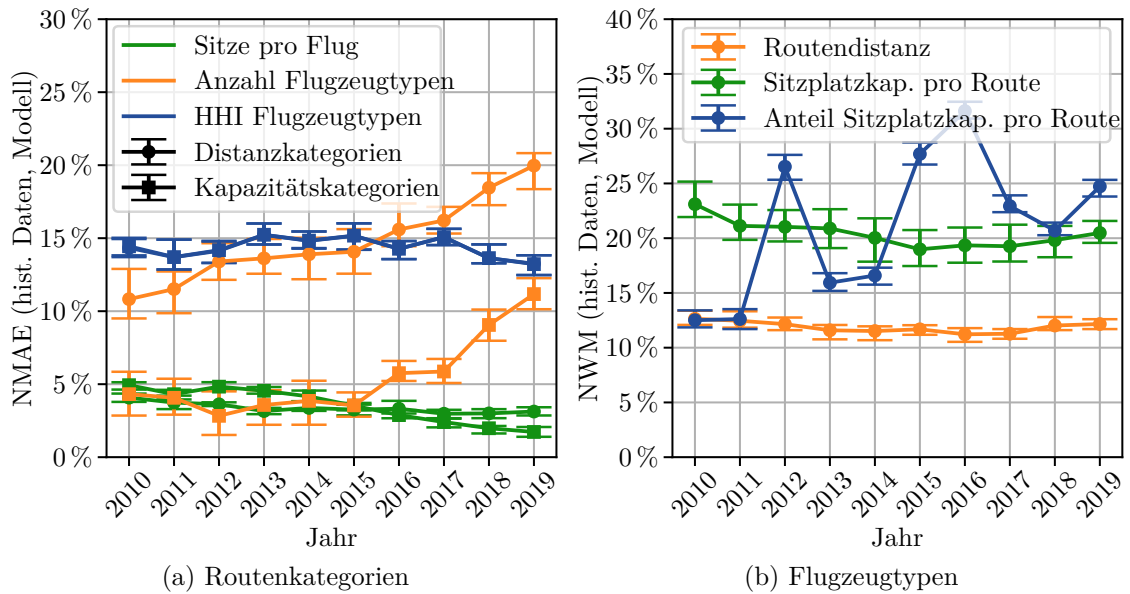


Abb. B.5: Aggregierte Validierungsergebnisse nach Routenkategorien und Flugzeugtypen für den Kalibrierungszeitraum 2010–2019

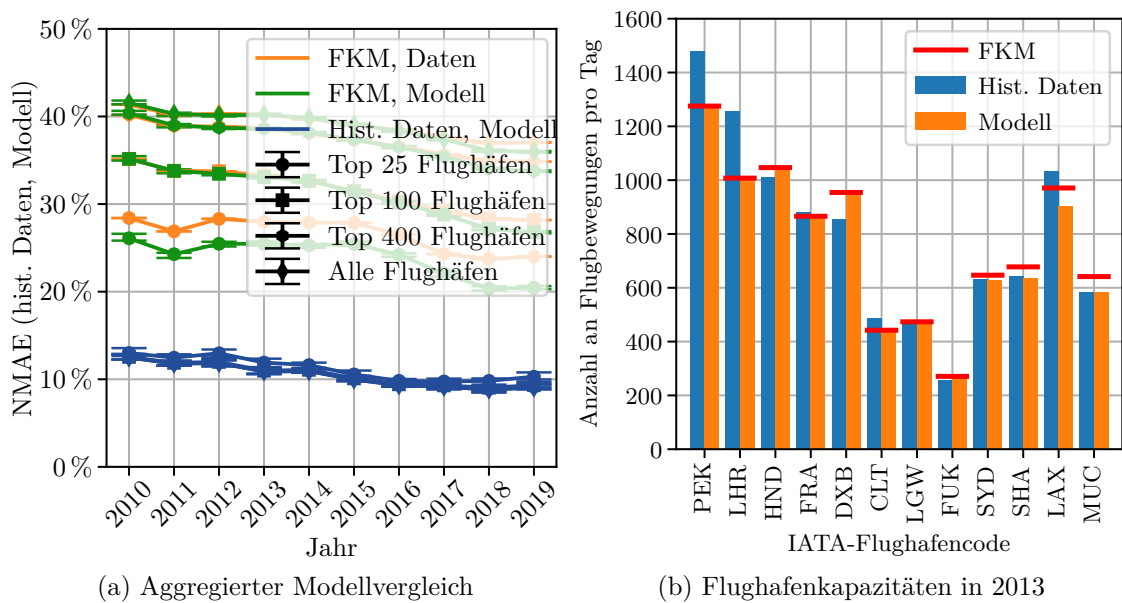


Abb. B.6: Aggregierte Validierungsergebnisse nach Flughäfen für den Kalibrierungszeitraum 2010–2019

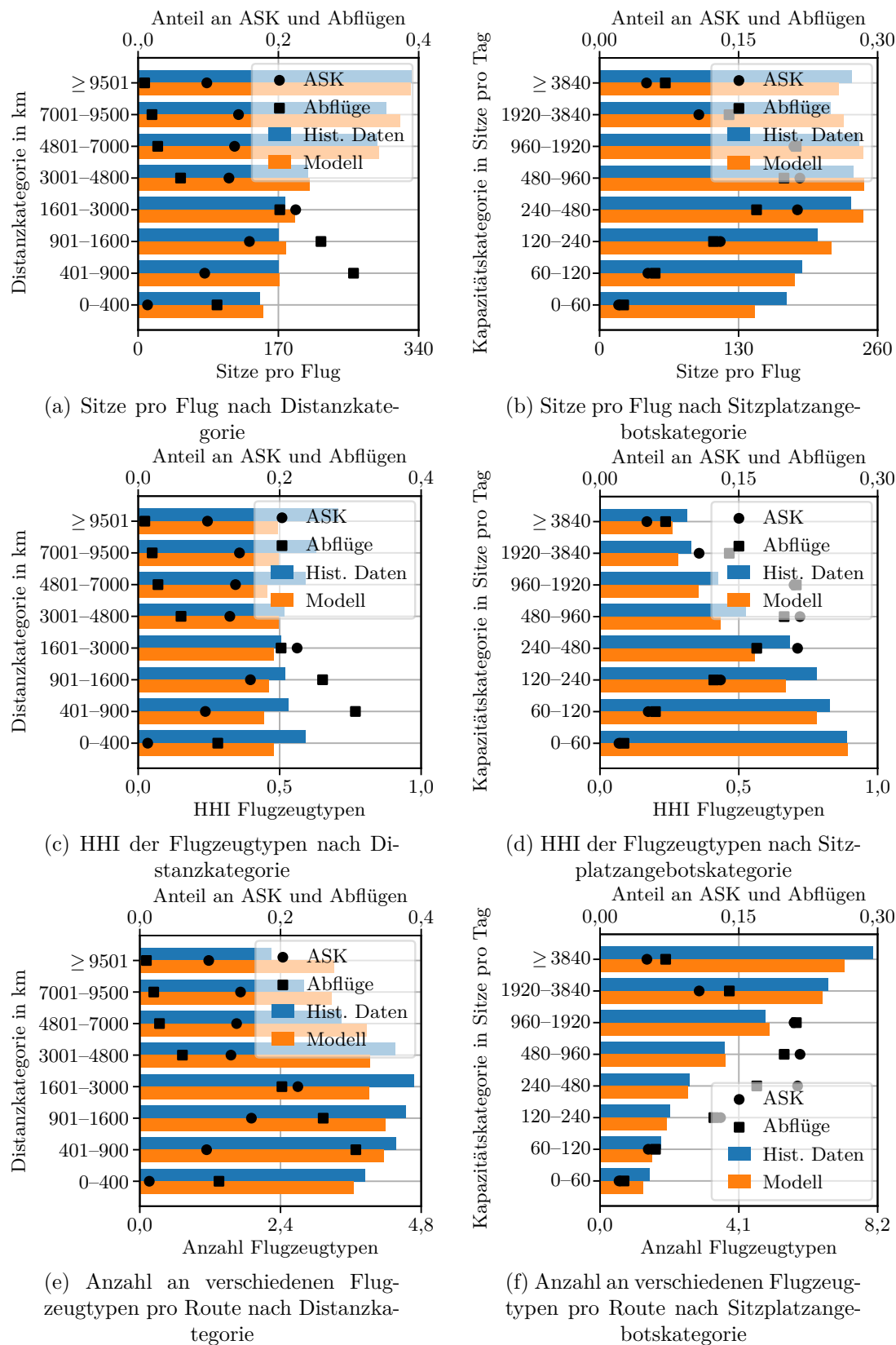
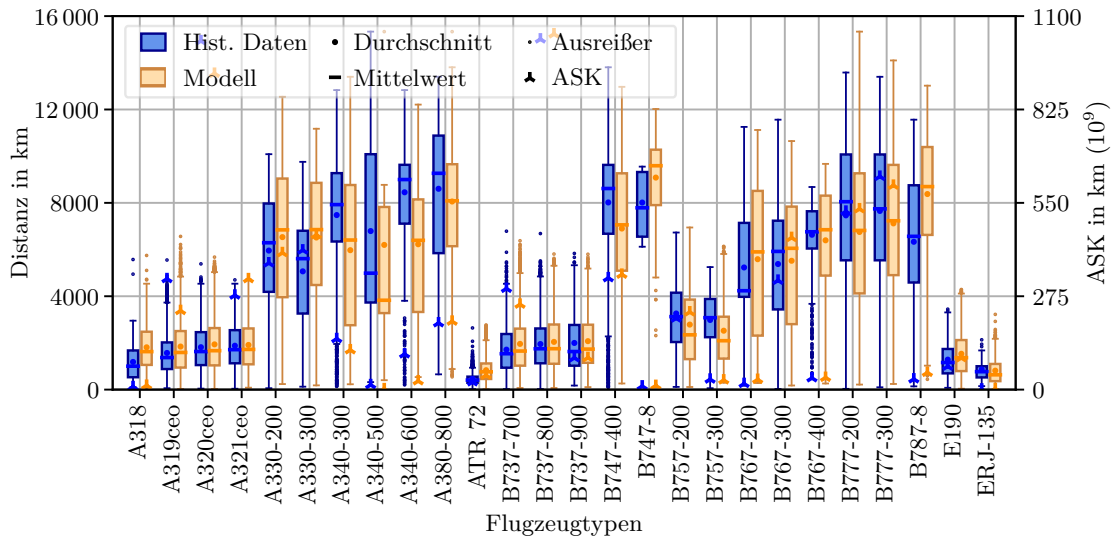
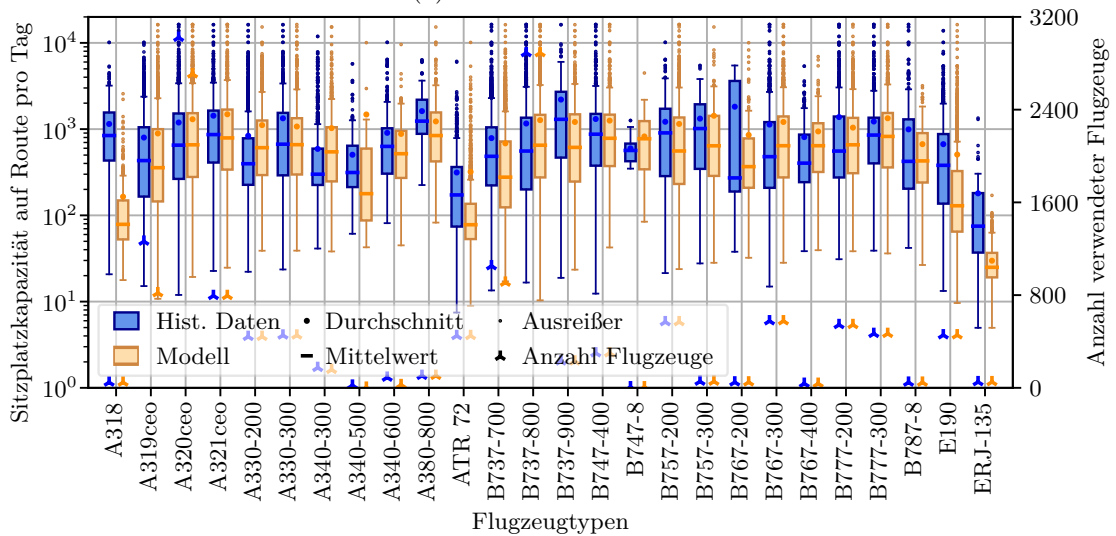


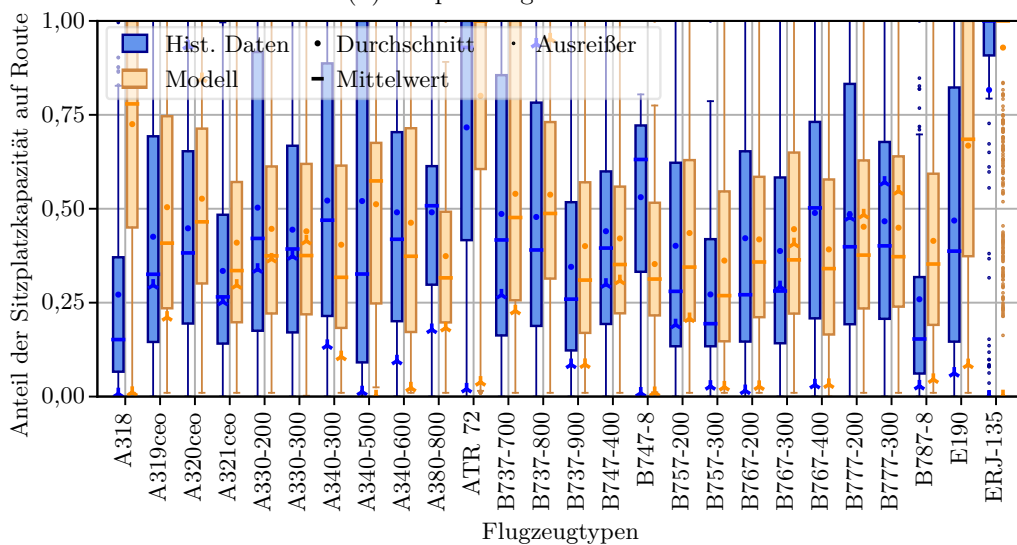
Abb. B.7: Validierungsergebnisse nach Routenkategorien für das Jahr 2013 und den Kalibrierungszeitraum 2010–2019; durchschnittliche Werte je Kategorie; Anteile der Kategorien an Flugbewegungen und ASK auf oberer Abszisse



(a) Distanzen der Routen



(b) Sitzplatzangebot auf den Routen



(c) Sitzplatzangebotsanteil auf den Routen

Abb. B.8: Charakteristika der Routen, auf denen die Flugzeugtypen im Jahr 2013 eingesetzt werden, für den Kalibrierungszeitraum 2010–2019

B.2 Triebwerksbauart für ein Kurzstreckenflugzeug

Tab. B.1: Zusammenfassung des Luftverkehrsszenarios für das Jahr 2040

Kategorie	Auswertungsmetrik		Metrikwert
Routen- netzwerk	Anzahl der Routen		44 399
	GCD pro Route in km	Minimum	9
		1. Quartil	702
		Median	1301
		3. Quartil	2282
		Maximum	14 201
Sitzplatz- angebot	Summe des Sitzplatzangebots im Jahr (10^9)		10,06
	Sitzplatzangebot pro Route und Jahr	Minimum	70
		1. Quartil	23 657
		Median	72 637
		3. Quartil	215 335
		Maximum	14 189 443
Flugzeug- flotte	Anzahl der Flugzeuge		33 757
	Durchschnittliches Flugzeugalter in Jahren		13,75
	Durchschnittliche Sitzplatzanzahl pro Flugzeug		248
	Anzahl der Flugzeuge je Sitzplatzkategorie (dominanter Flugzeugtyp)	≤ 150 Sitze	2913 (E190-E2)
		151 Sitze – 175 Sitze	5348 (A320neo)
		176 Sitze – 210 Sitze	5711 (A321neo)
		211 Sitze – 280 Sitze	9435 (B787-8)
		281 Sitze – 350 Sitze	5552 (A350-900)
		≥ 351 Sitze	4798 (B777-9)

Tab. B.2: Alle Untersuchungsszenarien des Anwendungsfalls mit den 10%-, 50%- und 90%-Quantilen der ermittelten Einsatzdistanzen

Szenario	Flugzeug	Treibstoff- preis in €/kg	VOT in €/h	Anzahl Flugzeuge	Distanz in km		
					10 %	50 %	90 %
1	Turbofan	0,3	0	500	435	1155	2148
2	Turboprop	0,3	0	500	429	960	1932
3	Turbofan	0,3	20	500	451	1127	2105
4	Turboprop	0,3	20	500	341	679	1492
5	Turbofan	0,3	40	500	403	1094	2055
6	Turboprop	0,3	40	500	309	567	1214
7	Turbofan	0,9	0	500	530	1282	2454
8	Turboprop	0,9	0	500	484	1150	2216
9	Turbofan	0,9	20	500	521	1274	2434
10	Turboprop	0,9	20	500	363	845	1756
11	Turbofan	0,9	40	500	508	1226	2375
12	Turboprop	0,9	40	500	327	677	1472
13	Turbofan	1,8	0	500	690	1525	2685
14	Turboprop	1,8	0	500	620	1380	2518
15	Turbofan	1,8	20	500	670	1495	2633
16	Turboprop	1,8	20	500	456	1102	2219
17	Turbofan	1,8	40	500	647	1492	2623
18	Turboprop	1,8	40	500	355	872	1754
19	Turbofan	0,3	0	2000	422	1101	2296
20	Turboprop	0,3	0	2000	370	937	1973
21	Turbofan	0,3	20	2000	417	1091	2202
22	Turboprop	0,3	20	2000	335	721	1583
23	Turbofan	0,3	40	2000	404	1070	2117
24	Turboprop	0,3	40	2000	309	645	1336
25	Turbofan	0,9	0	2000	483	1263	2488
26	Turboprop	0,9	0	2000	412	1066	2296
27	Turbofan	0,9	20	2000	489	1202	2455
28	Turboprop	0,9	20	2000	361	832	1854
29	Turbofan	0,9	40	2000	440	1200	2395
30	Turboprop	0,9	40	2000	337	704	1523
31	Turbofan	1,8	0	2000	594	1414	2680
32	Turboprop	1,8	0	2000	489	1266	2546
33	Turbofan	1,8	20	2000	568	1369	2636
34	Turboprop	1,8	20	2000	404	1025	2200
35	Turbofan	1,8	40	2000	519	1327	2582
36	Turboprop	1,8	40	2000	365	837	1819

B.3 Markteinführung eines Mittelstreckenflugzeugs

Tab. B.3: Flottenzusammensetzung der verschiedenen Szenarien für das Jahr 2040

Szenario	Flugzeugtyp	Anzahl	Alter	Sitze
1–4	A318	10	31,6	118
	A319ceo	262	31,9	141
	A320ceo	644	26,5	166
	A320neo	4210	14,4	174
	A321ceo	146	24,2	197
	A330-200	56	27,6	273
	A330-300	70	25,3	297
	A380-800	26	22,9	479
	ATR 72	228	26,1	72
	B737-700	211	31,2	133
	B737-800	629	25,0	168
	B737-900	62	23,2	187
	B747-8	231	18,5	391
	B767-300	13	36,6	265
	B777-200	55	33,7	297
	B777-300	63	24,2	371
	B777-9	4419	7,0	388
	E190	97	25,5	104
	E190-E2	2101	13,1	105
1	B787-8	8845	9,0	259
	A321neo	5452	10,8	210
	A350-900	5268	8,8	299
2–4	B787-8	2902	15,5	259
	A321neo	2506	15,5	210
	A350-900	1668	15,2	299
2	A321neo-suc	5617	6,0	210
	A350-900neo	6872	6,0	299
3 & 4	A321neo-suc	2946	6,0	210
	A350-900neo	3600	6,0	299
3	B787-8-suc	5943	6,0	259
4	ARB2028	5989	6,0	257

Abbildungsverzeichnis

1.1	Historische Entwicklung des Luftverkehrs	2
1.2	Einsatzdistanzen des Flugzeugtyps Airbus A320ceo in 2019	3
2.1	Prozessablauf im konzeptionellen Flugzeugentwurf	9
2.2	Zusammensetzung der DOC des Flugzeugtyps Airbus A320ceo	12
2.3	Visualisierung der Ansätze zur Ermittlung von Einsatzszenarien für die Bewertung von Flugzeugentwürfen	16
4.1	Schematische Darstellung der allgemeinen Modellarchitektur	45
4.2	Modellbildung der NRD	64
4.3	Regression der Blockzeit für den Zeitraum 2010–2019	67
4.4	Ablauf der Turnaround-Prozesse für die Flugzeugtypen A320ceo und A320neo	68
4.5	Regression der Turnaround-Zeit für den Zeitraum 2010–2019	69
4.6	Regression der Nutzungsrate für den Zeitraum 2010–2019	71
4.7	Bestimmung der Flughafenkapazität am Beispiel FRA im Jahr 2019	74
4.8	Regression der benötigten Startbahnlänge für den Flugzeugtyp Boeing 787-9	76
4.9	Regression der benötigten Landebahnlänge für den Flugzeugtyp Boeing 787-9	76
4.10	Sitzplatzangebot und Anzahl an Airlines auf der Route	83
4.11	Anzahl an Airlines und Marktkonzentration auf der Route	85
4.12	Vergleich der unterschiedlichen Kalibrierungszeiträume	90
4.13	Aktivitätsdiagramm des Modells der Flugzeug-Routen-Zuordnung	92
4.14	Charakteristika der Routen, auf denen die Flugzeugtypen im Jahr 2013 eingesetzt werden, für den Kalibrierungszeitraum 2010–2016	98

4.15	Validierungsergebnisse nach Routenkategorien für das Jahr 2013 und den Kalibrierungszeitraum 2010–2016	101
4.16	Aggregierte Validierungsergebnisse nach Routenkategorien und Flugzeugtypen für den Kalibrierungszeitraum 2010–2016	103
4.17	Aggregierte Validierungsergebnisse nach Flughäfen für den Kalibrierungszeitraum 2010–2016	104
5.1	NRD der untersuchten Kurzstreckenflugzeuge	114
5.2	3D-Renderings der untersuchten Kurzstreckenflugzeuge	114
5.3	Distanzverteilungen der Einsatzszenarien	118
5.4	Veränderung der Bewertungsmetriken beim Wechsel von Turbopan zu Turboprop	119
5.5	Routennetzwerke von Lufthansa und easyJet mit den Flugzeugtypen Airbus A321ceo und Airbus A321neo in 2019	122
5.6	Einsatzdistanzverteilungen unterschiedlicher Flugzeugtypen in den untersuchten Szenarien	129
5.7	Distanzabhängige Auswertung der Einsatzszenarien	131
B.1	Aggregierte Validierungsergebnisse nach Routenkategorien und Flugzeugtypen für den Kalibrierungszeitraum 2013–2019	172
B.2	Aggregierte Validierungsergebnisse nach Flughäfen für den Kalibrierungszeitraum 2013–2019	172
B.3	Validierungsergebnisse nach Routenkategorien für das Jahr 2013 und den Kalibrierungszeitraum 2013–2019	173
B.4	Charakteristika der Routen, auf denen die Flugzeugtypen im Jahr 2013 eingesetzt werden, für den Kalibrierungszeitraum 2013–2019	174
B.5	Aggregierte Validierungsergebnisse nach Routenkategorien und Flugzeugtypen für den Kalibrierungszeitraum 2010–2019	175
B.6	Aggregierte Validierungsergebnisse nach Flughäfen für den Kalibrierungszeitraum 2010–2019	175
B.7	Validierungsergebnisse nach Routenkategorien für das Jahr 2013 und den Kalibrierungszeitraum 2010–2019	176
B.8	Charakteristika der Routen, auf denen die Flugzeugtypen im Jahr 2013 eingesetzt werden, für den Kalibrierungszeitraum 2010–2019	177

Tabellenverzeichnis

2.1	Literatur zur Bewertung von Flugzeugentwürfen	17
3.1	Potentielle Erfüllung der Anforderungen aus dem Einsatzbereich der zu entwickelnden Modells durch verschiedene Modellierungsmethodiken	40
4.1	Notation für Zielfunktion und Entscheidungsvariablen	49
4.2	Notation für die Nebenbedingungen	51
4.3	Notation für die Kosten	53
4.4	Notation für die Flugzeugnutzung	54
4.5	Notation für die Marktkonzentration	56
4.6	Werte der Koeffizienten der Regression für die Blockzeit	66
4.7	Werte der Koeffizienten der Regression für die Turnaround-Zeit	68
4.8	Werte der Koeffizienten der Regression für die Nutzungsrate	70
4.9	Fünf-Punkte-Zusammenfassung der Sitzplatzdichte	80
4.10	Koeffizienten der Regression für den Mittelwert der Anzahl an Airlines	82
4.11	Koeffizienten der Regression für die Varianz der Anzahl an Airlines	83
4.12	Abweichungsmaße für die Kalibrierung	87
4.13	Werte der Kalibrierungsparameter	89
4.14	Verifizierung der Submodelle	96
4.15	Validierung der Modelldynamik	107
5.1	TLARs der untersuchten Kurzstreckenflugzeuge	114
5.2	Auswahl an Untersuchungsszenarien mit Einsatzdistanzen	117
5.3	Veränderung der Bewertungsmetriken beim Wechsel von Turbofan- zu Turboprop-Flugzeugentwurf	123

5.4	Vergleich der Auswertung der untersuchten Flottenszenarien	133
A.1	Allgemeine Daten zu den Flugzeugtypen	150
A.2	Massen- und Nutzlast-Reichweiten-Daten zu den Flugzeugtypen . .	152
A.3	Koeffizienten der Regression für die Treibstoffverbräuche	154
A.4	Koeffizienten der Regression für die Start- und Landebahnlängen . .	156
A.5	Beschreibung der Runway-Konfigurationen	159
A.6	Beziehung zwischen den Runway-Konfigurationen hinsichtlich der Anzahl an Flugbewegungen	164
A.7	Jährliche Kerosinpreise	165
A.8	Sammlung der DOC-Formeln	166
A.9	Parameter des Modells der DOC	167
B.1	Zusammenfassung des Luftverkehrsszenarios für das Jahr 2040 . . .	178
B.2	Alle Untersuchungsszenarien des Anwendungsfalls mit Einsatzdi- stanzen	179
B.3	Flottenzusammensetzung der verschiedenen Szenarien für das Jahr 2040	180

Literaturverzeichnis

- Abara, J. (1989). Applying Integer Linear Programming to the Fleet Assignment Problem. *Interfaces*, 19(4):20–28. doi:10.1287/inte.19.4.20.
- Abbas, A., de Vicente, J., und Valero, E. (2013). Aerodynamic technologies to improve aircraft performance. *Aerospace Science and Technology*, 28(1):100–132. doi:10.1016/j.ast.2012.10.008.
- Abrahams, M. (1983). A service quality model of air travel demand: An empirical study. *Transportation Research Part A: General*, 17(5):385–393. doi:10.1016/0191-2607(83)90007-9.
- Abu Salem, K., Palaia, G., Quarta, A. A., und Chiarelli, M. R. (2023). Medium-Range Aircraft Conceptual Design from a Local Air Quality and Climate Change Viewpoint. *Energies*, 16(10):4013. doi:10.3390/en16104013.
- Adler, N. (2001). Competition in a deregulated air transportation market. *European Journal of Operational Research*, 129(2):337–345. doi:10.1016/S0377-2217(00)00231-9.
- Adler, N. (2005). Hub-Spoke Network Choice Under Competition with an Application to Western Europe. *Transportation Science*, 39(1):58–72. doi:10.1287/trsc.1030.0081.
- Adler, N., Pels, E., und Nash, C. (2010). High-speed rail and air transport competition: Game engineering as tool for cost-benefit analysis. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44(7):812–833. doi:10.1016/j.trb.2010.01.001.
- Adler, T., Falzarano, C., und Spitz, G. (2005). Modeling Service Trade-Offs in Air Itinerary Choices. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1915:20–26. doi:10.3141/1915-03.
- aero.de (2018). Flughafen Frankfurt friert Eckwert 2019 ein: 104 Flugbewegungen pro Stunde. /<https://www.aero.de/news-29975/Fraport-Chef-Schulte-will-Zahl-der-Fluege-in-Frankfurt-2019-kaum-steigern.html>. (Stand: 09.02.2025).
- Aerospace Technology Institute (2018). The Economics of Aerospace: The Evolving Aerospace R&D Landscape. /https://www.ati.org.uk/wp-content/uploads/2021/08/insight_10-the-evolving-aerospace-rd-landscape.pdf. (Stand: 09.02.2025).

- Airbus (2022a). Aircraft Characteristics: Airport and Maintenance Planning. [/https://aircraft.airbus.com/en/customer-care/fleet-wide-care/airport-operations-and-aircraft-characteristics/aircraft-characteristics](https://aircraft.airbus.com/en/customer-care/fleet-wide-care/airport-operations-and-aircraft-characteristics/aircraft-characteristics). (Stand: 09.02.2025).
- Airbus (2022b). *Global Market Forecast 2022-2041*.
- Airbus (2023). A320 Family: Unbeatable Fuel Efficiency. [/https://www.airbus.com/en/products-services/commercial-aircraft/passenger-aircraft/a320-family](https://www.airbus.com/en/products-services/commercial-aircraft/passenger-aircraft/a320-family). (Stand: 28.02.2023).
- Alder, M., Moerland, E., Jepsen, J., und Nagel, B. (2020). Recent Advances in Establishing a Common Language for Aircraft Design with CPACS. In *Aerospace Europe Conference 2020*. [/https://elib.dlr.de/134341/](https://elib.dlr.de/134341/). (Stand: 09.02.2025).
- Anderson, J. D. (1999). *Aircraft performance and design*. McGraw-Hill Education, Boston, Massachusetts, USA, 1. Auflage. doi:48481.
- Anderson, J. D. (2016). *Introduction to flight*. McGraw-Hill series in aeronautical and aerospace engineering. McGraw-Hill Education, New York, New York, USA, 8. Auflage.
- Anderson, J. D. (2017). *Fundamentals of aerodynamics*. McGraw-Hill series in aeronautical and aerospace engineering. McGraw-Hill Education, New York, New York, USA, 6. Auflage.
- Atanasov, G., Wehrspohn, J., Kühlen, M., Cabac, Y., Silberhorn, D., Kotzem, M., Dahmann, K., und Linke, F. (2023). Short-Medium-Range Turboprop-Powered Aircraft as a Cost-Efficient Enabler for Low Climate Impact. In *AIAA Aviation 2023 Forum*, Reston, Virginia, USA. American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi:10.2514/6.2023-3368.
- ATR (2023). ATR-600 Series Documents. [/https://www.atr-aircraft.com/atr-600-series/](https://www.atr-aircraft.com/atr-600-series/). (Stand: 09.02.2025).
- Bain & Company (2023). Engineering and R&D Report.
- Balcombe, K., Fraser, I., und Harris, L. (2009). Consumer willingness to pay for in-flight service and comfort levels: A choice experiment. *Journal of Air Transport Management*, 15(5):221–226. doi:10.1016/j.jairtraman.2008.12.005.
- Barredo Arrieta, A., Díaz-Rodríguez, N., Del Ser, J., Bennetot, A., Tabik, S., Barbado, A., Garcia, S., Gil-Lopez, S., Molina, D., Benjamins, R., Chatila, R., und Herrera, F. (2020). Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI. *Information Fusion*, 58:82–115. doi:10.1016/j.inffus.2019.12.012.
- Bazargan, M. (2010). *Airline operations and scheduling*. Ashgate, Farnham, Surrey, Vereinigtes Königreich und Burlington, Vermont, USA, 2. Auflage.
- Beaagency, A., Saking, M. E., und Talbot, D. (2015). Outsourcing of strategic resources and capabilities: opposing choices in the commercial aircraft manufacturing. *Journal of Knowledge Management*, 19(5):912–931. doi:10.1108/JKM-01-2015-0040.

- Belobaba, P., Odoni, A. R., und Barnhart, C., Herausgeber (2009). *The Global Airline Industry*. Aerospace series. Wiley, Chichester, Vereinigtes Königreich. doi:10.1002/9780470744734.
- Berge, M. E. und Hopperstad, C. A. (1993). Demand Driven Dispatch: A Method for Dynamic Aircraft Capacity Assignment, Models and Algorithms. *Operations Research*, 41(1):153–168. doi:10.1287/opre.41.1.153.
- Bertsimas, D. und Tsitsiklis, J. N. (1997). *Introduction to linear optimization*, Band 7 in *Athena scientific books*. Dynamic Ideas and Athena Scientific, Belmont, Massachusetts, USA.
- Bhadra, D. (2003). Choice of Aircraft Fleets in the US NAS: Findings from a Multinomial Logit Analysis. In *3rd AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, Reston, Virginia, USA. American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi:10.2514/6.2003-6767.
- Bhadra, D., Gentry, J., Hogan, B., und Wells, M. (2003). CAASD’s Future Air Traffic Timetable Estimator: A Micro-Econometric Approach. MITRE Corporation.
- Bhadra, D., Gentry, J., Hogan, B., und Wells, M. (2005). Future Air Traffic Timetable Estimator. *Journal of Aircraft*, 42(2):320–328. doi:10.2514/1.6288.
- Birolini, S., Antunes, A. P., Cattaneo, M., Malighetti, P., und Paleari, S. (2021a). Integrated flight scheduling and fleet assignment with improved supply-demand interactions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 149:162–180. doi:10.1016/j.trb.2021.05.001.
- Birolini, S., Jacquillat, A., Cattaneo, M., und Antunes, A. P. (2021b). Airline Network Planning: Mixed-integer non-convex optimization with demand–supply interactions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 154:100–124. doi:10.1016/j.trb.2021.09.003.
- Bloomberg (2022). Boeing’s CEO Sees at Least Two-Year Wait on Designing New Jetliner. /<https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-06-03/boeing-is-at-least-two-years-away-from-designing-new-jet-ceo>. (Stand: 28.02.2023).
- Boeing (2022a). Airport Compatibility: Airplane Characteristics for Airport Planning. /<https://www.boeing.com/commercial/airports/plan-manuals>. (Stand: 09.02.2025).
- Boeing (2022b). *Commercial Market Outlook 2022-2041*.
- Boeing (2022c). *World Air Cargo Forecast 2022-2041*.
- Boguslaski, C., Ito, H., und Lee, D. (2004). Entry Patterns in the Southwest Airlines Route System. *Review of Industrial Organization*, 25(3):317–350. doi:10.1007/s11151-004-1970-5.
- Bower, G. und Kroo, I. (2008). Multi-Objective Aircraft Optimization for Minimum Cost and Emissions over Specific Route Networks. In *8th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, Reston, Virginia, USA. American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi:10.2514/6.2008-8905.

- Bräunling, G. (2015). *Flugzeugtriebwerke: Grundlagen, Aero-Thermodynamik, ideale und reale Kreisprozesse, thermische Turbomaschinen, Komponenten, Emissionen und Systeme*. VDI-Buch. Springer Vieweg, Berlin, Deutschland. doi:10.1007/978-3-642-34539-5.
- Bravo, A., Vieira, D., und Ferrer, G. (2022). Emissions of future conventional aircrafts adopting evolutionary technologies. *Journal of Cleaner Production*, 347:131246. doi:10.1016/j.jclepro.2022.131246.
- Brett, P. (2014). *A Methodology for Evaluating Fleet Implications of Mission Specification Changes*. Dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, USA.
- Brey, R. und Walker, J. L. (2011). Latent temporal preferences: An application to airline travel. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 45(9):880–895. doi:10.1016/j.tra.2011.04.010.
- Brooker, P. (2006). Civil aircraft design priorities: air quality? climate change? noise? *The Aeronautical Journal*, 110(1110):517–532. doi:10.1017/S0001924000001408.
- Brueckner, J. K. und Flores-Fillol, R. (2007). Airline Schedule Competition. *Review of Industrial Organization*, 30(3):161–177. doi:10.1007/s11151-007-9140-1.
- Brüggen, A. und Klose, L. (2010). How fleet commonality influences low-cost airline operating performance: Empirical evidence. *Journal of Air Transport Management*, 16(6):299–303. doi:10.1016/j.jairtraman.2010.02.006.
- Bundesamt für Zivilluftfahrt (2005). Flughafen Zürich SIL-Koordinationsprozess: Betriebliche Eckwerte.
- Burschyk, T., Silberhorn, D., Wehrspohn, J., Kühlen, M., und Zill, T. (2023). Scenario-based implications of liquid hydrogen storage tank insulation quality for a short-range aircraft concept. In *AIAA Aviation 2023 Forum*, Reston, Virginia, USA. American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi:10.2514/6.2023-3522.
- Cadarso, L., Vaze, V., Barnhart, C., und Marín, Á. (2017). Integrated Airline Scheduling: Considering Competition Effects and the Entry of the High Speed Rail. *Transportation Science*, 51(1):132–154. doi:10.1287/trsc.2015.0617.
- Cai, Y., Rajaram, D., und Mavris, D. N. (2019). Multi-mission Multi-objective Optimization in Commercial Aircraft Conceptual Design. In *AIAA Aviation 2019 Forum*, Reston, Virginia, USA. American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi:10.2514/6.2019-3577.
- Cavadini, L. und de Lepinay, I. (2016). Assessing Trends in Aviation Noise and Emissions in Europe using Advanced Modelling Capabilities. In *2nd ECATS Conference*. [/http://www.ecats-network.eu/uploads/2017/06/ECATS2016_4.01-Cavadini_de_L%C3%A9pinay.pdf](http://www.ecats-network.eu/uploads/2017/06/ECATS2016_4.01-Cavadini_de_L%C3%A9pinay.pdf). (Stand: 29.02.2024).
- Cirium (2022). Fleets Analyzer. [/https://www.cirium.com/analytics-services/fleets-analyzer/](https://www.cirium.com/analytics-services/fleets-analyzer/). (Stand: 09.02.2025).
- Clark, P. (2017). *Buying the big jets: Fleet planning for airlines*. Routledge, New York, New York, USA, 3. Auflage. doi:10.4324/9781315570662.

- Clarke, L. W., Hane, C. A., Johnson, E. L., und Nemhauser, G. L. (1996). Maintenance and Crew Considerations in Fleet Assignment. *Transportation Science*, 30(3):249–260. doi:10.1287/trsc.30.3.249.
- Collopy, P. D. und Hollingsworth, P. M. (2011). Value-Driven Design. *Journal of Aircraft*, 48(3):749–759. doi:10.2514/1.C000311.
- Cook, G. N. (2017). *Airline operations and management: A management textbook*. Routledge, London, Vereinigtes Königreich und New York, New York, USA. doi:10.4324/9781315299594.
- Cox, B. (2018). *Mobility and the Energy Transition: A Life Cycle Assessment of Swiss Passenger Transport Technologies including Developments until 2050*. Dissertation, ETH Zürich, Zürich, Schweiz. doi:10.3929/ETHZ-B-000276298.
- Crossley, W. A., Mane, M., und Nusawardhana, A. (2004). Variable Resource Allocation Using Multidisciplinary Optimization: Initial Investigations for System of Systems. In *Multidisciplinary Analysis Optimization Conferences*. doi:10.2514/6.2004-4605.
- Dahlmann, K., Grewe, V., Frömming, C., und Burkhardt, U. (2016). Can we reliably assess climate mitigation options for air traffic scenarios despite large uncertainties in atmospheric processes? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 46:40–55. doi:10.1016/j.trd.2016.03.006.
- Dallara, E. S. (2011). *Aircraft Design For Reduced Climate Impact*. Dissertation, Stanford University, Stanford, Kalifornien, USA. /<https://purl.stanford.edu/yf499mg3300>. (Stand: 09.02.2025).
- Dantzig, G. B. (1955). Linear Programming under Uncertainty. *Management Science*, 1(3-4):197–206. doi:10.1287/mnsc.1.3-4.197.
- Dantzig, G. B. (1963). The Allocation of Aircraft to Routes under Uncertain Demand. In Dantzig, G. B., Herausgeber, *Linear Programming and Extensions*, Princeton Landmarks in Mathematics and Physics, Seiten 568–591. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, USA. doi:10.1515/9781400884179-029.
- de Borger, B. und Fosgerau, M. (2008). The trade-off between money and travel time: A test of the theory of reference-dependent preferences. *Journal of Urban Economics*, 64(1):101–115. doi:10.1016/j.jue.2007.09.001.
- Desai, A. A., Hollingsworth, P. M., und Chinchapatnam, P. (2016). Identifying the Best Design for Uncertain Markets. In *30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS 2016)*.
- Desai, A. A., Vengadasalam, L., Hollingsworth, P. M., und Chinchapatnam, P. (2019). Value-Driven Design Framework for Competitive Aviation Markets. *Journal of Aircraft*, 56(4):1658–1667. doi:10.2514/1.C034829.
- Deutsche Flugsicherung (2017). Aeronautical Information Publication: EDDE Frankfurt Main.
- Deutsche Lufthansa AG (2016). Geschäftsbericht.
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (2024). Luftfahrtstrategie des DLR: Auf dem Weg zu einer klimaverträglichen Luftfahrt.

- Dieter, G. E. und Schmidt, L. C. (2021). *Engineering design*. McGraw-Hill Education, New York, New York, USA, 6. Auflage.
- Dobson, G. und Lederer, P. J. (1993). Airline Scheduling and Routing in a Hub-and-Spoke System. *Transportation Science*, 27(3):281–297. doi:10.1287/trsc.27.3.281.
- Doyme, K., Dray, L. M., O’Sullivan, A., und Schäfer W., A. (2019). Simulating Airline Behavior: Application for the Australian Domestic Market. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2673(2):104–112. doi:10.1177/0361198119826533.
- Dray, L. M. (2020). AIM2015: Documentation. Air Transportation Systems Lab, UCL Energy Institute.
- Dray, L. M., Krammer, P., Doyme, K., Wang, B., Al Zayat, K., O’Sullivan, A., und Schäfer, A. W. (2019). AIM2015: Validation and initial results from an open-source aviation systems model. *Transport Policy*, 79:93–102. doi:10.1016/j.tranpol.2019.04.013.
- Economon, T. D., Copeland, S. R., Alonso, J. J., Zeinali, M., und Rutherford, D. (2011). Design and Optimization of Future Aircraft for Assessing the Fuel Burn Trends of Commercial Aviation. In *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Reston, Virginia, USA. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Embraer (2023). Documents - Airport Planning Manual (APM). /<https://www.embraercommercialaviation.com/media-downloads/documents/#49-51-apm>. (Stand: 09.02.2025).
- Eurocontrol (2022). Base of aircraft data (BADA). /<https://www.eurocontrol.int/model/bada>. (Stand: 09.02.2025).
- European Commission (2006). Impact Assessment of the inclusion of aviation activities in the scheme for greenhouse gas emissions allowance trading within the Community (Commission Staff Working Document).
- European Commission (2023). Consultation on monitoring, reporting & verification of aviation non-CO2 impact on the climate. /https://climate.ec.europa.eu/news-your-voice/news/consultation-monitoring-reporting-verification-aviation-non-co2-impact-climate-2023-10-25_en. (Stand: 09.02.2025).
- European Union Aviation Safety Agency (2010a). Reduction of sulphur limits in aviation fuel standards (SULPHUR): Research project EASA.2008/C11. /<https://www.easa.europa.eu/en/downloads/1215/en>. (Stand: 16.02.2024).
- European Union Aviation Safety Agency (2010b). Study on Aviation and Economic Modelling (SAVE).
- European Union Aviation Safety Agency (2019). European Aviation Environmental Report. /<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/615da9d1-713e-11e9-9f05-01aa75ed71a1/language-en>. (Stand: 09.02.2025).

- European Union Aviation Safety Agency (2022). Type Certificate Data Sheets (TCDS). /<https://www.easa.europa.eu/document-library/type-certificates>. (Stand: 09.02.2025).
- Federal Aviation Administration (1990). 121.195 Operational Landing Distances for Wet Runways Transport Category Airplanes. /https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/121.195-1A.pdf. (Stand: 09.02.2025).
- Federal Aviation Administration (1992). FAR 91.533 Flight attendant requirements. /<https://www.ecfr.gov/current/title-14/part-91/section-91.533>. (Stand: 09.02.2025).
- Federal Aviation Administration (2014). Aviation environmental Portfolio Management Tool (APMT). /https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/apl/research/models/apmt/. (Stand: 15.11.2022).
- Ferguson, A. R. und Dantzig, G. B. (1956). The Allocation of Aircraft to Routes – An Example of Linear Programming Under Uncertain Demand. *Management Science*, 3(1):45–73. doi:10.1287/mnsc.3.1.45.
- Fernando, A., Niwunhella, H., Wickramarachchi, R., und Nanayakkara, J. (2020). Optimization Models in Aircraft Assignment and Airline Disruption Management - A Systematic Review of Literature. In *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Southfield, Michigan, USA. IEOM Society International.
- Filippone, A. (2012). *Advanced aircraft flight performance*, Band 34 in *Cambridge aerospace series*. Cambridge University Press, Cambridge, Vereinigtes Königreich und New York, New York, USA.
- Franz, K. (2014). CeRAS Direct Operating Costs (DOC) Model.
- Fraport (2016). 235. Sitzung der Fluglärmkommission – Entwicklung der Flugbewegungen und Eckwerte. /https://www.flk-frankfurt.de/eigene_dateien/sitzungen/235._sitzung_am_11.05.2016/top_3_-_praes._fraport_-_entwicklung_der_flugbewegungen_und_eckwerte__11.5.2016.pdf. (Stand: 09.02.2025).
- Fraport (2023). Operating Hours: From 5:00 a.m. to 11:00 p.m. CEST: All is quiet at night at Frankfurt Airport – except in justified exceptional cases. (Stand: 23.09.2023).
- Gelhausen, M. C., Berster, P., und Wilken, D. (2013). Do airport capacity constraints have a serious impact on the future development of air traffic? *Journal of Air Transport Management*, 28:3–13. doi:10.1016/j.jairtraman.2012.12.004.
- Gelhausen, M. C., Berster, P., und Wilken, D. (2021). Post-COVID-19 Scenarios of Global Airline Traffic until 2040 That Reflect Airport Capacity Constraints and Mitigation Strategies. *Aerospace*, 8(10):300. doi:10.3390/aerospace8100300.
- Gelhausen, M. C., Grimme, W., Junior, A., Lois, C., und Berster, P. (2022). Clean Sky 2 Technology Evaluator – Results of the First Air Transport System Level Assessments. *Aerospace*, 9(4):204. doi:10.3390/aerospace9040204.

- Gelhausen, M. C., Wilken, D., und Berster, P. (2020). *Airport capacity constraints and strategies for mitigation: A global perspective*. Elsevier Academic Press, Saint Louis, Missouri, USA.
- Ghosh, R. (2019). *Ein Ansatz der quantitativen Zukunftsforschung als Grundlage der systemanalyse für das globale Lufttransportsystem*. Dissertation, Technische Universität Hamburg, Hamburg, Deutschland.
- Ghosh, R., Wicke, K., Kölker, K., Terekhov, I., Linke, F., Niklaß, M., Lührs, B., und Volker, G. (2016). An Integrated Modelling Approach for Climate Impact Assessments in the Future Air Transportation System – Findings from the WeCare Project. In *2nd ECATS Conference*.
- Gil, R. und Kim, M. (2021). Does competition increase quality? Evidence from the US airline industry. *International Journal of Industrial Organization*, 77:102742. doi:10.1016/j.ijindorg.2021.102742.
- Givoni, M. und Rietveld, P. (2009). Airline’s choice of aircraft size – Explanations and implications. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 43(5):500–510. doi:10.1016/j.tra.2009.01.001.
- Google (2023). Maps. /<https://www.google.com/maps/>. (Stand: 09.02.2025).
- Götz, S., Grothklags, S., Kliewer, G., und Tschöke, S. (1999). Solving the weekly fleet assignment problem for large airlines. In *Proceedings of the 3rd Metaheuristic International Conference*.
- Govindaraju, P., Davendralingam, N., und Crossley, W. A. (2017). A Concurrent Aircraft Design and Fleet Assignment Approach to Mitigate Environmental Impact through Fuel Burn Reduction under Operational Uncertainty. *Journal of Aerospace Operations*, 4(4):163–184. doi:10.3233/AOP-170061.
- Grewe, V. und Dahlmann, K. (2015). How ambiguous are climate metrics? And are we prepared to assess and compare the climate impact of new air traffic technologies? *Atmospheric environment (Oxford, England : 1994)*, 106:373–374. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.02.039.
- Grewe, V., Gangoli Rao, A., Grönstedt, T., Xisto, C., Linke, F., Melkert, J., Middel, J., Ohlenforst, B., Blakey, S., Christie, S., Matthes, S., und Dahlmann, K. (2021). Evaluating the climate impact of aviation emission scenarios towards the Paris agreement including COVID-19 effects. *Nature communications*, 12(1):3841. doi:10.1038/s41467-021-24091-y.
- Grewe, V. und Stenke, A. (2008). AirClim: an efficient tool for climate evaluation of aircraft technology. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(16):4621–4639. doi:10.5194/acp-8-4621-2008.
- Grimme, W. und Braun, M. (2022). Estimation of potential hydrogen demand and CO2 mitigation in global passenger air transport by the year 2050. *Transportation Research Procedia*, 65:24–33. doi:10.1016/j.trpro.2022.11.004.
- Grimme, W., Maertens, S., Bingemer, S., und Gelhausen, M. C. (2021). Estimating the market potential for long-haul narrowbody aircraft using origin-destination demand and flight schedules data. *Transportation Research Procedia*, 52:412–419. doi:10.1016/j.trpro.2021.01.048.

- Gu, Z., Johnson, E. L., Nemhauser, G. L., und Yinhua, W. (1994). Some properties of the fleet assignment problem. *Operations Research Letters*, 15(2):59–71. doi:10.1016/0167-6377(94)90001-9.
- Gurobi (2023). Gurobi Optimizer. /<https://www.gurobi.com/solutions/gurobi-optimizer/>. (Stand: 09.02.2025).
- Hane, C. A., Barnhart, C., Johnson, E. L., Marsten, R. E., Nemhauser, G. L., und Sigismondi, G. (1995). The fleet assignment problem: Solving a large-scale integer program. *Mathematical Programming*, 70(1-3):211–232. doi:10.1007/BF01585938.
- Hansen, M. (1990). Airline competition in a hub-dominated environment: An application of noncooperative game theory. *Transportation Research Part B: Methodological*, 24(1):27–43. doi:10.1016/0191-2615(90)90030-3.
- Hartmann, J., Pfeiffer, T., Breymann, B., Silberhorn, D., Moerland, E., Weiss, M., und Nagel, B. (2018). Collaborative Conceptual Design of a Mid-Range Aircraft under Consideration of Advanced Methods for Technology Assessment. In *31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS 2018)*.
- Hassan, M. und Mavris, D. N. (2014). A Methodology for the Prediction of Air Transportation Network Growth Dynamics. In *15th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference*, Reston, Virginia, USA. American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi:10.2514/6.2014-2038.
- Hassan, M., Payan, A., Pfaender, H., Garcia, E., Schutte, J., und Mavris, D. N. (2015). Framework Development for Performance Evaluation of the Future National Airspace System. In *15th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, Reston, Virginia, USA. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Hendricks, K., Piccione, M., und Tan, G. (1999). Equilibria in Networks. *Econometrica*, 67(6):1407–1434. doi:10.1111/1468-0262.00084.
- Hoogreef, M., Zuijderwijk, N., Scheers, E., Proesmans, P.-J., und Santos, B. F. (2023). Coupled Hybrid & Electric Aircraft Design and Strategic Airline Planning. In *AIAA Aviation 2023 Forum*, Reston, Virginia, USA. American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi:10.2514/6.2023-3869.
- Howe, S., Kolios, A. J., und Brennan, F. P. (2013). Environmental life cycle assessment of commercial passenger jet airliners. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 19:34–41. doi:10.1016/j.trd.2012.12.004.
- Hugon-Duprat, C. und O’Connell, J. F. (2015). The rationale for implementing a premium economy class in the long haul markets – Evidence from the transatlantic market. *Journal of Air Transport Management*, 47:11–19. doi:10.1016/j.jairtraman.2015.03.005.
- Husemann, M., Schäfer, K., und Stumpf, E. (2018). Flexibility within flight operations as an evaluation criterion for preliminary aircraft design. *Journal of Air Transport Management*, 71:201–214. doi:10.1016/j.jairtraman.2018.04.007.

- Hwang, J. T. und Martins, J. R. R. A. (2016). Allocation-mission-design optimization of next-generation aircraft using a parallel computational framework. In *AIAA Scitech 2016 Forum*, Reston, Virginia, USA. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- International Air Transport Association (2015). World Air Transport Statistics.
- International Airlines Group (2020). IAG results presentation: Full Year 2019.
- International Civil Aviation Organization (2010). Aviation environmental portfolio management tool for economics (APMT-economics) and its application in the CAEP/8 NOx stringency analysis.
- International Civil Aviation Organization (2016). Aircraft Noise Models for Assessment of Noise Around Airport - Improvements and Limitations.
- International Civil Aviation Organization (2017). Annex 16 - Environmental Protection - Volume I - Aircraft Noise.
- International Civil Aviation Organization (2019). Aviation Benefits Report. /<https://www.icao.int/sustainability/Documents/AVIATION-BENEFITS-2019-web.pdf>. (Stand: 09.02.2025).
- International Civil Aviation Organization (2021). Post-COVID-19 forecasts scenarios tables. /<https://www.icao.int/sustainability/Documents/Post-COVID-19%20forecasts%20scenarios%20tables.pdf>. (Stand: 09.02.2025).
- International Civil Aviation Organization (2022). Report on the feasibility of a long-term aspirational goal (LTAG) for international civil aviation CO2 emission reduction.
- International Civil Aviation Organization (2023). Annex 16 - Environmental Protection - Volume II - Aircraft Engine Emissions.
- Jansen, P. W. (2015). *Robust Coupled Optimization of Aircraft Family Design and Fleet Allocation for Multiple Markets*. Dissertation, Royal Military College of Canada, Kingston, Ontario, Kanada.
- Jansen, P. W. und Perez, R. E. (2012). Coupled Optimization of Aircraft Family Design and Fleet Assignment for Minimum Cost and Fuel Burn. In *12th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, Reston, Virginia, USA. American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi:10.2514/6.2012-5495.
- Jansen, P. W. und Perez, R. E. (2013). Coupled Optimization of Aircraft Design and Fleet Allocation with Uncertain Passenger Demand. In *13th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, Reston, Virginia, USA. American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi:10.2514/6.2013-4392.
- Jansen, P. W. und Perez, R. E. (2014). Robust Coupled Optimization of Aircraft Design and Fleet Allocation for Multiple Markets. In *AIAA/3AF Aircraft Noise and Emissions Reduction Symposium*, Reston, Virginia, USA. American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi:10.2514/6.2014-2735.

- Jansen, P. W. und Perez, R. E. (2016). Coupled Optimization of Aircraft Families and Fleet Allocation for Multiple Markets. *Journal of Aircraft*, 53(5):1485–1504. doi:10.2514/1.C033646.
- Jansen, P. W. und Perez, R. E. (2019). Multi-Objective Design Optimization of an MoM Aircraft using an Asynchronous Constrained PSO. In *AIAA Scitech 2019 Forum*, Reston, Virginia, USA. American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi:10.2514/6.2019-0008.
- Japan Schedule Coordination (2015). Fukuoka Capacity Analysis 2015. /http://www.schedule-coordination.jp/archives/arc_fuk/2015/fuk_capacity_analysis.pdf. (Stand: 09.01.2025).
- Johnson, V. S. (1990). Minimizing life cycle cost for subsonic commercial aircraft. *Journal of Aircraft*, 27(2):139–145. doi:10.2514/3.45909.
- Karmarkar, N. (1984). A new polynomial-time algorithm for linear programming. In DeMillo, R., Herausgeber, *Proceedings of the sixteenth annual ACM symposium on Theory of computing*, ACM Conferences, Seiten 302–311, New York, New York, USA. ACM. doi:10.1145/800057.808695.
- Kellari, D., Crawley, E. F., und Cameron, B. G. (2017). Influence of Technology Trends on Future Aircraft Architecture. *Journal of Aircraft*, 54(6):2213–2227. doi:10.2514/1.C034266.
- Kenan, N., Jebali, A., und Diabat, A. (2018). An integrated flight scheduling and fleet assignment problem under uncertainty. *Computers & Operations Research*, 100:333–342. doi:10.1016/j.cor.2017.08.014.
- Kharina, A. und Rutherford, D. (2015). Fuel efficiency trends for new commercial jet aircraft: 1960 to 2014. The International Council on Clean Transportation.
- Kim, D., Druot, T., und Liem, R. P. (2020). Data-driven Operation-based Aircraft Design Optimization. In *AIAA Aviation 2020 Forum*, Reston, Virginia, USA. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Kleijnen, J. P. (1995). Verification and validation of simulation models. *European Journal of Operational Research*, 82(1):145–162. doi:10.1016/0377-2217(94)00016-6.
- Kölker, K., Bießlich, P., und Lütjens, K. (2016). From passenger growth to aircraft movements. *Journal of Air Transport Management*, 56:99–106. doi:10.1016/j.jairtraman.2016.04.021.
- Kölker, K., Ghosh, R., und Lütjens, K. (2015). Assessing Quality of Air Travel using the Impact of Frequency, Travel Time and Number of Transfers on Passenger Demand. In *19th World Conference of the Air-Transport-Research-Society (ATRS)*. /<https://elib.dlr.de/95712/>. (Stand: 09.02.2025).
- Kölker, K., Lütjens, K., und Gollnick, V. (2024). Analyzing global passenger flows based on choice modeling in the air transportation system. *Journal of Air Transport Management*, 115:102530. doi:10.1016/j.jairtraman.2023.102530.

- Kösters, D. (2010). *Planmäßige Verspätungen im Luftverkehr*. Dissertation, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Aachen, Deutschland. /<https://publications.rwth-aachen.de/record/63963/files/3531.pdf>. (Stand: 09.02.2025).
- Kreps, D. M. (1990). *A course in microeconomic theory*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, USA, 1. Auflage.
- Krömer, M. M., Topchishvili, D., und Schön, C. (2024). Sustainable airline planning and scheduling. *Journal of Cleaner Production*, 434:139986. doi:10.1016/j.jclepro.2023.139986.
- Kühlen, M., Kölker, K., Linke, F., Dahlmann, K., Gollnick, V., und Lütjens, K. (2023). From passenger itineraries to climate impact: Analyzing the implications of a new mid-range aircraft on the global air transportation system. *Journal of Air Transport Management*, 113:102474. doi:10.1016/j.jairtraman.2023.102474.
- Kühlen, M., Lütjens, K., Linke, F., und Gollnick, V. (2022). An explanatory approach to modeling the fleet assignment in the global air transportation system. *CEAS Aeronautical Journal*, 14(1):255–269. doi:10.1007/s13272-022-00622-1.
- Kundu, A. K. (2010). *Aircraft design*, Band 27 in *Cambridge aerospace series*. Cambridge, Cambridge, Vereinigtes Königreich und New York, New York, USA. doi:10.1017/CBO9780511844652.
- Kuo, C.-W. und Jou, R.-C. (2017). Willingness to pay for airlines’ premium economy class: The perspective of passengers. *Journal of Air Transport Management*, 59:134–142. doi:10.1016/j.jairtraman.2016.12.005.
- Landau, S., Gosling, G. D., Small, K., und Adler, T. (2016). Measuring Air Carrier Passengers’ Values of Time by Trip Component. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2569(1):24–31. doi:10.3141/2569-03.
- Lange, F. (2019). High fidelity design of the AVACON research baseline aircraft based in CPACS data set. In *54th 3AF International Conference on Applied Aerodynamics*. Paris, Frankreich.
- Lee, D. S., Fahey, D. W., Forster, P. M., Newton, P. J., Wit, R. C. N., Lim, L. L., Owen, B., und Sausen, R. (2009). Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmospheric Environment*, 43(22):3520–3537. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.04.024.
- Lee, D. S., Fahey, D. W., Skowron, A., Allen, M. R., Burkhardt, U., Chen, Q., Doherty, S. J., Freeman, S., Forster, P. M., Fuglestvedt, J., Gettelman, A., de León, R. R., Lim, L. L., Lund, M. T., Millar, R. J., Owen, B., Penner, J. E., Pitari, G., Prather, M. J., Sausen, R., und Wilcox, L. J. (2021). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*, 244:117834. doi:10.1016/j.atmosenv.2020.117834.
- Lee, J., Lee, K., und Moon, I. (2022). A reinforcement learning approach for multi-fleet aircraft recovery under airline disruption. *Applied Soft Computing*, 129:109556. doi:10.1016/j.asoc.2022.109556.

- Lee, J. J., Lukachko, S. P., Waitz, I. A., und Schäfer, A. W. (2001). Historical and Future Trends in Aircraft Performance, Cost and Emissions. *Annual Review of Energy and the Environment*, 26(1):167–200. doi:10.1146/annurev.energy.26.1.167.
- Lehner, S., Zill, T., und Gollnick, V. (2012). Using Aircraft Requirements as Variables: An Integrated Optimization Approach for Air Transportation Systems. In *12th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, Reston, Virginia, USA. American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi:10.2514/6.2012-5680.
- Liem, R. P., Kenway, G. K. W., und Martins, J. R. R. A. (2012). Multi-point, multi-mission, high-fidelity aerostructural optimization of a long-range aircraft configuration. In *12th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, Reston, Virginia, USA. American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi:10.2514/6.2012-5706.
- Liem, R. P., Kenway, G. K. W., und Martins, J. R. R. A. (2015). Multimission Aircraft Fuel-Burn Minimization via Multipoint Aerostructural Optimization. *AIAA Journal*, 53(1):104–122. doi:10.2514/1.J052940.
- Linke, F. (2016). *Ökologische Analyse operationeller Lufttransportkonzepte*. Dissertation, Technische Universität Hamburg, Hamburg, Deutschland. /<http://hdl.handle.net/11420/11270>. (Stand: 22.08.2022).
- Linke, F., Dahlmann, K., Gerlinger, B., Wöhler, S., Otten, T., Plohr, M., Presto, F., Hartmann, J., und Weiss, M. (2020). The impact of a new mid-range aircraft with advanced technologies on air traffic emissions and climate. In *AIAA Aviation 2020 Forum*, Reston, Virginia, USA. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Linke, F., Grewe, V., und Gollnick, V. (2017). The Implications of Intermediate Stop Operations on Aviation Emissions and Climate. *Meteorologische Zeitschrift*, 26(6):697–709. doi:10.1127/metz/2017/0763.
- Lohatepanont, M. (2002). *Airline Fleet Assignment and Schedule Design Integrated Models and Algorithms*. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Boston, Massachusetts, USA. /<https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/8297>. (Stand: 09.02.2025).
- Mancel, C. und Mora-Camino, F. (2006). Airline fleet assignment : a state of the art. In *10th World Conference of the Air-Transport-Research-Society (ATRS)*.
- Mane, M. und Crossley, W. A. (2012). Allocation and Design of Aircraft for On-Demand Air Transportation with Uncertain Operations. *Journal of Aircraft*, 49(1):141–150. doi:10.2514/1.C031452.
- Mane, M., Crossley, W. A., und Nusawardhana, A. (2007). System-of-Systems Inspired Aircraft Sizing and Airline Resource Allocation via Decomposition. *Journal of Aircraft*, 44(4):1222–1235. doi:10.2514/1.26333.
- Martinez-Val, R., Roa, J., Perez, E., und Cuerno, C. (2011). Effects of the Mismatch Between Design Capabilities and Actual Aircraft Utilization. *Journal of Aircraft*, 48(6):1921–1927. doi:10.2514/1.C031348.

- Matthews, L. (1995). Forecasting peak passenger flows at airports. *Transportation*, 22(1):55–72. doi:10.1007/BF01151618.
- Mattingly, J. D., Heiser, W. H., und Pratt, D. T. (2002). *Aircraft engine design*. AIAA education series. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Virginia, USA, 2. Auflage.
- McDonald, R. A. (2013). Establishing Mission Requirements Based on Consideration of Aircraft Operations. *Journal of Aircraft*, 50(3):741–751. doi:10.2514/1.C031878.
- McKinsey & Company (2020). *Hydrogen-powered aviation: A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050*. Publications Office of the European Union, Luxemburg, Luxemburg, 1. Auflage. doi:10.2843/471510.
- Merkert, R. und Beck, M. (2017). Value of travel time savings and willingness to pay for regional aviation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 96:29–42. doi:10.1016/j.tra.2016.11.022.
- Meunier, D. und Quinet, E. (2015). Value of Time Estimations in Cost Benefit Analysis: The French Experience. *Transportation Research Procedia*, 8:62–71. doi:10.1016/j.trpro.2015.06.042.
- Nicolai, L. M. (2010). *Fundamentals of Aircraft and Airship Design*. AIAA education series. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Virginia, USA.
- Niklaß, M. (2019). *Ein systemanalytischer Ansatz zur Internalisierung der Klimawirkung der Luftfahrt*. Dissertation, Technische Universität Hamburg, Hamburg, Deutschland.
- Object Management Group (2005). Introduction to OMG’s Unified Modeling Language (UML). /<https://www.uml.org/what-is-uml.htm>. (Stand: 09.02.2025).
- Oguntona, O., Cui, A., Plötner, K., und Hornung, M. (2016). Fleet development planning of airlines: Incorporating the aircraft operating economics factor. In *30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS 2016)*.
- Our World in Data, The World Bank, und Aviation Safety Network (2024). Global aviation fatalities per million passengers. /<https://ourworldindata.org/grapher/aviation-fatalities-per-million-passengers>. (Stand: 09.02.2025).
- OurAirports (2023). Database. /<https://ourairports.com/data/>. (Stand: 09.02.2025).
- Papantoni, V., Linke, F., Dahlmann, K., Kühlen, M., Silberhorn, D., Brand, U., und Vogt, T. (2022). Life Cycle Assessment of Power-to-Liquid for Aviation: A Case Study of a Passenger Aircraft. *E3S Web of Conferences*, 349. doi:10.1051/e3sconf/202234902003.
- Perez, R. E. und Behdinan, K. (2002). Effective Multi-Mission Aircraft Conceptual Design Optimization Using a Hybrid Multi-Objective Evolutionary Method. In *Multidisciplinary Analysis Optimization Conferences*. doi:10.2514/6.2002-5464.

- Perez, R. E. und Jansen, P. W. (2017). Effect of Passenger Preferences on the Integrated Design and Optimization of Aircraft Families and Air Transport Network. In *17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, Reston, Virginia, USA. American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi:10.2514/6.2017-4249.
- Pfaender, H., Jimenez, H., und Mavris, D. N. (2010). A System Dynamics Analysis of Fleet Technology and Policy Options For Environmental Impact Mitigation. In *27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS 2010)*.
- Pohya, A. A., Wicke, K., und Hartmann, J. (2018). Comparison of Direct Operating Cost and Life Cycle Cost-Benefit Methods in Aircraft Technology Assessment. In *2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting*, Reston, Virginia, USA. American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi:10.2514/6.2018-0282.
- Presto, F. (2023). *Entwicklung und öko-temporale Analyse von Ansätzen zur Regulierung von Flugfrequenzen*. Dissertation, Technische Universität Hamburg, Hamburg, Deutschland. doi:10.57676/9Z64-F934.
- Presto, F., Gollnick, V., und Lütjens, K. (2019). The airline fleet-related implications of a utility-based frequency limit between high-density City Pairs in Europe. *ATRS 23rd World Conference*. doi:10.15480/882.2558.
- Proesmans, P.-J. und Vos, R. (2022). Airplane Design Optimization for Minimal Global Warming Impact. *Journal of Aircraft*, 59(5):1363–1381. doi:10.2514/1.C036529.
- Python Software Foundation (2018). Python 3.7.0. /<https://www.python.org/downloads/release/python-370/>. (Stand: 09.02.2025).
- Queenstown Airport (2025). Aviation Services & Charges: Information for Aircraft Operators. /<https://www.queenstownairport.co.nz/aviation-services-charges>. (Stand: 09.02.2025).
- Radhakrishnan, K., Deck, K., Proesmans, P.-J., Linke, F., Yin, F., Volker, G., Vos, R., Lührs, B., Niklaß, M., und Dedoussi, I. C. (2022). Minimising the climate impact of the next generation aircraft using novel climate functions for aircraft design. In *33rd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS 2022)*.
- Ramm, J., Rahn, A., Silberhorn, D., Wicke, K., Wende, G., Papantoni, V., Linke, F., Kühlen, M., und Dahlmann, K. (2024). Assessing the Feasibility of Hydrogen-Powered Aircraft: A Comparative Economic and Environmental Analysis. *Journal of Aircraft*, Seiten 1–17. doi:10.2514/1.C037463.
- Randt, N. P. (2013). Foundations of a Technology Assessment Technique Using a Scenario-Based Fleet System Dynamics Model. In *13th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, Reston, Virginia, USA. American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi:10.2514/6.2013-4383.
- Randt, N. P. (2016). *Aircraft Technology Assessment Using Fleet-Level Metrics*. Dissertation, Technischen Universität München, München, Deutschland.

- Randt, N. P., Jessberger, C., und Ploetner, K. O. (2015). Estimating the Fuel Saving Potential of Commercial Aircraft in Future Fleet-Development Scenarios. In *15th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, Reston, Virginia, USA. American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi:10.2514/6.2015-2435.
- Raymer, D. P. (2018). *Aircraft design: A conceptual approach*. AIAA education series. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Virginia, USA, 6. Auflage.
- Reuters (2020). Boeing's new CEO orders rethink on key jetliner project. [/https://www.reuters.com/article/us-boeing-737max-nma/boeings-new-ceo-orders-rethink-on-key-jetliner-project-idUSKBN1ZL2RM](https://www.reuters.com/article/us-boeing-737max-nma/boeings-new-ceo-orders-rethink-on-key-jetliner-project-idUSKBN1ZL2RM). (Stand: 09.02.2025).
- Reynolds, T., Barrett, S. R. H., Dray, L. M., Evans, A., Köhler, M., Vera-Morales, M., Schäfer, A. W., Wadud, Z., Britter, R., Hallam, H., und Hunsley, R. (2007). Modelling Environmental and Economic Impacts of Aviation: Introducing the Aviation Integrated Modelling Project. In *7th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, Reston, Virginia, USA. American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi:10.2514/6.2007-7751.
- Risse, K., Schäfer, K., Schültke, F., und Stumpf, E. (2016). Central Reference Aircraft data System (CeRAS) for research community. *CEAS Aeronautical Journal*, 7(1):121–133. doi:10.1007/s13272-015-0177-9.
- Roskopf, M. (2013). Fleet Optimization Model (FLOP): Software Documentation. DLR Lufttransportsysteme.
- Roskopf, M., Lehner, S., und Lütjens, K. (2013). Impact of single-aisle aircraft with reduced design range on airline operations and dynamics of fleet composition. *Journal of Aerospace Operations*, 2(3-4):99–113. doi:10.3233/AOP-130036.
- Roy, S., Crossley, W. A., Moore, K., Gray, J. S., und Martins, J. R. R. A. (2018). Next generation aircraft design considering airline operations and economics. In *2018 AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. doi:10.2514/6.2018-1647.
- Roy, S., Moore, K., Hwang, J. T., Gray, J. S., Crossley, W. A., und Martins, J. R. R. A. (2017). A Mixed Integer Efficient Global Optimization Algorithm for the Simultaneous Aircraft Allocation-Mission-Design Problem. In *58th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, Reston, Virginia, USA. American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi:10.2514/6.2017-1305.
- Ruan, J. H., Wang, Z. X., Chan, F. T., Patnaik, S., und Tiwari, M. K. (2021). A reinforcement learning-based algorithm for the aircraft maintenance routing problem. *Expert Systems with Applications*, 169:114399. doi:10.1016/j.eswa.2020.114399.
- Ryerson, M. S. und Hansen, M. (2010). The potential of turboprops for reducing aviation fuel consumption. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 15(6):305–314. doi:10.1016/j.trd.2010.03.003.

- Sa, C. A., Santos, B. F., und Clarke, J.-P. B. (2020). Portfolio-based airline fleet planning under stochastic demand. *Omega*, 97:102101. doi:10.1016/j.omega.2019.08.008.
- Sabre (2022). Market Intelligence. /<https://www.sabre.com/products/market-intelligence/>. (Stand: 09.02.2025).
- Schmitt, D. und Gollnick, V. (2016). *Air Transport System*. Springer Vienna, Wien, Österreich. doi:10.1007/978-3-7091-1880-1.
- Silberhorn, D. (2024). Final Results of The Exact Project: A Holistic Ecological and Economical Interpretation, Key Findings and Next Steps. In *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2024*.
- Silberhorn, D., Dahlmann, K., Görtz, A., Linke, F., Zanger, J., Rauch, B., Methling, T., Janzer, C., und Hartmann, J. (2022). Climate Impact Reduction Potentials of Synthetic Kerosene and Green Hydrogen Powered Mid-Range Aircraft Concepts. *Applied Sciences*, 12(12):5950. doi:10.3390/app12125950.
- Søvde, O. A., Matthes, S., Skowron, A., Iachetti, D., Lim, L. L., Owen, B., Hodnebrog, Ø., Di Genova, G., Pitari, G., Lee, D. S., Myhre, G., und Isaksen, I. S. (2014). Aircraft emission mitigation by changing route altitude: A multi-model estimate of aircraft NO_x emission impact on O₃ photochemistry. *Atmospheric environment (Oxford, England : 1994)*, 95:468–479. doi:10.1016/j.atmosenv.2014.06.049.
- Statista (2022a). Airbus Group’s research and development expenses between FY 2010 to FY 2021. /<https://www.statista.com/statistics/259476/eads-research-and-development-costs/>. (Stand: 09.02.2025).
- Statista (2022b). Boeing’s R&D expenditures from FY 2001 to FY 2021. /<https://www.statista.com/statistics/268991/expenditures-on-research-and-development-by-boeing/>. (Stand: 09.02.2025).
- Stumpf, E. (2013). Aircraft Design Lectures At Rwth Aachen University, Germany. In *11th European Workshop on Aircraft Design Education*. doi:10.5281/zenodo.546423.
- Subramanian, R., Scheff, R. P., Quillinan, J. D., Wiper, D. S., und Marsten, R. E. (1994). Coldstart: Fleet Assignment at Delta Air Lines. *Interfaces*, 24(1):104–120. doi:10.1287/inte.24.1.104.
- Taylor, C. und de Weck, O. L. (2007). Coupled Vehicle Design and Network Flow Optimization for Air Transportation Systems. *Journal of Aircraft*, 44(5):1479–1486. doi:10.2514/1.27320.
- Tetzloff, I. J. und Crossley, W. A. (2009). An Allocation Approach to Investigate New Aircraft Concepts and Technologies on Fleet-Level Metrics. In *9th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, Reston, Virginia, USA. American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi:10.2514/6.2009-6979.
- The Seattle Times (2015). Boeing looking closely at an all-new jet for 2025. /<https://www.seattletimes.com/business/boeing-aerospace/boeing-looking-closely-at-an-all-new-jet-for-2025/>. (Stand: 09.02.2025).

- The World Bank (2024). DataBank - World Development Indicators - Air transport, passengers carried. /<https://databank.worldbank.org/reports.aspx?dsid=2&series=IS.AIR.PSGR#>. (Stand: 09.02.2025).
- Thorbeck, J. (2013). DOC-Assessment Method: TU Berlin - DOC Method.
- Urban, M., Kluge, U., Ploetner, K. O., Barbeito, G., Pickl, S., und Hornung, M. (2017). Modelling the European Air Transport System: A System Dynamics Approach. In *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2017*. /<https://www.dglr.de/publikationen/2017/450125.pdf>. (Stand: 09.02.2025).
- U.S. Energy Information Administration (2023a). Annual Energy Outlook: Table 12. Petroleum and Other Liquids Prices. /<https://www.eia.gov/outlooks/aeo/>. (Stand: 09.02.2025).
- U.S. Energy Information Administration (2023b). Petroleum & Other Liquids: Spot Prices. /https://www.eia.gov/dnav/pet/pet_pri_spt_s1_a.htm. (Stand: 09.02.2025).
- Vaze, V. und Barnhart, C. (2012). Modeling Airline Frequency Competition for Airport Congestion Mitigation. *Transportation Science*, 46(4):512–535. doi:10.1287/trsc.1120.0412.
- Viry, P., Joly, L., Planés, T., und Bischoff, T. (2025). An adapted weighted multinomial logit model to capture the dynamics of global aircraft-route assignment. In *Towards Sustainable Aviation Summit 2025*.
- Vlek, S. und Vogels, M. (2000). AERO - Aviation Emissions and Evaluation of Reduction Options. National Aerospace Laboratory.
- Warburg, V., Bhat, C., und Adler, T. (2006). Modeling Demographic and Unobserved Heterogeneity in Air Passengers' Sensitivity to Service Attributes in Itinerary Choice. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1951(1):7–16. doi:10.1177/0361198106195100102.
- Wehrspohn, J., Rahn, A., Papantoni, V., Silberhorn, D., Burschky, T., Schröder, M., Linke, F., Dahlmann, K., Kühlen, M., Wicke, K., und Wende, G. (2022). A Detailed and Comparative Economic Analysis of Hybrid-Electric Aircraft Concepts Considering Environmental Assessment Factors. In *AIAA Aviation 2022 Forum*, Reston, Virginia, USA. American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi:10.2514/6.2022-3882.
- Wei, K., Vaze, V., und Jacquillat, A. (2018). Airline Timetable Development and Fleet Assignment Incorporating Passenger Choice. *SSRN Electronic Journal*. doi:10.2139/ssrn.3198882.
- Wei, W. und Hansen, M. (2007). Airlines' competition in aircraft size and service frequency in duopoly markets. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43(4):409–424. doi:10.1016/j.tre.2006.01.002.
- Wicke, K., Kruse, M., und Linke, F. (2012). Mission and economic analysis of aircraft with natural laminar flow. In *28th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS 2012)*. /https://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2012/PAPERS/029.PDF. (Stand: 09.02.2025).

- Wikipedia (2023). Lists of airports by IATA and ICAO code. /https://en.wikipedia.org/wiki/Lists_of_airports#By_code. (Stand: 09.02.2025).
- Willems, P. (2020). *Ansatz zur Modellierung generischer Flughäfen im globalen Lufttransportsystem*. Dissertation, Technische Universität Hamburg, Hamburg, Deutschland. /<https://elib.dlr.de/142777/>. (Stand: 09.02.2025).
- Williams, V., Noland, R. B., und Toumi, R. (2002). Reducing the climate change impacts of aviation by restricting cruise altitudes. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 7(6):451–464. doi:10.1016/S1361-9209(02)00013-5.
- Wöhler, S., Hartmann, J., Prenzel, E., und Kwik, H. (2018). Preliminary aircraft design for a midrange reference aircraft taking advanced technologies into account as part of the AVACON project for an entry into service in 2028. In *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2018*.
- Wöhler, S., Walther, J.-N., und Grimme, W. (2022). Design and Eco-Efficiency Assessment of a People Mover Aircraft in Comparison to State-Of-The-Art Narrow Body Aircraft. In *33rd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS 2022)*.
- Wolter, A. H. (2025). *Treibstoffpreissicherung in der Luftfahrtindustrie - Ein Modell zur Analyse, Planung und Gestaltung von Treibstoffpreissicherungsstrategien*. Dissertation (im Druck), Technische Universität Hamburg, Hamburg, Deutschland.
- Wong, C. W. H., Cheung, T. K. Y., und Zhang, A. (2023). A connectivity-based methodology for new air route identification. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 173:103715. doi:10.1016/j.tra.2023.103715.
- Yaakoubi, Y., Soumis, F., und Lacoste-Julien, S. (2020). Machine learning in airline crew pairing to construct initial clusters for dynamic constraint aggregation. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 9(4):100020. doi:10.1016/j.ejtl.2020.100020.
- Yutko, B. (2014). *The Impact of Aircraft Design Reference Mission on Fuel Efficiency in the Air Transportation System*. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Boston, Massachusetts, USA.
- Zhang, J., Roumeliotis, I., Zhang, X., und Zolotas, A. (2023). Techno-economic-environmental evaluation of aircraft propulsion electrification: Surrogate-based multi-mission optimal design approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 175:113168. doi:10.1016/j.rser.2023.113168.

