Entwicklung und öko-temporale Analyse von Ansätzen zur Regulierung von Flugfrequenzen

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg

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

genehmigte Dissertation

von
Felix Presto

aus
Hamburg

2023

Übersicht der Gutachter*innen:

1. Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Volker Gollnick
2. Gutachterin:	Prof. Dr. rer. pol. Kathrin Fischer
Vorsitzender des Prüfungsausschusses:	Prof. Dr.-Ing. Carsten Gertz
Tag der mündlichen Prüfung:	8. Juli 2022

Creative Commons Lizenzvertrag:

Der Text steht, soweit nicht anders gekennzeichnet, unter der Creative-Commons-Lizenz Namensnennung 4.0 (CC BY 4.0). Das bedeutet, dass er vervielfältigt, verbreitet und öffentlich zugänglich gemacht werden darf, auch kommerziell, sofern dabei stets der Urheber, die Quelle des Textes und o. g. Lizenz genannt werden. Die genaue Formulierung der Lizenz kann unter https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.de aufgerufen werden.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand zwischen 2018 und 2021 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Lufttransportsysteme der *Technischen Universität Hamburg* und des *Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt*. Ich habe diese Zeit in sehr schöner Erinnerung, wozu neben thematisch reizvollen Aufgaben insbesondere meine Mitmenschen beigetragen haben.

Zuerst danke ich dafür meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Gollnick. Besonders hervorheben möchte ich den inhaltlichen Gestaltungsspielraum in der Forschung, die fachlichen Diskussionen sowie das Vertrauen in der Zusammenarbeit. Des Weiteren möchte ich meiner Zweitgutachterin Frau Prof. Dr. rer. pol. Kathrin Fischer für die fachliche Unterstützung beim mathematischen Teil dieser Arbeit danken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Carsten Gertz danke ich für die Übernahme des Vorsitzes des Prüfungsausschusses.

Im Kollegenkreis danke ich Herrn Dipl.-Vw. Klaus Lütjens für die Schaffung eines einzigartig angenehmen Arbeitsumfeldes sowie für das stets zuverlässige und hilfreiche Feedback bei der Erstellung von Veröffentlichungen. Allen weiteren Kollegen danke ich für die Diskussionen und Gespräche im Büro, an der Kaffeemaschine, in der Kantine oder virtuell.

Meinen Eltern und meiner Schwester danke ich für die volle Unterstützung bei diesem Vorhaben von Anfang an. Meiner Frau Ines danke ich für ihren Optimismus, ihre Empathie und ihre Energie, so dass wir parallel zur Erstellung dieser Arbeit auch Eltern von unseren beiden Kindern, Leon und Amelie, geworden sind.

Hamburg, Januar 2023

Felix Presto

Kurzfassung

Zunehmende Kapazitätsengpässe sowie die Notwendigkeit nach ökologischen Effizienzgewinnen im Luftverkehr lassen die Reduzierung von Flugfrequenzen und die Erhöhung der Flugzeuggröße wie eine offensichtliche Maßnahme erscheinen.

In der Praxis gibt es mehrere Faktoren, die eine ambitionierte Erhöhung der durchschnittlich eingesetzten Flugzeuggrößen verhindern: (1) Frequenzwettbewerb zwischen Airlines, um möglichst kurze Umsteigeverbindungen anzubieten, (2) eine begrenzte Anzahl Flugzeugtypen am Markt in Kombination mit langen Produktlebenszyklen sowie (3) Flughafenslotallokationmechanismen, die auf Großvaterrechten basieren und damit einen Anreiz für Airlines darstellen, zugeteilte Slots zur Sicherung der eigenen Marktposition möglichst ausnutzen, was mit durchschnittlich kleineren Flugzeugen flexibler möglich ist.

In dieser Arbeit wird untersucht, inwiefern sich durch die Regulierung von Flugfrequenzen (die Anzahl Flüge auf einer Strecke pro Tag) Verspätungen reduzieren und durch den Einsatz größerer Flugzeuge ökologisch-ökonomische Effizienzgewinne erzeugen lassen. Die angebotene Sitzplatzkapazität pro Strecke bleibt dabei stets konstant. Die Untersuchung erfolgt für die höchstfrequentierten Strecken ausgehend von den 26 größten Flughäfen im EUROCONTROL-Raum für einen langfristigen Zeithorizont von 2019 bis 2040.

Dazu wurde das zweistufige Frequenzreduzierungsmodell FRED entwickelt. Darin werden im ersten Schritt alternative Frequenzregulierungsansätze modelliert, die Mechanismen beschreiben, nach denen Frequenzen auf welchen Strecken und auf welchen Wert reduziert werden. Im zweiten Schritt erfolgt die Zuweisung von Flottenmixen zu den frequenzreduzierten Strecken mittels eines ganzzahligen linearen Optimierungsproblems. Wesentliche modellierte und untersuchte Dimensionen sind *Air Traffic Flow Management* (ATFM)-Verspätung, Schedule Delay, Netto-Reisezeit, jährliche Flugzeugausnutzung, direkte Betriebskosten und der Kerosinverbrauch.

Je nach Ansatz ist durch die Reduzierung von 1% bis 5% der Flüge ein Rückgang der durchschnittlichen ATFM-Verspätung pro Flug von 1% bis 40% möglich. Die Netto-Reisezeit für Passagiere verkürzt sich bei Gewichtung des Zeitnutzens von

planbarem Schedule Delay und kurzfristigen ATFM-Verspätungen in den meisten Fällen. Ökologisch-ökonomische Effizienzgewinne von bis zu 5% in Bezug auf die angebotenen Sitzplatzkilometer können auf frequenzreduzierten Strecken generiert werden, wenn die maximal zulässige Flugzeuggröße begrenzt wird, so dass sich der Einsatz auf *Single-Aisle*-Flugzeuge beschränkt.

Mit der Einführung eines neuen Flugzeugtyps im Größenbereich eines *New Midsize Airplane* ab 2030 und einem entsprechenden Technologielevel kann das ökologisch-ökonomische Potenzial auf bis zu 10% gesteigert werden. Der Betrieb von aktuell am Markt verfügbaren *Twin-Aisle*-Flugzeugen auf Kurzstrecke führt dagegen zu einem Anstieg der Betriebskosten und des Kerosinverbrauchs. Saisonale Schwankungen im Luftverkehrsaufkommen erschweren zudem die gleichmäßige Ausnutzung der veränderten Flugzeugflotten über das Jahr hinweg. Frequenzregulierung ist ein regulatorisch relativ harter Eingriff, dessen qualitative Risiken wie Wettbewerbsverzerrung mit seinen quantitativen Potenzialen abgewogen werden müssen.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur **ix**
Abkürzungen . . . ix
Variablen Frequenzregulierung . . . x
Variablen Öko-Bewertung . . . xii
Variablen Flottenzuweisung . . . xiv
Indexmengen und Indizes . . . xv
Mengen und Elemente . . . xv

1 Einleitung **1**
1.1 Motivation . . . 1
1.2 Forschungsbeitrag . . . 5

2 Stand der Wissenschaft **7**
2.1 Marktseitige Wechselwirkungen von Frequenz . . . 8
2.2 Skaleneffekte von Flugzeuggröße . . . 10
2.2.1 Grundlagen . . . 11
2.2.2 Literaturüberblick . . . 14
2.3 Kapazitätsmanagement im Luftverkehr . . . 19
2.3.1 Grundlagen . . . 20
2.3.2 Literaturüberblick . . . 23
2.4 Zwischenfazit . . . 30

3 Modellentwicklung **35**
3.1 Ziele von Frequenzregulierung und Modellierungsgrundsätze . . . 36
3.2 Parameter zur temporalen Bewertung . . . 40
3.2.1 Schedule Delay . . . 41
3.2.2 ATFM-Verspätung . . . 44
3.2.3 Zeitlicher Grenznutzen einer Frequenz . . . 48
3.2.4 Veränderung der Netto-Reisezeit . . . 53
3.3 Frequenzregulierungsansätze . . . 54
3.3.1 Beschreibung der Frequenzregulierungsansätze . . . 54
3.3.2 Modellierung der Frequenzregulierungsansätze . . . 59
3.4 Angleichung der Flugzeuggröße . . . 73
3.5 Parameter zur ökologisch-ökonomischen Bewertung . . . 76
3.5.1 Betriebskosten und Kerosinverbrauch . . . 76

3.5.2 Flugzeugausnutzung und Flugzeuganzahl . . . 82
3.6 Optimierungsproblem der Flottenzuweisung . . . 83
3.6.1 Flottenzuweisung und typische Modellierungsansätze . . . 83
3.6.2 Ziel und Besonderheiten des Optimierungsproblems . . . 86
3.6.3 Formulierung des Optimierungsproblems . . . 89
3.7 Zwischenfazit . . . 96

4 Modellanwendung **99**
4.1 Auswahl des Untersuchungsraums . . . 99
4.1.1 Höchstfrequentierte Strecken im EUROCONTROL-Raum . . . 99
4.1.2 Verkehrs- und Verspätungssituation . . . 101
4.2 Datengrundlagen . . . 105
4.2.1 Vorhersagemethodik der Verkehrsdaten . . . 106
4.2.2 Flüge und Passagierströme . . . 107
4.2.3 Verspätungen . . . 108
4.2.4 Flugzeugdaten . . . 110
4.3 Verifizierung und Validierung der Modellbestandteile . . . 111
4.3.1 Frequenzreduzierungsschritt . . . 112
4.3.2 Flottenzuweisungsschritt . . . 116
4.4 Zwischenfazit . . . 119

5 Ergebnisse und Diskussion **121**
5.1 Zielfrequenzen und Zielflugzeuggrößen . . . 123
5.2 Flüge und ATFM-Verspätung . . . 128
5.3 Netto-Reisezeit . . . 132
5.4 Flottendynamiken . . . 137
5.5 Betriebskosten und Kerosinverbrauch . . . 143
5.6 Neue Flugzeugentwürfe . . . 149
5.6.1 Vorgehensweise . . . 150
5.6.2 Temporale Implikationen . . . 152
5.6.3 Ökonomisch-ökologische Implikationen . . . 155
5.7 Sensitivitätsanalysen . . . 161
5.7.1 Gewichtung des Negativnutzens von ATFM-Verspätungen . . . 162
5.7.2 Abweichung Zielsitzplatzkapazität . . . 163
5.7.3 Kerosinpreisanstieg . . . 167
5.8 Dimensionsübergreifende Zusammenfassung der Ergebnisse . . . 169
5.9 Übergeordnete Herausforderungen und Lösungsansätze . . . 175
5.10 Zwischenfazit . . . 179

6 Fazit **181**
6.1 Beantwortung der Forschungsfrage und Zusammenfassung . . . 181
6.2 Weiterer Forschungsbedarf . . . 184

A Verwendete Flugzeugtypen **187**

B 26 größte Airline-Hubs im EUROCONTROL-Raum **191**

C Vorhersage von Verkehrs- und Verspätungsdaten **193**

D Ergebnisse **195**
D.1 Zielfrequenzen und Zielflugzeuggrößen 195
D.2 Flüge und ATFM-Verspätungen 199
D.3 Netto-Reisezeit 200
D.4 Flottendynamiken 202
D.5 Betriebskosten und Kerosinverbrauch 204
D.6 Neue Flugzeugentwürfe 206

Abbildungsverzeichnis **207**

Tabellenverzeichnis **215**

Literaturverzeichnis **219**

Nomenklatur

Abkürzungen

ASK	Available Seat Kilometer (Angebotene Sitzplatzkilometer)
ATFM	Air Traffic Flow Management (Verkehrsflussregelung)
CASA	Computer-Assisted Slot Allocation
COC	Cash Operating Cost (cash-wirksame Betriebskosten)
COC/ASK	Cash Operating Cost (cash-wirksame Betriebskosten pro angebotenem Sitzplatzkilometer)
CODA	Central Office for Delay Analysis der EUROCONTROL
COVID-19	Coronavirus Disease 2019
DLR	Deutsches Zentraum für Luft- und Raumfahrt
DOC	Direct Operating Cost (Direkte Betriebskosten)
EASA	European Union Aviation Safety Agency
EIS	Entry into Service (Markteinführung)
EM	Engine Mass (Triebwerksmasse)
EOP	End of Production (Produktionsende)
EUROCONTROL	European Organisation for the Safety of Air Navigation
FC	Fuel Consumption (Kraftstoffverbrauch)
FC/ASK	Fuel Consumption per Available Seat Kilometer (Kraftstoffverbrauch pro angebotenem Sitzplatzkilometer)

FRED	Frequency Reduction Model
IATA	International Air Transport Association
IFR	Instrument Flight Rules (Instrumentenflugregeln)
LASR	Large Aircraft for Short Range (Großes Flugzeug für die Kurzstrecke)
LTO	Landing-Take-off (Landung - Start)
MRO	Maintenance, Repair and Overhaul (Instandhaltung)
MTOM	Maximum Take-Off Mass (Maximale Startmasse)
NFE	Network Flow Environment
NMA	New Midsize Airplane (Neues mittelgroßes Flugzeug)
OEM	Operating Empty Mass (Betriebsleermasse)
TCM	Trajectory Calculation Module
UDPP	User Driven Prioritisation Process
UML	Unified Modeling Language

Variablen Frequenzregulierung

Variable	**Einheit**	**Bezeichnung**
AAD^{max}	[min]	Maximale durchschnittliche ATFM-Verspätung pro Flug im EUROCONTROL-Raum (*average ATFM delay*)
AAD'_{my}	[min]	Empirische durchschnittliche ATFM-Verspätung pro Flug im EUROCONTROL-Raum (*average ATFM delay*)
AAD_{my}	[min]	Durchschnittliche ATFM-Verspätung pro Flug im EUROCONTROL-Raum (*average ATFM delay*)
AAD'_{rmy}	[min]	Empirische durchschnittliche ATFM-Verspätung pro Flug auf einer Strecke (*average ATFM delay*)
AF	[−]	Anzahl kumulierter nicht reduzierbarer Frequenzen (*accumulated frequencies*)
$AMTUF$	[min]	Kumulierter zeitlicher Grenznutzen nicht reduzierbarer Frequenzen (*accumulated marginal temporal utility of frequencies*)

Variable	**Einheit**	**Bezeichnung**
ASD^{low}	[min]	Minimaler durchschnittlicher Schedule Delay für Direkt- und Umsteigepassagiere in einer Iteration (*average schedule delay*)
ASD^{min}	[min]	Mindest-Schedule Delay für Direkt- und Umsteigepassagiere (*average schedule delay*)
ASD^{c}_{rmy}	[min]	Durchschnittlicher Schedule Delay für Umsteigepassagiere (*average schedule delay*)
ASD^{d}_{rmy}	[min]	Durchschnittlicher Schedule Delay für Direktpassagiere (*average schedule delay*)
ASD_{rmy}	[min]	Durchschnittlicher gewichteter Schedule Delay für Direkt- und Umsteigepassagiere (*average schedule delay*)
AS^{high}	[$Sitze$]	Größte durchschnittliche Zielflugzeuggrröße (*average aircraft size*)
AS^{max}	[$Sitze$]	Maximale durchschnittliche Zielflugzeuggröße (*average aircraft size*)
$ATASD$	[min]	Kumulierter Gesamt-Schedule Delay (*accumulated total average schedule delay*)
$ATDASD_{my}$	[min]	Kumulierter Rückgang des durchschnittlichen Gesamt-Schedule Delay (*accumulated total decrease in average schedule delay*)
$ATIAPAD_{my}$	[min]	Kumulierter Anstieg der durchschnittlichen Passagier-Gesamt-ATFM-Verspätung (*accumulated total increase in average passenger ATFM delay*)
D_{my}	[−]	Anzahl Flüge pro Tag im EUROCONTROL-Raum (*departures*)
F^{max}	[−]	Maximalfrequenz (Anzahl der Flüge pro Tag und Richtung) (*frequency*)
F_{rmy}	[−]	Frequenz auf einer Strecke (Anzahl der Flüge pro Tag und Richtung) (*frequency*)
$IAAD_{rmy}$	[min]	Anstieg der durchschnittlichen ATFM-Verspätung pro Flug im EUROCONTROL-Raum (*increase in average ATFM delay*)
$MTUF^{low}$	[min]	Geringster zeitlicher Grenznutzen einer Frequenz in einer Iteration (*marginal temporal utility of a frequency*)
$MTUF_{rmy}$	[min]	Zeitlicher Grenznutzen einer Frequenz (*marginal temporal utility of a frequency*)
PAX^{EURO}_{my}	[−]	Anzahl täglicher Passagiere im EUROCONTROL-Raum
PAX^{c}_{rmy}	[−]	Anzahl täglicher Umsteigepassagiere auf einer Strecke pro Richtung (*connecting passengers*)
PAX^{d}_{rmy}	[−]	Anzahl täglicher Direktpassagiere auf einer Strecke pro Richtung (*direct passengers*)
$TAFAD_{rmy}$	[min]	Gesamt-Flug-ATFM-Verspätung (*total increase in average passenger ATFM delay*)
$TASC_{rmy}$	[$Sitze$]	Angebotene Zielsitzplatzkapazität (*target available seat capacity*)

Variable	Einheit	Bezeichnung
$TASD^{low}$	[min]	Geringster Gesamt-Schedule Delay in einer Iteration (*total average schedule delay*)
$TASD^{min}$	[min]	Mindest-Gesamt-Schedule Delay für Direkt- und Umsteigepassagiere (*total average schedule delay*)
$TASD^{c}_{rmy}$	[min]	Gesamt-Schedule Delay für Umsteigepassagiere (*total average schedule delay*)
$TASD^{d}_{rmy}$	[min]	Gesamt-Schedule Delay für Direktpassagiere (*total average schedule delay*)
$TASD_{rmy}$	[min]	Gesamt-Schedule Delay für Direkt- und Umsteigepassagiere (*total average schedule delay*)
$TCNTT_{my}$	[min]	Kumulierte Veränderung der Netto-Reisezeit (*total change in net travel time*)
$TDASD_{rmy}$	[min]	Reduzierung im Gesamt-Schedule Delay für Direkt- und Umsteigepassagiere (*total decrease in total average schedule delay*)
$TIAPAD_{rmy}$	[min]	Anstieg in durchschnittlicher Gesamt-Passagier-ATFM-Verspätung (*total increase in average passenger ATFM delay*)
T_r	[min]	Kürzere der beiden Betriebsdauern zweier Flughäfen einer Strecke
$WTCNTT_{my}$	[min]	Gewichtete kumulierte Veränderung der Netto-Reisezeit *(weighted total change in net travel time*)
α_y	[−]	Regressionskoeffizient zur Schätzung der durchschnittlichen ATFM-Verspätung
β_y	[−]	Regressionskoeffizient zur Schätzung der durchschnittlichen ATFM-Verspätung
c_{rmy}	[−]	Überlastungsfaktor (*congestion*)
d	[−]	Gewichtungsfaktor des Negativnutzens von ATFM-Verspätung zu Schedule Delay (*disutility*)
u_{ATFM}	[−]	Betrag des Negativnutzens einer Einheit ATFM-Verspätung (*utility*)
u_{Sched}	[−]	Betrag des Positivnutzens einer Einheit Schedule Delay (*utility*)

Variablen Öko-Bewertung

Variable	Einheit	Bezeichnung
ASK_{ar}	$[Sitze * km]$	Angebotene Sitzplatzkilometer (*available seat kilometer*)
BT_r	$[h]$	Blockzeit (*block time*)
$COCASK_{ary}$	$[EUR/(Sitz* km)]$	Cash-wirksame direkte Betriebskosten pro angebotenem Sitplatzkilometer (*cash operating cost per available seat kilometer*)

Variable	**Einheit**	**Bezeichnung**
COC_{ary}	$[EUR]$	Cash-wirksame direkte Betriebskosten (*cash operating cost*)
$DistDet$	$[km]$	Umweg durch nicht direkte Routenführung (*distance detour*)
$DistGC_r$	$[km]$	Großkreisdistanz zwischen zwei Flughäfen (*great circle distance*)
$Dist_r$	$[km]$	Geflogene Distanz (*distance*)
$FCASK_{ar}$	$[kg/(Sitz * km)]$	Kerosinverbrauch pro angebotenem Sitzplatzkilometer (*fuel consumption per available seat kilometer*)
$FCTT_a$	$[kg]$	Kerosinverbrauch während des Taxiing und des Startvorgangs (*fuel consumption taxi take-off*)
FC_{ar}	$[kg]$	Kerosinverbrauch von Block zu Block (*fuel consumption*)
$FFTO_a$	$[kg/s]$	Kerosinfluss während des Startvorgangs (*fuel flow take-off*)
FFT_a	$[kg/s]$	Kerosinfluss während des Taxiing (*fuel flow taxi*)
FPI	$[\%]$	Jährliche Kerosinpreissteigerung (*fuel price increase*)
FP	$[EUR/kg]$	Kerosinpreis (*fuel price*)
FT_r	$[h]$	Flugzeit (*flight time*)
IR	$[\%]$	Jährliche Inflationsrate (inflation rate)
MU_{ay}^{max}	$[h]$	Maximale monatliche Flugzeugausnutzung (*monthly utilization*)
MU_{ay}^{ref}	$[h]$	Monatliche Flugzeugausnutzung als Referenz zur Bestimmung notwendiger Flugzeugtypen (*monthly utilization*)
N_a	$[-]$	Notwendige Anzahl Flugzeuge eines Typs
$OC_{Kero_{ar}}$	$[EUR]$	Betriebskosten für Kerosin (*operating cost*)
OC_{MROReg_a}	$[EUR]$	Instandhaltungskosten ohne Berücksichtigung des Bestrafungsfaktors für *Twin-Aisle*-Flugzeuge
OC_{MRO_a}	$[EUR]$	Betriebskosten für Instandhaltung (*operating cost maintenance, repair and overhaul*)
RMU_{amy}	$[h]$	Notwendige monatliche Flugzeugausnutzung (*required monthly utilization*)
SLF_r	$[\%]$	Sitzladefaktor (*seat load factor*)
S_a	$[Sitze]$	Flugzeuggröße (*size*)
TTO	$[s]$	Dauer Startvorgang (*take-off time*)
TT	$[s]$	Dauer Taxiing (*taxi time*)
YAU_a^{emp}	$[h]$	Empirische verfügbare jährliche Flugzeugausnutzung (*yearly available utilization*)
YAU_a	$[h]$	Verfügbare jährliche Flugzeugausnutzung (*yearly available utilization*)
Y_{ref}	$[-]$	Referenzjahr (*reference year*)
δ_a	$[-]$	Regressionskoeffizient zur Schätzung des Kerosinverbrauchs

Variable	Einheit	Bezeichnung
ϵ_a	$[-]$	Regressionskoeffizient zur Schätzung des Kerosinverbrauchs
γ_a	$[-]$	Regressionskoeffizient zur Schätzung des Kerosinverbrauchs
ζ_a	$[-]$	Regressionskoeffizient zur Schätzung des Kerosinverbrauchs
dpm_m	$[-]$	Tage im Monat (*days per month*)
f_{army}	$[-]$	Frequenz eines Flugzeugtyps (*fuel consumption*)
mp	$[-]$	Bestrafungsfaktor Instandhaltungskosten für *Twin-Aisle*-Flugzeuge (*maintenance penalty*)
ou	$[\%]$	Faktor zu Überausnutzung eines Flugzeugs (*over utilization*)
up	$[\%]$	Bestrafungsfaktor für die Ausnutzung von *Twin-Aisle*-Flugzeugen (*utilization penalty*)

Variablen Flottenzuweisung

Variable	Einheit	Bezeichnung
$AASC$	$[Sitze]$	Tatsächlich verfügbare Sitzplatzkapazität (*actual available seat capacity*) {Entscheidungvariable}
$AASL$	$[Sitze]$	Flughafenspezifischen Flugzeuggrößenlimit (*airport aircraft size limit*)
AS	$[Sitze]$	Durchschnittliche Zielflugzeuggröße als Ausgangswert der Frequenzreduzierungsschrittes (*aircraft size*)
$COCFA$	$[EUR]$	COC einer Flottenzuweisung
COC_a	$[EUR]$	COC eines Flugzeugtyps a
C	$[-]$	Anzahl Wettbewerber (*competitors*)
EIS_a	$[-]$	Jahr der Markteinführung eines Flugzeugtyps a
EOP_a	$[-]$	Jahr des Produktionsendes eines Flugzeugtyps a
F	$[-]$	Zielfrequenz über alle Flugzeugtypen einer Flottenzuweisung als Ausgangswert des Frequenzreduzierungsschrittes
NA^{min}	$[-]$	Mindestanzahl unterschiedlicher Flugzeugtypen innerhalb einer Flottenzuweisung (*number of aircraft types*)
NA	$[-]$	Anzahl unterschiedlicher Flugzeugtypen innerhalb einer Flottenzuweisung (*number of aircraft types*) {Entscheidungvariable}
S_a	$[Sitze]$	Flugzeuggröße (*size*)
$TASC$	$[Sitze]$	Angebotene Zielsitzplatzkapazität einer Flottenzuweisung (*target available seat capacity*)
das^{high}	$[Sitze]$	Maximale obere Abweichung von der durchschnittlichen Zielflugzeuggröße AS (*deviation average aircraft size*)

Variable	**Einheit**	**Bezeichnung**
das^{low}	$[Sitze]$	Maximale untere Abweichung von der durchschnittlichen Zielflugzeuggröße AS (*deviation average aircraft size*)
dsc	[%]	Maximale Abweichung der tatsächlichen Sitzplatzkapazität $AASC$ von der Zielsitzplatzkapazität $TASC$ (*deviation seat capacity*)
f_a	$[-]$	Frequenz eines Flugzeugtyps a innerhalb einer Flottenzuweisung {Entscheidungvariable}
u_a	$[-]$	Binäre Hilfsvariable die anzeigt, ob ein Flugzeugtyp a innerhalb einer Flottenzuweisung verwendet wird {Entscheidungvariable}
$v_{i,i+1}$	$[-]$	Binäre Hilfsvariable die anzeigt, ob die Frequenz zwischen zwei Flugzeugtypen in AA^* innerhalb einer Flottenzuweisung zunimmt, gleich ist oder abnimmt {Entscheidungvariable}
w	$[-]$	Hilfswert zur Modellierung von Nebenbedingungen

Indexmengen und Indizes

Bezeichnung	**Beschreibung**
A	Menge sämtlicher Flugzeugtypen a
M	Menge sämtlicher Monate m
R	Menge sämtlicher Strecken r
Y	Menge sämtlicher Jahre y
a	Flugzeugtyp (*aircraft type*)
m	Monat (*month*)
r	Strecke (*route*)
y	Jahr (*year*)

Mengen und Elemente

Bezeichnung	**Beschreibung**
AA^*	Menge AA aufsteigend nach Größe der Flugzeugtypen sortiert
AA	Menge der Flugzeugtypen a die für eine Flottenzuweisung zur Verfügung stehen
$ARMY$	Menge sämtlicher Flugzeugtyp-Strecke-Monat-Jahr-Kombinationen $army$
MY	Menge sämtlicher Monat-Jahr-Kombinationen my
NR	Menge nicht reduzierbarer Strecke-Monat-Jahr-Kombinationen
RMY^*	Teilmenge der Potenzmenge von RMY
RMY	Menge sämtlicher Strecke-Monat-Jahr-Kombinationen rmy

Bezeichnung	**Beschreibung**
$RRMY$	Menge sämtlicher frequenzreduzierter Strecke-Monat-Jahr-Kombinationen $rrmy$
RRY	Menge sämtlicher frequenzreduzierter Strecke-Jahr-Kombinationen rry
RY	Menge sämtlicher Strecke-Jahr-Kombinationen ry
$army$	Flugzeugtyp-Strecke-Monat-Jahr-Kombination
my	Monat-Jahr-Kombination
rmy^*	Strecke-Monat-Jahr-Kombination aus der Menge RMY^*
rmy	Strecke-Monat-Jahr-Kombination
$rrmy$	Frequenzreduzierte Strecke-Monat-Jahr-Kombination
rry	Frequenzreduzierte Strecke-Jahr-Kombination
ry	Strecke-Jahr-Kombination

1. Einleitung

1.1 Motivation

Wissenschaft und Praxis sind sich einig, dass in der Luftfahrt in den Dimensionen *Lufttransportsystemkapazität* und *Umwelt* in den nächsten Jahrzehnten maßgebliche Effizienzsteigerungen erforderlich sind. Dies gilt allgemein als herausfordernd, aufgrund der dominierenden Randbedingungen wie Wettbewerbsdruck, geringe Gewinnmargen, volatile Nachfrage sowie kapitalintensive Produktionsgüter mit langen Produktlebenszyklen.

Zur Illustrierung zunehmender Kapazitätsengpässe im Lufttransportsystem zeigt Abbildung 1.1 die historische und prognostizierte Entwicklung der Flüge sowie der durchschnittlichen *Air Traffic Flow Management* (ATFM)-Verspätung pro Flug im EUROCONTROL-Raum. ATFM-Verspätungen entstehen durch mangelnde Systemkapazität im Flugverkehrsmanagement.

Die gepunkteten Linien deuten qualitativ die möglichen Entwicklungskorridore und die Pfeile das als „am wahrscheinlichsten“ titulierte Szenario gemäß Prognosen von EUROCONTROL (2018b) an. Hervorzuheben ist hier die überproportionale Zunahme der ATFM-Verspätung im Vergleich zum Flugwachstum sowie die Spannweite des sich ergebenden Szenariotrichters.

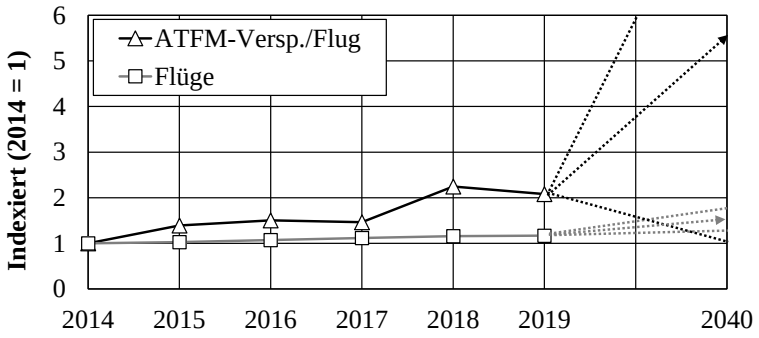

Abb. 1.1: Historische Entwicklung, Prognosekorridore (gepunktete Linie) und „wahrscheinlichste Entwicklung“ (Pfeile) von Flügen und durchschnittlicher ATFM-Verspätung pro Flug im EUROCONTROL-Raum von 2014-2040 basierend auf EUROCONTROL (2018b, 2019c) sowie der Annahme der Erreichung des Vor-COVID-19-Niveaus in 2025 (Airbus, 2020; IATA, 2020a)

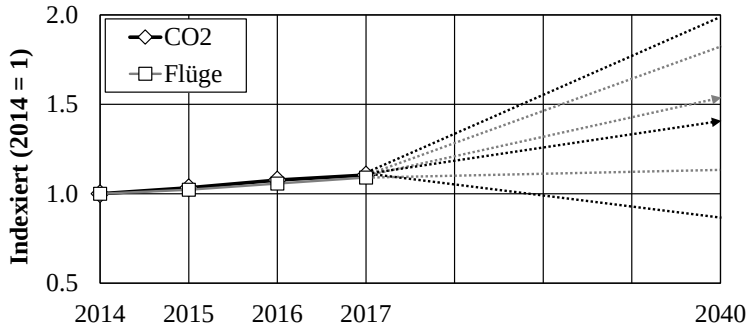

Abb. 1.2: Historische Entwicklung, Prognosekorridore (gepunktete Linie) und „wahrscheinlichste Entwicklung“ (Pfeile) von Flügen und CO_2-Emissionen von 2014-2040 in der EU (Werte ohne COVID-19-Anpassung und basierend auf EEA, EASA, EUROCONTROL (2020))

Die erwartete Zunahme der CO_2-Emissionen sowie der Flüge auf Abbildung 1.2 zeigt dagegen eine etwas geringere Szenariotrichterspannweite, ist vor dem Hintergrund der ökologischen Konsequenzen zunehmender Treibhausgase aber tendenziell kritischer. CO_2-Emissionen machen lediglich einen Teil der Klimawirkung der Luftfahrt aus, sie wurden hier gewählt, da sie direkt proportional mit dem Kerosinverbrauch zunehmen. Die Trichterspannweite der CO_2-Emissionen ist größer als die der Flüge, da erstere maßgeblich durch Technologieentwicklung beeinflusst werden können.

Der COVID-19-induzierte weltweite Einbruch des Luftverkehrs (ICAO, 2021) führt zwar zu einer temporären Entlastung des Lufttransportsystems, die langfristigen Herausforderungen sind damit jedoch nur einige Jahre in die Zukunft verschoben. So gehen beispielsweise der Flugzeughersteller *Airbus* und der internationale Verband der Fluggesellschaften IATA von einer Erholung bis 2025 auf das Niveau von 2019 aus (Airbus, 2020; IATA, 2020a). Folglich reduziert der durch COVID-19 entstehende zeitliche Aufschub nicht den Handlungsdruck, sondern kann auch als eine Gelegenheit angesehen werden, Nachhaltigkeitsbestrebungen auszubauen.

Die Regulierung von Flugfrequenzen, der Anzahl Flüge pro Tag auf einer Strecke, ist in diesem Kontext eine Kapazitätsmanagementmaßnahme, die darauf abzielt, den eingesetzten Flottenmix so zu verändern, dass durchschnittlich größere Flugzeuge eingesetzt werden. Unter Beibehaltung der Sitzplatzkapazität auf einer Strecke verspricht Frequenzregulierung Effizienzgewinne in den zwei Dimensionen:

Lufttransportsystemkapazität

Die Reduzierung von Verspätungen durch weniger Flugbewegungen;

Umwelt

Die Realisierung von ökologischen Skaleneffekten durch den Einsatz größerer Flugzeuge mit geringeren Emissionen pro Sitzplatz.

Gleichzeitig stellt Frequenzregulierung einen relativ harten regulatorischen Eingriff dar, da die Frequenz ein wesentliches Produktmerkmal in einem Airline-Netzwerk ist. In der vorliegenden Arbeit wird dieser Herausforderung mit der Grundvoraussetzung begegnet, dass Frequenzregulierung nicht nur Effizienzgewinne in den Dimensionen *Umwelt* und *Lufttransportsystemkapazität* erzeugen sollte, sondern auch für Airlines und Passagiere vorteilhaft sein muss. So werden beispielsweise ausschließlich Strecken betrachtet, die bereits eine relativ hohe Frequenz aufweisen, um die Konnektivität in einem Airline-Netzwerk nicht übermäßig einzuschränken. Gleichermaßen muss Frequenzregulierung für Airlines mindestens kostenneutral sein.

Frequenzregulierung steht dabei im Einklang mit mehreren übergeordneten Trends und Entwicklungen:

Natürliches Flugzeuggrößenwachstum

Historisch gesehen, ist die durchschnittliche Flugzeuggröße des eingesetzten Flottenmixes stets um 1% bis 2% pro Jahr „natürlich“ gewachsen. Dieses Wachstum lag jedoch deutlich unter dem durchschnittlichen Passagierwachstum von >4% jährlich (Airbus, 2018; Boeing, 2018c; EUROCONTROL, 2018c, 2020b). Frequenzregulierung würde folglich darauf abzielen, das „natürliche“ Flugzeuggrößenwachstum zu beschleunigen.

Fehlanreize durch Flughafenslotallokationsmechanismen

Auf Einzelverbindungsebene bevorzugen Airlines das Wachstum über Frequenz statt Flugzeuggröße. Hauptsächlich ergibt sich dies aus den damit verbundenen Zeitvorteilen für Passagiere und dem daraus resultierenden positiven Einfluss auf den eigenen Marktanteil. Dieser Frequenzwettbewerb (*frequency competition*) wird durch Flughafenslotallokationsmechanismen verstärkt, die es erfordern, Slots zurückzugeben, die weniger als 80% genutzt wurden. Dies ist dahingehend kritisch, dass übermäßige Frequenzen Verspätungen sowie Emissionen erhöhen, obwohl ab einem bestimmten Punkt kaum ein zusätzlicher zeitlicher Nutzen mehr für den Passagier erzeugt wird (Givoni und Rietveld (2009, 2010), Hansen (2002), Harvey (1987) und Vaze und Barnhart (2012b). Selbst zunehmende Flughafenüberlastung hat hier wenn überhaupt nur einen geringen kompensierenden Effekt (Berster et al., 2015; Evans & Schäfer, 2011; Evans & Schäfer, 2014). Frequenzregulierung würde diesem regulatorischen Fehlanreiz entgegenwirken.

Direkte Regulierung der Zielgröße

Theoretisch effiziente Marktmechanismen, z. B. dynamische Flughafen- und Luftraumgebühren oder CO_2-Kompensationsmaßnahmen, sind in der Administration häufig komplex (Gillen et al., 2016; Madas & Zografos, 2010)

oder in der Wirksamkeit umstritten (Larsson et al., 2019; Scheelhaase et al., 2018). Frequenzregulierung ist zwar der regulatorisch härtere Eingriff, wirkt dafür aber direkter (Hansen et al., 2001).

Integration von Flughafen- und Luftraumkapazitätsmanagement

Zahlreiche Publikationen behandeln Kapazitätsmanagementmaßnahmen für Lufträume oder Flughäfen getrennt. Frequenzregulierung betrifft gleichermaßen beide Luftverkehrsinfrastrukturen und stellt damit einen integrierten Ansatz dar, wie jüngst vom Flughafenverband *ACI Europe* in Bezug auf Kapazitätsmanagement in der Luftfahrt gefordert (ACI Europe, 2020).

Weniger ist mehr

Zunehmendes Umweltbewusstsein in der Bevölkerung („Flugscham“) erfordert aktives Gegenhandeln der Luftfahrtbranche. Diese Erwartung wird durch den erhöhten COVID-19-bedingten staatlichen Einfluss bei Luftverkehrsunternehmen teilweise verstärkt (Abate et al., 2020). Frequenzregulierung ist hier insofern ein gemäßigter Ansatz, als sie nicht darauf abzielt, weniger zu fliegen (Gössling et al., 2019), sondern gegebene Sitzplatzkapazität ökologisch-ökonomisch-temporal effizienter zu allokieren. Die überproportionale Zunahme von Verspätungen in Abhängigkeit des Verkehrsaufkommens (Abbildung 1.1) lässt darüber hinaus erwarten, dass die Anzahl zu regulierender Flüge im Verhältnis zu deren Gesamtzahl gering ist, sofern gezielt die besonders überlasteten Luftverkehrsinfrastrukturen angegangen werden (Fan & Odoni, 2002; Swaroop et al., 2012; Vaze & Barnhart, 2012b).

Die Untersuchung von Frequenzregulierung erfordert aufgrund der zahlreichen beteiligten Akteure und systemseitigen Wechselwirkungen einen breiten Untersuchungsansatz (Hisschemöller & Hoppe, 1995). Sie folgt der Prämisse von Dray et al. (2014, S. 76) aus einem themenverwandten Regulierungskontext, wonach derartige Analysen dazu dienen *„[...]to improve our insight of such complex policy issues, and by no means are intended to represent any policy recommendation.“*.

Der Untersuchungsrahmen einer breit wirkenden Regulierungsmaßnahme bietet zudem den Vorteil, dass damit die maximalen Effizienzsteigerungspotenziale in den Dimensionen *Lufttransportsystemkapazität* und *Umwelt* quantifiziert werden können, die der Einsatz größerer Flugzeuge bei weniger Flugbewegungen bietet. Mit anderen Maßnahmen, die auch hierauf abzielen (z. B. preisbasierte Ansätze), können ebenfalls nur maximal diese Potenziale realisiert werden.

1.2 Forschungsbeitrag

Die vorliegende Arbeit ist der erste wissenschaftliche Vorstoß, Frequenzregulierung auf breiter Systemebene im Lufttransport explorativ zu untersuchen. Zusammengefasst beantwortet sie die folgende Forschungsfrage:

> *Inwiefern ist die Regulierung der Flugfrequenz auf Streckenebene ein geeigneter Kapazitätsmanagementansatz zur Reduzierung von Verspätungen sowie zur Realisierung von ökologisch-ökonomischen Skaleneffekten durch den Einsatz größerer Flugzeuge?*

Abbildung 1.3 illustriert die drei Untersuchungsdimensionen, nach denen Frequenzregulierung technisch-quantitativ bewertet wird. Der Begriff *Frequenzregulierung* bezeichnet den allgemeinen Ansatz, die Anzahl der Flüge auf einer Strecke zu steuern. *Frequenzreduzierung* beschreibt explizit die für diese Arbeit relevante Verringerung von Frequenz.

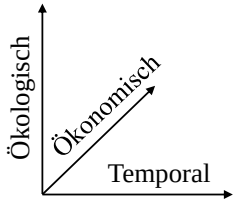

Abb. 1.3: Dimensionen, nach denen Frequenzregulierung untersucht wird

Tabelle 1.1 zeigt die Parameter sowie die Perspektive, die zur Untersuchung der jeweiligen Dimension primär eingenommen wird. Die Wechselwirkungen zwischen den Untersuchungsdimensionen werden detailliert analysiert, es erfolgt allerdings keine Gewichtung der Dimensionen gegeneinander, was dem Verantwortungsbereich eines Gesetzgebers zuzuordnen wäre. Die vorliegende Arbeit bewertet nicht, inwiefern Frequenzregulierung aus rechtlicher Sicht möglich ist, es werden allerdings diesbezügliche Aspekte diskutiert.

Die Strukturierung der vorliegenden Arbeit erfolgt an mehreren Stellen ebenfalls entlang der genannten Dimensionen. In Kapitel 2 wird der Stand der Wissenschaft dargelegt. Dabei werden die marktseitigen Wechselwirkungen von Frequenz erläutert (Abschnitt 2.1), die Skaleneffekte der Flugzeuggröße beschrieben (Abschnitt 2.2) sowie bestehende Kapazitätsmanagementansätze im Luftverkehr erklärt (Abschnitt 2.3). Abgeleitet daraus werden in Abschnitt 2.4 die identifizierten Forschungslücken und deren Adressierung benannt.

Die Entwicklung des zweistufigen Modells FRED (FrequenzREDuzierung) zur Untersuchung von Frequenzreduzierung erfolgt in zwei Schritten in Kapitel 3. Nach

TAB. 1.1: Parameter und primär eingenommene Perspektive, nach denen die jeweilige Bewertungsdimension untersucht wird

Dimension	Parameter	Prim. Untersuchungsperspektive		
		Airlines	Gesellschaft	Passagiere
Ökologisch	Kerosinverbrauch	•	•	
Ökonomisch	Flugzeugbetriebskosten	•		
Temporal	ATFM-Verspätungen	•		•
	Reisezeit			•

der Erläuterung der Ziele von Frequenzregulierung (Abschnitt 3.1), werden zuerst alternative Frequenzregulierungsansätze dargestellt (Abschnitt 3.2 bis Abschnitt 3.4). Hierbei steht die temporale Dimension im Vordergrund. Es folgt die Herleitung und Formulierung des Flottenzuweisungsmodells in Form eines ganzzahligen linearen Optimierungsproblems, das dazu dient, den frequenzreduzierten Strecken konkrete Flottenmixe zuzuweisen (Abschnitt 3.5 und Abschnitt 3.6). Hierbei wird die ökologisch-ökonomische Dimension fokussiert.

In Kapitel 4 werden die Auswahl des Untersuchungsraums (Abschnitt 4.1) und die verwendeten Datengrundlagen beleuchtet (Abschnitt 4.2). Das Kapitel schließt mit der Verifizierung und Validierung von FRED ab (Abschnitt 4.3).

Die Ergebnisse der einzelnen Frequenzregulierungsansätze werden in Kapitel 5 beschrieben und diskutiert. Im ersten Drittel geht es dabei primär um die temporale Dimension (Abschnitt 5.1 bis Abschnitt 5.3). Im zweiten Drittel wird vornehmlich die ökologisch-ökonomische Dimension adressiert (Abschnitt 5.4 bis Abschnitt 5.6). Im letzten Drittel erfolgen Sensitivitätsanalysen, eine Zusammenfassung der Ergebnisse sowie die Diskussion übergeordneter Herausforderungen im Zusammenhang mit Frequenzregulierung (Abschnitt 5.7 bis Abschnitt 5.9). Die Arbeit schließt in Kapitel 6 mit einer Zusammenfassung sowie weiteren potenzielle Forschungsfragen ab.

Für eine ausgewählte und aggregierte Darstellung einzelner Vorgehensweisen sowie Ergebnisse sei zudem auf zwei aus dieser Arbeit hervorgehende Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Fachzeitschriften verwiesen (Presto et al., 2021, 2022).

2. Stand der Wissenschaft

Die konkrete Frequenz und Flugzeuggröße auf einer Strecke sind ein Ergebnis aus:

- Dem Bestreben von Airlines, dem Passagier möglichst kurze Umsteigeverbindungen anzubieten, um den eigenen Marktanteil zu maximieren;
- den Kostenstrukturen und dem Umsatzpotenzial verfügbarer Flugzeugtypen auf Airline- und Gesamtmarktebene;
- dem regulativen Umfeld, insbesondere Großvaterrechten im Zusammenhang mit Flughafenslotallokationsmechanismen, die teils zur Sicherung der Airline-Marktposition genutzt werden.

Entsprechend dieser drei Faktoren erfolgt der Aufbau dieses Kapitels: In Abschnitt 2.1 wird der Stand der Wissenschaft zu den marktseitigen Wechselwirkungen von Frequenz und Flugzeuggröße dargelegt. In Abschnitt 2.2 folgt die Erläuterung technisch-betrieblicher Skaleneffekte in Bezug auf die Flugzeuggröße. Abschnitt 2.3 gibt einen Überblick zum aktuellen Regulierungsumfeld zum Kapazitätsmanagement an Flughäfen und in Lufträumen. Die Erkenntnisse dieser Literaturrecherche werden in Abschnitt 2.4 abschnittsübergreifend zusammengefasst, um die Forschungslücken zu fokussieren. Tabelle 2.1 zeigt, welche Bewertungsdimensionen durch die Literatur primär abgedeckt werden, wobei der ökonomischen Dimension eine gewisse Dominanz gegenüber der ökologischen zukommt.

Tab. 2.1: Übersicht der primär durch die Literatur abgedeckten Bewertungsdimensionen jedes Abschnitts in diesem Kapitel

Abschnitt	*Ökologisch*	*Ökonomisch*	*Temporal*
2.1 Marktseitige Wechselwirkungen von Frequenz		•	•
2.2 Skaleneffekte von Flugzeuggröße	•	•	
2.3 Kapazitätsmanagement im Luftverkehr		•	•
2.4 Zwischenfazit	•	•	•

2.1 Marktseitige Wechselwirkungen von Frequenz

Die Wahl der Frequenz und Flugzeuggröße auf einer Strecke steht in Wechselbeziehung zu unterschiedlichen Faktoren. Tabelle 2.2 zeigt eine Übersicht relevanter Veröffentlichungen, in der die Beziehungen zwischen Flugzeuggröße, Frequenz, Gemeinwohl, Kosten, Überlastung, Umwelt und Wettbewerb untersucht werden.

Auf aggregierter Ebene ist in Tabelle 2.2 erkennbar, dass vor allem Kostenaspekte in der Mehrzahl der Publikationen berücksichtigt werden, wohingegen Gemeinwohl- und Umweltaspekte unterrepräsentiert sind. Methodisch handelt es sich in den meisten Fällen um ökonometrische Modelle. Diese Erkenntnisse sind ein erster Aufsetzpunkt für die Entwicklung eines analytischen Modells, das für die Untersuchung von Frequenz-Flugzeuggröße-Dynamiken den zeitlichen Nutzen von Frequenzen aus einer Gemeinwohlperspektive bemisst und den Kerosinverbrauch individueller Flugzeuge als ökologischen Parameter miteinbezieht. Die wesentlichen Erkenntnisse der aufgelisteten Veröffentlichungen sind im Folgenden zusammengefasst.

Tab. 2.2: Literatur zu den Wechselbeziehungen von Frequenz und untersuchte Dimensionen in alphabetischer Reihenfolge

Quelle	Ansatz	Flugzeuggröße	Frequenz	Gemeinwohl	Kosten	Überlastung	Umwelt	Wettbewerb
Berster et al. (2015)	Ökonometrisch	•	•		•	•		
Brooke et al. (1994)	Ökonometrisch		•		•			
Button und Drexler (2005)	Analytisch		•		•			•
Evans und Schäfer (2011)	Spieltheoretisch	•	•		•	•	•	•
Evans und Schäfer (2014)	Spieltheoretisch	•	•		•	•	•	•
Givoni und Rietveld (2009)	Ökonometrisch	•	•		•	•	•	•
Gosling und Hansen (2001)	Ökonometrisch	•	•				•	
Hansen und Liu (2015)	Spieltheoretisch	•	•	•	•			•
Harvey (1987)	Ökonometrisch		•			•		
Kölker et al. (2016)	Ökonometrisch	•	•				•	
Liu et al. (2013)	Ökonometrisch	•	•			•		•
Pai (2010)	Ökonometrisch	•	•		•			
Wang et al. (2014)	Ökonometrisch	•	•		•			•
Wei und Hansen (2005)	Ökonometrisch	•	•		•			•
Zou und Hansen (2014)	Ökonometrisch	•	•		•	•		•

Die Ursache für übermäßig hohe Frequenzen liegt primär darin begründet, dass Airlines anstreben, den *Schedule Delay* zu minimieren. Dieses Konzept bezeichnet die Abweichung zwischen der idealen Abflugzeit eines Passagiers und dem nächsten verfügbaren Flug, folglich nimmt Schedule Delay mit zunehmender Frequenz ab. Schedule Delay ist somit eine Metrik, um den zeitlichen Vorteil von Frequenzen aus Passagiersicht zu quantifizieren und wird auch innerhalb von FRED dafür herangezogen (Unterabschnitt 3.2.1). Im weiteren Sinne ist möglichst geringer Schedule Delay damit auch ein Komfort-Aspekt, der durch zunehmende Individualisierungstendenzen im Reisekontext mitgeprägt wird (Frändberg & Vilhelmson, 2011). Aufgrund der Verbreitung dieses Begriffs in der Fachliteratur und keinem deutschen Pendant wird auf eine Übersetzung verzichtet.

Mehrere Untersuchungen kommen zu dem Ergebnis, dass Airlines ihren Marktanteil durch Frequenzerhöhung stärker steigern können als durch die Erhöhung der Flugzeuggröße, weshalb auch von Frequenzwettbewerb (*frequency competition*) gesprochen wird (Brooke et al., 1994; Hansen & Liu, 2015; Wei & Hansen, 2005). Das in diesem Kontext ebenfalls häufig genannte *S-Kurven-Modell* (Belobaba et al., 2009; Vaze & Barnhart, 2012a; Wei & Hansen, 2005) zur Abbildung der Abhängigkeit des Marktanteils von der Frequenzanzahl, wird in Button und Drexler (2005) und Hansen und Liu (2015) hingegen widerlegt.

Gleichzeitig sind die negativen Folgen von übermäßigen Frequenzen gut erforscht: Frequenzen erhöhen Verspätungen, die wiederum zu höheren Frequenzen führen können. Verspätungsinduzierte Kosten werden dabei teilweise an Passagiere weitergegeben (Zou & Hansen, 2014). Aus Airlinesicht überwiegen diese Nachteile nicht die Vorteile höherer Frequenzen in Bezug auf den Marktanteil, so dass geschlussfolgert wird (Zou & Hansen, 2014, S. 70): „*[...] air transportation congestion is not a problem that will take care of itself, through air carriers' voluntary schedule adjustment.*“.

Gemäß Pai (2010) nehmen Frequenz und Flugzeuggröße mit der Einwohnerzahl im Einzugsgebiet des Flughafens, Einkommen, Startbahnlänge und Hub-Betrieb zu. Mit zunehmender Flugdistanz steigt die Flugzeuggröße und die Frequenz nimmt ab. Es wird außerdem vermutet, dass Airlines versuchen, Flugausfälle mit hohen Frequenzen abzufedern.

Berster et al. (2015) finden heraus, dass die durchschnittliche Flugzeuggröße an kapazitiv überlasteten Flughäfen größer ist, wodurch Airlines von den geringeren Sitzplatzkosten größerer Flugzeuge profitieren können. Im Gegensatz dazu schlussfolgern Evans und Schäfer (2011) und Evans und Schäfer (2014), dass Kapazitätsbeschränkungen an US-amerikanischen Flughäfen keinen nennenswerten Einfluss auf die durchschnittliche Flugzeuggröße haben. In einer älteren Studie schlussfolgern Gosling und Hansen (2001), dass nur durch Regulierung eine signifikante Erhöhung der durchschnittlichen Flugzeuggröße herbeigeführt werden kann.

Vor der COVID-19-Pandemie wurde für die Zukunft erwartet, dass Frequenzwachstum im Gegensatz zu Flugzeuggrößenwachstum stärker zunehmen wird, aufgrund einer „*natural upper bound*“ (Kölker et al., 2016, S. 103) des Sitzladefaktors und begrenzter Flugzeugmusterauswahl für Kurzstrecken.

Givoni und Rietveld (2009) sprechen von Marktversagen bezüglich der Dynamiken von Frequenz und Flugzeuggröße. Während geringer Wettbewerb auf einer Strecke dazu führt, dass Airlines die durchschnittliche Flugzeuggröße erhöhen und Frequenz reduzieren, führt intensiver Wettbewerb zum gegenteiligen Effekt. Das bedeutet, dass Airlines gezielt Flugzeuge zu nicht-optimalen Kosten einsetzen. Dieser Effekt wird durch die verbreitete Praxis verstärkt, Flughafenslots nach Großvaterrechten und nicht nach Nachfrage zu vergeben.

Unter Umständen kann dies zum Horten von Flughafenslots führen, um diese gegenüber dem Wettbewerb zu schützen (Fukui (2012), Abschnitt 2.3). Zusätzliche Start- und Landebahnkapazität löst dieses Problem nur begrenzt, da es Airlines weiter ermöglicht, in den Frequenzwettbewerb einzusteigen, obwohl der Grenznutzen einer Frequenz für den Passagier abnimmt (Givoni & Rietveld, 2009). In einer vergleichsweise alten Untersuchung kommt Harvey (1987) für die San Francisco Bay Area zu dem Schluss, dass neun Flüge auf einer Strecke pro Tag optimal sind, wenn der zeitliche Nutzen sowie der verspätende Effekt einer jeden Frequenz berücksichtigt werden.

Einige Studien untersuchen regionale Charakteristika im Zusammenhang mit Frequenzen: Würde die höhere durchschnittliche Flugzeuggröße Europas auf die USA angewandt werden, ließen sich Verspätungen signifikant reduzieren (Liu et al., 2013). Auch im sich schnell entwickelnden, aber stärker regulierten chinesischen Luftfahrtmarkt, findet Wachstum, wie in Europa und den USA, auch eher über Frequenz statt Flugzeuggröße statt (Wang et al., 2014).

2.2 Skaleneffekte von Flugzeuggröße

In diesem Abschnitt werden in Unterabschnitt 2.2.1 zuerst die Grundlagen erläutert, die den Einsatz spezifischer Flugzeuggrößen auf bestimmten Strecken aus technisch-operativer Sicht beeinflussen. In Unterabschnitt 2.2.2 erfolgt ein Literaturüberblick zu Veröffentlichungen, die den Einsatz unterschiedlicher Flugzeuggrößen auf Flugzeugeinzel- und Flottenebene hinsichtlich direkter Betriebskosten (*Direct Operating Cost*, DOC) und Emissionen untersuchen. Diese Ausführungen dienen als theoretische Basis für die ökologisch-ökonomische Bewertung der zu untersuchenden Frequenzregulierungsansätze in Kapitel 5, die zum Einsatz unterschiedlicher Flottenmixe führen.

2.2.1 Grundlagen

Unter Skaleneffekten werden in der vorliegenden Arbeit abnehmende Sitzplatzkosten und -kerosinverbräuche bei zunehmender Flugzeuggröße verstanden. Auf geometrischer Ebene resultieren diese aus der zylindrischen Form des Flugzeugrumpfes. Dessen Volumen ist maßgeblich für die Fähigkeit, Nutzlast in Form von Passagieren oder Fracht zu transportieren. Seine Oberfläche bestimmt den Reibungs- und Formwiderstand sowie die strukturelle Rumpfmasse. Im Flugzeugentwurf wird die Form des Rumpfes u. a. durch dessen Schlankheitsgrad als Verhältnis aus Länge und Durchmesser ausgedrückt.

Innerhalb flugzeugkonfigurationsindividueller Grenzen erhöht insbesondere eine Rumpfverlängerung das Nutzlastpotenzial eines Flugzeugs überproportional im Vergleich zur Zunahme des Reibungs- und Formwiderstands sowie der Rumpfmasse. Dies resultiert daraus, dass keine oder nur geringe Anpassungen an der ohnehin notwendigen Cockpitsektion sowie den Flügeln notwendig sind (Gollnick, 2020a, 2020b). Begrenzt werden diese Effekte durch die strukturelle Festigkeit des Rumpfes.

Zusätzlich bedeuten diese Zusammenhänge tendenziell auch mit der Flugzeuggröße abnehmende Instandhaltungskosten, da sich der rein technische Instandhaltungsaufwand eher nach der Betriebsleermasse (*Operating Empty Mass*, OEM) richtet als nach dem Volumen bzw. Nutzlastpotential (siehe auch DOC-Modell in Unterabschnitt 3.5.1). Die technischen Instandhaltungsaufwände einiger Flugzeugsysteme (vor allem Avionik) sind sogar vollständig unabhängig von der Flugzeuggröße. Die Bemessung der Lande-, Abfertigungs- und Navigationsgebühren erfolgt häufig anhand der maximalen Abflugmasse (*Maximum Take-Off Mass*, MTOM) eines Flugzeugs, wodurch weitere positive Skaleneffekte in Bezug auf die direkten Betriebskosten entstehen können.

Maßgeblich begrenzt und verzerrt werden diese Skaleneffekte bei Passagierflugzeugen durch verschiedene operative Randbedingungen:

Kopplung von Reichweite und Flugzeuggröße

> Die Dimensionierung von Flugzeugen ist getrieben durch zahlreiche wechselseitige Abhängigkeiten („Schneeballeffekte“) seiner Hauptbauteile Rumpf, Flügel, Triebwerke und Fahrwerk. Unter der Randbedingung möglichst niedriger und ähnlicher Sitzplatzkosten führt höhere Reichweite rein technisch bedingt auch zu der Notwendigkeit größerer Verkehrsflugzeuge. Geschäftsreiseflugzeuge (*Business Jets*) sind hier ausgenommen, da vornehmlich die Einsatzflexibilität in Form von möglichst hoher Reichweite im Vordergrund steht und Betriebskosten zweitrangig sind.

Die für das Zurücklegen von Langstrecken erforderliche Kerosinmenge muss zunächst im Flugzeug untergebracht werden. Dadurch erhöhen sich der Tankvolumenbedarf und damit indirekt die Flugzeuggröße. Alle drei Effekte (Kerosinmenge, Tankvolumen, Flugzeuggröße) steigern die MTOM. Besonders bei Flugzeugen mit nur zwei Triebwerken erfordert die höhere MTOM leistungsstärkere und damit größere Antriebe (die ihrerseits die OEM erhöhen), um bei einem Triebwerksausfall während des Starts dennoch sicher abheben zu können.

Größere Triebwerke sind aufgrund größerer möglicher Nebenstromverhältnisse tendenziell effizienter, bedingen bei der verbreiteten Unterflügelanordnung jedoch längere Fahrwerke. Diese sind aufgrund der notwendigen Festigkeit typischerweise aus relativ schwerem Stahl und erzeugen zudem Reibungswiderstand, weshalb möglichst kurze und dünne Fahrwerke vorteilhaft sind. Damit es beim Abheben nicht zu einem Aufsetzen des Hecks kommt (*Tailstrike*), bestimmt die Fahrwerkslänge in Kombination mit der strukturellen Festigkeit des Rumpfes die maximale Flugzeuglänge.

Die in der Praxis zu beobachtenden, meist ähnlichen Größenproportionen vieler Passagierflugzeuggrößen, sind ein Produkt dieser Effekte. Dies gilt sowohl für Flugzeuge mit einem Gang (*Single-Aisle*) als auch mit zwei Gängen (*Twin-Aisle*). Ebenso sind diese der Grund, weshalb primär für die Kurzstrecke ausgelegte *Twin-Aisle*-Flugzeuge, auch zusammengefasst unter dem Begriff *Large Aircraft for Short Ranges* (LASR), bisher eher Ausnahmen oder Konzepte geblieben sind (Kenway et al. (2010) sowie Unterabschnitt 2.2.2). Gegenbeispiele sind hier Flugzeugtypen wie die *B747-100SR* oder deren Nachfolger *B747-400D*, die speziell für den japanische Kurzstreckenmarkt entwickelt wurden.

Hub-and-Spoke Netze

Zur Nutzung von Synergien durch Netzwerkeffekte betreiben Netzwerkairlines Hub-and-Spoke Netze. Die damit verbundene Bündelung von Passagierströmen begünstigt den Einsatz größerer Flugzeuge auf Langstrecken im Vergleich zu Direktverkehren. Gleichermaßen erfordert das Hub-and-Spoke Prinzip eine vergleichsweise größere Anzahl kleinerer Flugzeuge, ggf. in höherer Frequenz (Abschnitt 2.1), die Passagiere zum und vom Hub transportieren (*Feeder*).

Flottenkommunalität, Einsatzflexibilität und Maximierung des Flugzeugabsatzes

Die Kapitalintensität von Flugzeugentwicklungsprogrammen sowie dem Aufbau von Produktionslinien führt dazu, dass Hersteller ihre Flugzeuge möglichst universell auslegen, um ein breites Anforderungsspektrum abzudecken

(möglichst hohe Nutzlast und Reichweite in der jeweiligen Größenkategorie). Abstufungen innerhalb einzelner Größenkategorien werden häufig mittels Flugzeugfamilienkonzepten umgesetzt, um die Bauteilvielfalt sowie die Produktionskomplexität zu minimieren. Aus Airline-Sicht ist es hinsichtlich Flottenkommunalität und Einsatzflexibilität ebenfalls vorteilhaft, möglichst wenige unterschiedliche Flugzeugtypen zu betreiben (Husemann et al., 2018; Rosskopf et al., 2013). Beide Aspekte führen dazu, dass die Charakteristika der begrenzten Anzahl unterschiedlicher Flugzeugtypen vor allem an den Anforderungen der weit verbreiteten Hub-and-Spoke Netze ausgerichtet sind.

Besatzung

Die erforderliche Anzahl Piloten und Kabinencrewmitglieder steigt in der Regel unterproportional mit der Flugzeuggröße. Durch andere Faktoren werden positive Skaleneffekte jedoch teilweise kompensiert. Im Cockpit gelten häufig tarifvertragliche Regelungen, wonach größere Flugzeuge durch erfahrenere und damit teurere Crews betrieben werden (Wei & Hansen, 2003). Zur Umsetzung bestimmter Servicekonzepte werden in großen Flugzeugen mit höherwertigen Beförderungsklassen teilweise mehr Kabinencrewmitglieder pro Sitzplatz eingesetzt, als es der gesetzliche Mindeststandard erfordert, der eher bei *Single-Aisle*-Flugzeugen maßgebend ist.

Kabinenkonfigurationen

In Abhängigkeit des Geschäftsmodells werden Flugzeugkabinen verschiedenartig ausgestattet. Dies führt zu unterschiedlichen Sitzplatzdichten und somit Sitzplatzkosten sowie -kerosinverbräuchen für gleiche Flugzeugtypen bei unterschiedlichen Airlines (Unterabschnitt 2.2.2, Unterabschnitt 3.5.1). Auch innerhalb einer Airline kann es für den gleichen Flugzeugtyp abweichende Sitzplatzkonfigurationen geben, wenn diese z. B. für unterschiedliche Märkte eingesetzt werden. Insbesondere in den höherwertigen Beförderungsklassen sind *Twin-Aisle*-Flugzeuge zudem mit großzügigeren Liegesitzen ausgestattet, um auf Langstrecke Komfort zu bieten.

Zulassung

Die Zulassungsanforderungen für Passagierflugzeuge mit über 5.700 kg MTOM (CS25.817) geben vor, dass in Flugzeugen pro Reihe und Gangseite maximal drei Sitze installiert sein dürfen (EASA, 2018, S. 300). Daraus ergeben sich die typischen Sitzplatzanordnungen im *Single-Aisle*- (2-2, 2-3, 3-3) und *Twin-Aisle*-Bereich (2-3-2, 2-4-2, 3-3-3, 3-4-3, 3-5-3) in der

Economy-Klasse. Diese Anforderung bedeutet, dass insbesondere die 2-3-2-Konfiguration relativ viel Gangfläche im Verhältnis zur Sitzplatzanzahl erfordert. Das einzige Passagierflugzeug, das diese Konfiguration in der Regel in der *Economy*-Klasse aufweist, ist die *B767*-Familie. Die beiden nächstgrößeren Konfigurationen sind deutlich verbreiteter, beispielsweise in den *A330*- (2-4-2), *A340*- (2-4-2), *A350*- (3-3-3) und *B787*- (3-3-3) Familien.

Die dadurch entstehende Größenlücke im Bereich von 220 bis 300 Sitzen in reiner *Economy*-Bestuhlung wird auch als Mitte des Marktes (*middle of the market*) bezeichnet. Aufgrund des relativ hohen Alters der *B767*-Familie war ein neues Flugzeugprogramm in dieser Größenordnung in den letzten Jahren nicht nur vermehrt Gegenstand medialer Spekulationen, sondern auch wissenschaftlicher Untersuchungen (Unterabschnitt 2.2.2). So wird in Abschnitt 5.6 ebenfalls der Einsatz eines solchen Flugzeugtyps im Zusammenhang mit Frequenzregulierung untersucht. Als nicht fest definierter Sammelbegriff hat sich hierfür die Abkürzung NMA etabliert, die wechselweise für *New Midsize Airplane* oder *New Midrange Airplane* (alternativ auch *Aircraft*) steht.

Auf globaler Ebene haben diese Effekte zur Folge, dass *Single-Aisle*-Flugzeuge vornehmlich auf Kurz- und Mittelstrecken sowie *Twin-Aisle*-Flugzeuge überwiegend auf Langstrecken eingesetzt werden (Abbildung 2.1). Innerhalb der beiden Segmente ist ebenfalls ersichtlich, dass die durchschnittlichen Flugdistanzen mit der Flugzeuggröße zunehmen (Tabelle A.1). Es gibt einige, teils regionale Ausnahmen, diese spielen in Bezug auf die Weltflugzeugflotte jedoch eine untergeordnete Rolle.

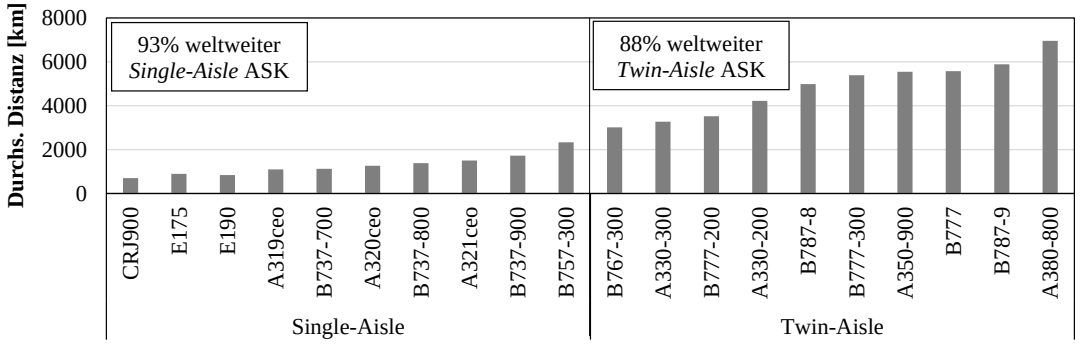

Abb. 2.1: Durchschnittliche Flugdistanz der top 10 *Single*- und *Twin-Aisle*-Flugzeugtypen nach weltweit erbrachten ASK in 2019 (Sabre Airline Solutions, 2019)

2.2.2 Literaturüberblick

Tabelle 2.3 zeigt eine Literaturübersicht zu den Skaleneffekten von Flugzeuggröße sowie den dabei adressierten Themenbereichen DOC/COC, Emissionen, Flotte, LASR und NMA. Im Vergleich zu Tabelle 2.2 wurden die Dimension Kosten und

Umwelt in DOC/COC und Emissionen konkretisiert, da dies auf Flugzeugebene spezifischer ist. Emissionen wurden nur aufgenommen, wenn diese unter Einbeziehung umwelttechnischer Überlegungen berücksichtigt werden und nicht, wenn Kerosinverbrauch als reine Kostenposition betrachtet wird. Die Grenze zwischen NMA und LASR wurde bei einer Flugzeuggröße von etwa 300 Sitzen gelegt. Sämtliche der folgend dargelegten Erkenntnisse finden Eingang in die Modellentwicklung in Kapitel 3 sowie die Ergebnisdiskussion in Kapitel 5.

Tab. 2.3: Literatur zu den Skaleneffekten von Flugzeuggröße und untersuchte Dimensionen in alphabetischer Reihenfolge

Quelle	Ansatz	DOC/COC	Emissionen	Flotte	LASR	NMA
Azzam et al. (2010)	Lineare Optimierung		•	•		
Dray (2013)	Analytisch	•	•	•		
Dray (2014)	Analytisch	•	•	•		
Fuchte et al. (2012)	Designstudie(n)	•				•
Givoni und Rietveld (2010)	Fallstudie(n)		•		•	
Henderson et al. (2012)	Designstudie(n)	•	•		•	
Kenway et al. (2010)	Designstudie(n)	•	•		•	
Martinez-Val et al. (2011)	Designstudie(n)	•	•		•	
Morrell (2009)	Analytisch	•	•	•		
Park und O'Kelly (2014)	Analytisch	•	•	•		
Park und O'Kelly (2018)	Ökonometrisch	•		•		
Rosskopf et al. (2014)	Lineare Optimierung	•	•	•		
Schmidt et al. (2017)	Designstudie(n)	•				•
Swan und Adler (2006)	Ökonometrisch	•				
Wei und Hansen (2003)	Ökonometrisch	•				

Swan und Adler (2006) sowie Wei und Hansen (2003) entwickeln mittels Regressionsanalyse empirischer Daten von US-Airlines unterschiedliche Modelle zur Schätzung von Airline-Betriebskosten. Beide Autorenteams stellen Funktionen in Abhängigkeit der Missionslänge und Flugzeuggröße auf. Insbesondere in Wei und Hansen (2003) wird herausgearbeitet, dass die sitzplatzkostenminimale Flugzeuggröße mit der Missionslänge zunimmt. Die Betrachtung beinhaltet *Single-* sowie *Twin-Aisle*-Flugzeuge und erstreckt sich bis zu einer maximalen Distanz von 2.400 nm, da es sich um US-Inlandsverkehre handelt. Je größer die Missionslänge, desto geringer die Unterschiede in den Sitzplatzkosten zwischen einzelnen Flugzeuggrößen. Basierend auf dieser Methodik wird gefolgert, dass in Bezug auf den Kaufpreis pro Sitzplatz negative Skaleneffekte bestehen.

Wie von Swan und Adler (2006) hervorgehoben, muss hierbei jedoch beachtet werden, dass Kapitalkosten eine vergleichsweise hohe Unsicherheit aufweisen, da

sie wesentlich bestimmt werden durch Abschreibungspraktiken, steuerliche Rahmenbedingungen und andere unternehmensspezifische Allokationsmechanismen. Dies ist der wesentliche Grund für die getrennte Betrachtung der Kapitalkosten in Abschnitt 5.5. Unter Berücksichtigung aller Betriebskostenpositionen gibt es gemäß Wei und Hansen (2003) nur geringe positive Skaleneffekte in Bezug auf die Flugzeuggröße. Diese werden maßgeblich durch die Kopplung von Flugzeuggröße und Pilotengehältern gedämpft. Dennoch wird geschlussfolgert, dass, basierend auf dem untersuchten Datensatz, Flugzeuggrößen Potenzial zur Realisierung von Skaleneffekten mittels *Up-Gauging* (wortwörtlich: Röhrenvergrößerung) besteht. Letzteres bezeichnet in der Fachliteratur die Erhöhung der Flugzeuggröße (Liu et al., 2013; Wei & Hansen, 2003).

Basierend auf einer globalen Streckenanalyse untersuchen Park und O'Kelly (2014) den Kerosinverbrauch pro Sitzplatz in Abhängigkeit der geflogenen Distanz. Eine Haupterkenntnis dabei ist, dass Langstreckenflugzeuge eine größere Heterogenität hinsichtlich Größe und Sitzplatzkonfiguration aufweisen. Dieser Aspekt findet Eingang in das Spektrum zugelassener Flugzeuggrößen im Optimierungsmodell zur Flottenzuweisung in Unterabschnitt 3.6.3. Typische Sitzplatzkapazitäten nutzen dabei das volle Nutzlastpotenzial nicht aus, wobei hier Fracht nicht berücksichtigt wird. Minimale Kerosinverbräuche pro Sitzplatz werden gemäß dieser Publikation auf Distanzen im Bereich von 1.000 nm bis 2.500 nm erzielt.

In einer darauf aufbauenden Veröffentlichung (Park & O'Kelly, 2018) wird die Beliebtheit von *Single-Aisle*-Flugzeugen auf deren ökonomische Effizienz sowie der Möglichkeit hohe Frequenzen anzubieten zurückgeführt. Für hochfrequente Mittelstrecken wird, entgegen der aktuellen Praxis, die potenzielle Vorteilhaftigkeit eines gemischten *Single-* und *Twin-Aisle*-Betriebs genannt, wie es auch für frequenzreduzierte Strecken in Frage kommt.

Abb. 2.2: Draufsicht des in Kenway et al. (2010) untersuchten LASR (links), *A330-200* (Mitte) und *A320ceo* (rechts)

Neuere Publikationen beleuchten aus verschiedenen Perspektiven den Einsatz von größeren Flugzeugen, die auf Kurzstrecke optimiert sind. Henderson et al. (2012) und Kenway et al. (2010) untersuchen den gleichen LASR-Entwurf hinsichtlich seiner cash-wirksamen Betriebskosten (*Cash Operating Cost*, COC, Abschnitt 3.5) und seiner Emissionen. Dabei wird ein *A330-200* durch Reduzierung der Auslegungsreichweite von 11.850 km auf 2.780 km speziell für den Kurzstreckenbetrieb modifiziert (Abbildung 2.2). Dies wird erreicht durch Anpassung des Startschubs, der Reiseflughöhe sowie der Flügelflächen und bewirkt eine Reduzierung der OEM um 26%. Dieser Entwurf wird in Abschnitt 5.6 ebenfalls im Zusammenhang mit Frequenzreduzierung untersucht. Tabelle 2.4 zeigt die Ergebnisse der Missionsanalysen auf Sitzplatzebene von Kenway et al. (2010). Daraus lassen sich zwei wesentliche Erkenntnisse ziehen:

- Die Effizienzsteigerungen eines LASR sind im Vergleich zum Einsatz zweier *Single-Aisle*-Flugzeuge als gering zu bewerten. Dies kommt daher, dass der Entwicklungs- und Produktionsaufwand vergleichsweise hoch ist, da neue Flügel, Struktur und ggf. Triebwerke erforderlich sind. Gleichzeitig ist das Marktpotenzial eines solchen Flugzeugs aufgrund begrenzter Einsatzflexibilität gering im Vergleich zu herkömmlichen *Single-Aisle*-Flugzeugen. Dies wiederum schlägt sich mutmaßlich in einem höheren Anschaffungspreis nieder, der die hier nicht betrachteten Kapitalkosten erhöht.
- Da die möglichen Einsparungen des LASR im Vergleich zu einem *A330-200* größer sind als zu einem *A320ceo*, wird implizit deutlich, dass bereits eines der kleinsten am Markt verfügbaren *Twin-Aisle* Flugzeuge (*A330-200*) auf Kurzstrecken teurer und ökologisch ineffizienter ist als zwei *Single-Aisle*-Flugzeuge.

Tab. 2.4: Ökonomisch-ökologische Ergebnisse der Missionsanalysen auf Sitzplatzebene von Kenway et al. (2010) zum Einsatz eines LASR

Untersuchung	Veränderung pro Sitzplatz		
	COC	CO_2, H_2O, Sulfat, Ruß	NO_x
LASR anstatt zwei *A320ceo*	-9%	-5,4%	-1.1%
LASR anstatt *A330-200*	-13%	-13,3%	-28,1%

Martinez-Val et al. (2011) analysieren parametrisch, in welchem Maße die MTOM, die OEM und die DOC in Abhängigkeit einer Auslegungsreichweitenreduzierung abnehmen. Für Kurzstreckenflugzeuge führt eine Halbierung der Auslegungsreichweite zu einem Rückgang der MTOM um 13%, der OEM um 8% und der DOC um 6%. Für ein Langstreckenflugzeug sind die Effekte ausgeprägter: Hier führt eine Reduzierung der Auslegungsreichweite um 35% zu einem Rückgang der MTOM,

der OEM und der DOC von respektive 27%, 16% und 13%. Es wird gefolgert, dass der reichweitenunabhängige Anteil der OEM maßgeblich für die verhältnismäßig geringen Reduzierungspotenziale ist. Diese Erkenntnisse illustrieren in Kombination mit den in Unterabschnitt 2.2.1 beschriebenen „Schneeballeffekten“, dass es allein schon aus ökonomisch-ökologischer Perspektive herausfordernd ist, ein LASR zu entwickeln, ungeachtet der Wettbewerbs- und Komfortvorteile von hohen Frequenzen.

Givoni und Rietveld (2010) vergleichen unterschiedliche Flugzeugtypen hinsichtlich ihrer Emissionen während des *Landing-Take-Off* (LTO)-Zyklus und der Klimawirkung im Reiseflug. Untersucht werden die Flugzeugtypen *A319ceo, A320ceo, A330-300, B747-400* und *B747-400D*. Im Ergebnis wird geschlussfolgert, dass der Einsatz größerer Flugzeuge in Kombination mit der Reduzierung von Frequenzen, Emissionen während des LTO-Zyklus erhöht, die Klimawirkung während des Reiseflugs aber reduziert wird. Da der Reiseflug zeitanteilig überwiegt, ergibt sich in Summe ein positiver Umweltbeitrag. Es wird jedoch eingeräumt, dass die Unterschiede mäßig und sensitiv in Bezug auf die gemachten Annahmen sind. Dieser Aspekt unterstreicht die Notwendigkeit möglichst detaillierter Betriebskosten- und Flugleistungsrechnung, wie in Abschnitt 3.5 dargestellt.

Fuchte et al. (2012) untersuchen den Zielkonflikt aus geringer Boardingzeit und geringen Betriebskosten für *Single-Aisle*- und kleine *Twin-Aisle*-Flugzeuge. Letztere kommen einem NMA gleich. Es wird geschlussfolgert, dass der Boardingzeitvorteil des NMA gering ist, wenn in einem *Single-Aisle*-Flugzeug eine zweite Tür kurz vor den Tragflächen zum Einsteigen genutzt wird. Dies wird von Schmidt et al. (2017) bestätigt. Aus dem höheren Verhältnis von Leermasse und Sitzplatzkapazität wird abgeleitet (Fuchte et al., 2012), dass ein NMA nur mit mindestens 240 Sitzplätzen wettbewerbsfähig sein kann. Diese Aspekte finden Eingang in die Bestimmung der möglichen jährlichen Ausnutzung in Form von Flugstunden (Gleichung 3.30) sowie die Untersuchung der neuen Flugzeugentwürfe in Abschnitt 5.6.

In einer Studie von Rosskopf et al. (2014) wird für eine europäische Netzwerkairline demonstriert, welche ökonomischen Auswirkungen eine Modernisierung der Flotte zur Erreichung ökologischer Ziele hat. Beispielsweise bedeutet eine Reduzierung der Flotten-NO_X-Emissionen um 6% bzw. 10% eine Abnahme des Airline-Vermögens von 3% bzw. 8% am Ende eines 10-Jahres-Planungszeitraums. Dies resultiert daraus, dass frühzeitiger Investitionen in effizientere Flugzeuge getätigt werden müssen, die den Gewinn schmälern. Diese Erkenntnis illustriert die ökonomische Sensitivität der Airline-Branche gegenüber regulativen Maßnahmen, weshalb diese Dimension über die gesamte Arbeit hinweg besondere Beachtung findet (u. a. Abschnitt 3.1, Abschnitt 3.5, Abschnitt 5.5).

Aus den Prognosen verschiedener Luftfahrt-Organisationen zum zukünftigen Luftverkehrswachstum vor der COVID-19-Pandemie geht hervor, dass das historische

„natürliche“ Flugzeuggrößenwachstum weiter Fortbestand haben wird (Airbus, 2018; Boeing, 2018c; EUROCONTROL, 2018b). Basierend auf diesen Vorhersagen sowie aggregierten Regressionen zum Kerosinverbrauch pro Sitzplatz schlussfolgert Morrell (2009), dass dadurch CO_2-Emissionen bis 2030 in Europa um weniger als 1% reduziert werden. Frequenzregulierung zielt darauf ab, dieses „natürliche“ Flugzeuggrößenwachstum zu beschleunigen.

Azzam et al. (2010) kalkulieren dagegen, dass der Einsatz größerer Flugzeuge im US-amerikanischen Lufttransportsystem den Gesamtkerosinverbrauch um bis zu 10% reduzieren könnte. Dieser Unterschied resultiert mutmaßlich aus der geringeren durchschnittlichen Flugzeuggröße in den USA für den Referenzfall sowie im Mittel längeren Strecken, so dass auch *Twin-Aisle*-Flugzeuge ökologisch vorteilhaft sein können. Markt- und wettbewerbsseitige Effekte von Frequenz werden allerdings nicht berücksichtigt. Es wird geschlussfolgert, dass durch operationelle Maßnahmen die Entwicklung in Richtung größerer Flugzeuge beschleunigt werden könnte. Frequenzregulierung zielt genau darauf ab.

Besonders in Dray (2013, 2014) wird deutlich, dass die Einführung neuerer Flugzeugtechnologie in die globalen Airline-Flotten ein langfristiger Prozess ist. Demnach dienen in einem wachsenden Markt neue Flugzeuge zunächst dazu, die zunehmende Nachfrage zu erfüllen und nicht unmittelbar ältere Flugzeuge zu ersetzen. Anhand der Untersuchung von *Retrofit*-Optionen wird in Dray (2013) dargelegt, dass diese zwar auf Flugzeugeinzelebene nennenswerte Effizienzsteigerungen bedeuten können. Auf Weltflottenebene liegt der deutlich größere Hebel jedoch in der Einführung neuer Technologie und darauf abzielende Regulierungen. Wäre es beispielsweise möglich, die Reduzierungsrate im Kerosinverbrauch um jährlich 0.2%-Punkte zu verbessern, würde dies eine Reduzierung des Gesamtkerosinverbrauchs von 3% über einen Zeithorizont von 20 bis 30 Jahren bedeuten.

In der zweiten Veröffentlichung (Dray, 2014) wird hergeleitet, dass die Ersetzung sämtlicher im Einsatz befindlicher Flugzeuge durch die neuste Generation des gleichen Typs zu einer Reduzierung der weltweiten CO_2-Emissionen von 10% führen würde. Jegliche regulatorische Maßnahmen müssen an diesen langfristigen Zyklen ausgerichtet sein. So wird auch für die Untersuchung von Frequenzregulierung in der vorliegenden Arbeit ein langfristiger Untersuchungszeitraum von 20 Jahren gewählt (Abschnitt 4.2).

2.3 Kapazitätsmanagement im Luftverkehr

Nachdem in Abschnitt 2.1 die marktseitigen und in Abschnitt 2.2 die technisch-operativen Faktoren beleuchtet wurden, welche die herrschenden Flugzeuggröße-Frequenz-Dynamiken prägen, erfolgt in diesem Abschnitt 2.3 die Beschreibung der kapazitätsmanagementseitigen Einflüsse. Eine wesentliche Herausforderung im

Kapazitätsmanagement der europäischen und US-amerikanischen Luftfahrt sind die zunehmenden Verspätungen (EUROCONTROL, 2018c; FAA and EUROCONTROL, 2019). Diese zu reduzieren, ist ein Teilziel von Frequenzregulierung (Abschnitt 3.1).

2.3.1 Grundlagen

Einleitend werden in diesem Unterabschnitt für Frequenzregulierung relevante Grundlagen zum Kapazitätsmanagement im Luftverkehr erläutert. Zuerst wird die Entstehung von ATFM-Verspätungen im Zusammenhang mit dem Verkehrsflussmanagement beschrieben, gefolgt vom Kapazitätsmanagement an Flughäfen.

(a) Verkehrsflussmanagement und ATFM-Verspätungen

Der Luftverkehr über Europa und angrenzenden Ländern wird durch die nationalen Flugsicherungsorganisationen überwacht und durch EUROCONTROL (Europäische Organisation zur Sicherung der Luftfahrt) übergreifend koordiniert. Für die vorliegende Arbeit ist vor allem das taktische Verkehrsflussmanagement (*tactical flow management*) des *Network Manager Operations Centers* der EUROCONTROL relevant (EUROCONTROL, 2020a).

In Bolić et al. (2017) ist dazu erläutert, wie im Falle von Kapazitätsengpässen Regulierungen (*regulations*) eingesetzt werden, um die Nachfrage an die Netzwerkkapazität anzupassen und den Flugverkehrsfluss sicherzustellen. Konkret werden einzelnen Flügen zeitabhängige Airwayslots zugewiesen, zu denen sie bestimmte Lufträume durchqueren dürfen. Diese Zuweisung geschieht mittels des *Computer-Assisted Slot Allocation* (CASA)-Algorithmus. Diesem liegt das *first-planned, first-served* Prinzip zugrunde, wonach Fluggesellschaften gemäß Reihenfolge der Flugplanabgabe einen Airwayslot erhalten. Kommt es zu einem Kapazitätsengpass, bedeutet dies, dass sie am Startflughafen auf ihr Zeitfenster warten müssen. Diese aus Kapazitätsengpässen resultierende Verspätung wird ATFM-Verspätung (*ATFM delay*) genannt. Gemäß des EUROCONTROL-Lexikons (EUROCONTROL, 2019a) sind ATFM-Verspätungen definiert als:

> *„[...] the duration between the last take-off time requested by the aircraft operator and the take-off slot allocated by the Central Flow Management Unit following a regulation [...] in relation to an airport (airport delay) or sector (en-route delay) location.“*

ATFM-Verspätungen sind folglich der netzwerkkapazitätsinduzierte Anteil an der Gesamtverspätung eines Fluges. Sie sind anerkannt als Ersatzmetrik für Kapazitätsengpässe im Luftraum und an Flughäfen (EUROCONTROL, 2021a, 2021b).

ATFM-Verspätungen sind somit ein geeigneter Parameter, um die durchschnittliche marginale Verspätung eines zusätzlichen Fluges im Netzwerk zu bestimmen (siehe Unterabschnitt 3.2.2).

ATFM-Verspätungen werden nach der dominierenden Entstehungsursache klassifiziert (EUROCONTROL, 2021a, 2021b). Übergeordnet wird dabei zwischen flughafen- und streckenverursachter ATFM-Verspätung unterschieden (*airport ATFM delay* und *en-route ATFM delay*). In Sanaei et al. (2021) werden die jeweiligen Ursachen von Regulierungen, die zu ATFM-Verspätungen führen (z. B. mangelnde Flugsicherungskapazität, Wetter, mangelnde Flughafenkapazität, überfüllte Lufträume), analysiert, um den Zustand des Netzwerks (der EUROCONTROL-Raum) hinsichtlich Nachfrage und Kapazität zu messen. Besonders deutlich wird dabei die unterschiedliche geografische Verteilung des Auftretens von Regulierungen und deren Ursachen (Abbildung 2.3). Außerdem wird auf die Wechselwirkungen von Regulierungen hingewiesen, beispielsweise zwischen einzelnen Sektoren (Unterabschnitt 3.2.2).

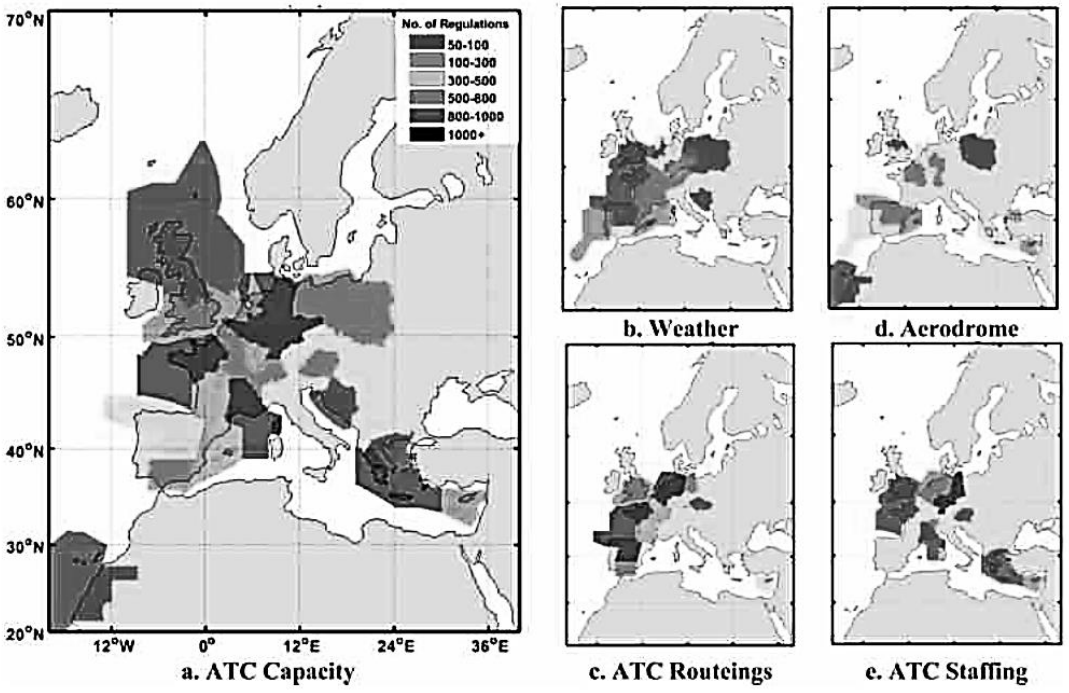

Abb. 2.3: Anzahl Regulierungen und geografische Verteilung (je dunkler, desto größer die Anzahl Regulierungen) in Europa von Mai bis Oktober 2017 (Sanaei et al., 2021)

ATFM-Verspätungen enthalten keine Verspätungen, die z. B. durch unpünktliche Passagiere, Verzögerungen bei der Abfertigung oder technische Probleme am Flugzeug verursacht werden. Sekundäre Verspätungen, resultierend aus der Verspätung eines vorherigen Fluges, erzeugen keine unmittelbare ATFM-Verspätung des aktuellen Flugs. Es kann allerdings sein, dass ein Flug eine ATFM-Verspätung erfährt,

weil dieser durch die Verspätung auf dem vorherigen Flug zu einer dann überlasteteren Zeit wieder starten möchte.

Mittels des *User Driven Prioritisation Process* (UDPP) können Airlines im Rahmen der ihnen zugeteilten Airwayslots einzelne Flüge priorisieren (EUROCONTROL, 2016), z. B. wenn diese einen hohen Anteil an Umsteigepassagieren befördern. Anteilig an der Gesamtstartverspätung (*total departure delay*) machen ATFM-Verspätungen in der Regel einen relativ geringen Teil von etwa 20% bis 30% aus (EUROCONTROL, 2018d, 2020b).

(b) Flughafen

Flughäfen, an denen die Nachfrage die Kapazität teilweise (*Level 2 Airports*) oder deutlich (*Level 3 Airports*) überschreitet, werden als koordinierte Flughäfen bezeichnet. Die Allokation von Flughafenkapazität erfolgt an *Level-3-Airports* durch die Zuteilung von Flughafenslots, wobei diese definiert sind als (IATA, 2020b, S. 61):

> *„[...] a permission given by a coordinator for a planned operation to use the full range of airport infrastructure necessary to arrive or depart at a Level 3 airport on a specific date and time.“*

Zur Abgrenzung von oben genannten Airwayslots wird der Begriff Flughafenslot verwendet, anstatt der häufig gebräuchlichen Kurzform Slot. Während die Allokation von begrenzten Sektorkapazitäten im Luftraum im Wesentlichen ein kurzfristiger und technischer Prozess ist, der durch die neutrale Organisation EUROCONTROL geschieht, hat die Zuteilung von Flughafenslots auch ökonomische und politische Aspekte. So sind für Hub-Airlines Flughafenslots an ihrem Heimatflughafen essentielle Voraussetzung für den Betrieb. Auch Flughäfen arbeiten meistens gewinnorientiert, während dies bei den nationalen Flugsicherungen teilweise nicht der Fall ist. Die Verfügbarkeit von mehr Kapazität bedeutet somit ein höheres Umsatzpotenzial.

Bei der bi-jährlichen Zuteilung von Flughafenslots auf der IATA-Slotkonferenz kommen verschiedene Mechanismen zur Anwendung, die in den *Worldwide Airport Slot Guidelines* beschrieben sind (IATA, 2020b). Deren Ziel ist es, einerseits Planungssicherheit für am Flughafen bereits operierende Airlines herzustellen und andererseits, neuen Airlines den Markteintritt zu ermöglichen zur Sicherstellung von ausreichend Wettbewerb:

80/20-Regel

Zwecks Planungssicherheit für Airlines und Passagiere hat eine Airline Anspruch auf einen Flughafenslot, wenn dieser in der vorherigen Flugplanperiode zu 80% genutzt wurde. Dieses Prinzip wird auch als Großvaterrecht,

historic precedence oder *use-it-or-lose-it-rule* bezeichnet. Es findet vorrangig vor allen anderen Verteilungsprinzipien Anwendung.

Marktneueintritte

Flughafenslots, die bei der Zuteilung von Flughafenslots basierend auf der 80/20-Regel nicht verteilt wurden, kommen in einen *Slotpool*. Dabei gilt die Maßgabe, dass 50% dieser Flughafenslots an neue Bewerber gehen müssen.

Tausch, Handel und geteilter Betrieb

Airlines dürfen untereinander Flughafenslots tauschen und unter bestimmten Randbedingungen auch damit handeln. Außerdem ist ein geteilter Betrieb (*shared operations*) möglich, bei dem eine Airline den Flughafenslot offiziell hält, aber eine andere Airline ihn nutzt. Die IATA spricht sich explizit gegen Auktionen aus, aufgrund potenziell höherer Kosten und Unsicherheiten. Es wird außerdem auf das Risiko verwiesen, dass ein solches Prinzip falsche Anreize setzen könnte, z. B., dass Flughafenkapazität gezielt verknappt wird, um hohe Preise zu erzielen.

Im täglichen Betrieb wird die Einhaltung slotbezogener Regeln kontinuierlich überwacht. Dies zielt insbesondere darauf ab, dass Flughafenslots von den berechtigten Airlines zu den vorgesehenen Zeiten genutzt werden. Darunter fällt auch der Slotmissbrauch, z. B. das Halten eines Flughafenslots, ohne diesen zu nutzen, oder dessen verspätete Rückgabe (IATA, 2020b).

2.3.2 Literaturüberblick

Aufgrund der Vielzahl an Publikationen zu Kapazitätsmanagement im Luftverkehr werden in diesem Abschnitt ausgewählte Veröffentlichungen referenziert, die eine besonders enge Verwandtschaft zum Ansatz der Frequenzregulierung aufweisen. Tabelle 2.5 enthält eine Auflistung an Titeln, die konkrete Kapazitätsmanagementansätze oder -regularien für Flughäfen und Lufträume mit dem Ziel der Verspätungsreduzierung untersuchen.

Dabei wird zum einen nach der Luftverkehrsinfrastruktur differenziert, die primär reguliert wird (Flughafen oder Luftraum). Zum anderen ist das untersuchte Regulierungsprinzip dargestellt. Es wurde darauf geachtet, sämtliche gängige Regulierungsprinzipien zu berücksichtigen. Letztendlich laufen zwar alle Ansätze darauf hinaus, die Anzahl der Flugbewegungen in einem bestimmten Zeitraum und/oder den Flottenmix zu steuern, dennoch gibt es Unterschiede, ob dies direkt geschieht (z. B. durch Start- und Landeslots) oder ob die Zielanzahl durch Zuhilfenahme anderer Metriken (Frequenz, Gemeinwohl, marktbasierte Mechanismen, Anpassung der zeitlich-örtlichen Flugplanung) abgeleitet wird.

Auch wenn es sich um eine Auswahl handelt, wird bei der Gesamtbetrachtung von Tabelle 2.5 deutlich, dass der größere Teil der Publikationen auf das Kapazitätsmanagement an Flughäfen im Vergleich zu Lufträumen abzielt. Das bemerken auch Madas und Zografos (2010, S. 275), wonach „*a substantial amount of research work*“ in die Untersuchung effizienter Slotallokationsmechanismen investiert wurde, obwohl durch die lokale Betrachtung gemäß Gillen et al. (2016) Gesamtsystemdynamiken vernachlässigt werden. Auch der europäische Flughafenverband *ACI Europe* ruft zu einem integrierteren Managementansatz zwischen Flughafen- und Luftraumkapazität auf (ACI Europe, 2020). Der Flughafen-Schwerpunkt in Tabelle 2.5 hat mutmaßlich zwei Ursachen:

- Die Kapazitätsbestimmung von Flughäfen ist durch ihren unmittelbaren Einfluss auf Slotvergaben ein politisch anspruchsvolles, da ökonomisch relevantes Feld und damit wissenschaftlich besonders interessant. Die Kapazität von Lufträumen ist relativ technisch durch Separierungsminima sowie durch Lotsenkapazitäten bestimmt und es gibt seitens der Fluggesellschaften weniger Möglichkeiten zur strategischen Einflussnahme.
- Die Flughäfen, insbesondere die Bahnsysteme und weniger die Terminal- oder Gatekapazität (Berster et al., 2015), stellten in der Vergangenheit eher die Kapazitätsengpässe dar als die Lufträume. Im EUROCONTROL-Raum hat sich dies in den letzten Jahren gedreht und seit 2016 wird die Mehrheit der kumulierten ATFM-Verspätungen durch Kapazitätsengpässe im Luftraum verursacht (Abbildung 4.7).

Der folgende Literaturüberblick differenziert nach Kapazitätsmanagementansätzen im Luftraum, an Flughäfen sowie in Bezug auf die Frequenz, aufgrund der zentralen Bedeutung für die vorliegende Arbeit.

(a) Luftraum

Bolić et al. (2017) untersuchen, inwiefern sich durch strategische Flugplanung ATFM-Verspätungen reduzieren lassen. Im Ergebnis führt dies zu einer geringfügigen Verschiebung einiger weniger Flüge über den Tag hinweg (*Depeaking*). Es handelt sich bei dieser Publikation um eine der wenigen, die Flughafen- und Luftraumkapazität gemeinsam berücksichtigen. Der Ansatz, kurzfristige Kapazitätsengpässe mit einem strategischen Flugplanungsansatz anzugehen, ist eine Parallele zur vorliegenden Arbeit, in der dies mittels strategischer Flottenplanung adressiert wird. Der zeitliche Horizont über mehrere Jahre ist bei strategischer Flottenplanung hingegen noch deutlich größer als bei Flugplanung, die in der Regel einen Vorlauf von mehreren Monaten aufweist.

In Lau et al. (2015) wird ein Ansatz präsentiert, bei dem kurzfristige Ereignisse, insbesondere Wetter, in die Allokation von Airwayslots mit einbezogen werden. Im

Tab. 2.5: Literatur zu Kapazitätsmanagement im Luftverkehr und untersuchte Dimensionen getrennt nach der primär regulierten Luftverkehrsinfrastruktur sowie dem Regulierungsprinzip

Quelle	Ansatz	Infrastr.		Reg.-Prinzip				
		Flughafen	Luftraum	Flugbeweg.	Flugplanung	Frequenz	Gemeinwohl	Marktbasiert
Berling et al. (2017)	Optimierung	•	•		•			
Billette de Villemeur (2004)	Spieltheor.					•	•	
Bolić et al. (2017)	Optimier.	•	•		•			
Brueckner (2002a)	Analytisch	•					•	•
Brueckner (2009)	Analytisch	•		•				•
Dzikus et al. (2015)	Analytisch	•		•	•	•		
EUROCONTROL (2018e)	Analytisch	•	•			•		
Flores-Fillol (2010)	Analytisch	•					•	•
Fukui (2012)	Statistisch	•		•				
Hansen et al. (2001)	Diskussion	•				•		
Hansen (2002)	Analytisch	•				•	•	
Humphreys und Francis (2002)	Diskussion	•			•	•		•
Ivanov et al. (2017)	Optimierung		•		•			
Jimenez et al. (2010)	Statistisch	•		•	•	•		
Jovanović et al. (2014)	Optimierung		•					•
Lau et al. (2015)	Optimierung	•	•		•			
Madas und Zografos (2006)	Diskussion	•		•				•
Madas und Zografos (2008)	Interview	•		•				•
Madas und Zografos (2010)	Mkrit. Bew.	•		•				•
Nollau und Thießen (2019)	Analytisch.	•	•			•		
Raffarin (2004)	Spieltheor.		•					•
Sheng et al. (2019)	Spieltheor.	•		•			•	
Swaroop et al. (2012)	Öko.-Analyt.	•		•			•	
Vaze und Barnhart (2012b)	Spieltheor.	•		•				
Wei (2006)	Spieltheor.	•						•

Ergebnis nimmt dadurch die Anzahl verspäteter Flüge sowie die Summe sämtlicher ATFM-Verspätungsminuten ab. Berling et al. (2017) verfolgen einen Ansatz, bei dem mittels optimierter Zuweisung von Airwayslots potenziell im Konflikt stehende Trajektorien vermieden werden. Im Unterschied zu Bolić et al. (2017) und Lau et al. (2015) erhöhen sich dabei jedoch die kumulierten ATFM-Verspätungen, da einige Flugzeuge länger am Boden gehalten werden.

Ivanov et al. (2017) berücksichtigen, dass sekundäre Verspätungen für den Airlinebetrieb deutlich schädlicher sind als ATFM-Verspätungen. Sekundäre Verspätungen entstehen, wenn sich Verspätungen eines vorherigen Flugs auf den Nachfolgenden übertragen. Häufig nimmt die Verspätung dabei weiter zu und es kommt zu einem „Dominoeffekt“, z. B. wenn bei verspäteter Ankunft am Zielflughafen der Landeslot nicht mehr verfügbar ist. Als Überschlagswert wird angegeben, dass sekundäre Verspätungen im Durchschnitt etwa eine Größenordnung größer sind als ATFM-Verspätungen. Um dieses Problematik abzufedern, implementieren Airlines Flugplanpuffer (*schedule buffers*) in ihren Flugplänen. Unter Berücksichtigung der Flugplanpuffer wird in der genannten Publikation der CASA-Algorithmus dahingehend verändert, dass bei der Zuweisung von Airwayslots sekundäre Verspätung minimiert wird. Dadurch wird das als gerecht erachtete *first-planned, first served*-Prinzip zwar teilweise aufgehoben, die zeitliche Einhaltung von Flughafenslots (*slot adherence*) verbessert sich hingegen und ATFM-Verspätungen werden reduziert.

Jovanović et al. (2014) untersuchen eine dynamische Anpassung der Navigationsgebühren, um Flugzeuge in weniger ausgelastete, benachbarte Sektoren zu leiten. Die Gebühren sind zwar in Summe umsatzneutral, das Prinzip vernachlässigt allerdings den erhöhten Kerosinverbrauch, der durch Umwege entsteht. Aus Kostenperspektive ist es daher nur in Zeiten geringer Kerosinpreise vorteilhaft, wobei der ökologische Aspekt zusätzlicher Emissionen nicht berücksichtigt wird.

(b) Flughafen

In einer Serie von drei Veröffentlichungen entwickeln und bewerten Madas und Zografos (2006, 2008, 2010) unterschiedliche Flughafenslotallokationsstrategien an Flughäfen sowie Teilaspekte davon: Großvaterrechte, Slothandel, Slotauktionen, Überlastungsgebühren, Rückgabe von Slots, Nutzen-oder-Verlieren und zweckgebundene Slots. Basierend auf Kombinationen dieser Mechanismen werden zunächst unterschiedliche Strategien entwickelt (Madas & Zografos, 2006).

In der zeitlich darauffolgenden Veröffentlichung (Madas & Zografos, 2008) werden diese Strategien mittels Kompatibilitätskriterien (*policy compatibility criteria*, Tabelle 2.6) bewertet, die durch Expertenbefragungen gewichtet wurden. Die Kompatibilitätskriterien umfassen Effizienz-, Kosten-, Implementierungs- und Akzeptanzaspekte. Trotz des Flughafenfokus lassen sich diese Kriterien auf Frequenzregulierung übertragen und werden in Abschnitt 5.8 im Zuge der Ergebnisdiskussion darauf angewendet (Tabelle 5.7).

Der Durchschnitt der Befragten bewertete dabei Überlastungsgebühren (*congestion tolls*) als die geeignetste Strategie, vor allem aufgrund der Adaptierbarkeit an lokale Randbedingungen. Die Airlinevertreter unter den Befragten hingegen favorisierten eher konservative Strategien, möglichst nah am Status Quo.

Tab. 2.6: Kompatibilitätskriterien für Regularien zum Kapazitätsmanagement an Flughäfen nach Madas und Zografos (2008), die Anwendung dieses Schemas auf Frequenzregulierung findet in Tabelle 5.7 statt

Kriterium	Indikator	Beschreibung
Effizienz	Allokation	Fähigkeit einer Regulierung, Slots an Interessenten mit größter Zahlungsbereitschaft zuzuweisen
	Wettbewerb	Fähigkeit einer Regulierung, fairen Wettbewerb zwischen Airlines zu fördern
	Infrastruktur	Fähigkeit einer Regulierung, Slots derart zu verteilen, dass Flughafenkapazität maximal ausgenutzt wird bzw. Knappheit vermieden wird
Kosten	Repräsentat.	Ausmaß, in dem Flughafengebühren tatsächliche Kosten für den Flughafenbetrieb widerspiegeln
	Implement.	Kosten, die für die Implementierung und Administration der Kapazitätsmanagementmaßnahme anfallen
Implement.	Komplexität	Aufwände für Administration, Vorbereitung, organisationale und prozessuale Anpassungen sowie abgedeckter Zeithorizont für die Regulierung
	Flexibilität	Kurz- und mittelfristige sowie räumliche Anpassungsfähigkeit der Regulierung
	Entschädig.	Ausmaß der zeitlichen Staffelung und Stufung der Einführung einer Regulierung, um Airlines Gelegenheit zur Adaption zu geben und Schadensersatzansprüche zu vermeiden
Akzeptanz	Trägheit	Ausmaß des erwarteten Widerstands gegenüber der Regulierung seitens Airlines und Flughäfen
	Transparenz	Ausmaß der Nachvollziehbarkeit einer Regulierung, so dass diese rechtlich nicht angreifbar ist

In Madas und Zografos (2010) werden die als vielversprechend erachteten Strategien hinsichtlich ihres Potenzials zur Verspätungsreduzierung sowie zur Vermeidung von Unterausnutzung knapper Flughafenkapazität bewertet. Dies umfasst auch die Missachtung slotbezogener Regeln, z. B. die verspätete oder gar keine Rückgabe nicht genutzter Slots oder das Nutzen eines Slots abseits der vorgesehenen Zeit. Es wird geschlussfolgert, dass die Landegebühren an einigen europäischen Beispiel-Hubs durchgängig geringer bemessen sind als die marginalen Verspätungskosten. Folglich werden Verspätungskosten nicht vollständig internalisiert.

Brueckner (2002a) liefert den wichtigen Hinweis, dass Airlines einen umso größeren Teil der von ihnen erzeugten Verspätungskosten selbst internalisieren, je größer ihr Fluganteil an einem Flughafen ist. Im Umkehrschluss sollte die Bemessung von

Überlastungsgebühren an einem Flughafen invers zum Fluganteil einer Airline sein.

Darauf aufbauend vergleicht Brueckner (2009) quantitative und preisliche (marktbasierte) Ansätze zum Kapazitätsmanagement von Flughäfen. Demnach liefert das Flughafenslotvergabeprinzip in Kombinaton mit der nachgelagerten Möglichkeit zum Flughafenslothandel gleichermaßen effiziente Ergebnisse wie Überlastungsgebühren. Dies hat einerseits den Vorteil, dass zusätzliche Kosten für Airlines vermieden werden. Andererseits entstehen keine Umsätze für die Flughäfen, die diese dann z. B. durch Landegebühren erzeugen müssten. Als weitere Randbedingung wird genannt, dass die Summe verteilter Flughafenslots optimal bemessen sein muss und Großvaterrechte (*grandfather rights* mit *use-it-or-lose-it-requirements*) die Flughafenslots vor dem Nichtnutzen schützen sollten.

Fukui (2012) hingegen schlussfolgert, dass diese Regeln dazu führen, dass an einigen US-Flughäfen ansässige Airlines Flughafenslots horten, um zu vermeiden, dass sie an Wettbewerber fallen. Horten bedeutet in diesem Fall auch bereits das Nutzen von Flughafenslots, jedoch mit vergleichsweise geringer Sitzplatzkapazität pro Flug. Durch den damit geringen Passagierdurchsatz wird dadurch die ohnehin begrenzte Flughafenkapazität nicht effizient genutzt.

(c) Frequenz

Den differenziertesten Ansatz zur Regulierung von Frequenzen liefert Hansen (2002), auf dem auch einer der untersuchten Frequenzregulierungsansätze der vorliegenden Arbeit in Unterabschnitt 3.3.1 aufbaut. Mit der beschriebenen Methodik wird der inkrementelle Anstieg in Warteschlangen-Verspätung (*queuing delay*) mit der inkrementellen Reduzierung in Schedule Delay einer Frequenz verrechnet. Nach Anwendung auf den *Los Angeles International Airport* und entsprechender Erhöhung der durchschnittlichen Flugzeuggröße ließe sich das Gemeinwohl, definiert als weniger kumulierte Verspätungsminuten, steigern. Es wird außerdem darauf aufmerksam gemacht, dass bei jeglicher Regulierungsmaßnahme, die darauf abzielt den Flottenmix zu beeinflussen, die Langfristigkeit von Flottenanpassungen berücksichtigt werden muss (*„Airlines cannot change their fleets overnight.“*, Hansen (2002, S. 87)).

In einem vorangehenden Forschungsbericht desselben Autors (Hansen et al., 2001) wird argumentiert, dass Frequenzregulierung auf den Kern eines vorherrschenden Kapazitätsproblems abzielt im Vergleich zu einer Regulierung der Flugzeuggröße. Sie birgt außerdem nicht das Risiko, dass Airlines zwar die Flugzeuggröße erhöhen, aber die Frequenz beibehalten und Verspätungen somit nicht reduziert würden. Sollten Airlines die Frequenz zwar reduzieren, aber nicht die Flugzeuggröße erhöhen, ergäbe sich eine Angebotsreduzierung, möglicherweise gefolgt von höheren Preisen, von denen Airlines sogar profitieren könnten. Es wird außerdem auf die

Systemdynamik hingewiesen, dass jegliche Form der Flottenmixbeeinflussung immer Auswirkungen auf mehrere Flughäfen hat. Dies erfordert eine flughafen- und airlineübergreifende Zusammenarbeit.

Darüber hinaus gibt es einige rudimentäre Studien, die auf die direkte Regulierung von Frequenz abzielen: Dzikus et al. (2015) präsentiert einen Ansatz, bei dem nach dem Zufallsprinzip Flüge an einem Flughafen gestrichen und durchschnittliche Flugzeuggrößen erhöht werden. Jimenez et al. (2010) diskutieren *Up-Gauging* im Zusammenhang mit der Reduzierung von Frequenzen als eine Maßnahme zur Entlastung von Flughäfen. Es wird im Vergleich zur zeitlichen Umverteilung von Flügen, der Nutzung von sekundären Flughäfen und der vermehrten Durchführung von Direkt- statt Anschlussflügen als vielversprechendstes Konzept bewertet, trotz der regulatorischen Herausforderungen.

In einer umfangreicheren Studie von Nollau und Thießen (2019) werden 140 Strecken in Europa dahingehend optimiert, dass die Frequenz reduziert und die Flugzeuggröße erhöht wird. Es werden zwar konkrete Flugpläne händisch erstellt, die übergeordneten Auswirkungen in den ökologisch-ökonomisch-temporalen Dimensionen werden jedoch kaum betrachtet. Mit dem Ziel der Verspätungsreduzierung untersucht EUROCONTROL (2018e) ein Schema, bei dem die Flugzeuggröße von effizienten Flughafenpaaren auf gleichartige, aber weniger effiziente Verbindungen übertragen wird. Hierbei bleibt jedoch der zeitliche Nutzen von Frequenzen (z. B. in Form von Schedule Delay) unberücksichtigt.

Humphreys und Francis (2002) schlagen Frequenzregulierung (*frequency caps*) ebenfalls als eine mögliche Maßnahme zur Reduzierung von Verspätungen vor, gehen aber nicht weiter darauf ein. Im Gegensatz zu diesen Publikationen, die eher auf eine Begrenzung der Frequenz abzielen, schlägt Billette de Villemeur (2004) eine kombinierte Regulierung aus Mindestfrequenz und maximalem Ticketpreis für monopolistische Regionalstrecken in Frankreich vor. Damit soll vermieden werden, dass Airlines auf Strecken ohne Wettbewerb zulasten der Konnektivität Frequenzen reduzieren und Preise erhöhen.

Einige Untersuchungen zielen zwar nicht auf Frequenzregulierung direkt ab, adressieren aber die Wechselwirkungen von Frequenz sowie Flugzeuggröße (siehe Abschnitt 2.1) und nutzen dies als Ausgangspunkt für die Untersuchung von Kapazitätsmanagementmaßnahmen: Gemäß Vaze und Barnhart (2012b) führt bereits eine geringfügige Reduzierung von Flughafenslots zu einem überproportional größeren Verspätungsrückgang am New Yorker Flughafen *La Guardia*. Zwar werden weniger Passagiere befördert, da die Flugzeuggröße nur bedingt erhöht wird, Airlines können ihre Gewinne jedoch steigern aufgrund geringerer verspätungsinduzierter Kosten.

Basierend auf der Beobachtung, dass Airlines „*overly small aircraft*“ einsetzen (Flores-Fillol, 2010, S. 358), wird eine Methodik zur Quantifizierung von Überlastungsgebühren entwickelt. Mittels eines ähnlichen gemeinwohlorientierten Ansatzes wie Hansen (2002) kommen Swaroop et al. (2012) zu dem Schluss, dass einige US-Flughäfen von der Einführung von Slotbeschränkungen profitieren würden und bestehende Flughafenslotlimits an einigen US-Flughäfen zu hoch angesetzt sind. Wei (2006) weist nach, dass mittels höherer Landegebühren Airlines dazu gebracht werden können, Frequenzen zu reduzieren und die durchschnittliche Flugzeuggröße zu erhöhen. In Bezug auf knappe Lauftraumkapazität und übermäßige Frequenzen schlägt Raffarin (2004) ebenfalls eine Änderung der Navigationsgebührenerhebung in Kombination mit Überlastungsgebühren zwecks Erhöhung der durchschnittlichen Flugzeuggröße vor.

2.4 Zwischenfazit

In diesem Abschnitt werden die Implikationen der thematisch breiten Literaturrecherche zusammengefasst, um die Forschungslücken zu fokussieren. Jeder Stichpunkt der folgenden Auflistung enthält eine wesentliche Erkenntnis in prägnanter Form (*Ausgangspunkt*). Darauf aufbauend wird dargelegt, wie die jeweilige Erkenntnis in der vorliegenden Arbeit adressiert wird (*Adressierung*).

Frequenzen erhöhen Konnektivität und Marktanteile

- *Ausgangspunkt:* Mehrere Untersuchungen weisen nach, dass eine Airline mit einem hohen Frequenzanteil auf einer Strecke einen (überproportional) höheren Marktanteil erreichen kann. Dies resultiert u. a. aus dem Bedürfnis von Reisenden nach möglichst kurzen Verbindungen innerhalb ihrer individuellen Reiseplanung. Bei Umsteigeverbindungen spielt die Frequenz eine noch größere Rolle, um eine möglichst kurze Transfer- und damit Gesamtreisezeit zu erzielen. Die Frequenz ist folglich ein wesentliches Produktmerkmal auf einer Verbindung (Brooke et al., 1994; Givoni & Rietveld, 2009; Hansen & Liu, 2015; Wei & Hansen, 2005).

- *Adressierung:* Diesem Aspekt wird zum einen dadurch Rechnung getragen, dass ausschließlich Verbindungen mit relativ hohen Frequenzen zur Frequenzregulierung herangezogen werden (Abschnitt 4.2). Aufgrund des abnehmenden zeitlichen Grenznutzens einer weiteren Frequenz werden damit Konnektivitätseinbußen möglichst gering gehalten. Zum anderen erfolgt die Bemessung des zeitlichen Wertes von Frequenzen auf Basis eines dedizierten Schedule Delay-Modells, welches u. a. nach Direkt- und Umsteigepassagieren differenziert (Unterabschnitt 3.2.1).

Zunehmende Kapazitätsengpässe

- *Ausgangspunkt:* Gemäß mehrerer Prognosen wächst in Europa und den USA die Anzahl der Flugbewegungen langfristig schneller als die Systemkapazität, mit zunehmenden Verspätungen als Folge (EUROCONTROL, 2018b; FAA and EUROCONTROL, 2019).
- *Adressierung - Region:* Sämtliche Untersuchungen der vorliegenden Arbeit beziehen sich auf den EUROCONTROL-Raum. Hierfür stehen zum einen umfassende Verspätungsdaten zur Verfügung (Unterabschnitt 4.1.1). Zum anderen betrachtet die Mehrzahl der verwandten Publikationen den US-amerikanischen Raum. Insgesamt wird der europäische Luftverkehr als regulierungsfreundlicher erachtet.
- *Adressierung - Zeithorizont:* Um die zunehmenden Kapazitätsengpässe, die Langfristigkeit von Flottenanpassungen sowie deren Nutzen zu berücksichtigen, wird der Zeitraum von 2019 bis 2040 in fünf-Jahres-Inkrementen untersucht (Unterabschnitt 4.2.1).

Frequenzwettbewerb erhöht Verspätungen und Emissionen

- *Ausgangspunkt:* Der Freqenzwettbewerb zwischen Airlines kann zum Einsatz von kleineren, nicht-emissionsminimalen Flugzeugen führen. Dies wird durch die Anwendung von Großvaterrechten bei der Flughafenslotallokation verstärkt, da Airlines hiermit teilweise ihre Flughafenslots vor dem Zugriff von Wettbewerbern schützen. Durch die größere Anzahl Flugbewegungen und den Einsatz nicht-emissionsminimaler Flugzeuggrößen entstehen in der Folge höhere Verspätungen und Emissionen (Givoni & Rietveld, 2009, 2010).
- *Adressierung:* Die marginale Verspätung und die Emissionen eines Fluges auf einer frequenzreduzierten Strecke werden detailliert modelliert (Abschnitt 3.5). Beide Dimensionen sind Bewertungskriterien für die untersuchten Frequenzregulierungsansätze (Abschnitt 3.1).

Geringe bis moderate Skaleneffekte der Flugzeuggröße

- *Ausgangspunkt:* Es existieren positive ökonomische und ökologische Skaleneffekte mit zunehmender Flugzeuggröße innerhalb der jeweiligen Flugzeugkategorien *Single-* und *Twin-Aisle*, wenngleich diese gering bis moderat sind und teilweise sensitiv gegenüber den getroffenen Annahmen. Mit speziell für Kurzstrecken ausgelegten Flugzeugmustern lassen sich weitere Reduzierungen der Sitzplatzkosten und -emissionen erzielen, resultierend aus einer geringeren OEM. Diese Konzepte sind aufgrund des herrschenden Frequenzwettbewerbs sowie der Vorteile flexibel einsetzbarer Flugzeugmuster in der Praxis aber kaum verbreitet (Azzam et al., 2010; Fuchte et al., 2012; Givoni & Rietveld, 2010; Kenway et al., 2010; Martinez-Val et al., 2011; Morrell, 2009; Wei & Hansen, 2003).

- *Adressierung - Betriebskosten und Emissionen:* Die Bestimmung der Kosten- und Emissionseffekte von *Up-Gauging* basiert auf aktuellsten parametrischen Modellen, um eine möglichst hohe Genauigkeit zu erzielen (Linke (2015, 2016) und Thorbeck (2013), Abschnitt 3.5). Es werden außerdem reale Flugzeugtypen aufgelöst. Berücksichtigt werden dabei empirische Werte für flugzeugtyp- (z. B. Massen), strecken- (z. B. Distanz)- und marktspezifische (z. B. Sitzladefaktoren) Parameter.

- *Adressierung - Flugzeugmuster für Kurzstrecke:* Es wird analysiert, welches Marktpotenzial für unterschiedliche auf Kurzstrecken ausgelegte Flugzeuggrößen im Zusammenhang mit Frequenzreduzierung besteht (Abschnitt 5.6).

Lange Produktlebenszyklen

- *Ausgangspunkt:* Die Einführung neuer Technologien in der Luftfahrt ist ein langfristiger Prozess, der bei der Entwicklung von Regulierungsmaßnahmen berücksichtigt werden sollte (Dray, 2013, 2014; Morrell, 2009).

- *Adressierung:* Die Reduzierung von Emissionen wird bei Frequenzregulierung durch den Einsatz größerer Flugzeuge mit einem geringeren Kerosinverbrauch pro Sitzplatz erzielt. Insofern handelt es sich nicht um eine Technologieweiterentwicklung, sondern um eine operationelle Maßnahme. Deren Effizienzsteigerungspotenzial ist tendenziell geringer, dafür aber schneller realisierbar als die Einführung neuer Technologien. Nichtsdestotrotz sind die mittel- bis langfristigen Auswirkungen aufgrund der langen Produktlebenszyklen von Flugzeugen von Bedeutung, weshalb ein Zeithorizont von 20 Jahren betrachtet wird.

Flugzeug- und Missionseinzelebene

- *Ausgangspunkt:* Für sich genommen, haben sämtliche Untersuchungen zum *Up-Gauging* einen eher engen Fokus. Es werden hauptsächlich einzelne Flugzeuggrößenkategorien auf fiktiven Missionen betrachtet (Givoni & Rietveld, 2009; Henderson et al., 2012; Kenway et al., 2010).

- *Adressierung - Missionen:* Die Auswirkungen vom *Up-Gauging* werden auf Systemebene (im EUROCONTROL-Raum) untersucht, nicht auf ausgewählten Missionen. Es werden sämtliche frequenzregulierte Strecken gemäß ihrer Frequenz, Streckenlänge und Passagierzahlen individuell berücksichtigt (Unterabschnitt 4.1.1). Damit wird erreicht, dass das ökologisch-ökonomisch-temporale Potenzial von Frequenzregulierung umfassend und unter realen Bedingungen untersucht wird, da es maßgeblich von den real vorhandenen Flottenstrukturen und geflogenen Strecken abhängt.

- *Adressierung - Fluggrößenkategorien:* Es werden der Großteil aktuell verfügbarer *Single-* und *Twin-Aisle*-Passagierflugzeuge sowie hypothetische zukünftige Entwürfe berücksichtigt, nicht einzelne Flugzeugmuster. Jeder untersuchten Strecke wird eine individuelle Zusammensetzung unterschiedlicher Flugzeugtypen zugewiesen (Unterabschnitt 3.6.2).

Getrennte Betrachtung von Flughafen und Luftraum

- *Ausgangspunkt:* Regulierungsansätze zum Kapazitätsmanagement sind in der wissenschaftlichen Literatur umfassend untersucht. In den meisten Fällen werden Flughafen- und Luftraum dabei getrennt betrachtet, womit Wechselwirkungen vernachlässigt werden (Bolić et al., 2017; Hansen, 2002; Ivanov et al., 2017; Swaroop et al., 2012; Vaze & Barnhart, 2012b).

- *Adressierung:* Die Regulierung von Frequenzen berücksichtigt integriert Flughäfen und Lufträume, da ein Flug durch einen Start- und Zielflughafen sowie einen zu durchquerenden Luftraum gekennzeichnet ist.

Vielfältige Regulierungsansätze

- *Ausgangspunkt:* Die Vielzahl an wissenschaftlichen Publikationen zu Regulierungsansätzen und zum Kapazitätsmanagement im Luftverkehr zeigt unterschiedlichste ökologisch-ökonomisch-temporale Potenziale auf. Teilweise erfolgt die Bewertung jedoch eindimensional und regional begrenzt trotz multidimensionaler systemweiter Auswirkungen. Als besonders effizient werden häufig marktbasierte Ansätze erachtet, in der Praxis sind diese jedoch kaum vorzufinden (Brueckner, 2002b, 2009; Flores-Fillol, 2010; Hansen, 2002; Madas & Zografos, 2006, 2008, 2010; Swaroop et al., 2012; Vaze & Barnhart, 2012b; Wei, 2006).

- *Adressierung - Multidimensionalität:* Die ökologisch-ökonomisch-temporalen Effekte von Frequenzregulierung werden daher in der vorliegenden Arbeit auf Systemebene (im EUROCONTROL-Raum) untersucht (Abschnitt 3.1, Abschnitt 4.1). Eine besondere Rolle spielt die Airlineperspektive, da Frequenzregulierung vor allem auf den von Airlines eingesetzten Flottenmix abzielt.

- *Adressierung - Marktbasiertheit:* Marktbasierte Ansätze (z. B. Überlastungsgebühren oder Slotauktionen) bergen das inhärente Risiko, dass mögliche Mehrkosten akzeptiert werden und sich eine tatsächliche Entlastung der betroffenen Infrastruktur wenn überhaupt nur indirekt ergibt. Selbst wenn mögliche Zusatzeinnahmen in den Ausbau von Infrastruktur fließen, so ist dies ein stark verzögerter Prozess. Frequenzregulierung hingegen zielt auf die Anzahl der Flugbewegungen direkt ab. Im Gegensatz zu den potenziellen

Mehrkosten marktbasierter Ansätze, die die Investitionsfähigkeit einer Airline in effizientere oder größere Flugzeuge tendenziell einschränken, kann eine gezielte Beschleunigung des natürlich stattfindenden *Up-Gauging*-Prozesses mittels Frequenzregulierung das Gegenteil bewirken (Abschnitt 5.5).

Praktische Umsetzbarkeit von Regulierungsansätzen

- *Ausgangslage:* Die umsetzungsbezogenen Herausforderungen von Regulierungen sind nicht nur geprägt von unterschiedlichen Interessenlagen, sondern auch von implementierungs- und administrationsseitigen Hürden. Frequenzregulierung wäre ein relativ harter regulatorischer Eingriff, für den dies ebenso gilt (Madas & Zografos, 2006, 2008, 2010).

- *Adressierung:* Bei ohnehin niedrigen Gewinnmargen ist eine ablehnende Haltung von Airlines gegenüber Maßnahmen offensichtlich, die Mehrkosten oder möglicherweise Umsatzausfälle bedeuten. Zwar geht eine Verspätungsreduzierung in der Regel auch mit einer Kostenreduzierung einher, häufig ist diese jedoch schwierig quantifizier- und zuordbar. Damit eine regulatorische Maßnahme attraktiv wird, muss sie demnach eine eindeutige Win-Win-Situation für sämtliche Akteure erzeugen. Nach diesem Grundsatz werden die Frequenzregulierungsansätze entwickelt und untersucht (Abschnitt 3.1).

Forschungslücke Frequenzregulierung

- *Ausgangspunkt:* Das aktuelle regulatorische Umfeld fördert den Frequenzwettbewerb zwischen Airlines trotz erwiesener negativer Konsequenzen wie Verspätungen sowie höherer Sitzplatzemissionen. Dennoch gibt es keine Publikationen, die Frequenzregulierung auf Systemebene umfassend und langfristig analysieren, um die damit verbundenen Potenziale und Wechselwirkungen zu bewerten (Dzikus et al., 2015; EUROCONTROL, 2018e; Hansen, 2002; Hansen et al., 2001).

- *Adressierung - Frequenzregulierung:* Es werden acht unterschiedliche Frequenzregulierungsansätze untersucht. Diese unterscheiden sich im Hinblick auf die Ableitung konkreter Frequenzwerte auf individuellen Strecken.

- *Adressierung - Systemebene:* Die entwickelten Frequenzregulierungsansätze werden auf die höchstfrequentierten 20 Strecken von jedem der 26 größten Flughäfen im EUROCONTROL-Raum angewandt (Unterabschnitt 4.1.1).

- *Adressierung - Bewertung:* Jeder Frequenzregulierungsansatz wird bezüglich seines ökologischen (Kerosinverbrauch), ökonomischen (Flugzeugbetriebskosten) und temporalen (ATFM-Verspätungen, Reisezeit) Potenzials sowie diesbezüglicher Wechselwirkungen untersucht.

3. Modellentwicklung

In diesem Kapitel erfolgt die Entwicklung eines Modells zur ökologisch-ökonomisch-temporalen Bewertung verschiedener Frequenzregulierungsansätze namens FRED (FrequenzREDuzierungsmodell). Dazu werden in Abschnitt 3.1 zunächst die Ziele von Frequenzregulierung konkretisiert und die Modellierungsgrundsätze dargelegt.

Die zweistufige Funktionsweise von FRED ist auf Abbildung 3.1 dargestellt. Der erste Schritt (im Folgenden: Frequenzreduzierungsschritt) umfasst die Durchführung alternativer Frequenzregulierungsansätze. Dazu sind in Abschnitt 3.2 zuerst die relevanten Basisparameter beschrieben. Darauf aufbauend erfolgt in Abschnitt 3.3 die Darlegung der Funktionsweise der Frequenzregulierungsansätze. In Abschnitt 3.4 ist ausgeführt, nach welchem Prinzip Airlines eine Angleichung der Flugzeuggröße über das Jahr hinweg durchführen könnten, wenn sie mit Frequenzregulierung konfrontiert werden. Für den Frequenzreduzierungsschritt ist vornehmlich die temporale Dimension relevant.

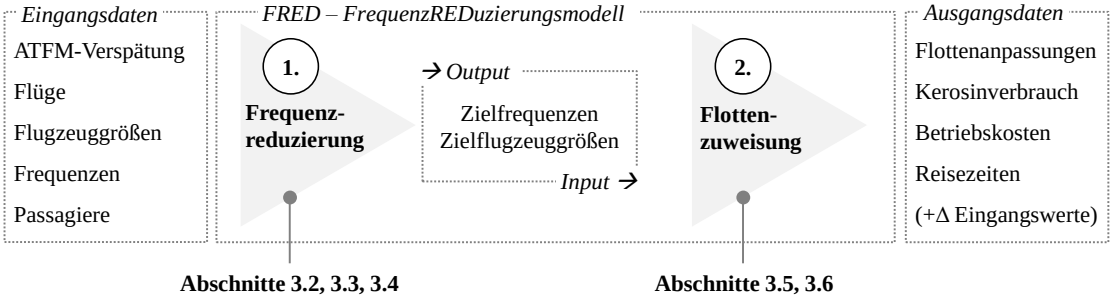

Abb. 3.1: Überblick der zweistufigen Funktionsweise des Frequenzreduzierungsmodells FRED

Wesentliche Ausgangsgrößen dieses Schritts sind Zielfrequenzen und -flugzeuggrößen für frequenzreduzierte Strecken, die Eingangswerte des zweiten Schritts darstellen. Dieser Schritt (im Folgenden: Flottenzuweisungsschritt) beinhaltet die Zuweisung eines Flottenmixes zu den frequenzreduzierten Strecken und ist in Abschnitt 3.5 sowie Abschnitt 3.6 dargelegt. Hierzu werden in Abschnitt 3.5 zuerst die ökologisch-ökonomischen Parameter eingeführt. Aufbauend darauf folgt in Abschnitt 3.6 die Beschreibung des Optimierungsmodells zur Flottenzuweisung auf frequenzreduzierten Strecken. Im Flottenzuweisungsschritt geht es primär um die ökologisch-ökonomische Perspektive.

Der Frequenzreduzierungsschritt repräsentiert somit die Vorgabe eines Regulators und der Flottenzuweisungsschritt die Airline-Reaktion darauf. Die beiden Schritte erfolgen separat (desintegriert), da auch in der Praxis Gesetzgeber und Airlines getrennte Entitäten mit begrenztem Informationsaustausch sind. Dieser getrennte Untersuchungsansatz dient dazu, das Potenzial von Frequenzregulierung unter Berücksichtigung der Pfadabhängigkeit in Bezug auf die bisherige Regulierungslandschaft zu erforschen und nicht einen hypothetischen Idealzustand zu erzeugen. Die Bemessung und Vergabe von Flughafenslots, als prinzipiell vergleichbare Kapazitätsmanagementmaßnahme aus der Praxis, erfolgt auf ähnlich desintegrierte Weise (Abschnitt 2.3). Eine Ausnahme stellt die optionale Angleichung der Flugzeuggröße dar (Abschnitt 3.4), welche inhaltlich der Airline-Reaktionen zuzuordnen ist, modellseitig jedoch im Frequenzreduzierungsschritt enthalten ist.

Eine integrierte Optimierung (z. B. eine Anpassung der Frequenzen durch Minimierung der Gesamtkosten, -verspätungen oder - emissionen) würde bedeuten, dass ein Gesetzgeber konkrete Flottenzuweisungen auf bestimmten Strecken vorschreiben würde, was aufgrund der weitestgehend privatisierten Luftverkehrswirtschaft in Europa unzweckmäßig wäre (Abschnitt 3.1). Darüber hinaus würde es implizit voraussetzen, dass ein Gesetzgeber detaillierte Informationen über die heterogenen und vertraulichen Kostenstrukturen von Airlines hat, wenn er Frequenzregulierungsentscheidungen trifft. In FRED erfolgt die Untersuchung der Frequenzregulierungsansätze auf Basis öffentlich bzw. öffentlich-kommerziell verfügbarer Verspätungs-, Flug-, Passagierstrom- und Flottendaten (CIRIUM, 2019; EUROCONTROL, 2019c; Sabre Airline Solutions, 2019) sowie parametrischer Kosten- und Kerosinverbrauchsmodelle (Linke, 2015; Thorbeck, 2013).

3.1 Ziele von Frequenzregulierung und Modellierungsgrundsätze

Laut Swaroop et al. (2012) sollte bei der Entwicklung von Kapazitätsmanagementmaßnahmen im Luftverkehr mit Bedacht berücksichtigt werden, welche Airlines, Flughäfen und Verbindungen in welchem Ausmaß betroffen sind. Dies unterliegt dem übergeordneten Ziel der Fairness, das auch von Eriksson et al. (2006, 2008) im Zusammenhang mit Kapazitätsmanagementmaßnahmen im Straßenverkehr betont wird.

Gillen et al. (2016) unterstreichen gleichzeitig die Notwendigkeit pragmatischer Regulierungsansätze vor dem Hintergrund von zahlreichen Untersuchungen zu Flughafen- und Luftraum-Überlastungsgebühren, die zwar optimale Ergebnisse erzielen, aber konzeptionell komplex sein können (Abschnitt 2.3). Im Sinne der regulatorischen Effizienz im Transportwesen (siehe Madas und Zografos (2008) für Flughafenslots, Gathon und Pestieau (1995) für das Eisenbahnwesen und Schade

und Schlag (2003) für den Straßenverkehr) sollte folglich mit geringer Intervention eine hohe Wirksamkeit erzielt werden.

Frequenzregulierung ist insofern pragmatisch, als die Begrenzung der Anzahl der Flüge auf einer Strecke eine relativ leicht zu greifende, ganzzahlige Metrik darstellt. Sie ist insofern effizient, als Flughafen- und Luftraumkapazität damit gemeinsam berücksichtigt werden können (Abschnitt 2.3). Das Kriterium der Fairness ist erfüllt, wenn die Interessen sämtlicher betroffener Akteure (Passagier, Airline, Gesellschaft) gleichermaßen adressiert werden. Dies erfordert einen breiten Untersuchungsansatz mit Berücksichtigung des Passagier-, Gesellschafts- und Airlinenutzens zur Ermöglichung der politischen Partizipation (Hisschemöller & Hoppe, 1995).

Nichtsdestotrotz stellt Frequenzregulierung auch eine relativ starke regulatorische Vorgabe dar, da Frequenzen ein relevantes Produktmerkmal des Airline-Flugangebotes sind (Abschnitt 2.1). Eine Diskussion der damit verbundenen Herausforderungen findet in Abschnitt 5.9 statt. Es wird daher vorausgesetzt, dass Frequenzregulierung für Airlines mindestens betriebskosten- und kerosinverbrauchsneutral sein muss, um grundsätzlich vertretbar zu sein. Zusätzlich ist es auch im Interesse eines Gesetzgebers, Airlines nicht im internationalen Wettbewerb zu schwächen.

Es ergeben sich die folgenden fünf, teils im Konflikt stehenden, regulatorischen Ziele, die Frequenzregulierung berücksichtigen soll:

- Die effektive Reduzierung von Verspätungen, gemessen an der durchschnittlichen ATFM-Verspätung, abgeleitet aus der in Abschnitt 2.3 beschriebenen Notwendigkeit weiterer Effizienzgewinne in der Nutzung von Luftverkehrsinfrastrukturen;
- Das Passagierbedürfnis nach Konnektivität im Sinne kurzer Reisezeiten gemessen anhand der Differenz aus Erhöhung des Schedule Delay und der Reduzierung der durchschnittlichen ATFM-Verspätung, abgeleitet aus der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Relevanz von Frequenzen insbesondere für Umsteigeverbindungen;
- Die Reduzierung von Emissionen gemessen am Kerosinverbrauch, abgeleitet aus der in Abschnitt 1.1 dargelegten übergeordneten Notwendigkeit ökologische Effizienzgewinne im Luftverkehr zu realisieren;
- Die Reduzierung von Kosten, gemessen an den direkten Flugzeugbetriebskosten sowie deren jährlicher Ausnutzung, abgeleitet aus den einleitend dargelegten, wirtschaftlich herausfordernden Randbedingungen im Luftverkehr in Abschnitt 1.1;

- Konzeptionelle Simplizität zwecks Transparenz und Umsetzbarkeit, abgeleitet von Gillen et al. (2016) (siehe oben) und aus den in Unterabschnitt 2.3.2 vorgestellten Kompatibilitätskriterien im Kapazitätsmanagement (Tabelle 2.6) von Madas und Zografos (2008).

Die Ziele der Verspätungs- und Reisezeitreduzierung unterscheiden sich vom Ziel der Emissions- und Kostenreduzierung dahingehend, durch welche lufttransportbezogenen Produktionsfaktoren ihre Erreichung beeinflusst wird. Verspätungen sind vorrangig vom Verkehrsaufkommen im Luftraum und an Flughäfen abhängig, wenn das Wetter und die Flugsicherungskapazitäten als externe Faktoren angesehen werden. Lufträume sind öffentliche Güter, die somit dem Zuständigkeitsbereich eines Gesetzgebers zuzuordnen sind. Flughäfen in Europa sind in der Regel (teil-) privatisiert, unterliegen aufgrund ihres teilweise monopolistischen Charakters jedoch erhöhter öffentlicher Aufsicht (Niemeier, 2002; Starkie, 2002).

Emissionen und Betriebskosten werden hingegen maßgeblich durch den eingesetzten Flottenmix beeinflusst. Flottenzuweisung – die Zuordnung von Flugzeugtypen zu Strecken im Netzwerk – gehört dabei zu den zentralen Planungsaufgaben einer Airline (Unterabschnitt 3.6.1). Folglich kann ein Gesetzgeber eher Flugbewegungen im Luftraum und an Flughäfen steuern als den Flottenmix auf bestimmten Strecken. Dies erklärt die indirekte Beeinflussung der Flugzeuggröße über die Frequenz als zu regulierende Zielgröße.

Die COVID-19-Pandemie und die daraus resultierenden staatlichen Rettungspakete haben kürzlich wieder die Kontroversität über den politischen Einfluss bei Luftfahrtunternehmen gezeigt. So werden einerseits positive soziale und umweltseitige Effekte erwartet (Abate et al., 2020). Andererseits wird befürchtet, dass der erhöhte staatliche Einfluss zur Politisierung und somit Einschränkung der unternehmerischen Entscheidungsfindung führt (Albers & Rundshagen, 2020). Beispielsweise wurde die Regelung der Abnahme bestimmter Flugzeugbestellungen für die Rettungspakete für *Air France-KLM* sowie die *Deutsche Lufthansa AG* umstritten diskutiert (aero.de Luftfahrtnachrichten, 2020a; BMWI, 2020; Deutsche Welle, 2020; Forbes, 2020).

Gemäß des *Leitfaden zur Entscheidungsfindung und Bewertung von Maßnahmen und Technologien im Verkehr* des DLR handelt es sich bei Frequenzregulierung um eine verkehrspolitische Maßnahme mit den *Standardzielsystemen* der *Umwelt* und *Effizienz* (Liedtke et al., 2020, S. 22). Dafür bieten sich Methoden mit und ohne vollständige Monetarisierbarkeit an. Zwecks Transparenz und Konsistenz wird in der zugrunde liegenden Methodik (Kapitel 3) auf die monetäre Umrechnung von nicht-monetären Einheiten verzichtet. In der Ergebnisdiskussion (Kapitel 5) findet diese zur Einordnung und Vergleichbarkeit der Effizienzgewinne jedoch vereinzelt statt.

Tab. 3.1: Erfüllung der Kriterien zur Wirkungsmodellierung in FRED nach Liedtke et al. (2020)

Kriterium	Umsetzung in FRED
Homomorphie	• Separate Abbildung von Frequenzregulierung und Airline-Reaktion • Nutzung aktuellster, teilweise erweiterter akademischer Modelle
Dynamisierbarkeit	• Betrachtung der Wirkungsweise von Frequenzregulierung über einen Zeitverlauf von 20 Jahren mit zunehmender Nachfrage und Verspätungen
Politiksensitivität	• Modellierung von unterschiedlichen Frequenzregulierungsansätzen zur Schaffung von Alternativen, die unterschiedliche politische Herangehensweisen reflektieren • Nutzung, explizite Beschreibung und Sensitivitätsanalysen von politisch festzulegenden Parametern

Insgesamt orientiert sich das Vorgehen an der *Multi-Actor-Multi-Criteria-Analysis*, die sich besonders für Entscheidungssituationen mit mehreren Akteuren und unterschiedlichen Bewertungsmaßstäben eignet. FRED erfüllt außerdem die drei wichtigen Kriterien zur Wirkungsmodellierung: die möglichst große Strukturähnlichkeit mit der Realität (Homomorphie), die Darstellung der Veränderungen der Modellkomponenten über den Zeitverlauf (Dynamisierbarkeit) sowie die Möglichkeit, Änderungen der politischen Rahmenbedingungen abzubilden (Politiksensitivität). Tabelle 3.1 zeigt, wie diese Kriterien in FRED adressiert werden.

Die folgende Auflistung enthält abschließend die zugrunde liegenden Annahmen und Vorgehensweisen bei der Modellentwicklung:

Konstante Nachfrage und Kapazität

Es wird angenommen, dass die Nachfrage auf frequenzregulierten Strecken konstant bleibt, weshalb Airlines die Sitzplatzkapazität auf jeder Strecke ebenfalls konstant halten. In der Realität würden Airlines ihre Sitzplatzkapazität in profitmaximierender Weise anpassen unter Berücksichtigung weiterer Randbedingungen wie der Verfügbarkeit größerer Flugzeuge, erwarteter Nachfrage, Wettbewerberverhalten und Marktopportunitäten. Diese Vereinfachung wird damit begründet, dass Frequenzen in FRED auf breiter Systemebene reduziert werden, d. h. für sämtliche auf einer Strecke operierende Airlines sowie für die meisten alternativen Verbindungen über andere Hub-Flughäfen. Diese Herangehensweise wiederum resultiert aus der Annahme, dass Frequenzregulierung wenn überhaupt auf transnationaler Ebene eingeführt werden müsste, um effektiv und fair zu sein. Dementsprechend liegt

auch die Minimalfrequenz auf einer Strecke, bis zu der reduziert wird, bei einem Flug am Tag.

Keine Richtungsabhängigkeit von Flügen und Flugzeuggrößen

In jede Richtung einer Strecke erfolgt stets die gleiche Anzahl Flüge mit der gleichen Flugzeuggröße. Bei leichten Abweichungen oder Dateninkonsistenzen wird der Durchschnitt gebildet und kaufmännisch gerundet. Dies entspricht der im europäischen Raum gängigen Flugzeugrotationslogik in Hub-Systemen, wonach ein Flugzeug vom Hub zu einer Speiche und wieder zurück fliegt. Selbst wenn es davon Abweichungen gibt, so kehrt ein Flugzeug auch nach komplexeren Rotationen früher oder später immer an die Basis zurück, an der es stationiert ist. Zusätzlich ist nicht davon auszugehen, dass es in eine bestimmte Richtung einer Strecke über das Jahr gemittelt dauerhaft deutlich mehr Passagiere gibt als in die Gegenrichtung, was Leerflüge möglicherweise rechtfertigen würde.

Abwägende Vorgehensweise

Aufgrund des explorativen Charakters der Untersuchung und der vergleichsweise vielen zu treffenden Annahmen wird eine abwägende Vorgehensweise angestrebt, um die resultierenden Effekte nicht über- oder unterzubewerten. Beispielsweise wird bei der Verwendung von Referenzwerten aus der Literatur eher auf die konservativeren Schätzungen zurückgegriffen. Gleiches gilt für die nachfrageseitige Berücksichtigung der COVID-19-Pandemie in der Modellanwendung (Abschnitt 4.2). An den entsprechenden Stellen wird auf diese vorsichtige Vorgehensweise stets hingewiesen bzw. diese diskutiert.

3.2 Parameter zur temporalen Bewertung

In diesem Abschnitt ist die mathematische Modellierung der Parameter Schedule Delay, ATFM-Verspätung und zeitlicher Grenznutzen einer Frequenz beschrieben. Das Modell wird in Abschnitt 4.1 auf den EUROCONTROL-Raum angewandt, der auch unter dem Begriff *Gesamtsystem* subsumiert wird, daher enthält bereits die Modellentwicklung einige Bezüge zu dieser Region. Die folgenden Mengen enthalten jeweils sämtliche verwendete Indizes:

R	Menge sämtlicher Strecken r (*route*), z. B. *FRA-LHR*
M	Menge sämtlicher Monate m (*month*), z. B. *Juli*
Y	Menge sämtlicher Jahre y (*year*), z. B. *2025*

3.2.1 Schedule Delay

Schedule Delay beschreibt die durchschnittliche zeitliche Abweichung zwischen der idealen Abflugzeit eines Passagiers und dem nächsten verfügbaren Flug. Schedule Delay ist demnach keine Verspätung im engeren Sinne, sondern ein konzeptioneller Ansatz, der dazu dient, den entstehenden zeitlichen Vorteil von Frequenzen zu messen.

Dieses Konzept wurde erstmals von Douglas und Miller (1974) beschrieben. Sowohl in dieser als auch in anderen älteren Publikationen (z. B. Abrahams, 1983) wird Schedule Delay heruntergebrochen in Frequenzverspätung (*frequency delay*) und stochastische Verspätung (*stochastic delay*). Erstere umfasst die heutige Definition von Schedule Delay, letztere die Wahrscheinlichkeit, dass ein Flug ausgebucht ist. In neuerer Literatur (z. B. Brueckner und Girvin, 2008; Flores-Fillol, 2010; Swaroop et al., 2012) wird der stochastische Anteil nicht mehr berücksichtigt. Mutmaßlich aufgrund des inzwischen weit verbreiteten Einsatzes von Revenue Management-Systemen, die in der Regel einige hochpreisige Buchungsklassen bis kurz vor dem Flug offenhalten.

In der vorliegenden Arbeit wird die Anzahl der Frequenzen auf Tagesebene betrachtet. Das bedeutet, es werden keine einzelnen Flüge und deren individueller Schedule Delay untersucht, sondern stets die Anzahl der Flüge auf einer Strecke über den Tag hinweg. Dies ermöglicht zum einen eine aggregiertere Betrachtung des Untersuchungsthemas, zum anderen erscheint eine Regulierung der Anzahl der Frequenzen auf Tagesebene am zweckmäßigsten. Ein Herunterbrechen auf Stunden- oder Tageszeitebene (z. B. morgens, mittags, abends) wäre in Relation zur Definition von Slotlimits, die in der Regel auf Stundenebene stattfindet (Abschnitt 2.3), zu granular. Ein gröberer Ansatz, z. B. auf Wochenebene, würde der Problematik von ATFM-Verspätungen, die sich typischerweise vormittags aufbauen und über Nacht wieder neutralisieren (EUROCONTROL, 2018a), nicht gerecht werden.

Aus diesem Grund wird ein tagesbasierter Ansatz für die Berechnung von durchschnittlichem Schedule Delay verwendet (Brueckner, 2004; Brueckner & Flores-Fillol, 2007; Brueckner & Girvin, 2008; Flores-Fillol, 2010). Dieser basiert auf einer gleichmäßigen Verteilung der Frequenzen sowie einer konstanten Nachfrage über den Tag hinweg (siehe Abbildung 3.2). Auch wenn Flüge und Nachfrage in der Praxis nicht gleichmäßig verteilt sind (Brey & Walker, 2011), so werden Abflugzeiten u. a. den Nachfrageschwankungen im Tagesverlauf angepasst, so dass sich ein möglichst gleichmäßiger durchschnittlicher Schedule Delay ergibt.

Zusätzlich werden die konkreten Abflugzeiten von weiteren Parametern beeinflusst, z. B. von der Rotationsplanung eines Flugzeugs (Barnhart et al., 2002), möglichen Nachtflugverboten sowie dem Wellensystem ankommender und abgehender Flüge

an Hub-Flughäfen (*banks*) zur Ermöglichung von effizienten Anschlussverbindungen (Burghouwt & de Wit, 2005).

Brey und Walker (2011) und Parker und Walker (2006) machen außerdem auf ein zeitliches Indifferenzfenster (*indifference window*) um die Abflugzeit aufmerksam. Für zeitsensible Geschäftsreisende wird dessen Größe auf eine Stunde angenähert. Auch wenn hierbei in der Praxis von einer deutlichen Streuung auszugehen ist, so gibt die Größenordnung eine Orientierung hinsichtlich der zeitlichen Grundflexibilität eines Passagiers. Weiterhin wird auf die wechselseitige Abhängigkeit zwischen präferierten und tatsächlichen Abflugzeiten hingewiesen. Beide Aspekte (Indifferenzfenster, wechselseitige Abhängigkeit) mindern den Einfluss der modellseitigen Vereinfachung einer gleichmäßigen Flugverteilung.

Abbildung 3.2 verdeutlicht den Unterschied im durchschnittlichen Schedule Delay zwischen Direkt- und Umsteigepassagieren. Für Direktpassagiere wird angenommen, dass der nächste für sie passende Flug vor oder nach ihrer präferierten Abflugzeit liegen kann. Für Umsteigepassagiere auf dem ersten Flug ihrer Verbindung gilt dies nicht, wenn der Anschlussflug nur mit dem Flug vor der idealen Abflugzeit erreicht wird.

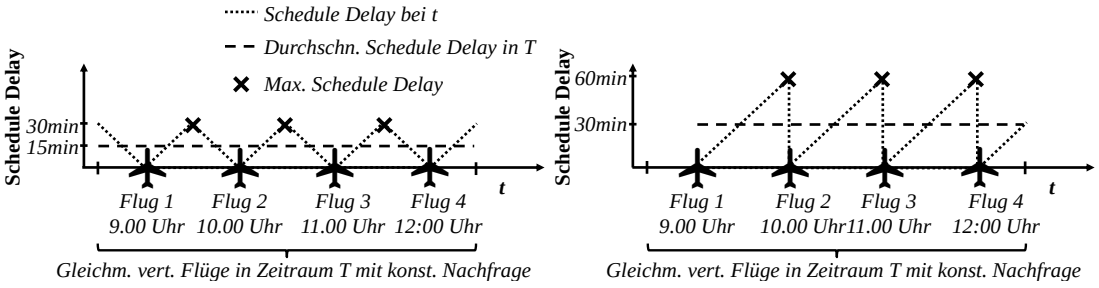

Abb. 3.2: Maximaler und durchschnittlicher Schedule Delay für Direkt- (links) und Umsteigepassagiere (rechts) für beispielhafte Strecke mit stündlichen Flügen

Bei dem abgebildeten Beispiel ergibt sich aus der stündlichen Flugverteilung demnach ein maximaler Schedule Delay von 30 Minuten für Direktpassagiere und von 60 Minuten für Umsteigepassagiere. Das heißt, ein Direktpassagier muss maximal 30 Minuten und ein Umsteigepassagier maximal 60 Minuten relativ zur präferierten Abflugzeit warten. Direkt- und Umsteigepassagiere, deren ideale Abflugzeit gleich der tatsächlichen ist, müssen beide null Minuten warten. Der durchschnittliche Schedule Delay über den Tagesverlauf hinweg liegt bei dieser Flugverteilung demnach bei 15 Minuten für Direktpassagiere und 30 Minuten für Umsteigepassagiere. Bei der gleichen Anzahl Frequenzen ist der Schedule Delay für Umsteigepassagiere folglich doppelt so groß wie für Direktpassagiere, was den größeren zeitlichen Nutzen von Frequenzen für Umsteigepassagiere illustriert.

Analog zu diesen Ausführungen werden der durchschnittliche Schedule Delay eines Direktpassagiers ASD^d_{rmy} (*average schedule delay*) und eines Umsteigepassagiers ASD^c_{rmy} gemäß Gleichungen 3.1a und 3.1b modelliert. Die Superskripte d und c bezeichnen Direktpassagiere (*direct*) und Umsteigepassagiere (*connecting*). Die Werte 2 und 4 in den Nennern resultieren folglich aus der Durchschnittsbildung über die betrachtete Zeitdauer. T_r ist die kürzere der täglichen Betriebsdauern des Start- und Zielflughafens. Die kürzere Betriebsdauer ist ausschlaggebend, da diese entscheidend dafür ist, über wie viele Stunden am Tag eine bestimmte Anzahl Frequenzen F_{rmy} angeboten werden kann. Da die Anzahl Frequenzen im Nenner steht, wird der Schedule Delay mit zunehmender Frequenz geringer.

$$ASD^d_{rmy} = \frac{T_r}{F_{rmy} * 4} \qquad F_{rmy} \in \{1,...,n\} \tag{3.1a}$$

$$ASD^c_{rmy} = \frac{T_r}{F_{rmy} * 2} = 2 * ASD^d_{rmy} \qquad F_{rmy} \in \{1,...,n\} \tag{3.1b}$$

Gleichung 3.2 verdeutlicht dieses Konzept für das auf Abbildung 3.2 dargestellte Beispiel mit stündlichen Flügen auf einer Strecke. Die modellseitige Differenzierung zwischen Direkt- und Umsteigepassagieren ist eine realitätsnähere Vorgehensweise im Vergleich zu verwandten Publikationen, die meist nur die Formulierung für Direktpassagiere verwenden. Dies führte bisweilen dazu, dass Schedule Delay und damit der Zeitvorteil zusätzlicher Frequenzen als tendenziell zu gering bemessen wird.

$$\text{Beispiel:} \qquad ASD^d_{rmy} = \frac{16\ h\ pro\ Tag}{16\ Frequenzen * 4} = 0{,}25\ h \tag{3.2a}$$

$$\text{Beispiel:} \qquad ASD^c_{rmy} = \frac{16\ h\ pro\ Tag}{16\ Frequenzen * 2} = 0{,}5\ h \tag{3.2b}$$

Der Gesamt-Schedule Delay für Direktpassagiere $TASD^d_{rmy}$ (*total average schedule delay*) und Umsteigepassagiere $TASD^c_{rmy}$ ergibt sich aus dem durchschnittlichen Schedule Delay multipliziert mit der Anzahl der jeweiligen Passagiertypen PAX^d_{rmy} und PAX^c_{rmy} auf einer Strecke (Gleichung 3.3a und Gleichung 3.3b). Die Summe der beiden passagiertypspezifischen Gesamt-Schedule Delays ergibt den Gesamt-Schedule Delay $TASD_{rmy}$ (Gleichung 3.3c). Der durchschnittliche Schedule Delay gewichtet nach Passagiertypen ASD_{rmy} lässt sich gemäß (Gleichung 3.3d) bestimmen.

$$TASD^{d}_{rmy} = ASD^{d}_{rmy} * PAX^{d}_{rmy} \tag{3.3a}$$

$$TASD^{c}_{rmy} = ASD^{c}_{rmy} * PAX^{c}_{rmy} \tag{3.3b}$$

$$TASD_{rmy} = TASD^{d}_{rmy} + TASD^{c}_{rmy} \tag{3.3c}$$

$$ASD_{rmy} = ASD^{d}_{rmy} * \frac{PAX^{d}_{rmy}}{PAX^{d}_{rmy} + PAX^{c}_{rmy}} + ASD^{c}_{rmy} * \frac{PAX^{c}_{rmy}}{PAX^{d}_{rmy} + PAX^{c}_{rmy}} \tag{3.3d}$$

Die Gesamt-Reduzierung im durchschnittlichen Schedule Delay $TDASD_{rmy}$ (*total decrease in average schedule delay*) als Funktion der Frequenz F_{rmy} ergibt sich gemäß Gleichung 3.4.

$$TDASD_{rmy}(F_{rmy}) = TASD_{rmy}(F_{rmy} - 1) - TASD_{rmy}(F_{rmy}) \qquad F_{rmy} \in \{2,...,n\} \tag{3.4}$$

3.2.2 ATFM-Verspätung

Die Schätzung der inkrementellen Verspätung eines zusätzlichen Fluges im Lufttransportsystem basiert auf der nichtlinearen Regression empirischer ATFM-Verspätungsdaten (EUROCONTROL, 2019c). Dieser Ansatz zur Messung der durchschnittlichen ATFM-Verspätung in Abhängigkeit des Verkehrsaufkommens wird ebenfalls von EUROCONTROL im Zuge der Leistungsmessung verwendet (EUROCONTROL, 2002a, 2002b). Er ähnelt der Messung der Flughafenkapazität, die sich durch eine durchschnittliche Zielverspätung an einem exemplarischen Tag ergibt (Gelhausen et al., 2019).

Dieses Vorgehen vereinfacht zwar den räumlich-zeitlich stochastischen Charakter von ATFM-Verspätungen, da diese in der Praxis neben der Anzahl Flüge im Lufttransportsystem von zahlreichen weiteren Faktoren abhängen, z. B. dem Wetter und der vorhandenen Flugsicherungskapazität (Abschnitt 2.3). Dennoch ist dieser Ansatz für das übergeordnete Ziel, der langfristigen Potenzialanalyse einer Kapazitätsmanagementmaßnahme, hinreichend, da er transparent und somit nachvollziehbar ist. Dies ist notwendig für das (öffentliche) Problembewusstsein sowie die (öffentliche) Akzeptanz einer Regulierungsmaßnahme. Beides ist eine Voraussetzung für dessen Einführung, insbesondere mit zahlreichen unterschiedlichen Akteuren (Eriksson et al., 2006; Hirschi et al., 2002; Schade & Schlag, 2003).

Aufgrund ihrer nichtlinearen Dynamiken werden Verspätungen im Luftverkehr häufig mittels Warteschlangentheorie modelliert (Odoni, 2001). Daher wurde die

allgemeine Form einer exponentiellen (nichtlinearen) Regression zur Schätzung der ATFM-Verspätung verwendet (Gleichung 3.5). Hierbei ist AAD die durchschnittliche ATFM-Verspätung pro Flug, D die Anzahl der Flüge im EUROCONTROL-Raum und α sowie β sind die Regressionskoeffizienten.

$$AAD = \alpha * e^{\beta * D} \tag{3.5}$$

Für das geschätzte Modell ergibt sich die Schreibweise in Gleichung 3.6. Um Saisonalitäten abzubilden, werden AAD_{my} und D_{my} monatsweise modelliert. Da die Systemkapazität des EUROCONTROL-Raums über die Jahre zunimmt (EUROCONTROL, 2018b), erfolgt außerdem eine jahreweise Differenzierung der Regressionskoeffizienten.

$$AAD_{my} = \alpha_y * e^{\beta_y * D_{my}} \qquad D_{my} \in \{1,...,n\} \tag{3.6}$$

Ohne auf Unterabschnitt 4.2.3 vorzugreifen, zeigt Abbildung 3.3 zur Illustrierung die durchschnittliche ATFM-Verspätung in Abhängigkeit der täglichen Flüge im EUROCONTROL-Raum. Jeder Datenpunkt ist hierbei ein Monatsdurchschnitt aus den Jahren 2014 bis 2019. Die zunehmende Streuung der Werte um die Regressionslinie zeigt die Abhängigkeit der ATFM-Verspätung von weiteren Parametern, neben der Anzahl der Flüge (siehe oben). Die verkehrsärmeren Wintermonate (Dezember - März) liegen dabei eher links und die verkehrsreicheren Sommer- und Frühherbstmonate (Juni - Oktober) eher rechts.

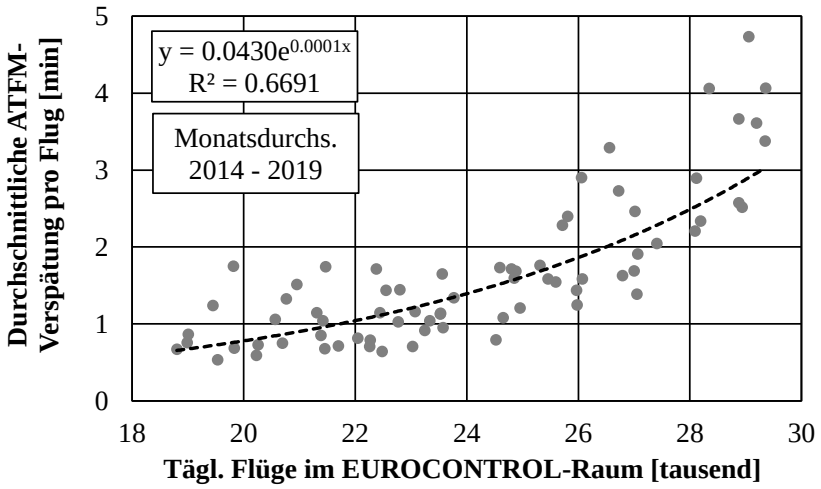

Abb. 3.3: Durchschnittliche monatliche ATFM-Verspätung pro Flug im EUROCONTROL-Raum von 2014 bis 2019 und Regressionslinie; ermittelt durch Linearisierung und anschließender Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate (EUROCONTROL, 2019c)

Der inkrementelle Anstieg der durchschnittlichen ATFM-Verspätung pro Flug $IAAD_{rmy}$ (*increase in average ATFM delay*) im EUROCONTROL-Raum ergibt sich als Funktion von D_{my} aus Gleichung 3.7.

$$IAAD_{rmy}(D_{my}) = (AAD_{my}(D_{my}) - AAD_{my}(D_{my}-1)) * c_{rmy}(D_{my}) \qquad D_{my} \in \{1,...,n\} \tag{3.7}$$

Der strecken- und monatsspezifische Überlastungsfaktor c_{rmy} dient dazu, die regional und saisonal variierenden Verspätungszustände vereinfacht zu modellieren (Gleichung 3.8a). Der erste Bruchterm beschreibt das Verhältnis der empirischen streckenspezifischen ATFM-Verspätung pro Flug AAD'_{rmy} und der empirischen monatsspezifischen ATFM-Verspätung pro Flug im EUROCONTROL-Raum AAD'_{my}. Entsteht auf einer Strecke A beispielsweise doppelt so viel durchschnittliche ATFM-Verspätung wie im Mittel im gesamten EUROCONTROL-Raum, würde dieser Bruch zwei ergeben (Gleichung 3.8b). Er gibt somit Aufschluss darüber, ob auf der betreffenden Strecke eine über- oder unterdurchschnittliche ATFM-Verspätung relativ zum EUROCONTROL-Raum-weiten Mittelwert herrscht.

Aufgrund des nichtlinearen Charakters von ATFM-Verspätungen ist zusätzlich davon auszugehen, dass mit der Abnahme der Anzahl Flüge durch Frequenzreduzierung die streckenspezifischen Unterschiede relativ zueinander geringer werden. Ist der EUROCONTROL-Raum bereits teilweise entlastet, wird die Frequenzreduzierung auf einer anfangs sehr überlasteten Strecke nicht mehr in gleichem Maße stärker zur Reduzierung der durchschnittlichen ATFM-Verspätung im Gesamtsystem beitragen wie eine zu Beginn unterdurchschnittlich ausgelastete Strecke. Umgekehrt wird eine unterdurchschnittlich ausgelastete Strecke nicht mehr in gleichem Maße weniger zur Reduzierung der durchschnittlichen ATFM-Verspätung im Gesamtsystem beitragen.

Dieses Systemverhalten wird über den zweiten Bruchterm abgebildet, bestehend aus der zu dem Zeitpunkt im Frequenzreduzierungsprozess vorliegenden durchschnittlichen ATFM-Verspätung $AAD_{my}(D_{my})$ und dem empirischen Wert AAD'_{my}. Wurde beispielsweise die durchschnittliche ATFM-Verspätung im EUROCONTROL-Raum durch Frequenzreduzierung bereits auf 80% des empirischen (Anfangs-) Wertes reduziert, so würde die beispielhafte Strecke A nicht mit zwei, sondern mit 1,8 gewichtet werden (Gleichung 3.8b). Analog werden Strecken mit einer unterdurchschnittlichen ATFM-Verspätung mit zunehmender Frequenzreduzierung höher gewichtet als anfangs. Folglich nähern sich die streckenspezifischen Gewichtungsfaktoren mit zunehmender Systementlastung einander an.

$$c_{rmy}(D_{my}) = 1 + (\frac{AAD'_{rmy}}{AAD'_{my}} - 1) * \frac{AAD_{my}(D_{my})}{AAD'_{my}} \tag{3.8a}$$

$$\text{Beispiel:} \quad c_{rmy}(D_{my}) = 1 + (\underbrace{\frac{6\,min}{3\,min}}_{2} - 1) * \underbrace{\frac{2{,}4\,min}{3\,min}}_{0{,}8} = 1{,}8 \tag{3.8b}$$

Gleichung 3.7 trifft folglich eine näherungsweise Aussage zur Veränderung der durchschnittlichen systemweiten ATFM-Verspätung, die durch einen Flug auf einer bestimmten Strecke hervorgerufen wird. Die Veränderung der streckenspezifischen durchschnittlichen ATFM-Verspätung eines einzelnen Flugs wird damit nicht modelliert. Mit diesem Vorgehen ist es möglich, relevante strecken- und monatsspezifische ATFM-Verspätungsunterschiede (Abschnitt 4.2) auf zweckmäßige Weise auf Gesamtsystemebene zu berücksichtigen. Dies ist erforderlich, um gemäß der Zielsetzung ATFM-Verspätungen gezielt auf besonders überlasteten Strecken zu reduzieren (Abschnitt 3.1).

Eine detailliertere Bestimmung dieser nichtlinearen Dynamiken auf Streckenebene erfordert aufwendige Simulationstechniken, da die Veränderung der streckenspezifischen ATFM-Verspätung vom Flugverkehrsaufkommen in den konkret auf dieser Strecke durchflogenen Sektoren abhängt. Das Flugverkehrsaufkommen kann sich auch dadurch ändern, dass auf anderen Strecken, die teilweise die gleichen Sektoren nutzen, Frequenzen reduziert werden. Zusätzlich steht jeder Sektor auch in Wechselwirkung zum Verkehr in den angrenzenden Sektoren. In der Realität kommen zusätzlich stochastische Effekte hinzu, wie Wetter oder Flugsicherungskapazität. Insgesamt ist die Modellierungsweise zur Messung der verspätenden Wirkung eines Flugs eher vorsichtig (siehe Auflistung am Ende dieses Unterabschnitts), insofern wird die inhaltliche Aussagekraft des Gesamtmodells durch die beschriebene Vereinfachung nicht beeinträchtigt.

Analog zur Bestimmung der Veränderung des Gesamt-Schedule Delays, ergibt sich der inkrementelle Anstieg der Gesamt-Passagier-ATFM-Verspätung $TIAPAD_{rmy}$ (*total increase in average passenger ATFM delay*) mittels Multiplikation von $IAAD_{rmy}$ mit der Anzahl täglicher Passagiere im EUROCONTROL-Raum PAX_{my}^{EURO} (Gleichung 3.9).

$$TIAPAD_{rmy} = IAAD_{rmy} * PAX_{my}^{EURO} \tag{3.9}$$

Die in diesem Unterabschnitt 3.2.2 eingeführten Modellierungsweisen zur Bestimmung von Verspätung sind im Gesamtkontext der vorliegenden Arbeit als vorsichtig zu bewerten, denn:

- Es werden nur ATFM-Verspätungen berücksichtigt, die vor dem Start entstehen und bei denen folglich das Flugzeug am Boden gehalten wird. Bei kurzfristig überlasteten Lufträumen können ATFM-Maßnahmen in der Luft ergriffen werden, die zur einer Umleitung (*rerouting*) und damit zu (weiterer) Verspätung sowie erhöhtem Treibstoffverbrauch führen. Auch in unmittelbarer Umgebung des Zielflughafens in der *Arrival Sequencing and Metering Area* kann es bei höherem Verkehrsaufkommen zu zusätzlichen Verspätungen im Zuge der Herstellung der Anflugstaffelung kommen (EUROCONTROL, 2020b).

- Neben ATFM-Verspätungen werden keine anderen Verspätungstypen berücksichtigt. Zu nennen wären hier beispielsweise sekundäre Verspätungen oder Verzögerungen bei der Abfertigung, die ebenfalls eine teilweise Abhängigkeit vom Gesamtverkehrsaufkommen am Flughafen haben. Durch Frequenzregulierung ließen sich diese Verspätungen ebenfalls reduzieren.

- In der verwendeten Datenbasis (EUROCONTROL, 2019c) sind keine Flüge berücksichtigt, die aufgrund einer sehr hohen ATFM-Verspätung (ggf. auch auf einem vorherigen Flug) gestrichen wurden. Die hierdurch für Passagiere und Airlines entstehende ATFM-Verspätung würde den Durchschnitt der Datenbasis weiter erhöhen.

3.2.3 Zeitlicher Grenznutzen einer Frequenz

Der zeitliche Grenznutzen einer Frequenz $MTUF_{rmy}$ (*marginal temporal utility of a frequency*) ergibt sich aus der Differenz ihrer inkrementellen streckenspezifischen Reduzierung im Gesamt-Schedule Delay und ihres inkrementellen Anstiegs in durchschnittlicher Gesamt-Passagier-ATFM-Verspätung gemäß Gleichung 3.10 (Hansen, 2002; Swaroop et al., 2012).

Demnach wird der marginale zeitliche Zusatznutzen, den die Reisenden auf einer Strecke durch eine zusätzliche Frequenz erfahren, abgewogen mit den zusätzlichen zeitlichen Kosten, die durch die verspätende Wirkung dieser Frequenz für sämtliche Passagiere im Lufttransportsystem entstehen („zeitliche Kosten-Nutzen-Abwägung“). Durch diese ganzheitliche Perspektive kann dieses Vorgehen als ein gemeinwohlorientierter Ansatz in der zeitlichen Passagierdimension bezeichnet werden.

In den meisten Hub-Netzwerken in Europa operieren Flugzeuge vom Hub zu den Speichen nach einem Hinflug-Rückflug-Prinzip. Dadurch sind sowohl die Frequenzen als auch die gemittelten Passagierzahlen in beide Richtungen ähnlich (Abschnitt 3.1). Aus flugzeugrotationsplanerischer Sicht ergibt sich daraus die Anforderung, dass Frequenzen immer in beiden Richtungen einer Strecke reduziert werden müssen. Da es auf einer Strecke direktionale Unterschiede in der durchschnittlichen ATFM-Verspätung geben kann, muss dies in ATFM-verspätungsbasierten Bemessungsgrundlagen zur Frequenzregulierung berücksichtigt werden. Aus diesem Grund werden $TDASD_{rmy}$ und $TIAPAD_{rmy}$ in der Formulierung für $MTUF_{rmy}$ als Summe für den Hin- und Rückflug berücksichtigt. Die Superskripte *out* und *in* markieren den Hinflug (*outbound*) und Rückflug (*inbound*) ausgehend von einem Flughafen.

$$MTUF_{rmy} = TDTASD^{out}_{rmy} + TDTASD^{in}_{rmy} - d * (TIAPAD^{out}_{rmy} + TIAPAD^{in}_{rmy}) \tag{3.10}$$

Da nicht planbare ATFM-Verspätung einen größeren Negativnutzen erzeugt als planbarer Schedule Delay einen positiven Nutzen (Adler et al., 2005; Hansen, 2002), wird $TIAPAD_{rmy}$ mit einem Faktor d (*disutility*) multipliziert. Neben der Nichtplanbarkeit kommt hinzu, dass ATFM-Verspätungen gemeinhin im Flugzeug verbracht werden. Ein Ort, der von Passagieren in der Regel als weniger nutzenstiftend empfunden wird als das Zuhause oder die Arbeitsstätte. Dies sind die Orte, an denen Schedule Delay häufig verbracht wird, wenn nicht gerade am Umsteigeflughafen.

Folglich lässt sich d gemäß Gleichung 3.11 formulieren. Dabei ist u_{ATFM} (*utility*) der Betrag des zeitlichen Negativnutzens von ATFM-Verspätungen und u_{Sched} der Betrag des zeitlichen Positivnutzens von Schedule Delay. Die Einheit dieser Nutzenmetriken ist dabei unerheblich, so lange sie auf die gleiche zeitliche Dauer (z. B. 1 Minute) der beiden Verspätungstypen normiert ist.

$$d = \frac{u_{ATFM}}{u_{Sched}} \tag{3.11}$$

Zur Veranschaulichung dieses Prinzips zeigt Abbildung 3.4 den Verlauf von $TDASD_{rmy}$, $TIAPAD_{rmy}$ und $MTUF_{rmy}$ für unterschiedliche Werte von d. Die Strecke *Nizza-London Gatwick* wurde gewählt, da hier in 2019 die Unterschiede von ATFM-Verspätungen und Passagieranzahlen zwischen Sommer und Winter besonders ausgeprägt sind, was einen illustrativen Anwendungsfall erzeugt. Im Juli reisten auf dieser Strecke etwa doppelt so viele Passagiere wie im Januar 2019. Dies führt dazu, dass der Wert von $TDASD_{rmy}$ im Juli 2019 bei gleicher Frequenz etwa doppelt so groß ist, wie im Januar. Der zeitliche Vorteil einer bestimmten

Anzahl Frequenzen ist für den Juli 2019 folglich doppelt so groß, da mehr Reisende davon profitieren.

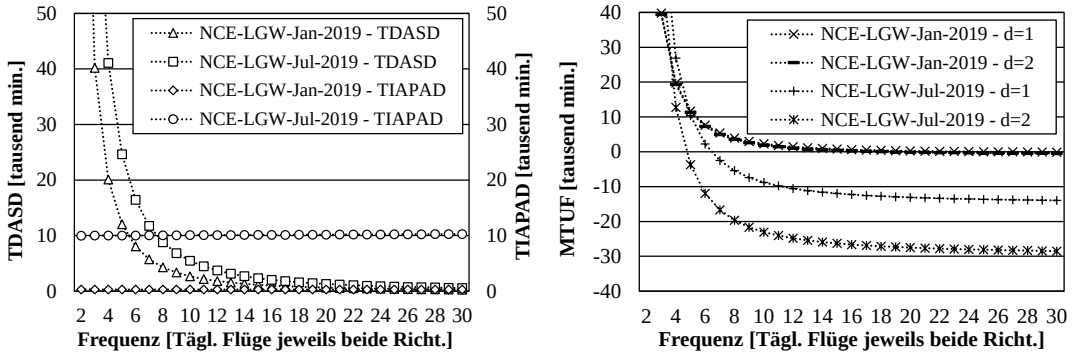

Abb. 3.4: Verlauf von $TDASD_{rmy}$ und $TIAPAD_{rmy}$ (links) sowie $MTUF_{rmy}$ für unterschiedliche Werte von d (rechts) für Strecke *NCE-LGW* (*Nizza - London Gatwick*) im Juni 2019

Auf der sekundären vertikalen Achse sind die Werte für $TIAPAD_{rmy}$ aufgetragen. Da es sich bei der dargestellten Anzahl von 30 Frequenzen relativ zur Gesamtzahl an Flügen im EUROCONTROL-Raum (Abbildung 3.3) um einen kleinen Wert handelt, ist der Anstieg der Verläufe visuell kaum erkennbar. Außerdem ist ersichtlich, dass der Anstieg der durchschnittlichen ATFM-Verspätung einer zusätzlichen Frequenz im Juli 2019 deutlich über dem Wert für Januar 2019 liegt, resultierend aus zwei Gründen:

- Die durchschnittliche ATFM-Verspätung lag im Juli 2019 deutlich höher und somit in einem steileren Bereich der Kurve auf Abbildung 3.3.
- An einem durchschnittlichen Tag im Juli 2019 waren mehr Passagiere im EUROCONTROL-Raum unterwegs, womit mehr Reisende von Verspätung betroffen sind.

Auf der rechten Seite von Abbildung 3.4 sind die Werte für $MTUF_{rmy}$ dargestellt, die sich gemäß Gleichung 3.10 aus der Differenz von $TDASD_{rmy}$ und $TIAPAD_{rmy}$ mit einer bestimmten Gewichtung d zueinander ergeben. Zur Illustrierung der Wirkungsweise von d sind zwei unterschiedliche Werte für diesen Parameter gezeigt. Hierbei wird deutlich, dass die beiden Verläufe für den Januar 2019 nahezu deckungsgleich sind, resultierend aus den niedrigen Werten für $TIAPAD_{rmy}$ in diesem Monat. Für den Juli 2019 ist der Unterschied hingegen größer.

Eine wesentliche Frage, die sich in diesem Zusammenhang stellt, ist folglich die Bemessung von d. Es gibt keine Veröffentlichung(en), die sowohl für ATFM-Verspätungen als auch für Schedule Delay Kostenwerte aus Passagiersicht basierend auf einer Methodik, identischen Annahmen und dem gleichen Datensatz

ermittelt, was zwecks Konsistenz zu präferieren wäre. Daher werden zwei Veröffentlichungen mit zumindest sich überschneidenden Autorenteams kombiniert herangezogen: In Adler et al. (2005) werden monetäre Referenzwerte für Schedule Delay (*schedule time difference*) und Flugzeit (*flight time*) angegeben. Diese ergeben sich aus der Frage, wie viel ein Passagier bereit wäre zu zahlen, um die Flugzeit oder den Schedule Delay um eine Stunde zu verkürzen. In Landau et al. (2016) werden monetäre Referenzwerte für erwartete Verspätungen im weiteren Sinne (*expected delay*) angegeben.

Gemäß Adler et al. (2005) wären Passagiere bereit, für eine einstündige Flugzeitverkürzung 2,3 (Geschäftsreisende) bis 6,5 (Privatreisende) mal so viel zu zahlen wie für eine einstündige Reduzierung des Schedule Delay. In Landau et al. (2016) wird eine erwartete Verspätung mit einem Faktor von 3,5 (Privatreisende) und 5,6 (Geschäftsreisende) gegenüber einer Flugzeitverkürzung bewertet. Neben der naturgemäß hohen Standardabweichung dieser Werte muss für deren zweckmäßige Weiterverwendung im Zusammenhang mit ATFM-Verspätungen folgendes beachtet werden:

- Diese Werte berücksichtigen, dass mit steigenden Verspätungen deren Negativnutzen überproportional zunimmt (Cook & Tanner, 2015). Dieser kann sogar sprunghaft steigen, z. B. wenn ein Anschlussflug verpasst wird (Pita et al., 2013).
- Während die Werte aus Adler et al. (2005) und Landau et al. (2016) auf Stundenebene ermittelt wurden, treten ATFM-Verspätungen in der Praxis häufig in der Größenordnung von wenigen Minuten auf (EUROCONTROL, 2019c, 2020b). Der nichtlineare Charakter des Negativnutzens in Abhängigkeit von Verspätung (Cook & Tanner, 2015) führt dazu, dass ATFM-Verspätungen im einstelligen Minutenbereich für Passagiere zeitlich unkritischer sind.
- Dies ist auch deshalb der Fall, weil Airlines gerade auf überlasteten Strecken häufig Zeitpuffer in die Flugpläne einbauen (*schedule padding*), um trotz potenzieller initialer ATFM-Verspätung pünktlich am Zielflughafen anzukommen (Ball et al., 2010; Barnhart et al., 2012; Yimga & Gorjidooz, 2019). Dadurch entfällt für ATFM-Verspätungen, die sich innerhalb des Flugplan-Zeitpuffers befinden, der nicht planbare Charakter. Vielmehr können dann die Zeitwerte für Flugzeit angesetzt werden, da ATFM-Verspätungen häufig am Boden im Flugzeug verbracht werden.
- Idealerweise führt die Reduzierung von ATFM-Verspätungen dazu, dass die Notwendigkeit nach Flugplan-Zeitpuffern abnimmt. Laut Ball et al. (2010) wurden in den USA im Jahr 2007 ein Viertel der gesamten direkten verspätungsbezogenen Passagier- und Airlinekosten durch Flugplan-Zeitpuffer

verursacht (ca. 6 Mrd. US$). In Yimga und Gorjidooz (2019) wird basierend auf 2016-Daten ermittelt, dass durch Zeitpuffer in den Flugplänen an 62 US-Flughäfen den Konsumenten insgesamt Kosten in Höhe von ca. 12,6 Mrd. US$ entstanden sind. In beiden Fällen ergeben sich diese Werte aus den Produktivitätseinbußen durch verlorene Zeit und können als Orientierungswerte verstanden werden.

- Ferner lässt sich argumentieren, dass Luftverkehrsinfrastrukturen in der Regel kapazitiv so ausgelegt sind, dass eine bestimmte durchschnittliche Verspätung nicht überschritten wird (Abschnitt 2.3). Das bedeutet, eine bestimmte Verspätung ist in jedem Fall möglich, welche vom Passagier zumindest teilweise eingeplant wird und damit wieder einen geplanten Charakter hat, auch über den Flugplan-Zeitpuffer hinaus (Ball et al., 2010).

Eine Gewichtung von Schedule Delay und ATFM-Verspätungen gegeneinander hinsichtlich ihres (Negativ-) Nutzens kann folglich nur eine Näherung sein. Die Festlegung auf einen konkreten Wert wäre in der Praxis mutmaßlich politisch getrieben und ist vergleichbar mit einer praktischen Kalibrierung des Modells. Durch die Summe der beschriebenen Unsicherheiten sowie der ausschlaggebenden Tatsache, dass ATFM-Verspätungen häufig nur wenige Minuten betragen, wird in der vorliegenden Arbeit eine vorsichtige Herangehensweise mit $d = 2$ gewählt, sofern nicht anders angegeben.

Das bedeutet konkret, dass eine Minute ATFM-Verspätung doppelt so viel Negativnutzen erzeugt wie eine Minute Schedule Delay. Um den Einfluss dieser Unsicherheit zu untersuchen, werden in Unterabschnitt 5.7.1 Sensitivitätsanalysen dieses Faktors durchgeführt.

Methodisch erweitert der entwickelte Ansatz zur Berechnung von $MTUF_{rmy}$ das Vorgehen von Hansen (2002) und Swaroop et al. (2012) um vier Aspekte:

- Für die Bestimmung des Schedule Delays werden empirische Direkt- und Umsteigepassagierzahlen verwendet und nicht angebotene Sitzplätze, wodurch die Messung präziser ist.
- Für die Verspätungsberechnung werden empirische ATFM-Verspätungsdaten von Flughäfen sowie Lufträumen genutzt und kein generisches Warteschlangenmodell für ankommende Flüge am Flughafen.
- ATFM-Verspätungen und Schedule Delay werden gegeneinander gewichtet.
- Das Hinflug-Rückflug-Prinzip in Hub-Systemen wird berücksichtigt.

Der subjektive Zeitwert (*value of time*) von unterschiedlichen Passagiertypen, beispielsweise zwischen Privat- und Geschäftsreisenden, wird nicht berücksichtigt (Douglas & Miller, 1974; Hansen, 2002; Swaroop et al., 2012). Die Zeit jedes Passagiers als gleichwertig anzusehen unterstützt die gemeinwohlorientierte Perspektive eines Gesetzgebers.

3.2.4 Veränderung der Netto-Reisezeit

Im vorherigen Unterabschnitt 3.2.3 wurde gezeigt, wie auf Flugeinzelebene Schedule Delay und ATFM-Verspätung gegeneinander abgewogen werden. Für die Bewertung von Frequenzregulierung für sämtliche Passagiere im Lufttransportsystem ist entscheidend, welche Veränderungen sich für den Schedule Delay und ATFM-Verspätungen in Summe ergeben. Hierfür wird der Parameter der Netto-Reisezeit eingeführt, dessen Veränderung nach Durchführung von Frequenzregulierung in Kapitel 5 untersucht wird.

Es wird zwischen der über sämtliche frequenzreduzierte Strecken kumulierten Veränderung der Netto-Reisezeit $TCNTT_{my}$ (*total change in net travel time*) und der gewichteten Veränderung der Netto-Reisezeit $WTCNTT_{my}$ (*weighted total change in net travel time*) unterschieden (Gleichung 3.12). Analog zur Definition des zeitlichen Grenznutzens einer Frequenz $MTUF_{rmy}$ (Gleichung 3.10) ergibt sich letztere mittels Gewichtung des Faktors d.

$ATIAPAD_{my}$ (*accumulated total increase in average passenger ATFM delay*) ist hierbei der kumulierte Anstieg der Gesamt-Passagier-ATFM-Verspätung und $ATDASD_{my}$ (*accumulated total decrease in total average schedule delay*) der kumulierte Rückgang des Gesamt-Schedule Delays jeder reduzierten Frequenz. Mittels der Vorzeichen wird berücksichtigt, dass die ATFM-Verspätung ab- und der Schedule Delay insgesamt zunimmt. Ein negativer Wert von $TCNTT_{my}$ oder $WTCNTT_{my}$ bedeutet folglich eine Verkürzung der Reisezeit.

$$TCNTT_{my} = -ATIAPAD_{my} + ATDASD_{my} \tag{3.12a}$$

$$WTCNTT_{my} = -ATIAPAD_{my} * d + ATDASD_{my} \tag{3.12b}$$

Basierend auf Gleichung 3.4 und Gleichung 3.9 berechnen sich $ATDASD_{my}$ und $ATIAPAD_{my}$ in Gleichung 3.13 jeweils als Summe von $TDASD_{rmy}$ und $TIAPAD_{rmy}$ über sämtliche reduzierte $rrmy$ (*reduced rmy*, Gleichung 3.21). Der Laufindex des zweiten Summenzeichens zählt dabei rückwärts von der initialen Frequenz $F_{rrmy_{ref}}$ bis zum reduzierten Wert F_{rrmy} bzw. von der initialen Fluganzahl $D_{my_{ref}}$ bis zum reduzierten Wert D_{my}. Außerdem erfolgt eine Multiplikation mit der Anzahl der Tage im Monat dpm_m (*days per month*), um die Werte in der Ergebnisauswertung auf Monatsebene auszuweisen.

$$ATDASD_{my} = \sum_{rrmy \in RRMY} \sum_{i=F_{rrmy_{ref}}}^{F_{rrmy}} TDASD_i * dpm_m \tag{3.13a}$$

$$ATIAPAD_{my} = \sum_{rrmy \in RRMY} \sum_{i=D_{my_{ref}}}^{D_{my}} TIAPAD_i * dpm_m \tag{3.13b}$$

Bei der Berechnung von $ATIAPAD_{my}$ kommt die methodische Vereinfachung zum Tragen, die aus der Modellierung streckenspezifischer Überlastungszustände mittels des Gewichtungsfaktors c_{rmy} resultiert (Gleichung 3.8). Diese führt dazu, dass $ATIAPAD_{my}$ variieren kann, je nachdem in welcher Reihenfolge Frequenzen auf welchen Strecken reduziert werden. Der dadurch auftretende Fehler ist insgesamt gering, eine Quantifizierung dessen findet im Zusammenhang mit der Ergebnisauswertung in Abschnitt 5.2 statt.

3.3 Frequenzregulierungsansätze

Abgeleitet aus den Ausführungen in Abschnitt 3.1 sowie den in Abschnitt 3.2 eingeführten Parametern und Funktionen ist in diesem Abschnitt 3.3 die Entwicklung unterschiedlicher Frequenzregulierungsansätze beschrieben. Diese werden in Unterabschnitt 3.3.1 zuerst inhaltlich erläutert und anschließend in Unterabschnitt 3.3.2 mathematisch-algorithmisch modelliert.

3.3.1 Beschreibung der Frequenzregulierungsansätze

Jeder Frequenzregulierungsansatz beschreibt einen alternativen Weg, um zu einer konkreten Anzahl an Frequenzen auf einer Strecke zu gelangen und berücksichtigt in unterschiedlicher Ausprägung die regulatorischen Ziele (Abschnitt 3.1). Die Frequenz auf einer Strecke wird dabei auch als Zielregulierungsgröße bezeichnet. Diese wird entweder direkt oder über Ersatzregulierungsgrößen gesteuert.

Den Ansätzen ist gemein, dass sie die Anzahl an Frequenzen auf einer Strecke über sämtliche Airlines hinweg vorgeben. Dieses regulatorisch relativ harte Vorgehen (Abschnitt 3.1) dient in der Analyse dazu, das maximale ökologisch-ökonomisch-temporale Potenzial von Frequenzregulierung zu quantifizieren (Abbildung 1.3). In Abschnitt 5.9 werden regulatorisch weichere Möglichkeiten der Frequenzregulierung als Ausblick und unter Berücksichtigung der erarbeiteten Ergebnisse diskutiert.

Die bewusste Auswahl möglichst verschiedener Vorgehensweisen dient dazu, das Potenzial von Frequenzregulierung breit zu untersuchen. Dennoch stellen die untersuchten Ansätze nur eine Auswahl an Möglichkeiten dar, die nicht als vollumfänglich anzusehen ist. Es wird in der folgenden Beschreibung zwischen Frequenzregulierungsansätzen mit und ohne Kompensation unterschieden.

(a) Ansätze ohne Kompensation

Ansatz *Gedeckelte Frequenz*

Bei diesem Ansatz wird die maximale Frequenz für sämtliche Strecken auf einen statisch festgelegten Wert gesetzt. Für die vorliegende Arbeit wird angelehnt an Hansen et al. (2001) ein Wert von 15 Flüge pro Tag und Richtung verwendet. Bei Europa-typischen täglichen Flughafenbetriebsdauern von 16 bis 18 Stunden entspricht dies durchschnittlich knapp einem Stundentakt, wie er bereits heute auf Kurz- und Mittelstrecken (Sabre Airline Solutions, 2019) sowie auch im Fernverkehr der Deutschen Bahn zu finden ist (Deutsche Bahn AG, 2015, 2019). Dieser Ansatz stellt ein konzeptionell relativ einfaches Vorgehen dar, bei dem die Zielregulierungsgröße direkt gesteuert wird. Es werden weder die Passagierzahlen noch die Passagiertypen (Direkt- oder Umsteigepassagiere) berücksichtigt. Ebenso wird nicht betrachtet, inwiefern die genutzten Luftverkehrsinfrastrukturen überlastet sind.

Ansatz *Mindest-Schedule Delay*

Bei diesem Ansatz wird als Ersatzregulierungsgröße ein mindestens geltender Schedule Delay definiert, der für sämtliche Strecken gilt. Dies entspricht einer durchschnittlichen Mindestwartezeit bis zum nächsten Flug, die als zumutbar erachtet wird, z. B. 20 Minuten. Da Schedule Delay mit zunehmender Frequenz abnimmt, wird ein Mindestwert festgelegt, der nicht unterschritten werden soll. Dieser Ansatz lässt sich als eine differenzierte Weiterentwicklung des Vorherigen betrachten, da die Passagieranzahlen und -typen für jede Strecke berücksichtigt werden. Er bezieht allerdings nicht das Ausmaß der Überlastung der betroffenen Luftverkehrsinfrastrukturen mit ein.

Ansatz *Maximale ATFM-Verspätung*

Bei diesem Ansatz wird eine zu erreichende durchschnittliche Verspätung im Gesamtsystem (dem EUROCONTROL-Raum) als Ersatzregulierungsgröße definiert, z. B. eine Reduzierung von 20% unterhalb des aktuellen bzw. vorhergesagten Niveaus. Es handelt sich folglich um einen maximal zulässigen Wert, der nicht übertroffen werden soll. Dabei werden Frequenzen in absteigender Reihenfolge auf den Strecken mit der größten Verspätung und den höchsten Frequenzen reduziert. Dieser Ansatz fokussiert überlastete Infrastruktur. Er berücksichtigt das Passagierbedürfnis nach Konnektivität nur

insofern, als die Anzahl der Frequenzen auf einer Strecke in die Reihenfolge der Frequenzreduzierung einfließt. Die Vorgabe einer durchschnittlichen Verspätung ähnelt der Bemessung der Anzahl von verfügbaren Slots an einem Flughafen (siehe Unterabschnitt 2.3.2 und Unterabschnitt 3.2.2).

Ansatz *Positiver Grenznutzen*

Bei diesem Ansatz wird der zeitliche Grenznutzen einer Frequenz $MTUF_{rmy}$ (Gleichung 3.10) als Ersatzregulierungsgröße verwendet, angelehnt an Hansen (2002). Dieser ergibt sich aus der Differenz zwischen ihrer marginalen Reduzierung im Gesamt-Schedule Delay auf einer Strecke und dem marginalen Anstieg in Gesamt-Passagier-ATFM-Verspätung im EUROCONTROL-Raum. Wenn der zeitliche Grenznutzen negativ ist, wird die Frequenz reduziert. Dies entspricht auf Abbildung 3.4 beispielsweise sämtlichen Flügen mit einem Wert, der geringer als null ist. Mit diesem Ansatz wird sowohl dem Passagierbedürfnis nach Konnektivität als auch dem Fokus auf überlastete Infrastruktur Rechnung getragen. Durch die Abwägung des zeitlichen Nutzens der Passagiere auf einer Strecke mit den Kosten aller übrigen Passagiere im Lufttransportsystem lässt er sich als „gemeinwohlorientiert in der zeitlichen Dimension“ bezeichnen, ist jedoch konzeptionell der komplexeste. Frequenzen mit einem negativen zeitlichen Grenznutzen werden im Folgenden auch als „schädlich“ bezeichnet.

(b) Ansätze mit Kompensation

Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, ist die direkte Regulierung des eingesetzten Flottenmixes kaum zweckmäßig. Basierend auf den Erkenntnissen aus Abschnitt 2.2 sollten zur Berücksichtigung der Teilziele der Emissions- und Kostenreduzierung jedoch die tendenziell höheren Sitzplatzemissionen und -kosten von *Twin-Aisle*-Flugzeugen auf der Kurzstrecke beachtet werden. Ansonsten könnten die vorgegebenen Zielfrequenzen dazu führen, dass mit der Maßgabe konstanter Sitzplatzkapazität auf einer Strecke zu große Flugzeuge eingesetzt werden müssten.

Dazu werden die beschriebenen Frequenzregulierungsansätze dahingehend erweitert, dass die maximale durchschnittliche Flugzeuggröße begrenzt wird, die sich nach der Frequenzreduzierung ergibt. Wichtig ist hierbei, dass diese Begrenzung zunächst nur einen Effekt auf die Bestimmung der Zielfrequenz hat. Erst im Flottenzuweisungsschritt von FRED wird ein konkreter Flottenmix einer Strecke zugewiesen. Dessen Durchschnittsgröße liegt maximal bei dem begrenzten Wert, die Sitzplatzanzahlen einzelner eingesetzter Flugzeugtypen können jedoch darüber und darunter liegen (Unterabschnitt 3.6.2, Unterabschnitt 3.6.3).

Sofern nicht anders angegeben, wird die durchschnittliche Flugzeuggröße auf 220 Sitze pro Flug begrenzt, was etwa dem *A321neo* als größtem verfügbaren *Single-Aisle*-Flugzeug entspricht (Tabelle A.1). Die Einbeziehung einer durchschnittlichen

Flugzeuggröße wird auch in Hansen et al. (2001) diskutiert, allerdings als Mindestwert und im US-amerikanischen Umfeld mit deutlich kleineren durchschnittlichen Flugzeuggrößen als im EUROCONTROL-Raum.

Strecken, auf denen die Frequenz nicht (weiter) reduziert werden kann, da ansonsten das Flugzeuggrößenlimit überschritten würde, werden durch Frequenzreduzierung auf anderen Strecken kompensiert, die dieses Limit (noch) nicht erreichen. Damit wird bezweckt, dass im Ergebnis die gleiche bzw. eine ähnliche Anzahl an Frequenzen reduziert wird und gleichzeitig die ökologisch-ökonomischen Ziele berücksichtigt werden. Zusätzlich lassen sich damit flughafenspezifische Flugzeuggrößenlimits berücksichtigen, wie sie beispielsweise am Flughafen *London City* existieren.

Es wird damit in Kauf genommen, dass auf einigen Strecken weiterhin höhere Frequenzen angeboten werden, wenn dort bereits vergleichsweise große Flugzeuge eingesetzt werden. Im Umkehrschluss wird auf Strecken mit niedrigeren Frequenzen, aber auch geringeren Flugzeuggrößen, Frequenzreduzierung durchgeführt. Prinzipbedingt erfolgt Frequenzreduzierung dadurch dezentraler. So ist die durchschnittliche reduzierte Anzahl Frequenzen pro Strecke geringer, dafür ist insgesamt eine größere Zahl unterschiedlicher Strecken betroffen. Das eingegrenzte Flugzeuggrößenspektrum führt darüber hinaus zu einem homogeneren Flottenmix.

Der Begriff *Kompensation* ist angelehnt an die im Luftverkehr zunehmend Verbreitung findende Möglichkeit, CO_2-Emissionen beispielsweise durch Aufforstung auszugleichen (Gössling et al., 2007). Die Kompensation erfolgt bei den folgenden Frequenzregulierungsansätzen zwecks Konsistenz allerdings auf Basis der verschiedenen Ziel- oder Ersatzregulierungsgrößen. Im Folgenden ist beschrieben, wie diese Kompensation für jeden der oben beschriebenen Ansätze funktioniert.

Ansatz *Gedeckelte Frequenz mit Kompensation*

Auf jeder Strecke wird unter Beibehaltung konstanter Sitzplatzkapazität die Frequenz soweit reduziert, bis die Zielfrequenz oder das Flugzeuggrößenlimit erreicht ist. Wird die Zielfrequenz nicht erreicht, wird die Differenz zwischen der Zielfrequenz und der Frequenz, bis zu der reduziert werden kann, zur späteren Kompensation zunächst kumuliert. Anschließend wird die Zielfrequenz um eins verringert und jede noch reduzierbare Strecke wird auf diesen Wert gesetzt. Dies erfolgt so lange, ggf. auch durch weitere schrittweise Reduzierung der Zielfrequenz, bis sämtliche kumulierte Frequenzen kompensiert sind.

Ansatz *Mindest-Schedule Delay mit Kompensation*

Analog zum Ansatz *Gedeckelte Frequenz mit Kompensation* werden zunächst sämtliche Strecken, auf denen der Mindest-Schedule Delay unterschritten

wird, reduziert. Bei nicht bzw. nur teilweise reduzierbaren Strecken wird die Differenz zwischen dem Mindest-Schedule Delay und dem Schedule Delay, bis zu dem reduziert werden konnte, kumuliert. Im Anschluss erfolgt die Kompensation durch Reduzierung weiterer Strecken, deren Schedule Delay über dem Zielwert liegt.

Ansatz *Maximale ATFM-Verspätung mit Kompensation*

Bei diesem Ansatz beginnt die Frequenzreduzierung auf der Strecke mit der höchsten Frequenz und der größten ATFM-Verspätung, analog zum Ansatz ohne Kompensation. Strecken, auf denen das Flugzeuggrößenlimit überschritten würde, werden nicht reduziert und wirken dementsprechend auch nicht auf die Reduzierung der durchschnittlichen Verspätung im Gesamtsystem hin. Die Reduzierung erfolgt so lange, bis die festgelegte maximale ATFM-Verspätung erreicht ist.

Ansatz *Positiver Grenznutzen mit Kompensation*

Analog zum Ansatz ohne Kompensation ist es das Ziel dieses Ansatzes, sämtliche Frequenzen mit einem negativen zeitlichen Grenznutzen zu reduzieren. Ist dies bei einzelnen Frequenzen nicht möglich, wird deren negativer zeitlicher Grenznutzen kumuliert und später durch Reduzierung von Frequenzen mit einem positiven Grenznutzen kompensiert.

Damit werden insgesamt acht verschiedene Ansätze untersucht. Tabelle 3.2 fasst die vorgestellten Ansätze zusammen und zeigt qualitativ, inwiefern diese die regulatorischen Ziele Konnektivität, Überlastung, Emissionen/Kosten und Simplizität in ihrer Herangehensweise prinzipiell berücksichtigen. Die Tabelle trifft keine Aussage, wie gut die Ansätze diese Ziele auf Ergebnisebene auch erfüllen. Dabei wird deutlich, dass der Kompensationsmechanismus zwar eine Berücksichtigung von Emissionen bewirkt, allerdings die regulatorische Simplizität verringert. Die Berücksichtigung der regulatorischen Ziele Konnektivität und Überlastung bleibt von der Kompensation jedoch unberührt.

TAB. 3.2: Frequenzregulierungsansätze mit qualitativer Berücksichtigung der regulatorischen Ziele Konnektivität, Überlastung, Emissionen/Kosten und Simplizität innerhalb ihrer Methodik (– – geringe bis ++ hohe Merkmalsausprägung)

Bezeichnung	Konnektivität	Überlastung	Kompens.	Emissionen/ Kosten	Simplizität
Gedeckelte Frequenz	–	– –	N	– –	++
			J	++	+
Mindest-Schedule Delay	++	–	N	– –	+
			J	++	–
Max. ATFM-Verspätung	–	++	N	– –	+
			J	++	–
Positiver Grenznutzen	++	++	N	– –	–
			J	++	– –

3.3.2 Modellierung der Frequenzregulierungsansätze

In diesem Unterabschnit ist beschrieben, wie die Frequenzregulierungsansätze des Frequenzreduzierungsschritts in FRED modelliert wurden. Diese wurden außerdem in der objektorientierten Programmiersprache *JAVA* implementiert.

Die Formulierung erfolgt in einer Mischung aus mathematischer Notation und grafischen Aktivitätsdiagrammen, die an den *Unified Modeling Language*-Standard (UML) angelehnt sind (Object Management Group, 2017). UML ist ein Visualisierungsstandard zur Dokumentation von objektorientiert programmierter Software.

Diese gewählte Formulierungsweise ist ein zweckmäßiges Vorgehen, um die inhaltlich-algorithmisch-mathematische Funktionsweise der Frequenzregulierungsansätze kompakt darzustellen sowie deren Unterschiede zu verdeutlichen. Sie findet ebenfalls in zahlreichen themenverwandten Publikationen Anwendung (Dzikus et al., 2015; Evans & Schäfer, 2011; Evans & Schäfer, 2014; Madas & Zografos, 2006, 2008, 2010; Vaze & Barnhart, 2012a).

Die Darstellungen fokussieren auf die wesentliche Funktionsweise der Ansätze, so dass einige Modellschritte nicht explizit aufgeführt sind (z. B. die Berechnung der sich verändernden ATFM-Verspätung und Flugzeuggrößen oder implementierungstechnische Besonderheiten zum schnelleren Programmdurchlauf). Dabei werden folgende algorithmische Strukturen in den Ansätzen verwendet, teils in verschachtelter Form:

- *for*-Schleife: Eine *for*-Schleife wird so lange ausgeführt, bis eine Laufvariable einen bestimmten Wert erreicht. Alternativ kann über sämtliche Elemente einer bestimmten Menge iteriert werden. Im Folgenden ist dies häufig die Indexmenge RMY.
- *if*-Anweisung: Bei einer *if*-Anweisung wird ein bestimmtes Kriterium geprüft. Je nach Ergebnis der Prüfung verfährt das Programm unterschiedlich weiter.
- *while*-Schleife: Eine *while*-Schleife wird so lange ausgeführt, wie ein bestimmtes Kriterium erfüllt bzw. nicht erfüllt ist z. B. die Erreichung eines Zielwertes. Die Prüfung des Kriteriums erfolgt zu Beginn des Durchlaufs.

Aufbauend zu den am Anfang von Abschnitt 3.2 eingeführten Indizes dienen die folgenden Indexmengen sowie Funktionen zur mathematischen Formulierung der Frequenzregulierungsansätze. Bei den Indexmengen handelt es sich um Kombinationen der Indizes r, m und y, denen mittels der Funktionen Werte für unterschiedliche Parameter zugeordnet werden.

Mengen:

MY	Menge sämtlicher Monat-Jahr-Kombinationen my, z. B. *Juli-2030*
RMY	Menge sämtlicher Strecke-Monat-Jahr-Kombinationen rmy, z. B. *FRA-LHR-Juli-2030*

Funktionen:

$F : RMY \rightarrow \mathbb{N}$	Zuordnung einer Frequenz F_{rmy} zu jedem $rmy \in RMY$
$D : MY \rightarrow \mathbb{N}$	Zuordnung einer täglichen Anzahl Flüge im EUROCONTROL-Raum D_{my} zu jedem $my \in MY$

(a) Ansätze ohne Kompensation

Auf Abbildung 3.5 ist das Funktionsprinzip vom Ansatz *Gedeckelte Frequenz* dargestellt. Dieser wurde als *for*-Schleife implementiert, in der einmal über jedes $rmy \in RMY$ iteriert wird. Die Zahlen bezeichnen einzelne Schritte, Knoten sowie Objekte und sind im Folgenden erklärt:

1. Startknoten eines Aktivitätsdiagramms gemäß UML-Notation;
2. Eingangsdatenobjekt;
3. Frequenz F_{rmy} für erste (erste Iteration) bzw. nächste (alle weiteren Iterationen) $rmy \in RMY$ lesen;

4. Überprüfung, ob die Frequenz die Maximalfrequenz F^{max} überschreitet; wenn ja, weiter mit Schritt 5; wenn nein, weiter mit Schritt 7.

5. Die Anzahl Flüge im EUROCONTROL-Raum in diesem my wird um die Anzahl zu reduzierender Frequenzen vermindert;

6. Die Frequenz wird auf dieser rmy auf die Maximalfrequenz F^{max} gesetzt;

7. Überprüfung ob sämtliche $rmy \in RMY$ geprüft wurden; wenn ja, weiter mit Schritt 8, wenn nein, zurück zu Schritt 3;

8. Ausgangsdatenobjekt für den nachfolgenden Flottenzuweisungsschritt;

9. Endknoten eines Aktivitätsdiagramms gemäß UML-Notation.

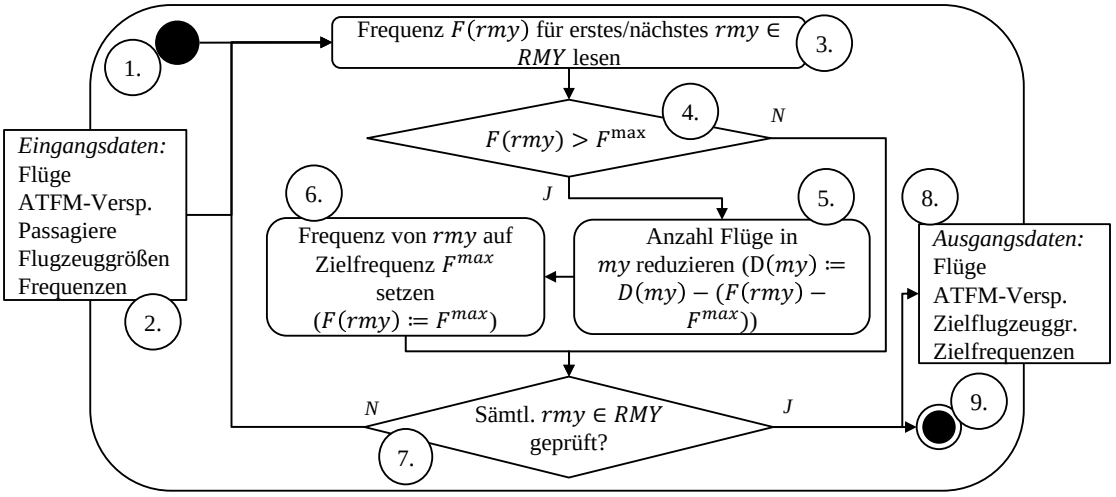

Abb. 3.5: Aktivitätsdiagramm des Ansatzes *Gedeckelte Frequenz*

Abbildung 3.6 zeigt das Funktionsprinzip des Ansatzes *Mindest-Schedule Delay*. Dieser ist relativ ähnlich zum Ansatz *Gedeckelte Frequenz* und wurde ebenfalls als *for*-Schleife implementiert, die einmal über jedes $rmy \in RMY$ iteriert. Für jedes $rmy \in RMY$ wird der durchschnittliche Schedule Delay ASD_{rmy} dabei als Mittelwert beider Richtungen bestimmt, da es leichte Unterschiede in der Passagieranzahl und den jeweiligen -typen geben kann. Dementsprechend erfolgt die Frequenzreduzierung direkt in beide Richtungen eines rmy und auch die Anzahl Flüge im EUROCONTROL-Raum im zugehörigen my wird um zwei reduziert.

Ein wesentlicher implementierungsseitiger Unterschied besteht darin, dass mittels einer inneren *while*-Schleife die Frequenz auf jedem einzelnen $rmy \in RMY$ sukzessive reduziert wird, bis der vorgegebene Mindest-Schedule Delay ASD^{min} erreicht wird. Aufgrund des ganzzahligen Charakters von Frequenzen wird dieser in der Regel nicht genau erreicht, sondern (geringfügig) überschritten.

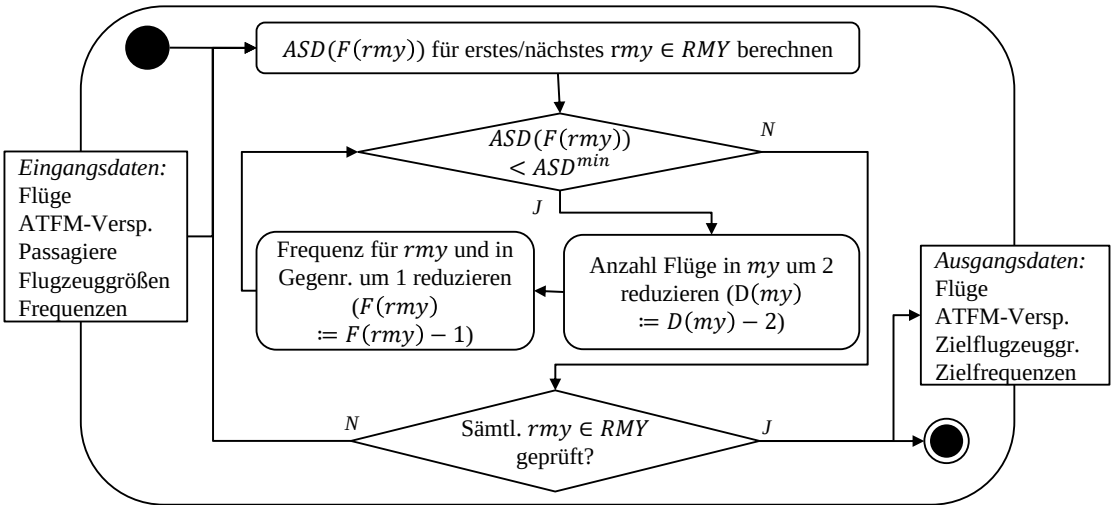

Abb. 3.6: Aktivitätsdiagramm des Ansatzes *Mindest-Schedule Delay*

Bei den Frequenzregulierungsansätzen *Gedeckelte Frequenz* und *Mindest-Schedule Delay*, jeweils ohne und auch mit Kompensation (siehe unten), ist die konkrete Reihenfolge, nach der auf welchen Strecken Frequenzen reduziert werden, aus inhaltlicher Sicht irrelevant. Aufgrund der vereinfachten Modellierung strecken- und monatsspezifischer Verspätungszustände mittels des Überlastungsfaktors c_{rmy} (Gleichung 3.8) kann die Veränderung der durchschnittlichen ATFM-Verspätung allerdings leicht variieren, je nach konkreter Reduzierungsreihenfolge eines Durchlaufs. Implementierungsseitig wird sie daher jedes Mal zufällig gewählt.

Die (geringfügige) Streuung der Ergebniswerte, die hierdurch entsteht, hängt von den verwendeten Eingangsdaten sowie Randbedingungen ab und wird daher in der Ergebnisdiskussion (Abschnitt 5.2, Abschnitt 5.3) quantifiziert. Alternativ zu der zufälligen Reduzierungsreihenfolge, ließe sich diese auf Basis weiterer Kriterien festlegen (z. B. unter Einbeziehung der Passagieranzahl auf einer Strecke) allerdings mit der Folge erhöhter regulatorischer Komplexität.

Abbildung 3.7 zeigt das Funktionsprinzip des Ansatzes *Maximale ATFM-Verspätung*. Dieser wurde als *while*-Schleife implementiert. Um die Beziehung zwischen Mengen auf Monat-Jahr- und Strecke-Monat-Jahr-Ebene herzustellen, erfolgt zunächst die Definition der Funktion $my(rmy)$. Diese ordnet jeder rmy den zugehörigen my zu (Gleichung 3.14).

$$my : RMY \rightarrow MY \tag{3.14}$$

Die zur erreichenden durchschnittlichen maximalen ATFM-Verspätungen werden mit der Funktion $AAD^{max}(my)$ modelliert, die jedem my die maximal zulässige positive ATFM-Verspätung AAD^{max} zuordnet (Gleichung 3.15).

$$AAD^{max} : MY \rightarrow \mathbb{R}^{>0} \tag{3.15}$$

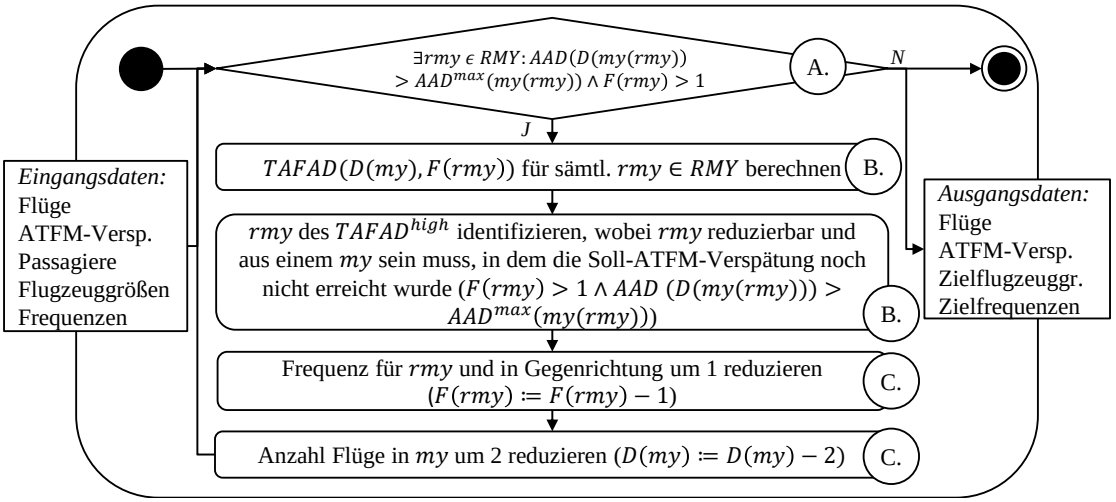

Abb. 3.7: Aktivitätsdiagramm des Ansatzes *Maximale ATFM-Verspätung*

Außerdem wird die Gesamt-ATFM-Verspätung sämtlicher Frequenzen an einem Tag in beiden Richtungen einer Strecke $TAFAD_{rmy}$ (*total average flight ATFM delay*) gemäß Gleichung 3.16 eingeführt. Diese dient als Bemessungsgrundlage zur Auswahl der zu reduzierenden Strecken (siehe unten).

$$TAFAD_{rmy} = AAD_{my} * (F^{out}_{rmy} * c^{out}_{rmy} + F^{in}_{rmy} * c^{in}_{rmy}) \qquad F_{rmy} \in \{1,...,n\} \tag{3.16}$$

Mit den Buchstaben in Abbildung 3.7 sind die folgenden Unterschiede im Vergleich zu den beiden vorherigen Ansätzen markiert:

A. Im Kopf der *while*-Schleife wird geprüft, ob sämtliche Kriterien erfüllt sind, damit die Schleife weiterläuft. In diesem Fall muss mindestens ein $my(rmy)$ existieren, in dem die Zielverspätung noch nicht erreicht ist und in dem mindestens eine reduzierbare Frequenz vorhanden ist. Die my-spezifische Differenzierung ist notwendig, da AAD^{max} aufgrund saisonal schwankender ATFM-Verspätungen für jedes my unterschiedlich vorgegeben wird.

B. Die Reihenfolge, nach der die Frequenzen reduziert werden, basiert auf dem Parameter $TAFAD_{rmy}$ (Gleichung 3.16). Es wird das rmy identifiziert, auf dem $TAFAD_{rmy}$ den größten Wert annimmt. Zudem darf die maximale ATFM-Verspätung in dem gewählten my noch nicht erreicht sein und die zugehörige Frequenz muss reduzierbar sein. $TAFAD_{rmy}$ ist hierbei eine Hilfsgröße, um das rmy zu identifizieren, auf dem die höchste durchschnittlichen systemweite ATFM-Verspätung durch sämtliche Frequenzen entsteht

(Gleichung 3.16). Noch konsistenter wäre es, den einzelnen Flug zu identifizieren, der die durchschnittliche systemweite ATFM-Verspätung am stärksten treibt. Die Funktion zur Bestimmung des inkrementellen Anstiegs eines bestimmten Flugs $IAAD_{rmy}$ kann nicht verwendet werden, weil ansonsten immer die gleiche Strecke mit dem höchsten c_{rmy} gewählt würde. Mit dem gewählten Vorgehen werden folglich besonders die Strecken reduziert, auf denen hohe ATFM-Verspätungen entstehen *und* auf denen es viele Frequenzen gibt.

C. Da $TAFAD_{rmy}$ beide Richtungen einer Strecke berücksichtigt (Gleichung 3.16), werden die Frequenzen und Flüge in jeder Iteration immer in beiden Richtungen reduziert. Damit wird vermieden, dass nach der Frequenzreduzierung eine unterschiedliche Anzahl Frequenzen in beide Richtungen einer Strecke vorgegeben wird.

Auf Abbildung 3.8 ist das Funktionsprinzip vom Ansatz *Positiver Grenznutzen* dargestellt. Dieser wurde ebenfalls als *while*-Schleife implementiert. Diese wird ausgeführt, bis der geringste zeitliche Grenznutzen $MTUF_{rmy}$ sämtlicher $rmy \in RMY$ positiv ist. Das Prinzip ähnelt damit dem Ablauf des Ansatzes *Maximale ATFM-Verspätung*.

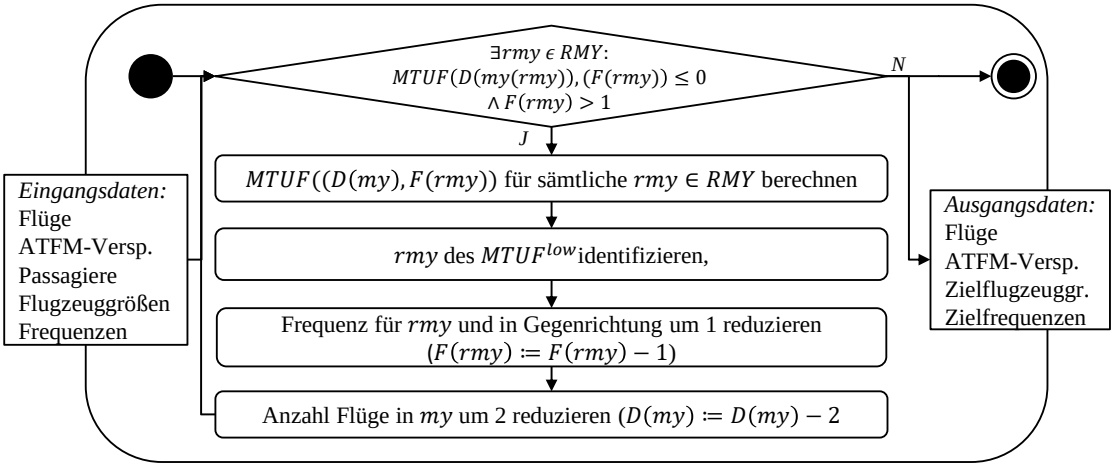

Abb. 3.8: Aktivitätsdiagramm des Ansatzes *Positiver Grenznutzen*

(b) Ansätze mit Kompensation

Das Vorgehen für die Ansätze mit Kompensation ist zweigeteilt: Zuerst erfolgt die initiale Frequenzreduzierung, bei der auf den betroffenen rmy die Frequenzen reduziert werden, bis die maximale durchschnittliche Flugzeuggröße AS^{max} (*average aircraft size*) erreicht ist. Diese entspricht in den meisten Fällen dem definierten Wert von 220 Sitzen pro Flug (Unterabschnitt 3.3.1) oder in Ausnahmefällen dem geringeren flughafenspezifischen Flugzeuggrößenlimit. Nicht (weiter) reduzierbare

Frequenzen werden kumuliert. Im zweiten Schritt erfolgt die Kompensation der kumulierten Frequenzen mittels Frequenzreduzierung auf anderen rmy. Eine Ausnahme bildet der Ansatz *Maximale ATFM-Verspätung*, bei dem diese Zweiteilung nicht erforderlich ist (siehe unten).

Kumulation und Kompensation erfolgen dabei my-spezifisch. Das bedeutet, eine nicht reduzierbare Frequenz eines bestimmten my muss durch Reduzierung einer anderen Frequenz im gleichen my kompensiert werden. Andernfalls könnte es beispielsweise vorkommen, dass nicht reduzierbare Frequenzen im Sommer kumuliert und mit anderen Frequenzen im Winter kompensiert würden, was nicht zur Verspätungsreduzierung in der jeweiligen Jahreszeit beitragen würde.

Auch bei den Ansätzen mit Kompensation bleibt die angebotene Zielsitzplatzkapazität $TASC_{rmy}$ (*target available seat capacity*) auf einer Strecke stets konstant. Zur Formulierung des Kumulations- und Kompensationsprinzips des Ansatzes *Gedeckelte Frequenz mit Kompensation* wird die Funktion $AF(my)$ (*accumulated frequencies*) in Gleichung 3.17 eingeführt, die jeder Monat-Jahr-Kombination my die Anzahl kumulierter Frequenzen AF zuordnet. Zu Beginn der Iteration gilt $AF(my) = 0$ für sämtliche $my \in MY$.

$$AF : MY \rightarrow \mathbb{N} \tag{3.17}$$

Abbildung 3.9 stellt die Funktionsweise des Ansatzes *Gedeckelte Frequenz mit Kompensation* dar. Das Vorgehen besteht aus den folgenden Einzelschritten:

1. Startknoten eines Aktivitätsdiagramms gemäß UML-Notation;
2. Eingangsdatenobjekt;
3. Frequenz $F(rmy)$ für erste (erste Iteration) bzw. nächste (alle weiteren Iterationen) $rmy \in RMY$ lesen;
4. Überprüfung, ob die maximale Frequenz F^{max} überschritten wird; wenn ja, weiter mit Schritt 5; wenn nein, weiter mit Schritt 9;
5. Überprüfung, ob nach der Frequenzreduzierung die Zielflugzeuggröße unterhalb der zugelassenen Maximalflugzeuggröße AS^{max} liegt; wenn ja, weiter mit Schritt 6; wenn nein, weiter mit Schritt 8;
6. Reduzierung der Frequenz $F(rmy)$ um 1;
7. Reduzierung der Flüge $D(my)$ im EUROCONTROL-Raum um 1;
8. Die Anzahl nicht reduzierter Frequenzen (als Differenz zwischen der Zielfrequenz und der Frequenz, bis zu der reduziert werden konnte) in diesem my kumulieren;

9. Überprüfung, ob sämtliche $rmy \in RMY$ geprüft wurden; wenn ja, weiter mit Schritt 10, wenn nein, zurück zu Schritt 3;
10. Reduzierung der maximal zulässigen Frequenz um 1;
11. Überprüfung, ob die Zielfrequenz größer als null ist. Wenn nein (Abbruchbedingung), endet die Frequenzreduzierung vorzeitig und weiter mit Schritt 20;
12. Überprüfung, ob es (weitere) my mit zu kompensierenden Frequenzen gibt. Wenn ja, weiter mit Schritt 13; wenn nein, weiter mit Schritt 20;
13. Frequenz $F(rmy)$ für nächstes $rmy \in RMY$ lesen. Dabei muss rmy aus einem my stammen, in dem zu kompensierende Frequenzen vorhanden sind;
14. Überprüfung, ob die maximale Frequenz F^{max} überschritten wird; wenn ja, weiter mit Schritt 15; wenn nein, weiter mit Schritt 19;
15. Überprüfung, ob nach der Frequenzreduzierung die durchschnittliche Zielflugzeuggröße unterhalb der zugelassenen durchschnittlichen Maximalflugzeuggröße AS^{max} liegt; wenn ja, weiter mit Schritt 16; wenn nein, weiter mit Schritt 19;
16. Reduzierung der Frequenz $F(rmy)$ um 1 in beide Richtung des rmy. Dies ist notwendig, um sicherzustellen, dass zwei Richtungen einer Strecke stets die gleiche Frequenz aufweisen, da der Frequenzreduzierungsprozess innerhalb der Kompensation nach jeder Iteration enden kann (und nicht in jedem Fall über jedes $rmy \in RMY$ iteriert wird);
17. Reduzierung der Flüge $D(my)$ im EUROCONTROL-Raum um 2;
18. Nicht reduzierte Frequenzen aus der initialen Reduzierung kompensieren;
19. Überprüfung ob sämtliche $rmy \in RMY$ geprüft wurden; wenn ja, weiter mit Schritt 10, wenn nein, weiter mit Schritt 12;
20. Ausgangsdatenobjekt für den nachfolgenden Flottenzuweisungsschritt;
21. Endknoten eines Aktivitätsdiagramms gemäß UML-Notation.

Diese Beschreibung illustriert, dass das Kompensationsprinzip zu einer höheren algorithmischen und somit auch regulatorischen Komplexität führt (Tabelle 3.2). Die initiale Reduzierung erfolgt mittels Verschachtelung einer *for*- und einer *while*-Schleife. Die *for*-Schleife iteriert einmal über sämtliche $rmy \in RMY$ (Schritte 3 bis 9). Die *while*-Schleife reduziert die Frequenz innerhalb jeder Iteration um 1, bis die Maximalfrequenz oder die geringstmögliche Frequenz erreicht ist (Schritte 4 bis 7).

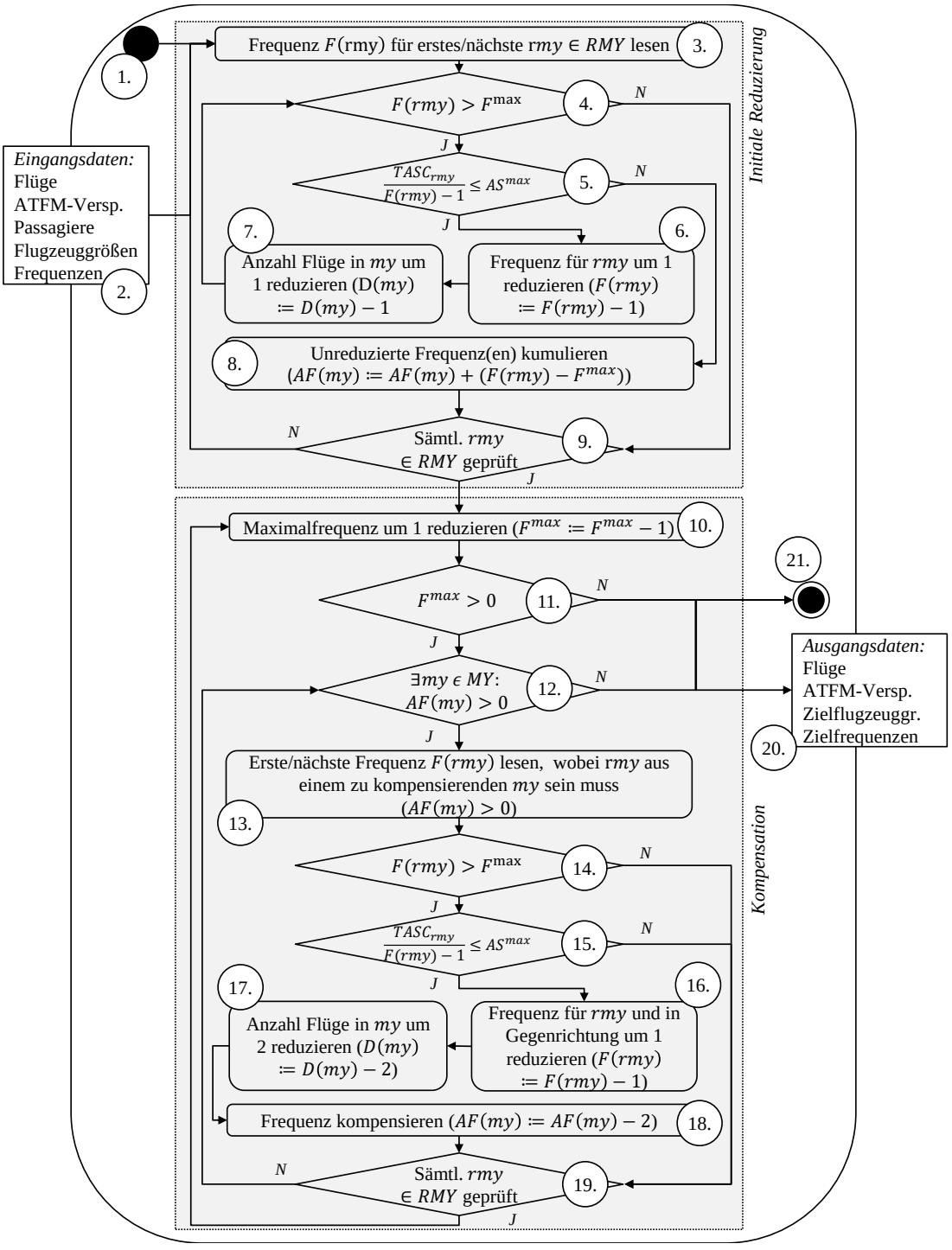

Abb. 3.9: Aktivitätsdiagramm des Ansatzes *Gedeckelte Frequenz mit Kompensation*

Alternativ wäre im Gegensatz zu diesem schrittweisen Vorgehen auch eine direkte Reduzierung bis auf die Maximalfrequenz oder die geringstmögliche Frequenz möglich. Zwecks Konsistenz mit dem Ansatz *Mindest-Schedule Delay mit Kompensation* sowie der Wiederverwertung implementierter Methoden zur Berechnung des Schedule Delays wurde jedoch das schrittweise Vorgehen gewählt.

Die Kompensation erfolgt mittels zweier verschachtelter *for*-Schleifen. Innerhalb der äußeren *for*-Schleife wird die Maximalfrequenz so lange sukzessive verringert (Schritte 10 bis 19), bis sämtliche $my \in MY$ kompensiert sind (Schritt 12). Innerhalb der inneren *for*-Schleife wird über sämtliche $rmy \in RMY$ iteriert (Schritte 12 bis 19). Nach jeder Reduzierung erfolgt die Prüfung, ob sämtliche kumulierte Frequenzen kompensiert sind.

In den meisten Fällen wird dadurch nicht für sämtliche Strecken die letzte vorgegebene Maximalfrequenz erreicht, bevor die Frequenzreduzierung endet. Auf welchen konkreten Strecken im letzten Kompensationsdurchlauf noch Frequenzen reduziert werden, hängt von der Iterationsreihenfolge der inneren *for*-Schleife ab, die analog zum initialen Reduzierungsdurchlauf sowie zu den Ansätzen ohne Kompensation (siehe oben) zufällig gewählt ist.

Die hierdurch entstehende Streuung der Ergebnisse ist insgesamt gering und wird in der Diskussion quantifiziert, da sie von den verwendeten Eingangsdaten sowie Randbedingungen abhängt (Abschnitt 5.2, Abschnitt 5.3). Dieses Vorgehen ist dennoch methodisch sauberer als das Reduzieren sämtlicher Strecken auf die letzte Maximalfrequenz, da somit exakt die gleiche Anzahl Frequenzen reduziert wird wie beim Ansatz *Gedeckelte Frequenz*.

Die Kumulation und Kompensation für *Mindest-Schedule Delay mit Kompensation* erfolgt über die Funktion $ATASD(my)$ (*accumulated total average schedule delay*), die in Gleichung 3.18a formuliert ist. Zu Beginn der Iteration gilt $ATASD(my) = 0$ für sämtliche $my \in MY$. Zudem wird der Parameter $TASD^{min}$ eingeführt, der den Mindest-Gesamt-Schedule Delay darstellt, der sich aus dem vorgegebenen Mindest-Schedule Delay ASD^{min} und den Passagieranzahlen PAX^{d}_{rmy} sowie PAX^{c}_{rmy} auf einer Strecke ergibt (Gleichung 3.18b). Entsprechend ist der geringste Gesamt-Schedule Delay $TASD^{low}$ definiert, der auf dem niedrigsten durchschnittlichen Schedule Delay ASD^{low} in einer Iteration basiert (Gleichung 3.18c).

$$ATASD : MY \rightarrow \mathbb{R} \tag{3.18a}$$

$$TASD^{min} = ASD^{min} * (PAX^{d}_{rmy} + PAX^{c}_{rmy}) \tag{3.18b}$$

$$TASD^{low} = ASD^{low} * (PAX^{d}_{rmy} + PAX^{c}_{rmy}) \tag{3.18c}$$

Um zwischenzuspeichern, welche rmy nicht weiter reduzierbar sind, wird die Menge NR (*non-reducible*) definiert, die eine Teilmenge von RMY ist (Gleichung 3.19). Zu Beginn der Iteration gilt $NR = \emptyset$. Jedes rmy, auf dem die durchschnittliche Zielflugzeuggröße erreicht wurde, wird NR hinzugefügt und bei allen weiteren Iterationen nicht mehr betrachtet.

$$NR \subseteq RMY \tag{3.19}$$

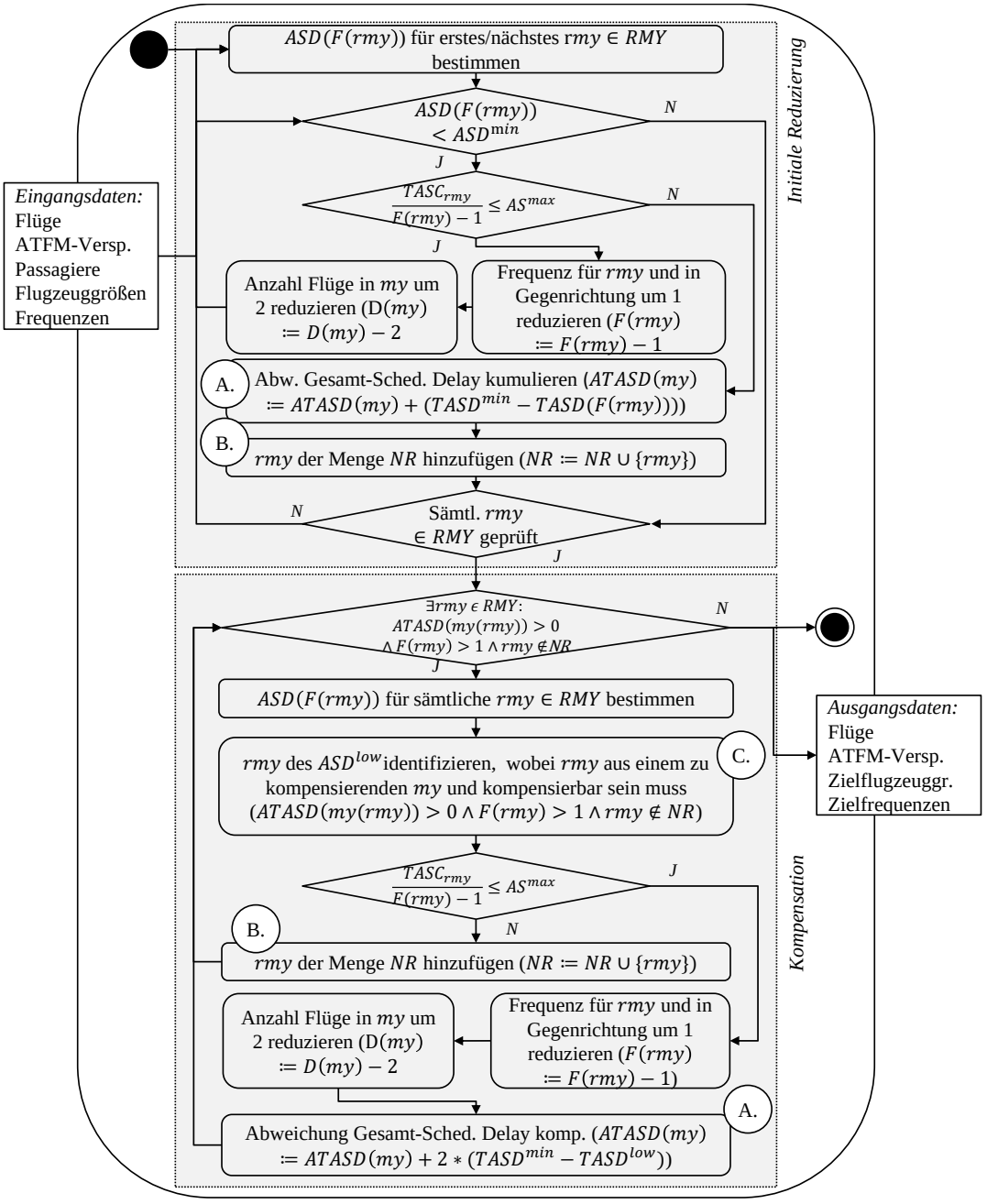

Abb. 3.10: Aktivitätsdiagramm des Ansatzes *Mindest-Schedule Delay mit Kompensation*

Abbildung 3.10 zeigt den Ansatz *Mindest-Schedule Delay mit Kompensation*. Mit den Buchstaben in der Abbildung sind die folgenden Unterschiede im Vergleich zum Ansatz *Gedeckelte Frequenz mit Kompensation* markiert.

A. Die Kumulation und Kompensation erfolgen auf Basis der Abweichung zwischen dem Mindest-Gesamt-Schedule Delay $TASD^{min}$ und dem durch

Frequenzreduzierung erzielbaren durchschnittlichen Gesamt-Schedule Delay $TASD_{rmy}$. Diese Abweichung reflektiert die Anzahl an Passagierminuten, die auf nicht (weiter) reduzierbaren rmy relativ zum Zielwert eingespart werden, d. h. diese rmy sind „besser“ gestellt, als eigentlich mit dem Zielwert gefordert. Im Gegenzug werden innerhalb der Kompensation einige rmy in gleichem Maße „schlechter“ gestellt.

B. Jede rmy, die nicht (weiter) reduziert werden kann, wird in der initialen Reduzierung oder in der Kompensation der Menge NR hinzugefügt.

C. Die Auswahlreihenfolge der zur Kompensation dienenden rmy ergibt sich, entsprechend der Ersatzregulierungsgröße des Ansatzes, auf Basis des geringsten durchschnittlichen Schedule Delay ASD^{low} in der jeweiligen Iteration. Das bedeutet, es wird immer das rmy gewählt, auf dem der geringste durchschnittliche Schedule Delay herrscht. Analog zum Ansatz *Mindest-Schedule Delay* erfolgt die Berechnung von ASD_{rmy} als Mittelwert beider Richtungen eines rmy, um leichte richtungsabhängige Schwankungen in der Passagieranzahl und den jeweiligen -typen auszugleichen. Damit ist die Auswahlreihenfolge flexibler als beim Ansatz *Gedeckelte Frequenz mit Kompensation*, da beispielsweise dasselbe rmy zwei mal direkt hintereinander zur Kompensation verwendet werden kann. Alternativ wäre es auch möglich, die rmy zur Kompensation nach dem geringsten Gesamt-Schedule Delay bzw. der Reduzierung im Gesamt-Schedule Delay einer bestimmten Frequenz auszuwählen. Dies würde allerdings dazu führen, dass eher Strecken mit weniger Passagieren betroffen wären.

Abbildung 3.11 zeigt den Ansatz *Maximale ATFM-Verspätung mit Kompensation*. Hierbei wird deutlich, dass die initiale Reduzierung und die Kompensation integriert in einer *while*-Schleife stattfinden. Diese wird ausgeführt, bis in sämtlichen my die vorgegebene durchschnittliche ATFM-Verspätung $AAD^{max}(my)$ erreicht ist. Der einzige Unterschied im Vergleich zu *Maximale ATFM-Verspätung* besteht darin, dass die rmy, auf denen die Maximalflugzeuggröße erreicht wurde, der Menge NR hinzugefügt und für die weitere Frequenzreduzierung nicht weiter betrachtet werden. Eine explizite Kumulation und Kompensation ist nicht erforderlich, da keine streckenspezifische Größe (wie bei den übrigen Ansätzen) sondern ein systemweiter Parameter als Regulierungsgröße vorgegeben wird.

Auf Abbildung 3.12 ist der Ansatz *Positiver Grenznutzen mit Kompensation* abgebildet. Dieser wurde als *while*-Schleife implementiert, die ausgeführt wird, bis keine rmy mit einem negativen temporalen Grenznutzen mehr vorhanden sind und sämtliche schädliche, nicht reduzierbare Frequenzen kompensiert wurden. In jeder Iteration (initiale Reduzierung und Kompensation) wird die Frequenz stets auf dem rmy mit dem geringsten zeitlichen Grenznutzen $MTUF^{low}$ reduziert. Die Kumulation und Kompensation finden separat mittels der Funktion $AMTUF$

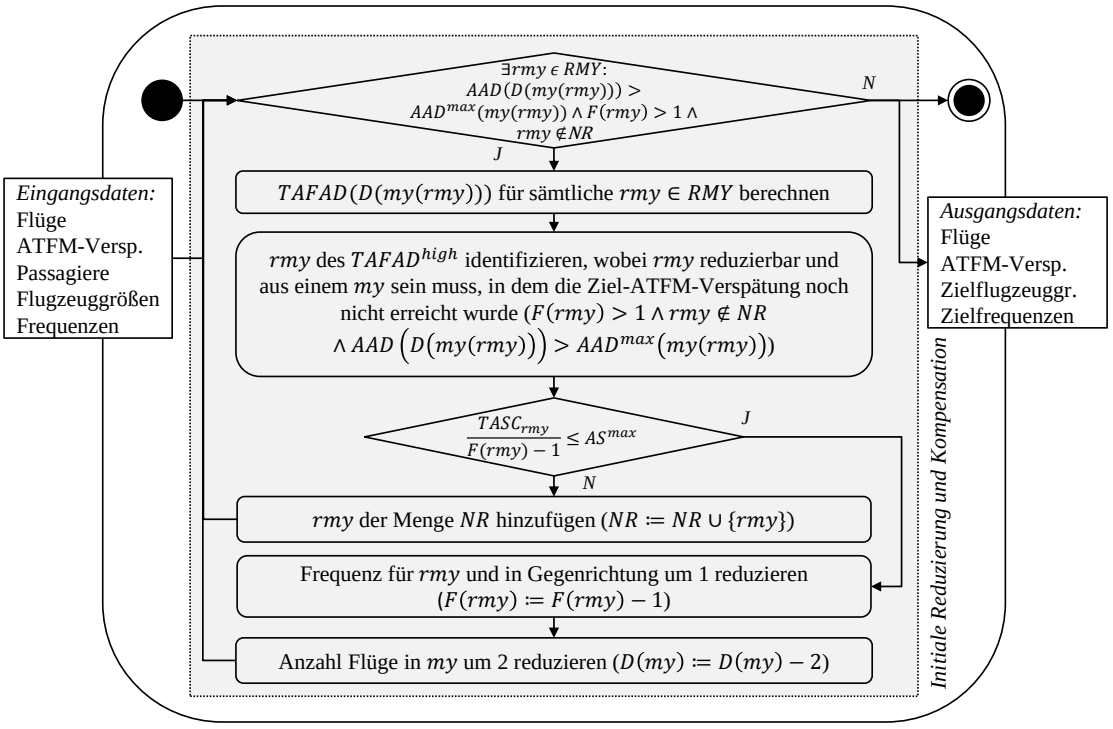

Abb. 3.11: Aktivitätsdiagramm des Ansatzes *Maximale ATFM-Verspätung mit Kompensation*

statt (siehe Gleichung 3.20). Zu Beginn der Iteration gilt $AMTUF(my) = 0$ für sämtliche $my \in MY$.

$$AMTUF : MY \to \mathbb{R} \tag{3.20}$$

In der initialen Reduzierung kumuliert diese den negativen Grenznutzen nicht reduzierbarer Frequenzen. Dieser Wert reflektiert die Summe an Passagierminuten, die gemäß Gleichung 3.10 durch schädliche Frequenzen „verloren“ geht. Auf diesen Strecken werden folglich die dort reisenden Passagiere durch geringeren Schedule Delay bevorteilt, während der Rest der Passagiere im EUROCONTROL-Raum durch höhere ATFM-Verspätung benachteiligt wird. Ausgleichend dazu werden bei der Kompensation durch Reduzierung von Frequenzen mit einem positiven Grenznutzen die auf den Strecken reisenden Passagiere benachteiligt, während die übrigen Passagiere im EUROCONTROL-Raum durch geringere ATFM-Verspätung bevorteilt werden.

Implementierungsseitig wurde außerdem ein weiterer Unterschied im Vergleich zu den übrigen Ansätzen mit Kompensation berücksichtigt (auf Abbildung 3.12 zwecks Übersichtlichkeit nicht dargestellt): Der zeitliche Grenznutzen einer spezifischen Frequenz variiert, je nachdem welche anderen Frequenzen ggf. vorher reduziert wurden und welche durchschnittliche ATFM-Verspätung bei diesem Schritt im Frequenzreduzierungsprozess herrscht (Gleichung 3.10).

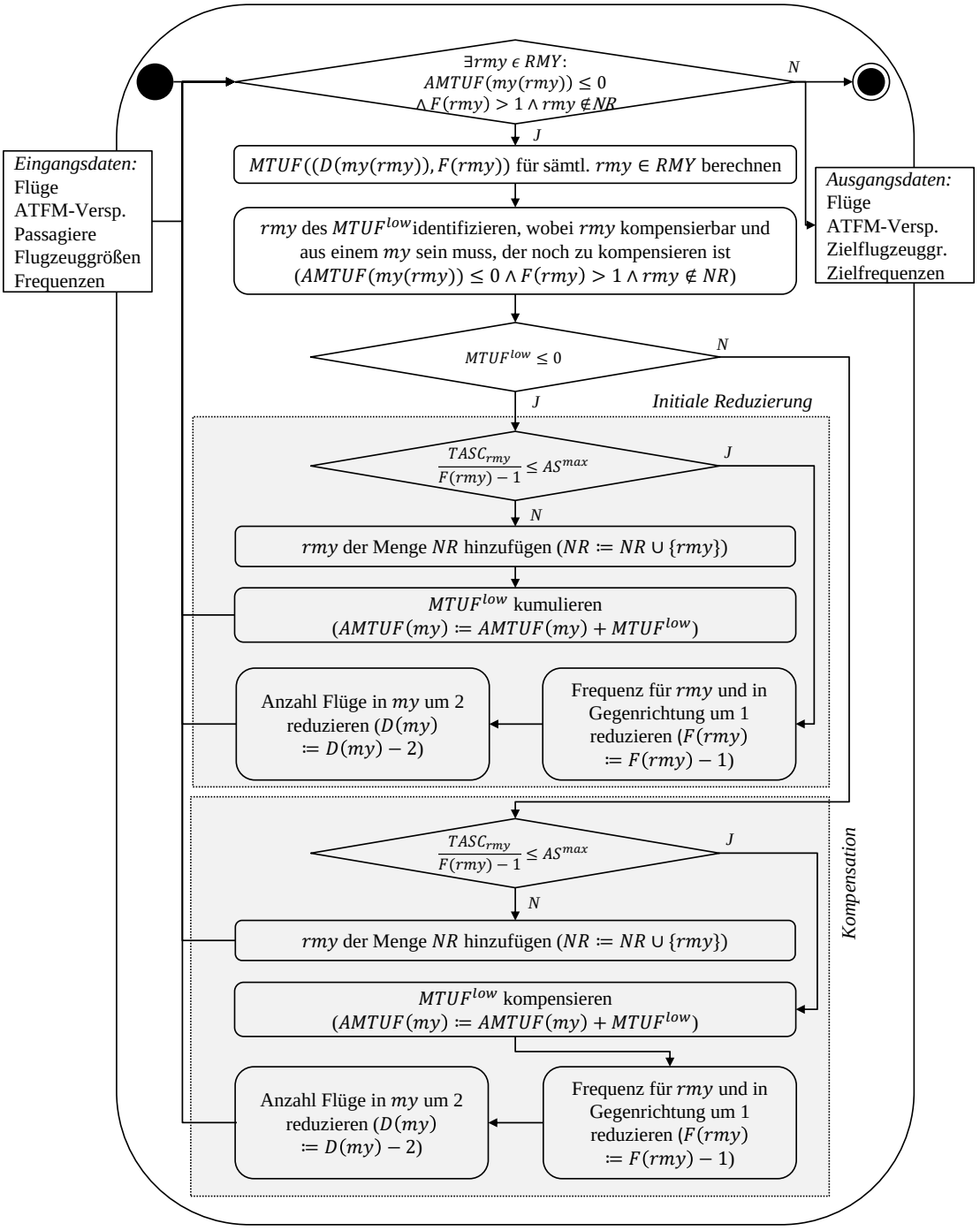

Abb. 3.12: Aktivitätsdiagramm des Ansatzes *Positiver Grenznutzen mit Kompensation*

Da innerhalb der initialen Reduzierung der zeitliche Grenznutzen nicht reduzierbarer Frequenzen zunächst kumuliert wird, ändert sich die durchschnittliche ATFM-Verspätung im EUROCONTROL-Raum nicht. Ebenso bleibt der zeitliche Grenznutzen sämtlicher anderer Frequenzen gleich und damit geringer, als wenn eine Frequenzreduzierung durchführt worden wäre. Um zu vermeiden, dass dadurch

in Summe ein betragsmäßig größerer zeitlicher Grenznutzen kumuliert und später kompensiert wird, erfolgt in FRED im Hintergrund zusätzlich eine Frequenzreduzierung wie beim Ansatz *Positiver Grenznutzen* (Abbildung 3.8). Nach dieser bemisst sich die Berechnung des zeitlichen Grenznutzens zur Kumulation und Kompensation. Im Ergebnis wird damit Konsistenz zwischen den beiden Ansätzen mit und ohne Kompensation hergestellt, so dass bei einem hypothetischen, unendlich hohen Flugzeuggrößenlimit mit den beiden Ansätzen exakt die gleichen Frequenzen reduziert würden.

3.4 Angleichung der Flugzeuggröße

Für die vorangegangene Entwicklung der Frequenzregulierungsansätze gilt die Grundannahme, dass Airlines Frequenzen nicht weiter reduzieren als vorgegeben. Aufgrund der saisonalen Unterschiede im Verkehrsaufkommen und der auftretenden Verspätungen kann es mit einigen Frequenzregulierungsansätzen allerdings dazu kommen, dass Frequenzreduzierung vornehmlich im Sommer stattfindet. Dies hat zur Folge, dass die erforderlichen Zielflugzeuggrößen saisonal schwanken. Für Airlines kann dies nachteilig sein, wenn sie dadurch ihre Flotten nicht das gesamte Jahr über gleichmäßig ausnutzen können.

In diesem Abschnitt ist daher beschrieben, wie untersucht wird, welche Auswirkungen sich ergeben, falls Airlines von sich aus Frequenzen weiter reduzieren, als durch den jeweiligen Frequenzregulierungsansatz vorgegeben wird. Diese freiwillige Reduzierung ist kein weiterer Frequenzregulierungsansatz, sondern als hypothetische Airline-Reaktion zu verstehen. Dessen Untersuchung dient dazu, den Lösungsraum hinsichtlich der temporal-ökologisch-ökonomischen Effekte weiter auszuleuchten. In der Praxis käme für eine Airline das wesentliche Risiko hinzu, dass Wettbewerber auf diesen Strecken Frequenzen übernehmen.

Das Vorgehen ist für sämtliche vorher beschriebene Ansätze identisch und wird für jeden Ansatz beispielhaft untersucht. Findet die Angleichung statt, wird sie zwischen die vorher beschriebenen Frequenzregulierungsansätze und die Flottenzuweisung geschaltet. FRED wird dahingehend erweitert, dass die aus Frequenzregulierung resultierenden Zielflugzeuggrößen über das Jahr hinweg angeglichen werden. Dazu wird auf Streckenebene der Monat mit der größten erforderlichen Zielflugzeuggröße identifiziert und der entsprechende Wert wird als Ziel für sämtliche andere Monate in dem Jahr verwendet.

Dies folgt der Prämisse, dass Airlines besonders in den verkehrs- und deshalb ertragreicheren Monaten anstreben, Frequenzen nicht weiter zu reduzieren als erforderlich. Um die dafür notwendigen, größeren Flugzeuge auch in den verkehrsärmeren Monaten zu betreiben, führt dies unter Beibehaltung konstanter

Sitzplatzkapazität zu weiterer Frequenzreduzierung im Winter als durch die Frequenzregulierungsansätze vorgegeben. Es ergibt sich dadurch zwar eine weitere Reduzierung der durchschnittlichen ATFM-Verspätung, allerdings auch ein höherer durchschnittlicher Schedule Delay. Analog zu den bisherigen Indexmengen zu Beginn von Unterabschnitt 3.3.2 erfolgt zuerst die Definition der Indexmenge RY:

RY	Menge sämtlicher Strecke-Jahr-Kombinationen ry, z. B. *FRA-LHR-2030*

Aufbauend darauf wird die Funktion $ry(rmy)$ definiert, die jedem rmy das zugehörige ry zuordnet (Gleichung 3.21a). Damit wird eine Zuordnung der Strecke-Monat-Jahr-Kombinationen zur jeweiligen Strecke-Jahr-Kombination geschaffen. Anschließend wird die Menge $RRMY$ (*reduced route month year*) definiert, die sämtliche Strecke-Monat-Jahr-Kombination $rrmy$ enthält, auf denen die Frequenz $F(rrmy)$ kleiner ist als die Frequenz $F_{ref}(rrmy)$ im Referenzszenario (Abschnitt 4.2). Folglich enthält diese Menge sämtliche Strecke-Monat-Jahr-Kombinationen, auf denen Frequenzen im vorangegangen Frequenzregulierungsansatz reduziert wurden (Gleichung 3.21b) und ist eine Teilmenge von RMY. Analog folgt die Menge RRY, die sämtliche rry reduzierter Strecken enthält (Gleichung 3.21c).

$$ry : RMY \rightarrow RY \tag{3.21a}$$

$$RRMY = \{rrmy \in RMY \mid F(rrmy) < F_{ref}(rrmy)\} \tag{3.21b}$$

$$RRY = \{rry \in RY \mid rry = ry(rrmy), rrmy \in RRMY\} \tag{3.21c}$$

Außerdem wird die Funktion $RMY^*(ry)$ definiert, die für jedes ry die zugehörige Menge mit den Strecke-Monat-Jahr-Kombinationen sämtlicher Monate eines Jahres zurückliefert (Gleichung 3.22a). RMY^* ist damit ein Element der Potenzmenge $\mathcal{P}$ von RMY, welche sämtliche Teilmengen von RMY umfasst. Davon sind $RMY^*(ry)$ die Teilmengen, die für jedes ry sämtliche zugehörige rmy^* beinhalten (Gleichung 3.22b). Für das Argument $FRA-LHR-2030$ würde $RMY^*(ry)$ beispielsweise die Menge $\{FRA-LHR-Jan-2030,...,FRA-LHR-Dez-2030\}$ zurückgeben.

$$RMY^* : RY \rightarrow \mathcal{P}(RMY) \tag{3.22a}$$

$$RMY^*(ry) = \{rmy^* \in RMY \mid ry(rmy^*) = ry\} \tag{3.22b}$$

Die Modellierung zur Angleichung der Flugzeuggröße ist auf Abbildung 3.13 dargestellt und besteht aus den folgenden Einzelschritten:

1. Startknoten eines Aktivitätsdiagramms gemäß UML-Notation;
2. Eingangsdatenobjekt;
3. Erstes (erste Iteration) bzw. nächstes (alle weiteren Iterationen) $rry \in RRY$ lesen;
4. Identifizierung der rmy^* mit der größten durchschnittlichen Zielflugzeuggröße AS^{high};
5. Angleichung der Zielflugzeuggrößen auf AS^{high} für sämtliche dieser $rmy^* \in RMY^*(rry)$ mittels weiterer Frequenzreduzierung. Hierbei wird stets aufgerundet um sicherzustellen, dass mindestens 1 Frequenz angeboten wird;
6. Überprüfung, ob sämtliche $rry \in RRY$ geprüft wurden; wenn ja, weiter mit Schritt 7, wenn nein, weiter mit Schritt 3;
7. Ausgangsdatenobjekt für den nachfolgenden Flottenzuweisungsschritt;
8. Endknoten eines Aktivitätsdiagramms gemäß UML-Notation.

Die Iteration über die Elemente rry der Menge RRY findet in zufälliger Reihenfolge statt, analog zu einigen der Frequenzregulierungsansätze (Unterabschnitt 3.3.2). Bedingt durch die strecken- und monatsspezifische Gewichtung mittels des Überlastungfaktors c_{rmy} (Gleichung 3.8) führt dies zu einer Streuung der Ergebnisse der ATFM-Verspätungsberechnung bei mehrmaliger Berechnung. Der Grad der Streuung hängt neben der Iterationsreihenfolge von den verwendeten Eingangsdaten sowie Randbedingungen ab und wird daher ebenfalls in der Ergebnisdiskussion (Abschnitt 5.2, Abschnitt 5.3) quantifiziert.

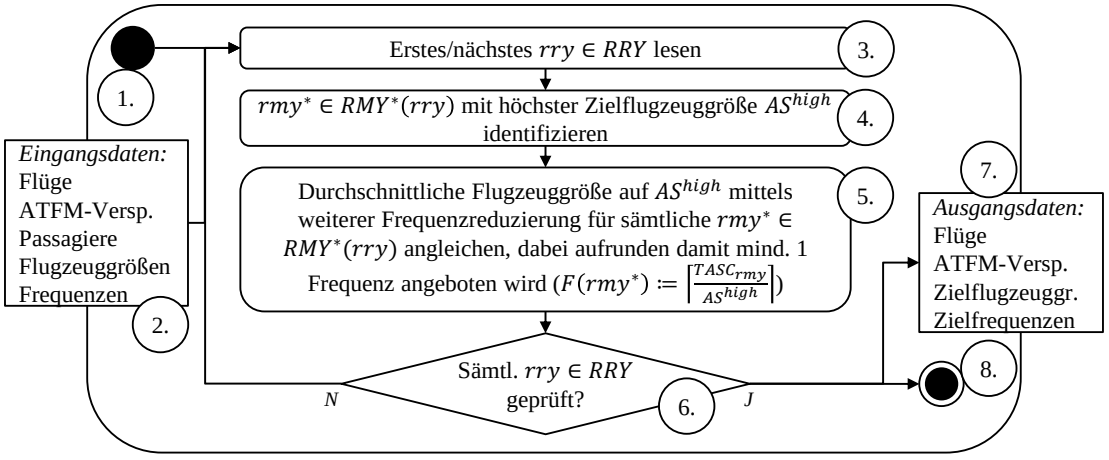

Abb. 3.13: Aktivitätsdiagramm des Vorgehens zur Angleichung der Flugzeuggröße

3.5 Parameter zur ökologisch-ökonomischen Bewertung

In diesem Abschnitt ist zuerst die Modellierung der Betriebskosten und des Kerosinverbrauchs beschrieben (Unterabschnitt 3.5.1). Es folgt die Berechnungsweise für die Flugzeugausnutzung in Form von jährlichen Flugstunden sowie die Bestimmung der notwendigen Anzahl Flugzeuge für einen gegebenen Flugplan (Unterabschnitt 3.5.2). Ergänzend zu den bisherigen Indizes (Abschnitt 3.2) wird die folgende Indexmenge eingeführt:

A Menge sämtlicher Flugzeugtypen a (*aircraft*), z. B. *A320neo*, vollständige Auflistung in Tabelle A.1

3.5.1 Betriebskosten und Kerosinverbrauch

Die Bestimmung der Betriebskosten erfolgt mittels des DOC-Modells der *TU Berlin* (Thorbeck, 2013). Diese wird von Risse et al. (2016) als „DOC-Standard“ bezeichnet und wird auf der offenen *CeRAS*-Forschungsplattform der *RWTH Aachen* im Bereich Flugzeugentwurf beschrieben (ILR Aachen, 2016). Im Gegensatz zum ebenfalls verbreiteten DOC-Modell von Liebeck et al. (1995) handelt es sich beim DOC-Modell von Thorbeck (2013) um den neueren, detaillierteren und aus dem europäischen Raum stammenden Ansatz.

Mit diesem Modell werden die einzelnen Bestandteile der DOC, Kerosin (*Kero*), Gebühren (*Geb*), Instandhaltung (*MRO*), Crew (*Crew*) und Kapitalkosten (*Kap*), parametrisch berechnet und addiert (Gleichung 3.23).

$$DOC = OC_{Kero} + OC_{Geb} + OC_{MRO} + OC_{Crew} + OC_{Kap} \tag{3.23}$$

Für die spätere Bewertung von Frequenzregulierung in Abschnitt 5.5 werden die Kapitalkosten OC_{Kap} separat von den übrigen cash-wirksamen Betriebskosten COC betrachtet (Gleichung 3.24). Diese Trennung erfolgt, da die Kapitalkosten aufgrund ihrer Vertraulichkeit mit einer hohen Unsicherheit behaftet sind (Swan & Adler, 2006). Zum Anderen sind sie abhängig von zahlreichen betreiber- und nicht flugzeugtypspezifischen Randbedingungen, z. B. dessen Verhandlungsmacht gegenüber den Flugzeugherstellern, Abschreibungspraktiken sowie Kreditwürdigkeit (Clark, 2017).

Die Verwendung von Flugzeughersteller-Listenpreisen ist hier ebenfalls nicht zielführend, da bei Flugzeugbestellungen Listenpreisrabatte in Höhe von 50% bis 60% üblich sind (Gollnick, 2014; The Wall Street Journal, 2012). *Airbus* veröffentlicht seit 2019 gar keine Listenpreise mehr *„due to their relative irrelevance to real-world deal values“* (flightglobal.com, 2019).

In der Praxis hängt die konkrete Flugzeugauswahl u. a. maßgeblich von der Airline-Bestandsflottenstruktur sowie dem konkret verhandelten Angebotspaket ab, z. B. in Form von Rabatten, Garantien, Kauf weiterer Flugzeuge anderen Typs, Abnahme- und Zahlungshorizonte (Clark, 2017; Rosskopf, 2013b). Gerade im *Single-Aisle*-Bereich unterscheiden sich die konkurrierenden Flugzeugfamilien (*A320, B737*) hinsichtlich ihrer ökologisch-ökonomischen Leistungsfähigkeit nur geringfügig, aufgrund ähnlicher Nutzlast-Reichweite-Charakteristiken und Massen sowie gleichen Triebwerksfamilien (Airbus, 2019a; Boeing, 2019).

Damit reflektieren die Kapitalkosten bzw. Listenpreise die technische Leistungsfähigkeit eines Flugzeugtyps nur eingeschränkt bzw. können den flugzeugtypenübergreifenden Vergleich verzerren (Clark, 2017). Um dem vorzubeugen, werden die COC und die Kapitalkosten in der späteren Analyse getrennt betrachtet (Abschnitt 5.5).

$$COC = OC_{Kero} + OC_{Geb} + OC_{MRO} + OC_{Crew} \tag{3.24}$$

Da das Umsatzpotenzial eines Flugzeugtyps u. a. von dessen Sitzplatzkapazität abhängt und die Betriebskosten aufgrund variabler und fixer Betriebskostenbestandteile mit der geflogenen Distanz nichtlinear zunehmen, werden die COC häufig auf die angebotenen Sitzplatzkilometer ASK (*available seat kilometer*) heruntergebrochen (Clark, 2017; Doganis, 2019; Wei & Hansen, 2003). Diese werden als cash-wirksame Betriebskosten pro angebotenem Sitzplatzkilometer (COC/ASK (*cash operating cost per available seat kilometer*) bezeichnet und entsprechen den Stückkosten, die den flugzeugtyp- und streckenübergreifenden Betriebskostenvergleich erleichtern. Für einen Flug eines Flugzeugtyps a auf einer Strecke r ergeben sich die ASK_{ar} mittels Multiplikation der geflogenen Distanz $Dist_r$ und der Flugzeuggröße in Sitzplätzen S_a (Gleichung 3.25a).

Distanzen zwischen Flughäfen werden meistens als Großkreisentfernungen $DistGC_r$ (*great circle distance*) ausgewiesen, die nicht der real geflogenen Route entsprechen. Dies wird durch Hinzuaddieren eines pauschal geflogenen Umwegfaktors $DistDet$ (*distance detour*) abgebildet (Gleichung 3.25b). Damit wird vermieden, dass zu kurze Flugdistanzen angenommen und die Betriebskosten- sowie Kerosinverbrauchswerte unterschätzt werden.

Da Frequenzreduzierung für einen Zeithorizont von 20 Jahren untersucht wird, werden die $COCASK_{ary}$, sowie sämtliche monetäre Werte, außerdem mit einer Rate IR aufgezinst, ausgehend vom Referenzjahr Y_{ref} (*reference year*) 2010 aus dem die DOC-Modelldaten stammen (Thorbeck, 2013).

$$ASK_{ar} = Dist_r * S_a \tag{3.25a}$$

$$Dist_r = DistGC_r + DistDet \tag{3.25b}$$

$$COCASK_{ary} = \frac{COC_{ary}}{ASK_{ar}} * (1 + IR/100)^{y-Y_{ref}} \tag{3.25c}$$

Auf Abbildung 3.14 sind die abnehmenden COC/ASK für ausgesuchte Flugzeugtypen mit zunehmender Distanz dargestellt. Dabei wird in den Diagrammen zwischen empirischen Sitzplatzanzahlen für europäische Airlines (Sabre Airline Solutions, 2019) sowie normierten *Economy*-Bestuhlungen gemäß Tabelle A.1 unterschieden. Diese normierten Anzahlen basieren auf der Annahme, dass Airlines im Falle von Frequenzregulierung *Twin-Aisle*-Flugzeuge mit einer an *Single-Aisle*-Flugzeugen angelehnten *Economy*-Bestuhlung ausstatten würden, da für den Kurz- und Mittelstreckenbetrieb eher keine Liegesitze in den höherwertigen Beförderungsklassen erforderlich sind (Unterabschnitt 2.2.1) und diese die Sitzplatzkosten tendenziell erhöhen würden.

Die Normierung dient dabei primär der Vergleichbarkeit der *Twin-Aisle*-Flugzeugtypen. Sie basiert auf Kabinenlayouts aus Herstellerdokumenten, die in eine einheitliche *Economy*-Bestuhlung mit einem gängigen Sitzplatzabstand von 31 Zoll transformiert wurden (Airbus, 2019c; Boeing, 2018a, 2018b). Die normierten Kabinenlayouts von *Single-Aisle*-Flugzeugen weichen nur geringfügig von den empirischen Werten ab.

Wie auf Abbildung 3.14 ersichtlich ist, nehmen die COC/ASK mit den normierten höheren Sitzplatzdichten ab. Für den *A350-900*, als größten gezeigten Flugzeugtypen, liegen sie mit der normierten Bestuhlung für längere Distanzen sogar im Bereich des *A321neo*. Hier spiegeln sich die Erkenntnisse der Literaturrecherche in Abschnitt 2.2 wieder, wonach *Twin-Aisle*-Flugzeuge auf der Kurzstrecke nur bedingt ökonomischer sind als *Single-Aisle*-Flugzeuge. Dabei ist allerdings auch

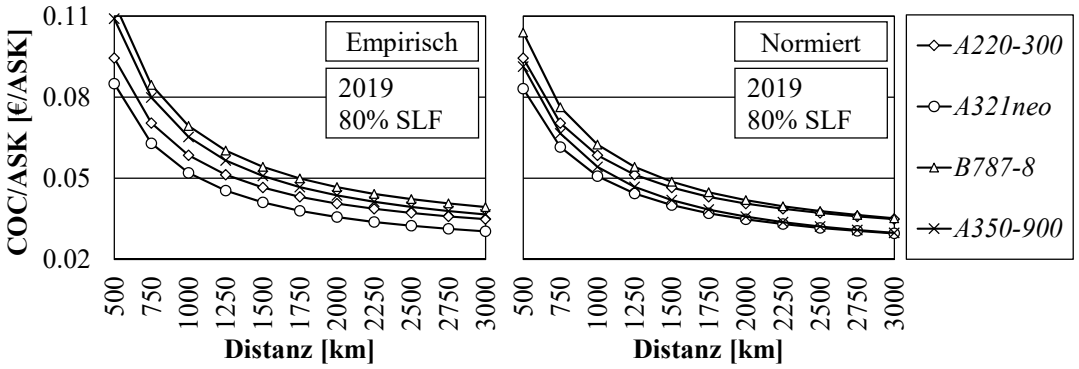

Abb. 3.14: COC/ASK in Abhängigkeit der geflogenen Distanz für empirische Sitzplatzanzahlen (links) und für normierte *Economy*-Bestuhlung (rechts) gemäß Tabelle A.1 mit einem Sitzladefaktor von 80% für ausgesuchte Flugzeugtypen der Größe nach sortiert (CIRIUM, 2019; Sabre Airline Solutions, 2019)

zu berücksichtigen, dass die verwendete DOC-Methode für derart unübliche Betriebsformen möglicherweise ungenau wird. Für eine vollständige ökonomische Bewertung sind außerdem die Kapitalkosten sowie die mögliche jährliche Ausnutzung entscheidend (Unterabschnitt 3.5.2).

Da nahezu sämtliche untersuchte Strecken innerhalb des EUROCONTROL-Raums im Kurz- und Mittelstreckenbereich liegen (Unterabschnitt 4.1.1), ist die Darstellung hier bei einer Distanz von 3.000 km zwecks Übersichtlichkeit begrenzt. Im weiteren Verlauf würden die Kurven wieder ansteigen. Dieser Punkt ist durch die maximale Reichweite bei gegebener Sitzplatzkonfiguration und einem Sitzladefaktor von 100% definiert. In der Regel befindet er sich im Nutzlast-Reichweiten-Diagramm im Substitutionsbereich, d. h. für darüber hinausgehende Distanzen müssen Sitze leer bleiben, was ab dann den Anstieg der COC/ASK erzeugt.

Da der Kerosinpreis FP (*fuel price*) historisch gesehen trotz seiner Volatilität tendenziell gestiegen ist, wird für die Berechnung der Kerosinkosten eine jährliche Steigerung von FPI (*fuel price increase*) ausgehend vom Referenzjahr Y_{ref} angenommen (Thorbeck, 2013). Dieses Vorgehen wird auch in anderen langfristig ausgerichteten Untersuchungszeiträumen angewendet, z. B. in Rosskopf (2013b). In Unterabschnitt 5.7.3 werden zur Illustrierung des Einflusses dieses Parameters Sensitivitätsanalysen von FPI durchgeführt. Unter Berücksichtigung des Kerosinverbrauchs FC_{ar} (*fuel consumption*) ergeben sich mittels Gleichung 3.26 die $OC_{Kero_{ar}}$.

$$OC_{Kero_{ar}} = FC_{ar} * FP * (1 + FPI/100)^{y-Y_{ref}} \tag{3.26}$$

Der Kerosinverbrauch wird strecken- und flugzeugtypspezifisch bestimmt. Für den

Missionsabschnitt zwischen Abheben und Landung wurden aus dem Flugleistungsrechnungsprogramm „*Trajectory Calculation Module*“ (TCM) der Einrichtung *Lufttransportsysteme* des DLR Funktionsvorschriften extrahiert, die auf Daten von EUROCONTROL basieren (EUROCONTROL, 2019b; Linke, 2015, 2016).

Erweiternd zu Rosskopf (2013b) wurde dazu nicht nur die Distanz $Dist_r$ verwendet, sondern auch der Sitzladefaktor SLF_r als Parameter mit aufgenommen, so dass sich Funktionsvorschriften mit den Regressionskoeffizienten γ_a, δ_a, ϵ_a und ζ_a ergeben (Gleichung 3.27a). Der Sitzladefaktor ist im Zusammenhang mit Frequenzreduzierung wichtig, da es hier innerhalb der untersuchten Strecken maßgebliche Unterschiede gibt.

Modellbedingt wird hinsichtlich der Nutzlast in TCM allerdings nicht nach Passagieren und Fracht differenziert, da dies für die Flugleistungsrechnung unerheblich ist. Die verwendete Datengrundlage zu den Passagierzahlen (Sabre Airline Solutions (2019), Abschnitt 4.2) enthält dagegen nur Daten zu Passagieren und nicht zur Fracht. Vereinfachend wird daher angenommen, dass die prozentuale Nutzlast dem Sitzladefaktor entspricht, auch wenn die Passagiere häufig nur einen Teil der Nutzlast ausmachen.

Da es sich bei den zu untersuchenden höchstfrequentierten Strecken (Abschnitt 4.1) um Verbindungen zwischen größeren europäischen Städten handelt, ist davon auszugehen, dass hier auch ein reger Luftfrachtverkehr herrscht. Die getätigte Vereinfachung führt somit tendenziell nicht dazu, dass der Kerosinverbrauch zu hoch berechnet wird.

Hinzu kommen der Kerosinverbrauch für das Taxiing sowie den Startvorgang $FCTT_a$ (*fuel consumption taxi take-off*) als letzter Term in Gleichung 3.27a. Dieser wiederum ist bestimmt durch den Kerosinfluss während des Taxiing FFT_a (*fuel flow taxi*) und dessen Dauer TT (*taxi time*) sowie respektive den Kerosinfluss während des Startvorgangs $FFTO_a$ (*fuel flow take-off*) und dessen Dauer TTO (*take-off time*) gemäß Gleichung 3.27b. Für beide Zeitdauern werden EUROCONTROL-Raum-weite Durchschnitte verwendet. Analog zu den COC/ASK wird auch der Kerosinverbrauch mit $FCASK_{ar}$ (FC/ASK) auf ASK-Ebene angegeben (Gleichung 3.27c). Die verwendeten Regressionsparameter für jeden Flugzeugtyp finden sich in Tabelle A.2.

$$FC_{ar} = \gamma_a * Dist_r{}^2 + \delta_a * Dist_r + \epsilon_a * Dist_r * SLF_r + \zeta_a + FCTT_a \tag{3.27a}$$

$$FCTT_a = FFT_a * TT + FFTO_a * TTO \tag{3.27b}$$

$$FCASK_{ar} = \frac{FC_{ar}}{ASK_{ar}} \tag{3.27c}$$

Die Bestimmung der Instandhaltungs- und Crewkosten sowie der Gebühren erfolgt im verwendeten DOC-Modell durch Schätzfunktionen basierend auf technisch-operativen Parametern. Instandhaltungskosten sind dabei eine Funktion der OEM, der Flugstunden und der Flugzyklen. Crewkosten werden in Abhängigkeit der Sitzplätze bestimmt. Die Gebühren sind eine Funktion der Flugzyklen, der Nutzlast sowie der MTOM. Zwecks Übersichtlichkeit werden weitere Details nicht aufgeführt, es wurden die verfügbaren Funktionen und Richtwerte übernommen, die in der Modellspezifizierung nachzulesen sind (Thorbeck, 2013).

Bei der Bestimmung der Kabinencrewkosten und der Instandhaltungskosten wurden zwei geringfügige Änderungen vorgenommen, die der genaueren Modellierung des *Twin-Aisle*-Einsatzes dienen. Im verwendeten DOC-Modell wird die Anzahl an Kabinencrewmitgliedern mit einer Person für jede angefangene 50 Sitzplätze bemessen. In den Zertifizierungsstandards der *European Union Aviation Safety Agency* (EASA) für *Twin-Aisle*-Flugzeuge ist zusätzlich festgelegt, dass pro bodentiefem Notausgangspaar mindestens zwei Kabinencrewmitglieder an Bord sein müssen (EASA, 2015). In FRED wird die größere der sich jeweils ergebenden Anzahlen an Kabinencrewmitgliedern verwendet.

Es ist anzunehmen, dass die Schätzfunktionen für Instandhaltungskosten OC_{MRO_a} im verwendeten DOC-Modell implizit berücksichtigen, dass *Twin-Aisle*-Flugzeuge vornehmlich auf Langstrecke eingesetzt werden, da dies ihrem typischen Betriebsprofil entspricht (Unterabschnitt 2.2.1). Dementsprechend sind auch die Flugzeugstruktur sowie die Triebwerke eher auf Flugstunden statt Flugzyklen ausgelegt.

Da hohe Frequenzen insbesondere auf Kurz- und Mittelstrecken vorzufinden sind, wie in der Beschreibung zur Auswahl des Untersuchungsraums ausgeführt (Unterabschnitt 4.1.1), wurde im Modell berücksichtigt, dass bei *Twin-Aisle*-Flugzeugen flugzyklenlimitierte Instandhaltungsintervalle verkürzt werden, wenn diese nicht auf Langstrecke betrieben werden. Dies wird über einen Bestrafungsfaktor *mp* (*maintenance penalty*) abgebildet, der auf die reguläre Berechnung der Instandhaltungskosten $OC_{MRORega}$ aufgeschlagen wird (Gleichung 3.28).

$$OC_{MRO_a} = OC_{MROReg_a} * (1 + mp/100) \tag{3.28}$$

3.5.2 Flugzeugausnutzung und Flugzeuganzahl

Die Flugzeugausnutzung (*aircraft utilization*), in Form der jährlich erzielbaren Flugstunden, ist ein Maß für die Produktivität eines Flugzeugs. Dementsprechend streben Airlines an, diese zu maximieren, um eine möglichst geringe Flugzeuganzahl zur Bedienung ihres Netzwerks einsetzen zu müssen (Clark, 2017).

Aus der jährlichen Summe sämtlicher Flugstunden eines bestimmten Flugzeugtyps sowie der zur Verfügung stehenden durchschnittlichen Flugzeugausnutzung pro Flugzeugtyp YAU_a (*yearly available utilization*) lässt sich umgekehrt die benötigte Anzahl Flugzeuge eines bestimmten Flugzeugtypen N_a berechnen, wie im Folgenden beschrieben.

Da es saisonale Unterschiede im Flugverkehrsaufkommen gibt, variiert die durchschnittliche monatliche Flugstundenanzahl RMU_{amy} (*required monthly utilization*). Diese ergibt sich aus der Summe sämtlicher Frequenzen eines Flugzeugtyps f_{army}, den Tagen pro Monat dpm_m sowie der Flugzeit FT_r (*flight time*), die für jede geflogene Strecke benötigt wird Gleichung 3.29a. Die Flugzeit ist die Differenz aus der Blockzeit BT_r und der Taxizeit TT (Gleichung 3.29b).

Für die notwendige Anzahl Flugzeugtypen ist der Monat mit der höchsten Ausnutzung MU_{ay}^{max} entscheidend (Gleichung 3.29c). Gleichzeitig besteht in begrenztem Umfang die Möglichkeit, eine Flotte im verkehrsreichen Sommer intensiver zu nutzen, z. B. durch Bündelung von Instandhaltungsaktivitäten im Winter. Diese Überausnutzung wird durch den Faktor ou (*over-utilization*) ausgedrückt. Rechnet man diesen heraus, ergibt sich die erforderliche monatliche Ausnutzung MU_{ay}^{ref} (Gleichung 3.29c) die als Referenz zur Bemessung der Flugzeugtypenanzahl N_a dient (Gleichung 3.29d).

$$RMU_{amy} = \sum_{army \in ARMY} f_{army} * dpm_m * FT_r \tag{3.29a}$$

$$FT_r = BT_r - TT \tag{3.29b}$$

$$MU_{ay}^{ref} = \frac{MU_{ay}^{max}}{1 + ou/100} \tag{3.29c}$$

$$N_a = \frac{MU_{ay}^{ref}}{YAU_a/12} \tag{3.29d}$$

Da sämtliche Flugzeugtypen in FRED theoretisch auf allen untersuchten Strecken eingesetzt werden können, werden keine flugzeugtypspezifischen Werte für YAU_a (Gleichung 3.30) verwendet, da diese implizit airline- und somit streckenabhängig sind. Im Kurz- und Mittelstreckensegment ist die Flugzeugausnutzung zudem typischerweise geringer als im Langstreckenbereich, da anteilig mehr Zeit am Boden verbracht wird. Für sämtliche Flugzeugtypen werden aus diesem Grund die gleichen durchschnittlichen Werte von Kurz- und Mittelstreckenflugzeugen zunächst als Basis angesetzt.

Ein nicht zu vernachlässigender Aspekt bei *Twin-Aisle*-Flugzeugen ist allerdings, dass diese aufgrund ihrer Größe längere *Turnaround*-Zeiten aufweisen als *Single-Aisle*-Flugzeuge. Dies resultiert aus längeren Dauern für das Ein- und Aussteigen der Passagiere, Be- und Entladung sowie der Kabinenreinigung nach jedem Flug. Zwar gibt es Publikationen, die zu dem Schluss kommen, dass *Twin-Aisle*-Flugzeuge aufgrund des teilweise vorteilhafteren Verhältnisses aus Sitzplätzen zu Ganganzahl auch kürzere Ein- und Aussteigedauern aufweisen können (Fuchte et al., 2011, 2012), dies gilt jedoch nur für bestimmte Konfigurationen. Für die Bestimmung der Flugzeugausnutzung von *Twin-Aisle*-Flugzeugen YAU_a wird daher ein Bestrafungsfaktor up (*utilization penalty*) vom empirischen Durchschnitt von Kurz- und Mittelstreckenflugzeugen YAU_a^{emp} abgezogen (Gleichung 3.30).

$$YAU_a = YAU_a^{emp} * (1 - up/100) \tag{3.30}$$

3.6 Optimierungsproblem der Flottenzuweisung

In diesem Abschnitt erfolgt zuerst die Beschreibung von Flottenzuweisung im Allgemeinen sowie typischen Modelierungsweisen (Unterabschnitt 3.6.1). Anschließend werden das Ziel und die Besonderheiten des entwickelten Optimierungsproblems zur Flottenzuweisung dargelegt (Unterabschnitt 3.6.2), gefolgt von dessen mathematischer Formulierung (Unterabschnitt 3.6.3).

3.6.1 Flottenzuweisung und typische Modellierungsansätze

Das Zuweisen von Flugzeugtypen zu einem Flugplan oder zu Strecken im Airline-Netzwerk wird typischerweise als Flottenzuweisung (*fleet assignment*) bezeichnet. Gemäß Belobaba et al. (2009) ist Flottenzuweisung ein Teil der übergeordneten Flugplanentwicklung (*schedule development*), die außerdem aus der Frequenzplanung (*frequency planning*), der Flugzeitplanung (*timetable development*) und der

Flugzeugrotationsplanung (*aircraft rotation planning*) besteht. Diese Planungsschritte finden in der Praxis in unterschiedlich integriertem Ausmaß statt (Lohatepanont & Barnhart, 2004). Je nach Integrationsgrad können die Frequenzen für jede Strecke ein Eingangswert oder ein Ergebnis der Flottenzuweisung sein.

In typischen Optimierungsproblemen zur Flottenzuweisung sind die Anzahlen verfügbarer Flugzeuge in einer Airline-Flotte gegeben (z. B. 150 *A320* und 100 *B737-800*) und werden als Nebenbedingungen modelliert (Barnhart et al., 2002, 2003; Pita et al., 2013, 2014). Die verfügbaren Flugzeugtypen werden dem Streckennetz meistens in kostenminimierender oder gewinnmaximierender Weise zugewiesen, häufig unter Berücksichtigung weiterer Nebenbedingungen. Aufgrund der Vielzahl an möglichen Kombinationen, eine bestehende Flotte einem Netzwerk zuzuweisen sowie der zu berücksichtigen Randbedingungen, werden hierzu in der Wissenschaft und Praxis häufig (gemischt-) ganzzahlige Optimierungsprobleme gelöst (Barnhart et al., 2002, 2003; Pita et al., 2013, 2014). Im Airline-Betrieb findet diese typische Flottenzuweisung einen bis mehrere Monate vor dem geplanten Flug statt.

Durch unterschiedliche marktseitige Faktoren ergeben sich daraus die auf Abbildung 3.15 dargestellten idealisierten Verteilungen der Fluganzahl in Abhängigkeit der Flugzeuggrößen auf einer Strecke. Am unteren Ende wird die eingesetzte Flugzeuggröße begrenzt durch zunehmende Sitzplatzkosten sowie Flughafenslotlimits. Umgekehrt wird die Flugzeuggröße am oberen Ende dadurch begrenzt, dass Airlines anstreben, einen geringen Schedule Delay zu erzielen (Abschnitt 2.1 und Unterabschnitt 3.2.1) und tageszeitabhängige Nachfrageschwankungen abzudecken (Brey & Walker, 2011).

Die Maxima können durch Flugzeugkommunalitätseffekte innerhalb einer Airline-Flotte (Brüggen & Klose, 2010; Rosskopf, 2013b) verstärkt werden, die dazu führen, dass ähnliche Flugzeugtypen auf einer einzelnen Strecke eingesetzt werden. Airlineübergreifend sehen sich Wettbewerber möglicherweise einem Kostendruck

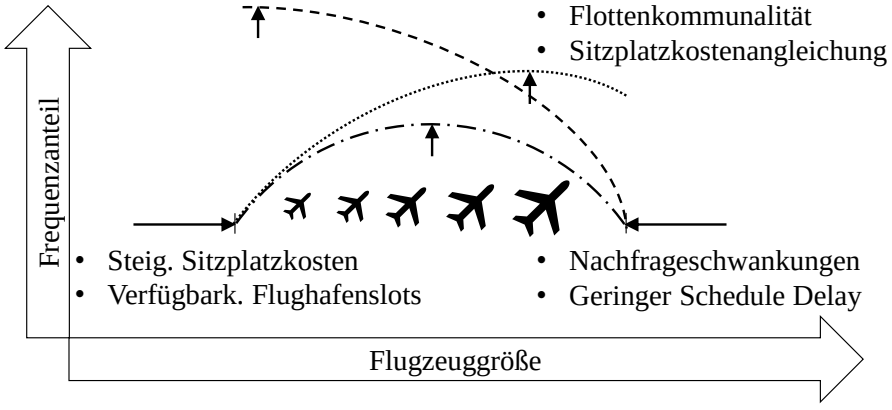

Abb. 3.15: Schematische Darstellung der treibenden und limitierenden Faktoren idealisierter Frequenzverteilungen (gestrichelte Linien) in Abhängigkeit der Flugzeuggröße auf einer Strecke

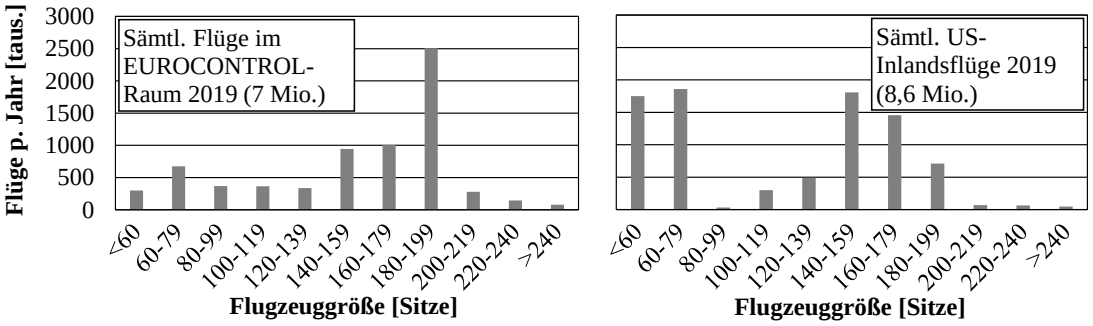

Abb. 3.16: Verteilung der Anzahl der Flüge in Abhängigkeit der Flugzeuggröße innerhalb des EUROCONTROL-Raums 2019 (links) sowie US-amerikanische Inlandsflüge 2019 (Sabre Airline Solutions, 2019)

ausgesetzt, zu ähnlichen Sitzplatzkosten auf einer Strecke zu produzieren, was ebenfalls zu einer Konvergenz der Flugzeuggrößen führen kann.

In der Realität gibt es Abweichungen von diesen idealisierten Beispielen. So ist der Verlauf nicht zwangsläufig streng monoton und nach außen gewölbt. Die Abweichungen hängen u. a. davon ab, welche Flugzeuge in einer Airline-Flotte und am Markt überhaupt verfügbar sind. Auf Abbildung 3.16 sind die Anzahl der Flüge in Abhängigkeit der Flugzeuggröße innerhalb des EUROCONTROL-Raums sowie für US-amerikanische Inlandsflüge abgebildet. Der wesentliche Unterschied liegt darin, dass die durchschnittliche Flugzeuggröße mit 115 Sitzen pro Flug für US-amerikanische Inlandsflüge deutlich unterhalb des Durchschnitts von 152 Sitzen pro Flug im EUROCONTROL-Raum liegt. Dies resultiert zum einen aus einem größeren Anteil kleinerer Regionalstrecken, auf denen Flugzeuge mit weniger als 80 Sitzen eingesetzt werden. Zum anderen ist auch im typischen *Single-Aisle*-Bereich das Maximum in der Größenspanne zwischen 140 und 159 Sitzen pro Flug angesiedelt.

Auf den untersuchten höchstfrequentierten Strecken im EUROCONTROL-Raum (Unterabschnitt 4.1.1) auf Abbildung 3.17 ist eine linksschiefe Verteilung erkennbar. Die Linksschiefe resultiert aus der Flugzeuggrößenlücke oberhalb von ca. 220 Sitzen pro Flug. Genau auf diese Marktlücke zielen Entwürfe im Größenbereich eines NMA ab (Unterabschnitt 2.2.1, Unterabschnitt 2.2.2). Der leichte Anstieg im Bereich von 60 bis 79 Sitzen pro Flug entsteht durch Flüge zu und zwischen kleineren Regionalflughäfen.

Auf Strecken-Monatsebene sind die Ausprägungen relativ heterogen hinsichtlich der Verteilung und der Anzahl unterschiedlicher Flugzeuggrößen (Abbildung 3.18). Strecken zwischen großen Airline-Hubs weisen dabei eher weniger saisonale Unterschiede auf, während eher touristische Märkte (*TXL-PMI, Berlin - Palma de Mallorca*) vornehmlich im Sommer bedient werden.

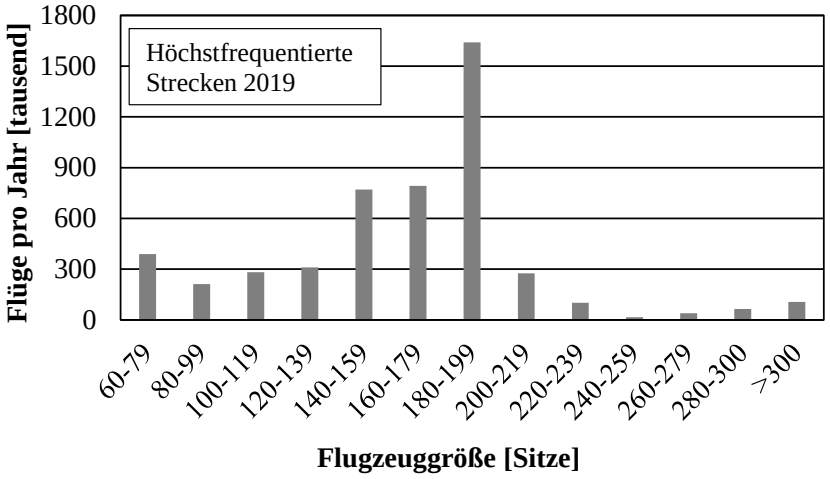

Abb. 3.17: Verteilung der Anzahl der Flüge in Abhängigkeit der Flugzeuggröße auf den höchstfrequentierten Strecken im EUROCONTROL-Raum 2019 (Sabre Airline Solutions, 2019)

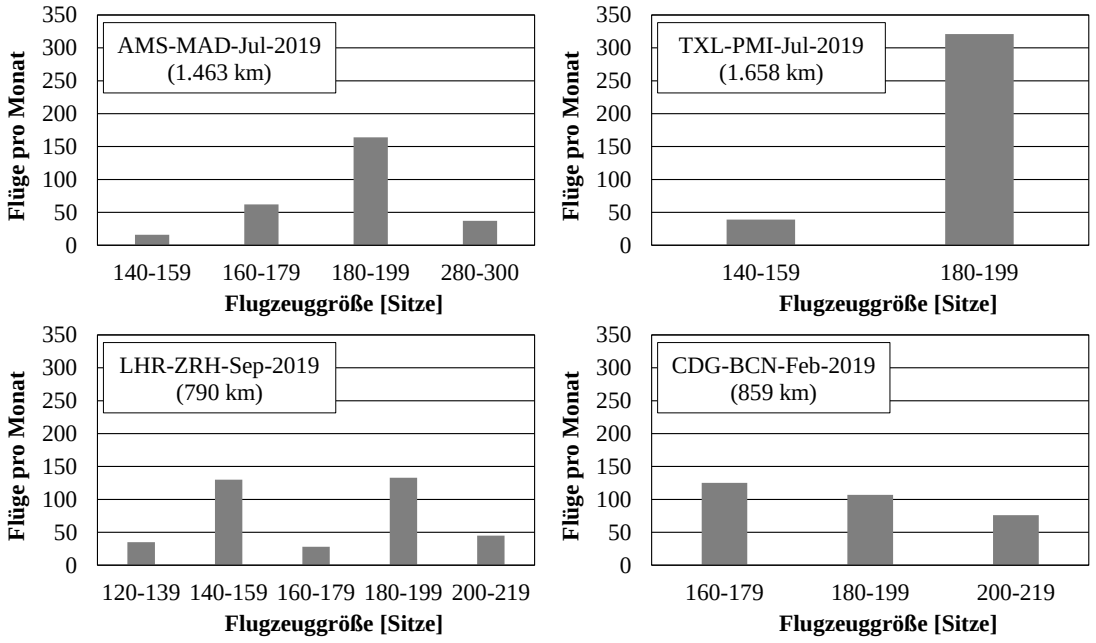

Abb. 3.18: Exemplarische Verteilungen der Flüge in Abhängigkeit der Flugzeuggröße auf ausgewählten Strecken (Sabre Airline Solutions, 2019)

3.6.2 Ziel und Besonderheiten des Optimierungsproblems

Die Art der Flottenzuweisung in FRED unterscheidet sich in einigen Aspekten von typischen Flottenzuweisungsmodellen. Das Ziel des in der vorliegenden Arbeit entwickelten Optimierungsmodells ist es, Flottenzuweisungen für frequenzreduzierte Strecken zu generieren, die das reale Airline-Verhalten für den Fall der Frequenzregulierung möglichst treffend beschreiben. Auf dieser Basis wird anschließend

die Validität von Frequenzregulierung mittels Analyse der ökologisch-ökonomisch-temporalen Effekte relativ zu einem Referenzszenario bewertet.

Es ist nicht das Ziel aufzuzeigen, wie Flottenzuweisung im Falle von Frequenzregulierung mit gegebenen Flotten *optimalerweise* erfolgen sollte. Dies würde es erfordern, empirische Flottenstrukturen und Airline-Netze über den gesamten Untersuchungszeitraum von 20 Jahren in die Zukunft fortzuschreiben, was aufgrund der Volatilität der Luftfahrtbranche unzweckmäßig erscheint. Zur Bestimmung der systemweiten Auswirkungen von Frequenzregulierung ist es außerdem auch nicht erforderlich, wie im Folgenden dargelegt wird.

Da keine empirischen Daten dazu vorliegen, wie Airlines ihre Flottenzuweisung anpassen, wenn sie mit Frequenzregulierung konfrontiert sind, wird an einigen Stellen mit Annahmen gearbeitet. Diese wurden möglichst abwägend und stets mit Bezug zum aktuellen Airline-Verhalten als Referenzpunkt getroffen.

In FRED sind die Anzahlen einzelner Flugzeugtypen ein Ergebnis der Flottenzuweisung und die Zielsitzplatzkapazität Eingangswert. Dies ist in den meisten Modellen zur Flottenzuweisung umgekehrt, da eine feststehende Flotte einem Netzwerk zugewiesen wird (Unterabschnitt 3.6.1). Mittels der Modellierungsweise in FRED soll hingegen herausgearbeitet werden, welche Änderungen sich in der Zusammensetzung einer Flotte durch Frequenzregulierung ergeben. Dies ist auch der Grund dafür, weshalb die einzelnen Strecken als räumlich-zeitlich unabhängig betrachtet werden:

Räumlich - Systemebene

Die untersuchten 798 höchstfrequentierten Strecken im EUROCONTROL-Raum (Unterabschnitt 4.1.1) sind eine Teilmenge mehrerer, sich teilweise überlappender Airline-Streckennetze. Die nicht zu diesen höchstfrequentierten Strecken gehörenden Flüge bleiben von Frequenzregulierung unberührt, d. h. die dortigen Flottenzuweisungen, können ebenfalls unangetastet bleiben, um die Problemgröße handhabbar zu halten. Gleichzeitig ist die Teilmenge der höchstfrequentierten Strecken groß genug, um als eigenes „virtuelles“ Netz betrachtet zu werden, auf dem eine eigene Flotte eingesetzt wird.

Räumlich - Streckenebene

Eine typische Nebenbedingung in klassischen Flottenzuweisungsproblemen ist (neben den Anzahlen verfügbarer Flugzeugtypen) die Einschränkung, dass genau der Flugzeugtyp, der von einem Flughafen zu einem anderen fliegt, auch wieder zurückfliegen muss. Dies wird über Flussbedingungen (*flow constraints*) modelliert (Barnhart et al., 2002). Die für die Flottenzuweisung in diesem Optimierungsproblem relevanten Parameter sind in beide

Richtungen einer Strecke identisch, so dass hier ohnehin die gleichen Flugzeugtypkombinationen zugewiesen werden.

Zeitlich - Saisonalitäten

Ein zu berücksichtigender Teilaspekt von Frequenzregulierung sind die saisonal schwankenden Intensitäten von Passagierströmen und Verspätungen (Abschnitt 4.2). Unter dem Teilziel, Verspätungen zu vermeiden, ergibt sich im Sommer eine stärkere Frequenzreduzierung als im Winter. Dies ist nachteilig für Airlines, da sie dann nur für den Sommer größere Flugzeuge bräuchten (Abschnitt 3.4). Um diese saisonalen Implikationen bzw. Anforderungen an Frequenzregulierung herauszuarbeiten, werden die Flottenzuweisungen auf Monatsebene als zeitlich unabhängig betrachtet.

Auch wenn insgesamt weniger Flüge auf einer Strecke stattfinden und sich der Flugzeuggrößendurchschnitt erhöht, kann davon ausgegangen werden, dass die auf Abbildung 3.15 beschriebenen Mechanismen auch mit Frequenzregulierung weitgehend intakt bleiben, so dass sich ähnlich geformte Frequenzverteilungen in Abhängigkeit der Flugzeuggröße einstellen. Derartige Verteilungen werden auch im Zusammenhang mit langfristig orientierten Vorhersagemodellen von Flugbewegungen verwendet (EUROCONTROL, 2018f; Kölker et al., 2016) und eignen sich daher ebenfalls für diesen Anwendungsfall.

Unter der Annahme, dass Nachfrage, Umsatz und die Sitzplatzkapazität konstant bleiben (Abschnitt 3.1), ist nur die Zusammensetzung des Flottenmixes auf einer Strecke (die Sitzplatzkapazitätsallokation) variabel. Dies wiederum ist als reines Betriebskostenminimierungsproblem aufzufassen, da Opportunitätskosten durch entgangene Umsätze aufgrund zu kleiner Flugzeuge (*spill costs*) wegfallen (Barnhart et al., 2003).

Folglich wird die Flottenzuweisung auf frequenzreduzierten Strecken in FRED mittels Lösung eines COC-minimierenden Optimierungsproblems modelliert (Unterabschnitt 3.6.3). Es werden die COC herangezogen, da diese eine höhere Aussagekraft bezüglich der technisch-operativen Leistungsfähigkeit eines Flugzeugs aufweisen im Vergleich zu den DOC (Unterabschnitt 3.5.1).

Dabei ist folgender Kompromiss erforderlich: Einerseits kann zur objektiven Bewertung von Frequenzregulierung sowie zur Handhabbarkeit des Optimierungsproblems nicht die Flottenzuweisung jeder individuellen Airline aufgelöst werden. Flottenzuweisung findet deshalb über sämtliche Airlines auf einer Strecke hinweg statt. Dies entspricht einem Airline-Monopolfall, wie er auch in einigen vergleichbaren Publikationen auf höherem Aggregationslevel angenommen wird (Brueckner, 2004; Vaze & Barnhart, 2012a).

Andererseits kann nicht davon ausgegangen werden, dass die airlineindividuellen Optima in Summe dem Gesamtoptimum einer Monopolairline entsprechen. So steigt beispielsweise die Flugzeugtypenvielfalt mit der Anzahl an Wettbewerbern auf einer Strecke (Sabre Airline Solutions, 2019). Diese Effekte werden über Nebenbedingungen dargestellt (Unterabschnitt 3.6.3).

Die Zuweisung mehrerer Flugzeugtypen (anstatt eines „Durchschnittstypen“) zu einer Strecke ist insbesondere für die Aufgabe der Frequenzregulierung relevant: Auf einem Großteil der untersuchten höchstfrequentierten Strecken werden bereits relativ große *Single-Aisle*-Flugzeuge mit 180 bis 200 Sitzen eingesetzt (Abschnitt 4.2). Eine Steigerung der durchschnittlichen Zielflugzeuggröße kann in vielen Fällen dazu führen, dass diese in der Größenlücke von 215 bis 325 Sitzen zwischen aktuellen *Single-* und *Twin-Aisle*-Flugzeugen liegt (Tabelle A.1). Um durchschnittliche Zielflugzeuggrößen in dieser Größenlücke zu erreichen, muss folglich ein Mix aus Flugzeugen aus den Größenkategorien darüber und darunter eingesetzt werden, d. h. diese müssen separat aufgelöst werden.

Hinzu kommt, dass die Zuweisung nur eines kostenminimalen Flugzeugtyps im Vergleich zu einem Flottenmix die realen Betriebskosten tendenziell unterschätzen würde. Es werden konkrete am Markt verfügbare Flugzeugtypen modelliert, diese sind jedoch primär als repräsentative Optionen ihrer jeweiligen Größenkategorie zu verstehen (Unterabschnitt 3.5.1).

Diesen Unterabschnitt zusammenfassend ist es folglich nicht das Ziel des Optimierungsmodells, die Zusammensetzung an Flugzeugtypen auf einer Strecke zu bestimmen im Sinne einer geschäftsoptimierenden Aufgabe, wie es bei typischen Flottenzuweisungsproblemen der Fall ist. Es handelt sich stattdessen um ein hypothesenbasiertes, beschreibendes Modell, welches das betriebskostenoptimierende Verhalten von Airlines nachbildet, um darauf aufbauend die Kosten- und Kerosinverbrauchseffekte von Frequenzregulierung berechnen zu können.

3.6.3 Formulierung des Optimierungsproblems

In diesem Unterabschnitt wird das ganzzahlige lineare Optimierungsproblem der Flottenzuweisung mathematisch formuliert. Im ersten Teil sind dazu die relevanten Verknüpfungen der verwendeten Parameter dargelegt. Im zweiten Teil folgt die Aufstellung der Zielfunktion und der Nebenbedingungen.

Die räumlich-zeitliche Unabhängigkeit der Flottenzuweisungen führt dazu, dass das Optimierungsproblem für jede frequenzreduzierte einzeln gelöst werden kann und die einzelnen streckenspezifischen Optimierungsprobleme relativ klein sind. Die Anzahl insgesamt zu untersuchender Strecken kann dadurch wiederum größer

sein. Aufgrund der geringen Problemgrößen erfolgt die Lösung durch vollständige Enumeration. Analog zu den Frequenzregulierungsansätzen des ersten Modellschritts wurde das Optimierungsproblem in der Programmiersprache *JAVA* implementiert. Eine vollständige Dokumentation der Implementierung von FRED findet sich in Presto (2021).

(a) Parameterverknüpfungen

Die folgende Liste enthält die innerhalb des Optimierungsproblems verwendeten Mengen:

AA	Menge der Flugzeugtypen a, die für eine Flottenzuweisung zur Verfügung stehen ($AA \subseteq A$)
AA^*	Menge AA aufsteigend nach Größe der Flugzeugtypen sortiert

Die Zielsitzplatzkapazität $TASC$ (*total available seat capacity*), die Summe der täglich angebotenen Sitzplätze auf einer Strecke, bleibt über den Prozess der Frequenzreduzierung hinweg konstant (Abschnitt 3.1). Sie ergibt sich aus der Zielfrequenz F (*frequency*) sowie der durchschnittlichen Zielflugzeuggröße AS (*average aircraft size*) gemäß Gleichung 3.31.

$$TASC = F * AS \tag{3.31}$$

Der auf Abbildung 3.15 dargestellte Zusammenhang in Bezug auf das eingesetzte Flugzeuggrößenspektrum auf einer Strecke wird über eine maximale untere und obere Abweichung von der Zielflugzeuggröße modelliert (Gleichung 3.32). Die maximale untere Abweichung von der Zielflugzeuggröße das^{low} (*deviation average aircraft size*), die ein Flugzeugtyp innerhalb einer Flottenzuweisung aufweisen darf, ist eine Funktion der durchschnittlichen Zielflugzeuggröße (Gleichung 3.32a). Zwischen einer durchschnittlichen Zielflugzeuggröße von 215 bis 325 Sitzen steigt das^{low} linear von 55 auf 110 an. Mit den verwendeten Sitzplatzanzahlen (Tabelle A.1) stellt die Größe von 215 etwa die Maximalgröße für ein *Single-Aisle*-Flugzeug dar, in diesem Fall der *A321neo*.

Bei 325 Sitzplätzen beginnt der *Twin-Aisle*-Bereich mit dem *Airbus A330-800*. Im *Twin-Aisle*-Bereich sind die Größenabstände der einzelnen Flugzeugtypen außerdem größer. Damit für Zielflugzeuggrößen in diesem Übergangsbereich sowie darüber hinaus genügend Flugzeugtypen für eine Flottenzuweisung zur Auswahl stehen, wird der valide Bereich sukzessive vergrößert.

Die maximale obere Abweichung das^{high} ist konstant, außer es existiert für die betroffene Strecke ein flughafenspezifisches Flugzeuggrößenlimit $AASL$ (Gleichung 3.32b). Für diesen Fall darf ein zugewiesener Flugzeugtyp maximal diese

Größe aufweisen. Die angegebenen Werte wurden mittels Flugplananalyse (Sabre Airline Solutions, 2019) sowie im Rahmen der Validierung (Unterabschnitt 4.3.2) kalibriert.

$$das^{low} = \begin{cases} 55 & AS < 215 \\ 55 + (AS - 215) * 0{,}5 & 215 \leq AS < 325 \\ 110 & AS \geq 325 \end{cases} \tag{3.32a}$$

$$das^{high} = \begin{cases} 110 & \nexists AASL \\ AASL - AS & \exists AASL \end{cases} \tag{3.32b}$$

Die Menge der für eine Flottenzuweisung zur Verfügung stehenden Flugzeugtypen AA (*available aircraft types*) ergibt sich aus der Menge derer, dessen Größe innerhalb der maximalen unteren das^{low} sowie oberen Abweichung das^{high} liegt und die im betrachteten Jahr y zur Verfügung stehen (Gleichung 3.33a). Als auf dem Markt verfügbar gelten Flugzeugtypen, deren EIS_a (*entry into service*) mindestens erreicht und deren EOP_a (*end of production*) noch nicht überschritten wurde (Rosskopf, 2013b). Zur Modellierung der Frequenzverteilung in Abhängigkeit der Flugzeuggröße (Gleichung 3.38) ist eine aufsteigende Sortierreihenfolge nach Größe der Flugzeugtypen erforderlich, was mittels der Menge AA^* erfolgt (Gleichung 3.33b).

$$\begin{aligned} AA = \{a \in A \mid S_a \in [AS - das^{low}, AS + das^{high}]\} \\ \cap \{a \in A \mid EIS_a \leq y \wedge EOP_a \geq y\} \end{aligned} \tag{3.33a}$$

$$AA^* = \{a_1, a_2, ..., a_n \mid a_i \in AA, S_{a_i} < S_{a_{i+1}} \forall i = 1, ..., n-1\} \tag{3.33b}$$

Das folgende Beispiel illustriert das Prinzip der Funktionsweise von Gleichung 3.32 und Gleichung 3.33: Bei einer durchschnittlichen Zielflugzeuggröße von $AS = 200$ im Jahr 2030 würden sämtliche Flugzeugtypen mit einer Sitzplatzanzahl von 145 (220-55) Sitzen bis 310 (200+110) Sitzen zur Verfügung stehen. Dies entspricht sämtlichen Flugzeugtypen mit einer normierten Sitzplatzanzahl in diesem Intervall (Tabelle A.1) und einem EOP nach 2030 (Konkret: *A220-300, A319neo, A320neo, A321neo, B737M-7, B737M-8, B737M-9, B737M-10*).

Wie in der Praxis üblich, wird folglich ein Flottenmix bestehend aus mehreren unterschiedlichen Flugzeugtypen auf einer Strecke eingesetzt (Abbildung 3.15). Um zu vermeiden, dass ggf. nur ein betriebskostenminimaler Flugzeugtyp einer Strecke zugewiesen wird, ist eine Mindestanzahl Flugzeugtypen NA^{min} (*number of aircraft*

types) definiert gemäß Gleichung 3.34. Diese ist eine Funktion der Wettbewerberanzahl C (*competitors*) auf einer Strecke sowie der Zielfrequenz F.

Mit der Abhängigkeit von der Wettbewerberanzahl wird die empirische Beobachtung modelliert, dass mit einer höheren Anzahl Airlines auf einer Strecke eine größere Flugzeugtypenvielfalt einhergeht. Die Abhängigkeit von der Zielfrequenz wird verwendet, da die Anzahl Flugzeugtypen nicht größer sein kann als die Anzahl der Flüge. Die verwendeten Werte wurden basierend auf Flugplananalysen (Sabre Airline Solutions, 2019) ermittelt sowie innerhalb der Validierung kalibriert (Unterabschnitt 4.3.2), so dass sie für 94% der untersuchten Strecken zutreffen.

$$NA^{min} = \begin{cases} F & F < C \\ C & C \leq 3 \wedge F \geq C \\ 4 & C \geq 4 \wedge F \geq C \end{cases} \tag{3.34}$$

Aus folgenden Gründen wird ein Mindestwert NA^{min} anstatt eines Durchschnittswertes verwendet:

- Es ist davon auszugehen, dass Frequenzregulierung eher zu einer Abnahme der Flugzeugtypenvielfalt auf einer Strecke führt. Im *Single-Aisle*-Bereich liegt dies darin begründet, dass bereits auf einem Großteil der untersuchten Strecken relativ große *Single-Aisle*-Flugzeuge eingesetzt werden (Abbildung 3.17). Mit zunehmender Zielflugzeuggröße reduziert sich die Anzahl möglicher Flugzeugtypoptionen, da erwartet wird, dass Airlines den Einsatz von *Twin-Aisle*-Flugzeugen möglichst vermeiden, solange die durchschnittliche Zielflugzeuggröße dies zulässt (Abschnitt 2.2 und Unterabschnitt 3.3.1). Im *Twin-Aisle*-Bereich ist der Größenunterschied zwischen einzelnen Flugzeugtypen größer, so dass hier ebenfalls weniger Flugzeugtypen zur Erreichung einer bestimmten Zielflugzeuggröße in Frage kommen.
- Die Annahme der zeitlich-räumlichen Unabhängigkeit der frequenzreduzierten Strecken erlaubt es methodisch nicht, einen streckenübergreifenden Durchschnittswert festzulegen.

(b) Zielfunktion und Nebenbedingungen

Die folgende Auflistung enthält einleitend die Entscheidungsvariablen des Optimierungsproblems in alphabetischer Reihenfolge:

$AASC$	Tatsächlich angebotene Sitzplatzkapazität einer Flottenzuweisung (*actual available seat capacity*)

f_a	Frequenz eines Flugzeugtyps a innerhalb einer Flottenzuweisung (*frequency*)
NA	Anzahl unterschiedlicher Flugzeugtypen a innerhalb einer Flottenzuweisung (*number of aircraft types*)
u_a	Binäre Hilfsvariable, die anzeigt, ob ein Flugzeugtyp innerhalb einer Flottenzuweisung verwendet wird (*utilized*)
$v_{i,i+1}$	Binäre Hilfsvariable, die anzeigt, ob die Frequenz zwischen zwei Flugzeugtypen innerhalb einer Flottenzuweisung in AA^* steigt, fällt oder gleich ist

Die Zielfunktion (3.35) minimiert die COC einer Flottenzuweisung $COCFA$ (*cash operating cost of fleet assignment*), die sich aus der Summe der COC_a jedes einzelnen Flugzeugtypen sowie dessen Frequenz f_a ergeben. Dies geschieht für sämtliche $rmy \in RMY$ separat, da diese als räumlich-zeitlich unabhängig betrachtet werden (Unterabschnitt 3.6.2), daher sind innerhalb der Problemformulierung keine Indizes für die Strecke r, den Monat m oder das Jahr y erforderlich.

$$\min COCFA = \sum_{a \in AA} COC_a * f_a \tag{3.35}$$

Unter Berücksichtigung der geringeren Tripkosten von kleineren Flugzeugen führt die Minimierung der Summe der COC einer Flottenzuweisung tendenziell dazu, dass Flottenzuweisungen am unteren Ende des Zielsitzplatzkapazitätsbandes gewählt werden (Gleichung 3.36).

Alternativ ließen sich die durchschnittlichen COC/ASK (Gleichung 3.25c) einer Flottenzuweisung minimieren. Dadurch würden die Flottenzuweisungen eher in der oberen Hälfte des Zielsitzplatzkapazitätsbandes liegen, da eine höhere Sitzplatzkapazität in Kombination mit den abnehmenden Sitzplatzkosten größerer Flugzeuge die COC/ASK der Flottenzuweisung tendenziell reduziert. Dies würde allerdings dazu führen, dass in der Zielfunktion durch die Entscheidungsvariable $AASC$ geteilt werden müsste, wodurch das Optimierungsproblem nichtlinear würde.

Die Summe der Frequenzen der einzelnen Flugzeugtypen einer Flottenzuweisung entspricht der Zielfrequenz auf einer Strecke F (Gleichung 3.36a). Die tatsächlich angebotene Sitzplatzkapazität $AASC$ einer Flottenzuweisung ergibt sich aus der Frequenz jedes Flugzeugtyps f_a sowie seiner Flugzeuggröße S_a (Gleichung 3.36b).

$AASC$ darf die maximale positive und negative Abweichung von der Zielsitzplatzkapazität dsc (*deviation from target seat capacity*) nicht über- oder unterschreiten (Gleichung 3.36c und 3.36d), basierend auf der Modellierungsweise von Rosskopf (2013b).

Damit wird erreicht, dass die verfügbare Sitzplatzkapazität vor und nach der Frequenzreduzierung etwa gleich bleibt. Eine Abweichung von 1% nach oben und unten wird zugelassen wodurch sich ein zulässiges Zielsitzplatzkapazitätsband ergibt. Dieser Wert wurde innerhalb der Validierung kalibriert (Unterabschnitt 4.3.2). In Unterabschnitt 5.7.2 werden Sensitivitätsanalysen von dsc durchgeführt, um den Einfluss dieses Parameters auf die Modellergebnisse im Zusammenhang mit Frequenzregulierung auszuleuchten.

$$F = \sum_{a \in AA} f_a \tag{3.36a}$$

$$AASC = \sum_{a \in AA} S_a * f_a \tag{3.36b}$$

$$AASC \leq TASC * (1 + dsc/100) \tag{3.36c}$$

$$AASC \geq TASC * (1 - dsc/100) \tag{3.36d}$$

Die Anzahl unterschiedlicher Flugzeugtypen NA auf einer Strecke muss den Mindestwert NA^{min} erreichen (Gleichung 3.37a) und wird mittels der binären Hilfsvariable u_a modelliert. Diese zeigt an, ob ein Flugzeugtyp innerhalb einer Flottenzuweisung verwendet oder nicht verwendet wird und nimmt den Wert eins oder respektive null an (Gleichung 3.37b). Der Parameter w ist ein Hilfswert, der so gewählt wird, dass gilt $w \gg f_a$ (Gleichung 3.37c). Damit wird sichergestellt, dass u_a nur dann den Wert eins annimmt, wenn ein Flugzeugtyp verwendet wird.

$$NA \geq NA^{min} \tag{3.37a}$$

$$NA = \sum_{a \in AA} u_a \tag{3.37b}$$

$$\frac{f_a}{w} \leq u_a \leq f_a \qquad \forall a \in AA \tag{3.37c}$$

Die Zusammensetzung der Flottenzuweisung auf einer Strecke wird über die empirisch zu beobachtenden Frequenzverteilungen in Abhängigkeit der Flugzeuggrößen modelliert (Abbildung 3.15). Demnach sind drei übergeordnete Verteilungsarten zulässig:

- Eine zuerst monoton steigende und dann monoton fallende Verteilung: Diese Verteilung entspricht dem aggregierten Durchschnitt auf den höchstfrequentierten Strecken im EUROCONTROL-Raum (Abbildung 3.17) und ist beispielsweise auf der Strecke *AMS-MAD* zu erkennen (Abbildung 3.18).

- Eine monoton steigende Verteilung: Diese Verteilung ist insbesondere relevant, wenn sich die Zielflugzeuggröße nahe der maximalen Flugzeuggröße im *Single-Aisle*-Bereich befindet, beispielsweise die Strecke *TXL-PMI* auf Abbildung 3.18. Mit der oben eingeführten Annahme, dass Airlines den Einsatz von *Twin-Aisle*-Flugzeugen auf Kurzstrecke möglichst vermeiden, ergibt sich dann eine Flottenzuweisung, die beispielsweise zum Großteil aus *A321neo* sowie einigen kleineren Flugzeugtypen besteht.
- Eine monoton fallende Verteilung: Diese Verteilung kann auftreten, wenn die Zielflugzeuggröße zwar oberhalb des *Single-Aisle*-Bereichs, aber immer noch näher am *Single-* statt *Twin-Aisle*-Bereich liegt, z. B. bei 240 Sitzen. Dann würden beispielsweise *A321neo* (215 Sitze) und eine geringere Zahl *A330-800* (321 Sitze) zugewiesen werden. Alternativ kann diese Verteilung auch bei kleineren Zielflugzeuggrößen auftreten, wie beispielsweise auf der Strecke *CDG-BCN* auf Abbildung 3.18.

Mit diesem Vorgehen wird zwar nur ein Teil der möglichen Verteilungsarten abgedeckt (Abbildung 3.18). Vor dem Hintergrund des langen Zeithorizontes wäre es jedoch nicht zweckmäßig z. B. jede empirische streckenspezifische Verteilung 20 Jahre in die Zukunft fortzuschreiben. Entscheidender für die ökologisch-ökonomische Bewertung ist vielmehr, dass sich auf Gesamtsystemebene eine ähnlich geartete Verteilung wie auf Abbildung 3.17 einstellt.

Die Nebenbedingungen in Gleichung 3.38 beschreiben zulässige Kombinationen an Frequenzen von unterschiedlichen Flugzeugtypen innerhalb einer Flottenzuweisung. Dazu wird die binäre Hilfsvariable $v_{i,i+1}$ eingeführt, die das Verhältnis von zwei Frequenzen f_{a_i} und $f_{a_{i+1}}$ von zwei größenmäßig aufeinanderfolgenden Flugzeugtypen aus der Menge AA^* beschreibt. Ist $v_{i,i+1}= 0$, so ist die Frequenzkurve an der Stelle monoton steigend ($f_{a_i} \leq f_{a_{i+1}}$). Ist $v_{i,i+1}= 1$, so ist sie an der Stelle monoton fallend ($f_{a_i} \geq f_{a_{i+1}}$).

$$v_{12} \leq v_{23} \leq ... \leq v_{n-1,n} \tag{3.38a}$$

$$-v_{i,i+1} * w \leq f_{a_{i+1}} - f_{a_i} \leq (1 - v_{i,i+1}) * w \qquad \begin{matrix} \forall a \in AA^* \\ \forall i \in \{1,...,n-1\} \end{matrix} \tag{3.38b}$$

Sobald $v_{i,i+1}$=1, handelt es sich um den absteigenden Ast der Frequenzkurve. Die Hilfsvariable $v_{i,i+1}$ bleibt eins und die Frequenzkurve ist damit monoton fallend für alle darauffolgenden Frequenzen größerer Flugzeuge. Wenn die Frequenz zweier benachbarter Flugzeugtypen identisch ist, kann $v_{i,i+1}$ beide Werte annehmen. Für die Variable n zur Definition des Wertebereichs der Laufvariable i gilt hierbei

$n \geq NA$, da ein Flugzeugtyp zwar für eine Flottenzuweisung in AA^* zur Verfügung stehen, seine Frequenz jedoch null betragen kann. Abschließend sind die Wertebereiche der Entscheidungsvariablen definiert (Gleichung 3.39).

$$AASC \in \mathbb{N}_0 \tag{3.39a}$$

$$f_a \in \mathbb{N}_0 \qquad \forall a \in AA \tag{3.39b}$$

$$NA \in \mathbb{N}_0 \tag{3.39c}$$

$$u_a \in \{0,1\} \qquad \forall a \in AA \tag{3.39d}$$

$$v_{i,i+1} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in \{1,...,n-1\} \tag{3.39e}$$

Wenn in Ausnahmefällen das Problem nicht lösbar ist, weil keine Flottenzuweisung sämtliche Nebenbedingungen erfüllt, werden zwei alternative Lösungsversuche unternommen: Zuerst wird die Mindestanzahl Flugzeugtypen NA^{min} um 2 reduziert. Bleibt das Problem trotzdem unlösbar, wird der einzelne Flugzeugtyp für alle Frequenzen auf der betreffenden Strecke zugewiesen, bei dem die Abweichung zwischen $AASC$ und $TASC$ am geringsten ist.

3.7 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurden die Ziele von Frequenzregulierung und die Funktionsweise des Frequenzreduzierungsmodells FRED beschrieben. Frequenzregulierung verfolgt das Ziel, durch den Einsatz größerer Flugzeuge bei weniger Flugbewegungen (konstante Sitzplatzkapazität) ökologisch-ökonomisch-temporale Effizienzen zu generieren. FRED quantifiziert diese Effizienzpotenziale in einem zweistufigen Vorgehen.

Im ersten Schritt, dem Frequenzreduzierungsschritt, werden unterschiedliche Frequenzregulierungsansätze durchgeführt. Diese beschreiben Prinzipien, nach denen die Streckenauswahl zur Frequenzreduzierung sowie die Bestimmung einer konkreten Anzahl Flüge auf jeder Strecke erfolgt. Es wurden acht Ansätze entwickelt, die sich hinsichtlich der zugrunde liegenden Zielmetriken und ihrer regulatorischen Komplexität unterscheiden.

Vier Ansätze berücksichtigen eine maximal zulässige Flugzeuggröße bis zu der erhöht werden darf, um die Sitzplatzkapazität auf einer Strecke bei reduzierter Frequenz konstant zu halten. Damit wird der Einsatz von *Twin-Aisle*-Flugzeugen vermieden, da diese in den meisten Fällen höhere Sitzplatzkosten und -emissionen im Kurzstreckenbetrieb aufweisen.

Im zweiten Schritt, dem Flottenzuweisungsschritt, erfolgt die Zuweisung von Flottenmixen zu den frequenzreduzierten Strecken. Auf der Basis werden anschließend die ökologischen und ökonomischen Effekte von Frequenzregulierung untersucht. Die Betriebskosten- sowie Kerosinverbrauchsberechnungen erfolgen mittels detaillierter und aktueller DOC- sowie respektive Flugleistungsrechnungsmodelle.

Die Flottenzuweisung wurde mittels der Formulierung und Implementierung eines kleinen ganzzahligen linearen Optimierungsproblems modelliert, das airlineübergreifend für jede frequenzreduzierte Strecke einzeln gelöst wird. Die Zielfunktion minimiert die COC einer Flottenzuweisung unter Berücksichtigung von Randbedingungen, mit denen sichergestellt wird, dass sich reale Flugzeuggrößenverteilungen ergeben.

4. Modellanwendung

In diesem Kapitel werden in Abschnitt 4.1 die Auswahl der höchstfrequentierten Strecken im EUROCONTROL-Raum als Untersuchungsgegenstand begründet sowie die Verkehrs- und Verspätungssituation der letzten Jahre in dieser Region beschrieben. In Abschnitt 4.2 folgen die verwendeten Eingangsdaten inklusive der Projektion von Verkehrs- und Verspätungsdaten bis 2040. Auf dieser Basis werden einzelne Modellbestandteile in Abschnitt 4.3 verifiziert und validiert. Dieses Kapitel stellt damit die Brücke zwischen der Modellentwicklung in Kapitel 3 und der Ergebnisauswertung in Kapitel 5 dar.

4.1 Auswahl des Untersuchungsraums

4.1.1 Höchstfrequentierte Strecken im EUROCONTROL-Raum

Als Untersuchungsraum und Anwendungsfall für FRED wurde der EUROCONTROL-Raum ausgewählt. Darunter werden die Lufträume und Flughäfen der 41 EUROCONTROL-Mitgliedsstaaten (EUROCONTROL, 2019c) verstanden. Diese regionale Auswahl wurde aus den folgenden Gründen getroffen:

- Seitens der EUROCONTROL, insbesondere des *Central Office for Delay Analysis* (CODA), werden umfangreiche Verkehrs- sowie ATFM-Verspätungsdaten-, -analysen und -vorhersagen zur Verfügung gestellt (EUROCONTROL, 2018b, 2019c). Dies ermöglicht eine detaillierte und fundierte Analyse.
- Verkehrsgeografisch handelt es sich beim EUROCONTROL-Raum um ein relativ abgeschlossenes System, da 2018 ca. 96% der Flüge nach *Instrument Flight Rules* (IFR), die den EUROCONTROL-Luftraum nutzten, auch darin starteten und/oder landeten (EUROCONTROL, 2019c). Damit kommt die aus der Frequenzreduzierung resultierende Systementlastung vor allem den Airlines zu Gute, die gleichzeitig auch maßgeblich davon betroffen sind.
- Die Mehrheit der themenverwandten Untersuchungen fokussiert den US-amerikanischen Raum (Kapitel 2). Eine Untersuchung mit europäischem Fokus erhöht somit den wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn.

Aus den gut 37.000 Strecken mit Start- oder Zielflughafen innerhalb des EUROCONTROL-Raums wurden die 20 höchstfrequentierten Strecken ausgehend von jedem der 26 größten Airline-Hubs (Abbildung 4.1, Tabelle B.1) als potenziell zu frequenzregulierende ausgewählt.

Insgesamt ergibt sich daraus eine Menge an 798 verschiedenen Strecken bzw. 399 Flughafenpaaren. Im Jahr 2019 fanden auf diesen Verbindungen ca. 2,3 Mio. Flüge statt (durchschnittlich ca. 6.300 Flüge täglich), was etwa einem Viertel der Flüge im gesamten EUROCONTROL-Raum entspricht. Die durchschnittliche Frequenz liegt bei 8 Flügen pro Tag, die fluganzahlgewichtete Distanz bei 1.010 km und die Flugzeuggröße bei 163 Sitzen (Sabre Airline Solutions, 2019).

Abb. 4.1: Untersuchte 26 größte Flughäfen im EUROCONTROL-Raum nach Passagieren in 2019 (Tabelle B.1)

Mit den ausgewählten Flughäfen sind die Hubs sämtlicher europäischer Netzwerkairlines abgedeckt, womit dem Aspekt der Fairness Rechnung getragen wird. Außerdem bieten insbesondere Netzwerkairlines tendenziell höhere Frequenzen an als Airlines, die ein Punkt-zu-Punkt Netzwerk betreiben.

Alternativ ließen sich auch flughafenunabhängig sämtliche Strecken auswählen, die eine bestimmte Frequenz übersteigen. Damit würden zwar insbesondere Strecken mit hoher Frequenz noch gezielter angegangen werden, allerdings würden dann bestimmte Airlines ggf. übermäßig und andere weniger betroffen sein. Eine weitere Vorgehensweise wäre, nicht nur einzelne Flughäfen, sondern auch die Flughafen-Systeme von Metropolregionen (insbesondere London und Paris) zu berücksichtigen, was jedoch tendenziell die regulatorische Komplexität erhöht.

Ausgenommen wurde der *Flughafen Istanbul-Atatürk* bzw. der neuere *Flughafen Istanbul*, da die Zielflughäfen der davon ausgehenden höchstfrequentierten Strecken, im Gegensatz zu allen anderen zentraleuropäischen Airline-Hubs, vornehmlich inländisch sind oder sich nicht im übrigen EUROCONTROL-Raum befinden. Somit bestehen geringere Wechselwirkungen zwischen diesen Strecken und dem Rest des EUROCONTROL-Raums. Verbindungen zwischen den zentraleuropäischen Airline-Hubs und Istanbul werden jedoch berücksichtigt.

4.1.2 Verkehrs- und Verspätungssituation

Für die folgenden Ausführungen wurden geplante (i. S. v. einen Flugplan aufgegeben) IFR-Flüge im EUROCONTROL-Raum als Basis verwendet. Diese machen den Großteil (2016 - 2019 ca. 85%) der durchgeführten Flugbewegungen aus und decken nahezu vollständig die kommerzielle Luftfahrt ab. Nicht geplante, gestrichene oder militärische Flüge sowie die allgemeine Luftfahrt (*general aviation*) wurden nicht betrachtet. Damit wird Datenkonsistenz zwischen den unterschiedlichen Datenquellen hergestellt (Unterabschnitt 4.3.1).

Abbildung 4.2 veranschaulicht, dass die Anzahl der Flüge im EUROCONTROL-Raum zwischen 2014 und 2019 um ca. 17% gestiegen ist, während auf den höchstfrequentierten Strecken ein Wachstum von ca. 10% zu verzeichnen ist. Die durchschnittliche ATFM-Verspätung pro Flug nahm um 108% und respektive 92% zu. In Bezug auf die Flugbewegungen reagieren die ATFM-Verspätungen auf den höchstfrequentierten Strecken damit vergleichsweise sensitiv, was darauf hindeutet, dass diese gemäß Warteschlangentheorie näher an ihrer Kapazitätsgrenze betrieben werden (Odoni, 2001).

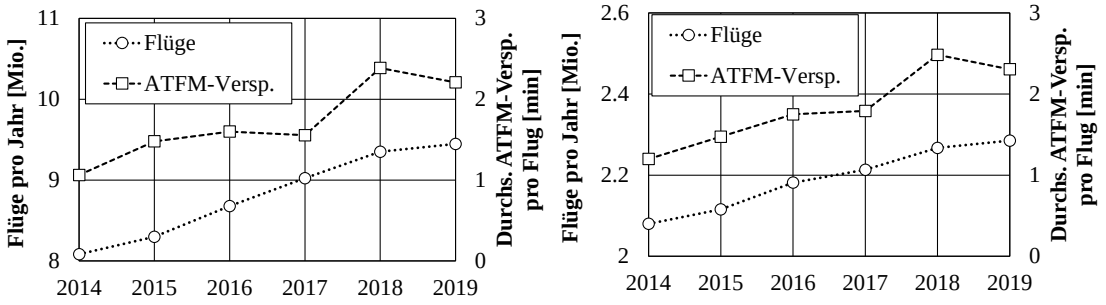

Abb. 4.2: Historische Entwicklung der Flüge und der durchschnittlichen ATFM-Verspätung im EUROCONTROL-Raum (links) und auf den höchstfrequentierten Strecken (rechts) (EUROCONTROL, 2019c)

Auf dieser aggregierten Darstellung ist die durchschnittliche ATFM-Verspätung pro Flug auf den höchstfrequentierten Strecken nicht nennenswert höher, sondern liegt im systemweiten Durchschnitt. Aufgrund des hohen Anteils an Umsteigepassagieren an Hub-Flughäfen sind Verspätungen hier jedoch als kritischer einzustufen. Die ähnliche durchschnittliche ATFM-Verspätung pro Flug auf den höchstfrequentierten Strecken wie im gesamten EUROCONTROL-Raum ist dabei

ein Ergebnis des CASA-Algorithmus in Kombination mit der UDPP (Unterabschnitt 2.3.1) mit dem Ziel, ATFM-Verspätungen möglichst gleichmäßig zu verteilen.

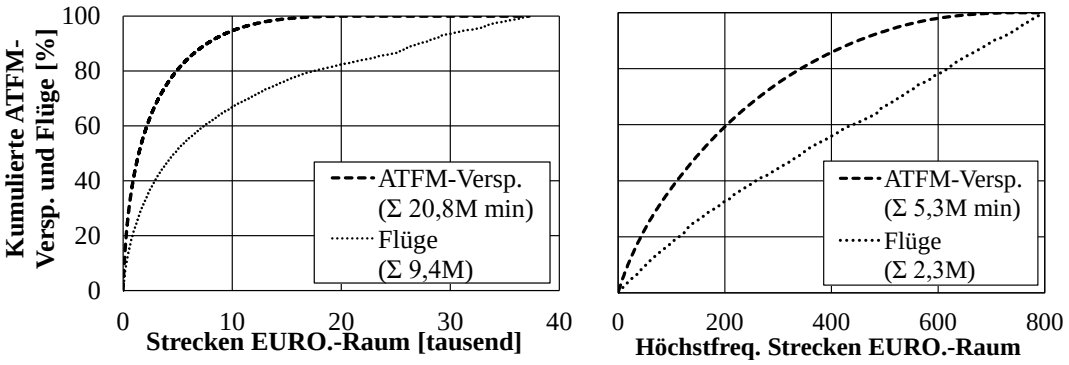

Abb. 4.3: Kumulierte relative ATFM-Verspätung und Flüge für den EUROCONTROL-Raum (links) und die höchstfrequentierten Strecken (rechts) in 2019, jeweils absteigend sortiert nach Anzahl der ATFM-Verspätungsminuten pro Strecke (EUROCONTROL, 2019c)

Auf Streckeneinzelebene wird allerdings deutlich, dass sowohl im gesamten EUROCONTROL-Raum als auch auf den höchstfrequentierten Strecken die kumulierten ATFM-Verspätungen relativ konzentriert auf wenigen Strecken entstehen. Auf Abbildung 4.3 sind dazu die kumulierten relativen ATFM-Verspätungsminuten und Flüge für den EUROCONTROL-Raum sowie die höchstfrequentierten Strecken in 2019 dargestellt. Unter die ersten 4.200 Strecken des EUROCONTROL-Raums (durchschnittlich ca. 12.300 Flüge täglich) fallen dabei 80% der höchstfrequentierten Strecken (durchschnittlich ca. 5.200 Flüge täglich).

Im EUROCONTROL-Raum entstehen 80% der kumulierten ATFM-Verspätungen auf ca. 13% der Strecken und durch ca. 51% der Flüge. Auf den höchstfrequentierten Strecken entstehen 80% der kumulierten ATFM-Verspätungen auf ca. 44% der Strecken durch ca. 50% der Flüge. Der vergleichsweise gerade Verlauf der Flugkurve auf den höchstfrequentierten Strecken ist dabei ein Indikator für eine relativ gleichmäßige Verteilung der Flügeanzahl.

Abbildung 4.4 verdeutlicht hinzufügend, dass die durchschnittliche ATFM-Verspätung auf den Verbindungen zwischen den größten Airline-Hubs durchgängig höher ist als auf den übrigen höchstfrequentierten Strecken. Aus geografischer Perspektive ist insbesondere die zentraleuropäische Region bestehend aus Südwestdeutschland (*DUS, FRA, MUC*), Belgien (*BRU*), den Niederlanden (*AMS*), Nordostfrankreich (*CDG, ORY*), der Schweiz (*ZRH*) und dem Großraum London (*LHR, LGW, STN*) von höheren ATFM-Verspätungen betroffen. An den skandinavischen Flughäfen (*CPH, ARN, HEL, OSL*) ist das Gegenteil der Fall, mutmaßlich aufgrund ihrer geografischen Randlage im EUROCONTROL-Raum (siehe auch Abbildung 2.3).

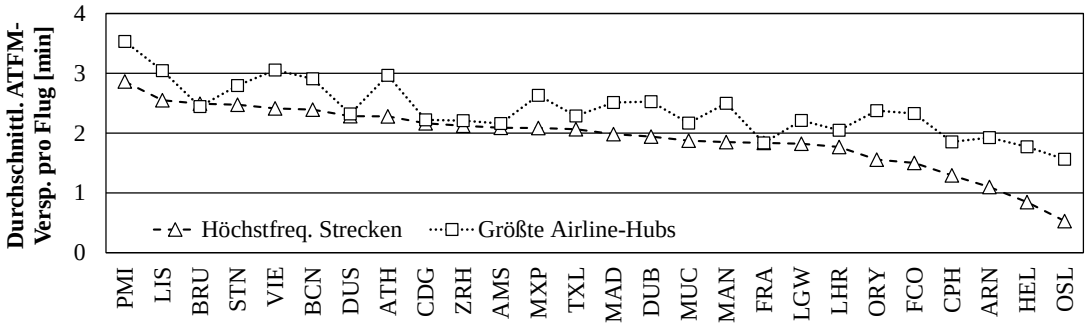

Abb. 4.4: Durchschnittliche ATFM-Verspätung ausgehend von den 26 größten Airline-Hubs, getrennt nach höchstfrequentierten Strecken und den 26 größten Airline-Hubs in 2019 (EUROCONTROL, 2019c)

Abbildung 4.5 zeigt die Flüge pro Tag und die durchschnittliche Flugzeuggröße ausgehend von den 26 größten Airline-Hubs auf sämtlichen höchstfrequentierten Strecken sowie nur zwischen den größten Airline-Hubs. Die Sortierung der Airline-Hubs erfolgt in absteigender Reihenfolge nach der Anzahl der Flüge und variiert leicht zwischen den beiden Abbildungen. Sie korreliert ungefähr mit der Gesamtgröße der Flughäfen, gemessen an der Anzahl Flugbewegungen über das Jahr hinweg (Tabelle B.1).

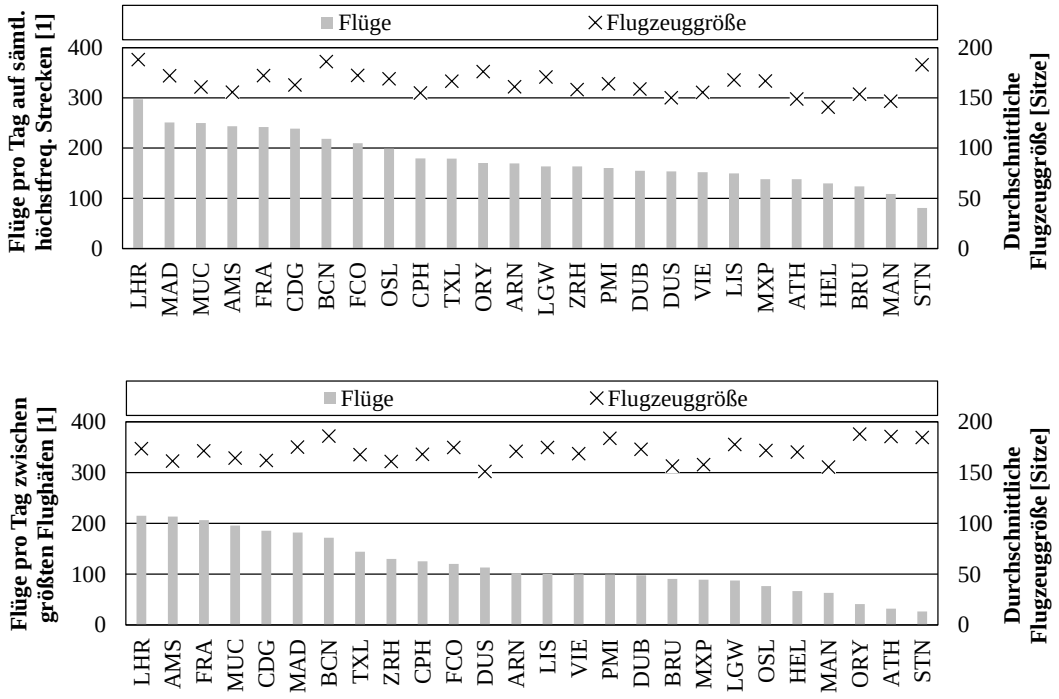

Abb. 4.5: Anzahl täglicher Flüge und durchschnittliche Flugzeuggröße ausgehend von jedem der größten 26 Airline-Hubs, separiert nach den höchstfrequentierten Strecken (oben) sowie nur zwischen den größten 26 Airline-Hubs in 2019 (Sabre Airline Solutions, 2019)

Zum einen wird dabei deutlich, dass ein Großteil der höchstfrequentierten Strecken die Verbindungen zwischen den größten Airline-Hubs sind (ca. 66%). Zum anderen ist die durchschnittliche Flugzeuggröße zwischen den größten Airline-Hubs minimal größer (ca. 2,5%). Dies stützt die Erkenntnisse von Berster et al. (2015), wonach die Flugzeuggröße an überlasteten Flughäfen leicht zunimmt (Abschnitt 2.1). Insgesamt befinden sich die Flugzeuggrößen ausgehend von den größten 26 Airline-Hubs jedoch alle in einem ähnlichen Größenbereich zwischen 150 und 200 Sitzen pro Flug.

Die saisonalen Unterschiede im Flugverkehrsaufkommen sowie der daraus resultierenden durchschnittlichen ATFM-Verspätung von 2014 bis 2019 sind auf Abbildung 4.6 dargestellt. Hier wird deutlich, dass die Jahresdurchschnitte vor allem durch die Spitzen im Sommer getrieben sind. Außerdem ist der Verlauf der durchschnittlichen ATFM-Verspätung weniger gleichförmig als der der Flüge. Dies unterstreicht, dass die durchschnittliche ATFM-Verspätung neben der Anzahl der Flüge im System von weiteren Faktoren abhängig ist (Unterabschnitt 3.2.2).

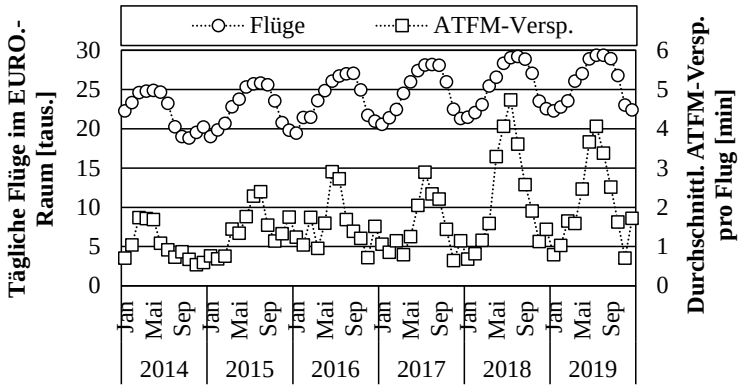

Abb. 4.6: Historische monatliche Entwicklung der durchschnittlichen ATFM-Verspätung und Anzahl täglicher Flüge im EUROCONTROL-Raum (EUROCONTROL, 2019c)

Abbildung 4.7 schlüsselt die Ursachen für die zunehmenden ATFM-Verspätungen in den letzten Jahren auf. Während von 2014 bis 2017 Kapazitätsengpässe an Flughäfen und im Luftraum (*en-Route*) noch etwa gleichermaßen ATFM-Verspätungen ausgelöst haben, war 2018 und 2019 vornehmlich die *en-Route*-Kapazität verursachend. Dies könnte mutmaßlich damit zusammenhängen, dass in den letzten Jahren das Flugverkehrswachstum bedingt durch die Billigfluggesellschaften eher an den sekundären, weniger überlasteten Flughäfen stattfand. Der Luftraum wird hingegen gleichermaßen von Hub- und Direktverkehren genutzt. Andere Ursachen (z. B. Streiks) spielen praktisch keine Rolle.

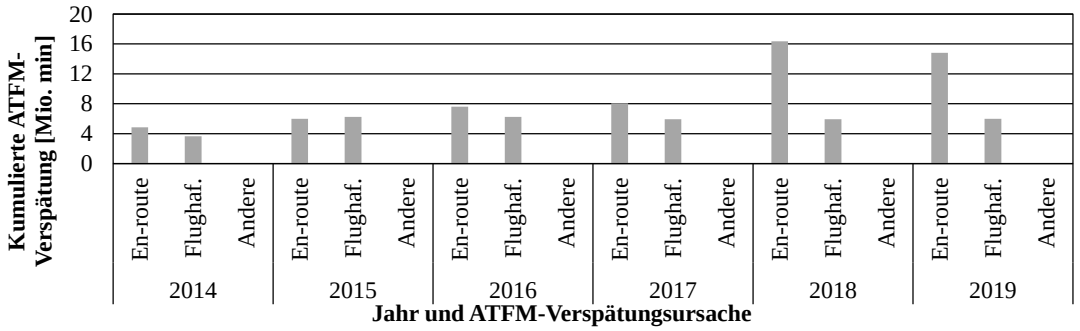

Abb. 4.7: Historische Entwicklung der Ursachen für ATFM-Verspätungen (EUROCONTROL, 2019c)

Schlussfolgernd stützen diese Zahlengerüste das Vorgehen zur Frequenzregulierung, die höchstfrequentierten Strecken heranzuziehen: Zwar ist die durchschnittliche ATFM-Verspätung pro Flug dort nicht nennenswert größer als im restlichen EUROCONTROL-Raum, aufgrund der Vielzahl an Flügen auf einigen Verbindungen sind die kumulierten Verspätungsminuten dennoch auf einigen Strecken sehr ausgeprägt. Gerade hier lassen sich Frequenzen zudem aufgrund eines geringen Schedule Delays am ehesten reduzieren, ohne die Verbindungsqualität übermäßig einzuschränken. Zudem gibt es keine anderen Häufungen artähnlicher Strecken, auf denen ATFM-Verspätungen noch deutlich kritischer sind und die deshalb im Fokus stehen könnten.

4.2 Datengrundlagen

In diesem Abschnitt sind die verwendeten Eingangsdaten für FRED beschrieben, beginnend mit der Vorhersagemethodik der Verkehrsdaten (Unterabschnitt 4.2.1). Ausgehend von den im vorherigen Abschnitt 4.1 beschriebenen historischen Entwicklungen erfolgt diese Vorhersage von 2019 bis 2040. Es folgen die Flug- und Passagieranzahlen (Unterabschnitt 4.2.2) sowie die Verspätungen (Unterabschnitt 4.2.3). In Unterabschnitt 4.2.4 werden die verwendeten Flugzeugdaten vorgestellt. In Summe werden für jeden Durchlauf von FRED ca. 345.000 Datensätze eingelesen und verarbeitet.

Die in diesem Abschnitt vorgestellte Datenbasis dient außerdem als Referenzszenario, mit dem sämtliche Frequenzregulierungsansätze in Kapitel 5 verglichen werden. Das Referenzszenario stellt die Entwicklung dar, die sich ergibt, wenn keine Frequenzregulierung durchgeführt wird.

4.2.1 Vorhersagemethodik der Verkehrsdaten

Zur Vorhersage der Verkehrsdaten (Flüge, Flugzeuggrößen, Passagiere, ATFM-Verspätungen) dienen der offizielle Bericht *Challenges of Growth* von EUROCONTROL (EUROCONTROL, 2018b) sowie die Datenbank mit empirischen Verkehrs- und Verspätungsdaten von CODA. Aus dem Bericht *Challenges of Growth* wird das als „am wahrscheinlichsten“ titulierte Szenario *Regulation and Growth* verwendet. Tabelle 4.1 zeigt die verwendeten durchschnittlichen jährlichen Wachstumswerte.

Tab. 4.1: Durchschnittliches jährliches Wachstum von Verkehrsdaten basierend auf EUROCONTROL (2018b)

Parameter	Jährliches Wachstum
Flüge	1,9%
Passagiere	2,5%
Flugzeuggröße	0,58%
ATFM-Verspätungen	7,1%

Der Wert für das Flugzeuggrößenwachstum wird nicht explizit von EUROCONTROL ausgewiesen und wurde deshalb (unter der Annahme konstant bleibender Sitzladefaktoren) aus der annualisierten Differenz zwischen Flug- und Passagierwachstum ermittelt. Das durchschnittliche jährliche ATFM-Verspätungswachstum wird ebenfalls nicht explizit ausgewiesen, sondern ist der annualisierte Durchschnitt aus dem vorhergesagten Anstieg der durchschnittlichen Verspätung pro Flug von 1,2 Minuten in 2016 auf 6,2 Minuten in 2040.

Aufgrund der Veröffentlichung des EUROCONTROL-Berichts in 2018 ist die COVID-19-Pandemie in den Prognosen noch nicht enthalten. Dieser Sachverhalt wird folgendermaßen berücksichtigt:

- Die Vorhersage erfolgt von 2025 bis 2040 in Fünfjahresschritten, da für Frequenzregulierung nicht jedes einzelne Jahr relevant ist, sondern die langfristigen Tendenzen entscheidender sind. Da das Jahr 2020 aufgrund des COVID-19-induzierten Verkehrseinbruchs nicht repräsentativ ist, wird das Jahr 2019 stattdessen verwendet.
- Basierend auf Einschätzungen des internationalen Airline-Verbandes IATA und des Flugzeugherstellers *Airbus* wird zurückhaltend angenommen, dass sich der (innereuropäische) Kurz- und Mittelstreckenverkehr bis 2025 auf das 2019-Niveau erholt hat (Airbus, 2020; IATA, 2020a). Konkret werden dazu die Werte, die für 2020 vorhergesagt waren, bis 2025 konstant gehalten. Ab dann setzt sich das erwartete Wachstum fort.

- Da der EUROCONTROL-Bericht auf Vorhersagen aus dem Jahr 2016 basiert, wurden außerdem die inzwischen vorliegenden empirischen Werte (Passagiere, Flüge, ATFM-Verspätung) für die Jahre 2017 bis 2019 für die Prognose einbezogen. Zunächst wurden dazu, ausgehend von den Werten jedes einzelnen Jahres 2016 bis 2019, die Verkehrsparameter einzeln auf die Jahre 2025 bis 2040 projiziert. Anschließend wurde der Durchschnitt der projizierten Ergebnisse gebildet. Für sämtliche Angaben in 2019 werden die vorliegenden empirischen Daten verwendet.

Dies stellt ein zweckmäßiges Vorgehen dar, um das Potenzial von Frequenzregulierung langfristig zu bewerten, da es nachvollziehbar und adaptierbar ist. Eine detailliertere Vorhersage der erwarteten Luftverkehrserholung nach der COVID-19-Pandemie ist kaum möglich und auch nicht erforderlich, da selbst Unterschiede von einigen Jahren in Bezug auf Frequenzregulierung nur einen geringen Einfluss auf die inhaltliche Aussagekraft der Ergebnisse hätten.

Eine weitere Differenzierung der Vorhersage wäre hinsichtlich der regional unterschiedlichen Ausprägungen der ATFM-Verspätungen möglich, würde allerdings ungleich höheren Modellierungsaufwand erfordern. So müssten für jede geflogene Strecke die durchflogenen Regionen bestimmt und der ATFM-Verspätungsrückgang bei Frequenzreduzierung berechnet werden. Der Effekt von Frequenzregulierung in einzelnen Regionen, für die eine besonders starke Zunahme durchschnittlicher ATFM-Verspätungen prognostiziert wird (EUROCONTROL, 2018c), ließe sich dadurch genauer auflösen.

4.2.2 Flüge und Passagierströme

Flugplan- und Passagierdaten basieren auf der kommerziellen Datenbank *Sabre Data & Analytics Market Intelligence 6.0* von Sabre Airline Solutions (2019). Folgende Teilschritte wurden ausgeführt, um Eingangswerte für die höchstfrequentierten Strecken für die Frequenz F_{rmy}, die durchschnittliche Flugzeuggröße S_a, die Direktpassagiere PAX^d_{rmy} sowie die Umsteigepassagiere PAX^c_{rmy} zu erzeugen:

- Ermittlung der monatlichen Flugpläne der höchstfrequentierten Strecken aus den Jahren 2016 bis 2019;
- Berechnung der Monatsdurchschnitte der täglichen Frequenz, der Flugzeuggröße und der täglichen Direkt- sowie Umsteigepassagiere für jedes Jahr;
- Projizierung der Werte für jedes Jahr 2016 bis 2019 auf die Jahre 2025 bis 2040 in Fünfjahresschritten und anschließende Bildung des Durchschnitts. Für das Jahr 2019 wurden die tatsächlichen Daten verwendet;

- Bedingt durch die Durchschnittsbildung, Dateninkonsistenzen sowie Passagierbuchungsverhalten kann es vorkommen, dass es bei den ermittelten Werten geringe direktionale Unterschiede auf einer Strecke geben kann. Zwecks Konsistenz wird daher für beide Richtungen der kaufmännisch gerundete Durchschnitt gebildet.

Analog wurden die Eingangswerte auf EUROCONTROL-Raum-Ebene erzeugt, basierend auf EUROCONTROL (2019c). Dazu zählen die Anzahl täglicher Flüge D_{my} und täglicher Passagiere PAX_{my}^{EURO}:

- Ermittlung der monatlichen Flüge im gesamten EUROCONTROL-Raum aus den Jahren 2016 bis 2019;
- Berechnung der Monatsdurchschnitte der täglichen Flüge und Passagiere für jedes Jahr;
- Projizierung der Werte für jedes Jahr 2016 bis 2019 auf die Jahre 2025 bis 2040 in Fünfjahresschritten und anschließende Bildung des Durchschnitts (Unterabschnitt 4.2.1). Für das Jahr 2019 wurden die tatsächlichen Daten verwendet.

Die damit ermittelten Werte für die tägliche Anzahl Flüge und Passagiere im EUROCONTROL-Raum sind in Tabelle C.1 und respektive Tabelle C.2 aufgelistet.

4.2.3 Verspätungen

Analog zu Unterabschnitt 4.2.2 wurden zur Erzeugung der jahresspezifischen Regressionsparameter in Gleichung 3.6 die folgenden Teilschritte mittels Daten von EUROCONTROL (2019c) durchgeführt:

- Ermittlung der monatlichen Flüge und Gesamtverspätungsminuten im gesamten EUROCONTROL-Raum aus den Jahren 2016 bis 2019;
- Berechnung der durchschnittlichen ATFM-Verspätung pro Flug mittels Division der Gesamtverspätungsminuten und Fluganzahl für jedes dieser Jahre;
- Projizierung der durchschnittlichen ATFM-Verspätung für jedes Jahr 2016 bis 2019 auf die Jahre 2025 bis 2040 in Fünfjahresschritten mittels der Wachstumswerte in Tabelle 4.1 und anschließende Bildung des Durchschnitts aus diesen Ergebnissen. Für das Jahr 2019 wurden die tatsächlichen Daten verwendet;

- Durchführung nichtlinearer Regressionen für jedes der Jahre 2019 bis 2040 in Fünfjahresschritten zur Schätzung der durchschnittlichen ATFM-Verspätung pro Flug in Abhängigkeit der täglichen Flüge im EUROCONTROL-Raum, basierend auf den jeweiligen Projektionen.

Die projizierten Durchschnittswerte der ATFM-Verspätung sind gemeinsam mit der täglichen Anzahl Flüge auf Abbildung 4.8 dargestellt. In Tabelle C.3 sind zusätzlich die genauen Werte enthalten. Analog zu Abbildung 4.6 ist auch hier ein saisonales Muster zu erkennen, welches durch die Durchschnittsbildung leicht geglättet wird. Neben dem Maximum im Monat Juli gibt es zwei Hochpunkte im März und Dezember, jedoch auf niedrigerem Niveau. Da hier kein Anstieg der Anzahl Flüge zu erkennen ist, resultiert die höhere ATFM-Verspätung aus anderen Ursachen, mutmaßlich Wetterereignissen oder dem kurzzeitigen aber regen Weihnachtsflugverkehr.

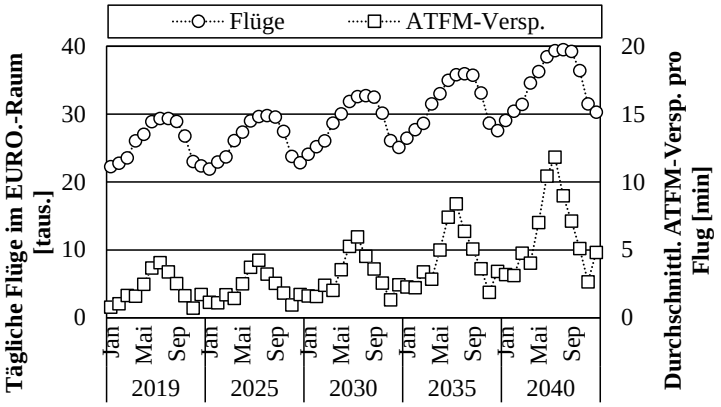

Abb. 4.8: Verwendete Datengrundlage zur monatlichen Entwicklung der durchschnittlichen ATFM-Verspätung und Anzahl täglicher Flüge im EUROCONTROL-Raum von 2019 bis 2040 (EUROCONTROL, 2018b, 2019c)

Abbildung 4.9 zeigt beispielhaft die Projektionen der durchschnittlichen ATFM-Verspätung in Abhängigkeit der täglichen Anzahl Flüge im EUROCONTROL-Raum für die Jahre 2025 und 2040 als Basis für die Regressionen. Jeder Datenpunkt repräsentiert einen Monat und ergibt sich aus dem Durchschnitt der Projektionen auf Basis der Jahre 2016 bis 2019. Bedingt durch dieses Vorgehen weisen die Datenpunkte in beiden Jahren die gleiche relative Verteilung zueinander auf, sie befinden sich in 2040 aber auf einem höheren Niveau, sowohl in Bezug auf die durchschnittliche ATFM-Verspätung pro Flug als auch die Anzahl täglicher Flüge im EUROCONTROL-Raum.

Aus diesem Grund sind die Regressionsparameter unterschiedlich, die Werte für das Bestimmtheitsmaß R^2 von 2025 bis 2040 jedoch identisch. Die Regressionsparameter für sämtliche Jahre von 2019 bis 2040 sind in Tabelle 4.2 aufgelistet. Da

für 2019 die tatsächlichen Werte verwendet wurden (und für die Jahre 2025 bis 2040 der Durchschnitt der Jahre 2016 bis 2019), weicht der Wert für R^2 hier ab.

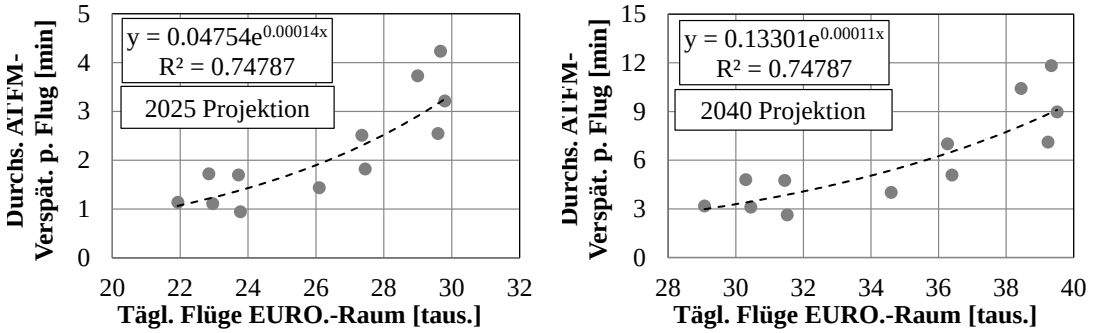

Abb. 4.9: Regressionen und Funktionen zur Schätzung der durchschnittlichen ATFM-Verspätung in Abhängigkeit der Flüge im EUROCONTROL-Raum für 2025 und 2040 (EUROCONTROL, 2019c)

Tab. 4.2: Regressionsparameter und Bestimmtheitsmaß R^2 für untersuchte Jahre zur Messung der durchschnittlichen ATFM-Verspätung; zur Auflösung der Unterschiede zwischen einzelnen Flügen wurde bis auf acht Nachkommastellen gerundet

Jahr	α_y	β_y	R^2
2019	0,02028839	0,00017377	0,76348
2025	0,04753974	0,00014181	0,74787
2030	0,0669891	0,00012908	0,74787
2035	0,09439555	0,00011748	0,74787
2040	0,13301446	0,00010693	0,74787

Zur Bestimmung des Überlastungsfaktors c_{rmy} (Gleichung 3.8) sind außerdem ATFM-Verspätungsdaten für jede der höchstfrequentierten Strecken erforderlich. Dazu wurden für jede Strecke die oben beschriebenen ersten beiden Schritte durchgeführt und anschließend der Durchschnitt über die Jahre 2016 bis 2019 gebildet.

4.2.4 Flugzeugdaten

Die notwendigen Flugzeugdaten dienen im Wesentlichen der Berechnung der COC und des Kerosinverbrauchs FC. Tabelle A.1 im Anhang enthält eine Auflistung sämtlicher verwendeter Flugzeugtypen sowie zugehöriger Parameter. Entsprechend dem Vorgehen von Rosskopf (2013a) wurden diese aus den angegebenen Quellen übernommen bzw. über ähnliche Flugzeugtypen angenähert, falls keine Quelle für den betroffenen Flugzeugtypen verfügbar war. Wenn auch keine Daten für einen ähnlichen Flugzeugtypen verfügbar waren, wurden diese geschätzt. Tabelle 4.3 zeigt die nicht-flugzeugtypspezifischen Parameter, die verwendeten Werte sowie die zugehörige Quelle.

Tab. 4.3: Nicht-flugzeugtypspezifische Parameter zur Berechnung der COC, DOC und der Ausnutzung eines Flugzeugs in Form von Flugstunden

Bezeichnung	Param.	Wert	Referenz
Bestrafungsfaktor Ausnutzung	up	20%	Schätzung basierend auf Boardingzeitdifferenzen Airbus (2019a, 2019b) und Boeing (2018b, 2020)
Bestrafungsfaktor Instandhaltung	mp	10%	Schätzung
Inflation	IR	2% p/a	EUROCONTROL (2018g) und Thorbeck (2013)
Kerosinpreis	FP	0,5 €/kg	Thorbeck (2013)
Kerosinpreisanstieg	FPI	3% p/a	Thorbeck (2013)
Preisreferenzjahr	Y_{ref}	2010	Thorbeck (2013)
Startdauer	TTO	42 s	ICAO (2019)
Taxidauer	TT	19 min	Mittelwert für höchstfrequentierte Strecken EUROCONTROL (2019d)
Überausnutzungsfaktor	ou	11%	CIRIUM (2019)
Verfügbare Ausnutzung	YAU_a	2.848 h	CIRIUM (2019)
Umwege durch reale Routings	$DistDet$	100 km	Schätzung

4.3 Verifizierung und Validierung der Modellbestandteile

Da Frequenzregulierung nach den in Abschnitt 3.3 beschriebenen Ansätzen ein hypothetisches Szenario darstellt, zu dem es keine vergleichbaren empirischen Daten gibt, lässt sich FRED nicht als Gesamtmodell validieren. Stattdessen werden die auf Abbildung 3.1 gezeigten Modellschritte (1. Frequenzreduzierung, 2. Flottenzuweisung) separat in Unterabschnitt 4.3.1 und Unterabschnitt 4.3.2 teils validiert und teils verifiziert. Bei der Verifizierung wird geprüft, ob ein Eingangsparameter plausibel oder, ob ein Rechenweg korrekt ist. Mit der Validierung wird festgestellt, welche inhaltliche Genauigkeit die Ergebnisse in welchem Anwendungsbereich aufweisen.

4.3.1 Frequenzreduzierungsschritt

Die unterschiedlichen Frequenzregulierungsansätze lassen sich gemäß der Struktur von Abschnitt 3.2 weiter unterteilen in die zwei Teilmodelle zur Bestimmung des Schedule Delay und der ATFM-Verspätung.

(a) Verifizierung Schedule Delay

Schedule Delay ist ein in der wissenschaftlichen Literatur verbreiteter Ansatz zur Messung des zeitlichen Vorteils von Frequenzen (Unterabschnitt 3.2.1). Durch Schedule Delay entsteht keine Verspätung im engeren Sinne, sondern er bemisst die durchschnittliche Abweichung zwischen der für einen Passagier idealen Abflugzeit und dem nächsten verfügbaren Flug.

Die für die Schedule Delay-Berechnungen relevanten Modelleingangswerte (Anzahl Flüge, Anzahl Passagiere) wurden verifiziert, indem geprüft wurde, ob die Werte mit einer anderen Datenquelle übereinstimmen. Tabelle 4.4 zeigt, wie dies im Detail erfolgte sowie die dabei identifizierte Abweichung. Dieses Vorgehen entspricht einer Plausibilitätsprüfung, da es sicherstellt, dass die verwendeten Werte hinsichtlich ihrer Größenordnung im gleichen Bereich liegen. Ein prinzipiell vergleichbares Beispiel (mit höherer Genauigkeit) ist der Betrieb von zwei unabhängigen Autopiloten im Flugzeug, deren Signale kontinuierlich abgeglichen werden.

Tab. 4.4: Eingangswerte, Art der Verifizierung und durchschnittliche Abweichung

Eingangswert	Abweichung	Verifizierung
F_{rmy} D_{my}	$< \pm 0{,}7\%$ $< \pm 4{,}5\%$	Wechselseitige Verifizierung für 2016 - 2019 durch Datenabgleich zwischen Sabre Airline Solutions (2019) und EUROCONTROL (2019c)
PAX_{my}^{EURO}	$< \pm 6{,}4\%$	Verifizierung der Daten aus Sabre Airline Solutions (2019) für 2016 - 2019 durch Datenabgleich mit The World Bank (2021)
PAX_{rmy}^{d} PAX_{rmy}^{c}	/	Sabre Airline Solutions (2019) ist die einzige verfügbare Datenbank mit der erforderlichen Granularität; es wurde modellseitig sichergestellt, dass die Anzahl beförderter Passagiere maximal der angebotenen Sitzplatzkapazität auf einer Strecke entspricht

Die Anzahl der Flüge von Sabre Airline Solutions (2019) liegt dabei durchgängig unter der von EUROCONTROL (2019c). Dies entsteht dadurch, dass Sabre Airline Solutions (2019) nur geplante Flüge aufführt und z. B. keine Charterverkehre. EUROCONTROL (2019c) hingegen zeigt sämtliche tatsächlich durchgeführte Flüge.

Die Unterschiede in den Passagierzahlen zwischen Sabre Airline Solutions (2019) und The World Bank (2021) sind insgesamt größer, da es hier diverse Abgrenzungs- und Zählmöglichkeiten gibt, die in den Datenbankbeschreibungen nicht immer vollständig definiert sind. Gerade in Bezug auf den Hub-Verkehr kann beispielsweise ein Umsteigepassagier für jeden Flug einzeln, nur für die gebuchte Reisekette oder gar nicht gezählt werden, wenn z. B. nicht eingereist, sondern nur umgestiegen wurde. Die Größenordnungen der Passagierzahlen stimmen dennoch überein. Die Daten von Sabre Airline Solutions (2019) sind, aufgrund der Spezialisierung des Anbieters auf genau diese Datentypen, am detailliertesten und als am glaubwürdigsten einzustufen.

Die Ergebnisse der Schedule Delay-Berechnungen sind konzeptioneller Natur und lassen sich daher nicht validieren. Die Anwendung in zahlreichen Untersuchungen unterstreicht aber die wissenschaftliche Akzeptanz dieses Vorgehens, das in FRED präzisiert wurde, indem zwischen Direkt- und Umsteigepassagieren differenziert wird.

(b) Validierung ATFM-Verspätung

Die Schätzfunktionen zur Berechnung der ATFM-Verspätung werden zum einen für sämtliche Frequenzregulierungsansätze für die Bestimmung der Veränderung der durchschnittlichen ATFM-Verspätung (Unterabschnitt 3.2.2) im EUROCONTROL-Raum sowie der Netto-Reisezeit (Unterabschnitt 3.2.4) verwendet. Zum anderen finden sie Eingang in die Methodik der Frequenzregulierungsansätze *Maximale ATFM-Verspätung* und *Positiver Grenznutzen* mit und ohne Kompensation (Unterabschnitt 3.3.1).

Die Validierung erfolgt mittels des *Network Flow Environment* (NFE) für das Jahr 2019 (Lau et al., 2014, 2015). Dabei handelt es sich um ein Modell zur Berechnung und Darstellung von Europäischen Luftverkehrsflüssen sowie von taktischen Maßnahmen des Kapazitätsmanagements und der ATFM-Verspätungsallokation. Es wurde durch die Einrichtung *Lufttransportsysteme* des DLR entwickelt. Innerhalb des NFE wird der CASA-Algorithmus der EUROCONTROL mittels einer Heuristik auf Tagesebene nachgebildet (Unterabschnitt 2.3.1). Basierend darauf lässt sich für unterschiedliche Verkehrsszenarien die durchschnittliche ATFM-Verspätung pro Flug im EUROCONTROL-Raum berechnen.

Das NFE verwendet zeitdiskrete Flugplantrajektorien, anhand derer Eintrittszeiten für Lufträume und Flughäfen abgeleitet werden können sowie Regulierungsdaten bezüglich Dauer und Ort der Initiierung. Diese werden ebenfalls von EUROCONTROL veröffentlicht, stammen jedoch aus einer anderen Datenbank als die für FRED verwendeten CODA-Daten, da sie zeitlich-räumlich noch granulärer sind (EUROCONTROL, 2019c). Das NFE verfolgt methodisch einen grundsätzlich anderen Ansatz und ist aufgrund der größeren Granularität als das höherwertige Vorgehen im Vergleich zur Regression einzustufen. Die Modellierung eines Tages

ist daher vergleichsweise aufwendig und benötigt auf einem Desktop-PC in der Regel mehrere Stunden.

Folgende Schritte wurden zur Validierung der Schätzfunktionen zur Bestimmung der ATFM-Verspätung vorgenommen:

- Basierend auf empirischen 2019-Daten wurden die durchschnittlichen ATFM-Verspätungen pro Flug für jeden Monat berechnet (Abbildung 4.10 links).
- Anschließend wurden zehn über das Jahr verteilte Beispieltage ermittelt. Dazu wurde erstens berücksichtigt, dass die Anzahl Flüge das gesamte Spektrum typischer Verkehrsaufkommen darstellt (von ca. 20.000 bis 30.000 Flügen täglich). Zweitens wurde darauf geachtet, dass die durchschnittliche ATFM-Verspätung pro Flug im EUROCONTROL-Raum für die gegebene Anzahl Flüge möglichst nah an der Regressionslinie liegt. Damit wird erreicht, dass primär die Systemdynamik von ATFM-Verspätungen im EUROCONTROL-Raum mittels des NFE validiert wird, die durch die Regressionslinie beschrieben wird und für FRED vorrangig relevant ist. Die Auswahl anderer Tage, die sich ggf. nicht entlang der Regressionslinie befinden, wäre dann hilfreich, wenn beispielsweise die Simulationsergebnisse des NFE durch einen Abgleich mit empirischen Daten validiert werden sollten (umgekehrter Fall). Die gewählten Beispieltage sind auf Abbildung 4.10 (rechts) mit Quadraten dargestellt.
- Für jeden der zehn Beispieltage wurde mit dem NFE die durchschnittliche ATFM-Verspätung pro Flug berechnet. Diese sind auf Abbildung 4.10 (rechts) mit Dreiecken dargestellt.

Auf der rechten Seite von Abbildung 4.10 ist ersichtlich, dass die per NFE ermittelte durchschnittliche ATFM-Verspätung pro Flug durchgängig oberhalb der empirischen CODA-Daten liegt (durchschnittlich ca. 0,9 Minuten bzw. ca. 10% bis 50%). Mögliche Erklärungen hierfür sind:

- Das NFE weist Airwayslots im Abstand von 15 Minuten zu. Das bedeutet, dass jeder verspätete Flug um mindestens 15 Minuten verspätet wird. In der Realität ist die Auflösung feiner, so dass gerade bei ATFM-Verspätungen unterhalb von 15 Minuten der Durchschnitt der empirischen Daten geringer ist.
- Des Weiteren hält das NFE Reservekapazitäten für Flüge bereit, für die relativ spät ein Flugplan aufgegeben wird. Dies wurde in der Praxis in den letzten Jahren vermehrt aufgegeben.

- Ferner wird in der Realität teilweise mit dynamischen Kapazitätsdaten gearbeitet, die im NFE nicht abgebildet sind.
- Zuletzt interpretiert das NFE Regulierungen tendenziell strenger als es in der Praxis der Fall ist.

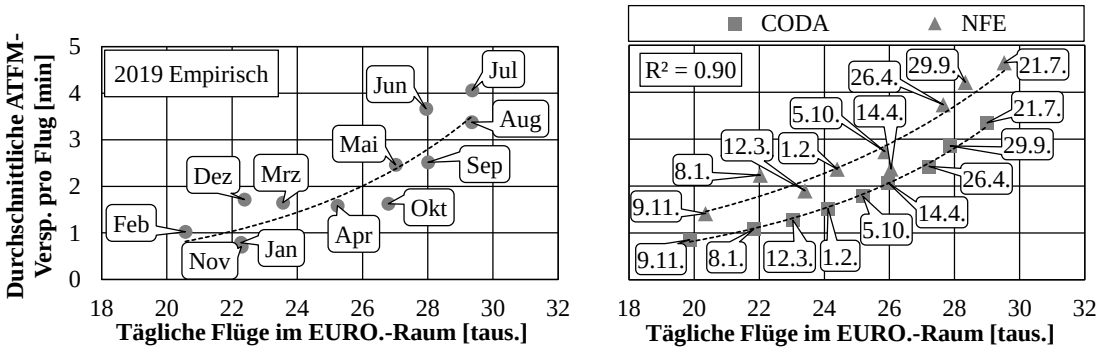

Abb. 4.10: Durchschnittliche ATFM-Verspätung pro Flug auf Monatsebene basierend auf empirischen 2019-Daten (links) sowie die durchschnittliche ATFM-Verspätung pro Flug für ausgewählte Beispieltage basierend auf empirischen 2019-Daten von CODA (EUROCONTROL, 2019c) sowie berechnet durch das NFE

Zwar liegen die mit dem NFE ermittelten Werte durchgängig oberhalb der Schätzung, dennoch lässt sich ihr Verlauf auch mittels einer exponentiellen Regression gut annähern. Die beiden Trendlinien verlaufen auf Abbildung 4.10 (rechts) relativ parallel und beschreiben somit eine ähnliche Systemdynamik. Dieser Aspekt ist insofern relevant, als die Schätzfunktionen in FRED vornehmlich zur Berechnung der Veränderung der durchschnittlichen ATFM-Verspätung dienen und weniger der absoluten Werte.

Die weitere Analyse der Funktionsvorschriften der beiden Trendlinien auf Abbildung 4.10 führt zu der Erkenntnis, dass die inkrementelle Veränderung der ATFM-Verspätung für höhere Verkehrsaufkommen (28.000 bis 30.000 Flüge pro Tag) basierend auf NFE-Ergebnissen 4% bis 7% über denen der CODA-Ergebnisse liegt (z. B. 21.7. und 29.9.). Für geringere Verkehrsaufkommen (20.000 bis 23.000 Flüge pro Tag) steigt die Abweichung auf ca. 30% (z. B. 8.1.). Folglich scheint die verfügbare Kapazität für geringere Nachfragen in der Realität effizienter genutzt zu werden, als es derzeit durch das NFE abgebildet ist. Die höhere Genauigkeit bei größerem Verkehrsaufkommen ist im Zusammenhang mit der Validierung von FRED dennoch als positiv zu bewerten, da gerade diese Fälle besonders relevant für Frequenzregulierung sind.

Für die Validität der ATFM-Verspätungsbestimmung in FRED bedeutet dies zusammengefasst folgendes: Die Schätzfunktionen liefern im Hinblick auf ihre methodische Simplizität, die eher unterschätzende Bemessung im Vergleich zu den

NFE-Werten sowie die Anwendung innerhalb einer explorativen Potenzialanalyse einer systemweiten Regulierungsmaßnahme gute Resultate.

4.3.2 Flottenzuweisungsschritt

Die Ergebnisse des Flottenzuweisungsschritts in FRED lassen sich mittels eines Vergleichs mit empirischen Daten validieren. Hierzu wurde das Modell auf die höchstfrequentierten Strecken aus dem Jahr 2019 angewendet und die Ergebnisse wurden mit der realen Flottenzuweisung auf diesen Strecken verglichen. Zur Kalibrierung des Modells wurden die Modellparameter der minimalen und maximalen Abweichung von der Zielflugzeuggröße (das^{low}, das^{high}, Gleichung 3.32), der Mindestanzahl Flugzeugtypen auf einer Strecke (NA^{min}, Gleichung 3.34) sowie der Abweichung von der Zielsitzplatzkapazität (dsc, Gleichung 3.36) verwendet.

Für die Sitzplatzzahlen wurden für die Validierung zwecks Konsistenz für jeden Flugzeugtyp die empirischen Durchschnitte aus Flugplandaten verwendet und nicht die normierten Werte (Tabelle A.1). Außerdem wurden innerhalb der Validierung neuere Flugzeugtypen nicht berücksichtigt, die 2019 zwar bereits auf dem Markt waren, aber aufgrund ihres niedrigen Alters eine geringe Marktdurchdringung aufwiesen (*A220-Familie, A320neo-Familie, B737M-Familie*). Damit wird erreicht, dass die neueren Flugzeugtypen vergleichbare ältere Flugzeugtypen aufgrund deren höherer COC nicht vollständig ersetzen und die Betriebskosten nicht unterschätzt werden.

Eine wesentliche Hilfsgröße, die zur Validierung herangezogen wird, sind die ASK. Da die Summe der ASK durch die Nebenbedingungen in Gleichung 3.36 relativ eng limitiert und damit quasi vorgegeben ist, stehen die ASK allein nicht im Fokus der Validierung, sondern die davon abgeleiteten Größen wie die ASK pro Flugzeuggröße (Abbildung 4.11) und -typ (Abbildung 4.12) sowie die COC/ASK und der FC/ASK (Tabelle 4.5). Im Vergleich zur Anzahl der Flüge, Strecken oder der angebotenen Sitzplatzkapazität eignen sich die ASK besonders gut, da sie die angebotene Transportleistung durch Mitberücksichtigung der geflogenen Distanz am besten reflektieren.

Abbildung 4.11 zeigt die Allokation der ASK als gleitenden Durchschnitt in Abhängigkeit der Flugzeuggröße für sämtliche höchstfrequentierte Strecken. Während in der Realität aufgrund unterschiedlicher Kabinenlayouts der Airlines nahezu jede Flugzeuggröße im abgebildeten Größenbereich vorhanden ist, sind für die einzelnen Flugzeugtypen in FRED feste Sitzplatzanzahlen vorgegeben (Tabelle A.1). Dies führt dazu, dass sich die allokierten ASK auf diese Flugzeuggrößen konzentrieren.

Da die vom Modell zugewiesenen Flugzeugtypen repräsentative Optionen innerhalb ihrer Größenkategorie sind (Unterabschnitt 3.6.2), wurde der zentrierte gleitende Durchschnitt als Darstellungsform gewählt, der die Verläufe glättet und vergleichbarer macht. Die 20. Ordnung des gleitenden Durchschnitts entspricht etwa

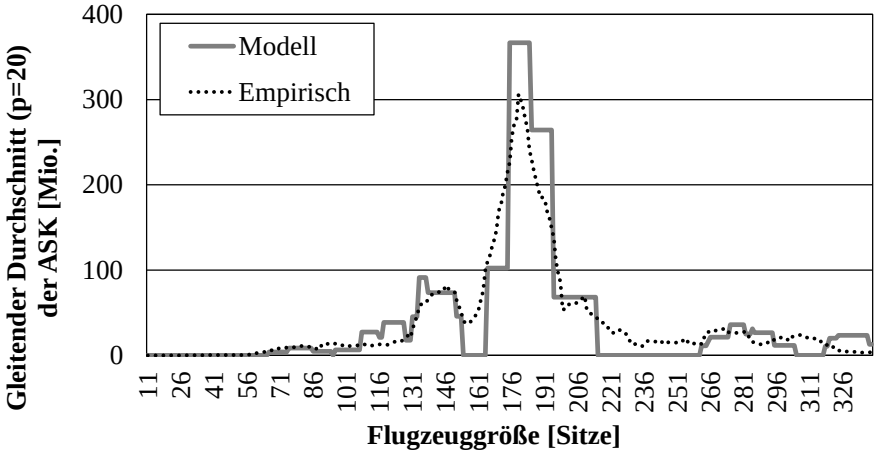

Abb. 4.11: Vergleich der Modellergebnisse und empirischen 2019-Daten (Sabre Airline Solutions, 2019) des gleitenden Durchschnitts der erbrachten ASK in Abhängigkeit der eingesetzten Flugzeuggrößen für die höchstfrequentierten Strecken

dem Doppelten des durchschnittlichen Größenabstandes zwischen den zugewiesenen Flugzeugtypen (10,75 Sitze) und stimmt außerdem mit der Größengruppierung auf Abbildung 3.17 überein.

Die Charakteristik des empirischen Verlaufs wird dabei optisch gut angenähert, auch wenn der kantigere Verlauf der Modellergebnisse erkennbar ist. Das Maximum im Bereich von 175 bis 184 wird beispielsweise maßgeblich durch die Zuweisung des *A320ceo* mit 175 Sitzen geprägt (Tabelle A.1). Die Kante rechts davon im Bereich von 185 bis 194 Sitzen entsteht durch die *B737-800* und *B737-900* mit jeweils 185 Sitzen. Über das gesamte Größenspektrum gemittelt entspricht die kumulierte (positive und negative Abweichung) der ASK pro Größe 0,2% mit der Gesamtanzahl der empirischen ASK als Basis.

Abbildung 4.12 zeigt die zehn am meisten zugewiesenen Flugzeugtypen gemessen an den erbrachten ASK in der Realität (links) und vom Modell (rechts). Dabei wird deutlich, dass sich das Modell in der vorliegenden Form nur bedingt dazu eignet, einzelne Flugzeugtypen aufzulösen. Dies ist als unkritisch einzustufen, da für die Bewertung von Frequenzregulierung primär die Flugzeuggröße entscheidend ist und weniger der konkrete Flugzeugtyp, sofern ähnliche Technologiereifen gegeben sind.

Konkret sind zum einen die Rangfolgen des *A320ceo* und der *B737-800* vertauscht. Dies ist dadurch zu erklären, dass die *B737-800* im Modell die geringeren Sitzplatzkosten aufweist und durch die Kostenminimierung mit lediglich indirekter Berücksichtigung von umsatzseitigen Aspekten übermäßig eingesetzt wird. Insgesamt werden von den ersten vier *Single-Aisle*-Flugzeugen in der Realität aber etwa die gleichen ASK erbracht wie von den ersten fünf *Single-Aisle*-Flugzeugen im Modell.

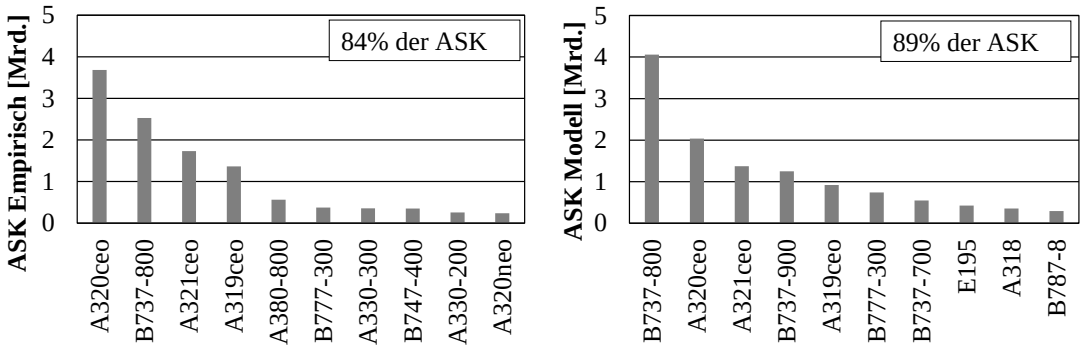

Abb. 4.12: Top 10 der zugewiesenen Flugzeugtypen nach ASK empirisch (links) gemäß Sabre Airline Solutions (2019) und im Modell (rechts) auf den höchstfrequentierten Strecken

Zum anderen werden in der Realität teilweise größere *Twin-Aisle*-Flugzeuge (*A380-800, B747-400*) zugewiesen als im Modell (*A350-900, B777-300*). Dabei handelt es sich um die wenigen Langstreckenflüge (*London–New York, London–Dubai, Mailand–New York, Paris–Pointe-a-Pitre*), die auch zu den höchstfrequentierten Strecken gehören.

Diese Unschärfe resultiert daraus, dass FRED im Zusammenhang mit Frequenzregulierung auf die Anwendung im Kurz- und Mittelstreckenbereich ausgelegt ist auch in Bezug auf die maximale untere und obere Abweichung von der Zielflugzeuggröße. Zudem sind vierstrahlige Flugzeuge in der Datenbasis nicht vorhanden (*A380-800, B747-400*), da ihr Einsatz auf Kurz- und Mittelstrecken noch ineffizienter ist als der von zweistrahligen *Twin-Aisle*-Flugzeugen (Abschnitt 2.2). Selbst auf Langstrecken findet in der Praxis eine zunehmende Abkehr von vierstrahligen Flugzeugen statt, weshalb für den Betrachtungszeitraum dieser Arbeit bis 2040 diese nicht berücksichtigt werden.

Die Frequenzregulierungsansätze werden in Abschnitt 5.5 hinsichtlich ihres Einflusses auf die Sitzplatzkosten und -kerosinverbräuche bewertet. Da die höchstfrequentierten Strecken von zahlreichen Airlines beflogen werden und jeweils nur einen Teil der jeweiligen Airline-Streckennetze ausmachen, werden die absoluten Werte für die COC/ASK und den FC/ASK über eine Näherung validiert. Tabelle 4.5 zeigt hierzu empirische Vergleichswerte auf. Die Flugzeugtypen der realen Flottenzuweisungen, die in der Datenbasis nicht verfügbar sind (Tabelle A.1), wurden für die Berechnung der COC/ASK sowie dem FC/ASK nicht berücksichtigt (ca. 12% der ASK).

Auch hier liefert FRED valide Ergebnisse. Der Vergleichswert für die COC/ASK kann nur als grober Indikator dienen, da die Sitzplatzkosten je nach Airline, Region, Geschäftsmodell, Flotte, Streckennetz und Bilanzierungsweise bis um den

Tab. 4.5: Validierung der absoluten COC/ASK und des absoluten FC/ASK

Parameter	Modell	Vergleich	Herleitung und Quelle
COC/ASK	0,056 €/ASK	0,03-0,11 €/ASK	Abgeleitet vom Durchschnitt europäischer Airlines mit einem Dollar-Euro-Umrechnungskurs von 0,8 sowie einem Kapitalkostenanteil von 30% an den DOC (Doganis, 2019, S. 63)
FC/ASK	0,021 kg/ASK	0,022 kg/ASK	Abgeleitet von 0,087 kg/RPK (*Revenue Passenger Kilometer*) CO_2-Emissionen für den innereuropäischen Verkehr in 2019 und einem durchschnittlichen Sitzladefaktor von 80% sowie 3,15 kg CO_2-Emissionen für die Verbrennung von 1 kg Kerosin (ICCT, 2020, S. 9)

Faktor 4 variieren können (Aircraft Commerce, 2003; Doganis, 2019; McKinsey&Company, 2017). Für die Validierung in dieser Arbeit ist es daher hinreichend, dass die ermittelten Werte von der Größenordnung her übereinstimmen.

Die Werte für FC/ASK werden sehr gut angenähert. Dies resultiert zum einen daraus, dass sich die Gesamtmenge des verbrauchten Kerosins sowie die Summe aller ASK im innereuropäischen Raum (durch Ausweisung in den Airline-Geschäftsberichten) relativ leicht messen lässt. Zum anderen handelt es sich beim zugrunde liegenden Modell TCM zur Berechnung der Kerosinverbräuche um ein sehr detailliertes Vorgehen.

4.4 Zwischenfazit

Mit dem Ziel der Verifizierung und Validierung einzelner Modellbestandteile von FRED wurden in diesem Kapitel zuerst die Auswahl des EUROCONTROL-Raums als Anwendungsfall erläutert und anschließend die Eingangsdaten beschrieben.

Innerhalb des EUROCONTROL-Raums wurden die 20 höchstfrequentierten Strecken (1.010 km durchschnittliche Streckenlänge) ausgehend von den 26 größten Flughäfen als potenziell zu frequenzregulierende ausgewählt. Dies erfolgte mit der Maßgabe, möglichst auf den Strecken Frequenzen zu reduzieren, auf denen es ohnehin vergleichsweise viele Flüge gibt, um die relative Angebotsreduzierung gering zu halten.

Aufgrund der Langfristigkeit von Flottenanpassungen wurde ein langfristiger Untersuchungszeitraum von 2019 bis 2040 gewählt. Zur Erzeugung einer Datengrundlage wurden dazu Verkehrs- und Verspätungsdaten in die Zukunft projiziert. Die

COVID-19-Pandemie wurde mittels der vorsichtigen Annahme berücksichtigt, dass sich bis 2025 wieder das Verkehrsniveau von 2019 eingestellt haben wird. Das sich daraus ergebende Szenario dient außerdem als Referenzszenario, mit dem sämtliche Frequenzregulierungsansätze in der Ergebnisdiskussion verglichen werden.

Da Frequenzregulierung ein hypothetisches Szenario darstellt, zu dem es keine empirischen Vergleichsdaten gibt, wurden die Modellbestandteile von FRED einzeln teils verifiziert und teils validiert. Die genutzten Eingangsdaten wurden durch den Vergleich mit anderen Datenbanken verifiziert, mit dem Ergebnis von Abweichungen von weniger als 10%. Dies stellt vor dem Hintergrund des Aggregationslevels der Daten sowie der Vielzahl verwendeter Werte eine gutes Ergebnis dar.

Die Messung der ATFM-Verspätung pro Flug wurde durch die Berechnung durchschnittlicher ATFM-Verspätungswerte für ausgewählte Beispieltage mittels Abgleich mit den Ergebnissen eines Simulationsmodells validiert. Der verwendete Regressionsansatz unterschätzt die durchschnittliche ATFM-Verspätung dabei tendenziell (ca. 2% bis 25% in Bezug auf die Veränderung der ATFM-Verspätung eines Fluges), jedoch mit zunehmender Genauigkeit bei den relevanten höheren Verkehrsaufkommen.

Das Optimierungsmodell zur Flottenzuweisung auf frequenzreduzierten Strecken wurde durch Anwendung auf empirische 2019-Daten der untersuchten höchstfrequentierten Strecken validiert. In Bezug auf relevante Kennzahlen, wie den COC/ASK und den FC/ASK, liefert das Modell valide Ergebnisse unter Berücksichtigung der Streuung empirischer Werte. Die Zusammensetzungen der Flottenmixe werden bezüglich der Flugzeuggröße (dem relevanten Parameter im Zusammenhang mit Frequenzregulierung) gut nachgebildet.

Zur Auflösung einzelner Flugzeugtypen (z. B. *A320, B737-800*) eignet sich das Modell nur bedingt, da es hier zu viele airlinespezifische und teilweise vertrauliche Einflussfaktoren gibt. Die Anwendung auf andere Regionen, wie beispielsweise den US-amerikanischem Raum mit teilweise noch höheren Frequenzen, kleineren Flugzeugen und größeren durchschnittlichen Verspätungen, erfordert, dass die Eingangsdaten in gleicher Form vorliegen. Insbesondere hinsichtlich detaillierter ATFM-Verspätungsdaten könnte es hier aufgrund unterschiedlicher Messlogiken und -auflösungen praktische Hürden geben.

Für die einzelnen Bestandteile des Modells ließen sich die verwendeten Ansätze für sehr detaillierte Untersuchungen weiter verfeinern. Die numerischen Ungenauigkeiten, die mit den getätigten Vereinfachungen einhergehen, werden durch eine insgesamt abwägende Vorgehensweise bezüglich getätigter Annahmen gedämpft. Für den breiten und explorativen Untersuchungsansatz dieser Arbeit liefert FRED in Bezug auf die ökologisch-ökonomisch-temporalen Untersuchungsdimensionen valide Ergebnisse.

5. Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel erfolgt die Darstellung und Diskussion der Ergebnisse jedes Frequenzregulierungsansatzes mit besonderem Fokus auf dessen Wirkmechanismen. Tabelle 5.1 zeigt eine Übersicht des Aufbaus dieses Kapitels sowie die primär betrachtete(n) Bewertungsdimension(en) in jedem Abschnitt.

Gemäß der Abfolge der Modellschritte von FRED auf Abbildung 3.1 werden in Abschnitt 5.1 zuerst die resultierenden Zielfrequenzen und -flugzeuggrößen des Frequenzreduzierungsschrittes beschrieben, da sich auf dieser Basis die weiteren Ergebnisse gut interpretieren lassen. Es folgen die Auswirkungen auf die durchschnittliche ATFM-Verspätung in Abschnitt 5.2 und Reisezeiten in Abschnitt 5.3. Als Ergebnis des Flottenzuweisungsschritts werden anschließend in Abschnitt 5.4 die sich ergebenden Flottendynamiken und in Abschnitt 5.5 die daraus resultierenden Auswirkungen auf Flugzeugbetriebskosten und den Kerosinverbrauch dargelegt.

Tab. 5.1: Übersicht der primär betrachteten Bewertungsdimensionen jedes Abschnitts in diesem Kapitel

Abschnitt	*Ökologisch*	*Ökonomisch*	*Temporal*
5.1 Zielfrequenzen und Zielflugzeuggrößen		•	
5.2 Flüge und ATFM-Verspätung			•
5.3 Netto-Reisezeit			•
5.4 Flottendynamiken		•	
5.5 Betriebskosten und Kerosinverbrauch	•	•	
5.6 Neue Flugzeugentwürfe	•	•	•
5.7 Sensitivitätsanalysen	•	•	•
5.8 Dimensionsübergreifende Zusammenfassung der Ergebnisse	•	•	•
5.9 Übergeordnete Herausforderungen und Lösungsansätze			
5.10 Zwischenfazit	•	•	•

Da das Potenzial von Frequenzregulierung von den am Markt verfügbaren Flugzeugtypen abhängt, werden in Abschnitt 5.6 zwei neue Flugzeugentwürfe in Form eines *New Midsize Airplane* (NMA) sowie eines *Large Aircraft for Short Range* (LASR) im Zusammenhang mit Frequenzreduzierung untersucht. Zur detaillierteren Ausleuchtung der Funktionsweise von FRED werden in Abschnitt 5.7 Sensitivitätsanalysen mit ausgewählten Parametern durchgeführt.

In Abschnitt 5.8 werden die Ergebnisse der einzelnen Bewertungsdimensionen für den übergreifenden Vergleich der Frequenzregulierungsansätze zusammenfassend dargestellt. Anschließend erfolgt in Abschnitt 5.9 eine Diskussion der mit Frequenzregulierung verbundenen qualitativen Herausforderungen, die nicht ökologisch-ökonomisch-temporaler Dimension sind. Das Kapitel schließt mit einem Zwischenfazit in Abschnitt 5.10 ab.

Zur kompakten Bezeichnung der untersuchten Frequenzregulierungsansätze innerhalb der Ergebnisanalyse wird eine Kodierung eingeführt (Tabelle 5.2). Diese ist in der rechten Spalte dargestellt, wobei die ersten beiden Buchstaben die Anfangsbuchstaben des Ansatzes bezeichnen. Handelt es sich um einen Ansatz mit Kompensation (Abschnitt 3.3), folgt darauf ein *K*. Falls eine Angleichung der Flugzeuggröße durchgeführt wurde (Abschnitt 3.4), wird ein *A* nach einem Bindestrich angehängt.

Tab. 5.2: Frequenzregulierungsansätze mit Kodierung (N: Nein; J: Ja)

Ansatz	Ansatz mit Kompensation	Angleichung Flugzeuggröße	Kodierung
Gedeckelte Frequenz	N	N	*GF*
		J	*GF-A*
	J	N	*GFK*
		J	*GFK-A*
Mindest-Schedule Delay	N	N	*MS*
		J	*MS-A*
	J	N	*MSK*
		J	*MSK-A*
Max. ATFM-Verspätung	N	N	*MA*
		J	*MA-A*
	J	N	*MAK*
		J	*MAK-A*
Positiver Grenznutzen	N	N	*PG*
		J	*PG-A*
	J	N	*PGK*
		J	*PGK-A*

5.1 Zielfrequenzen und Zielflugzeuggrößen

Die Zielfrequenzen und Zielflugzeuggrößen sind die Durchschnittswerte, die sich nach Durchführung der Frequenzregulierungsansätze für jede Strecke ergeben. Auf Abbildung 5.1 sind die Verläufe dieser beiden Parameter von 2019 bis 2040 für sämtliche höchstfrequentierte Strecken dargestellt. Bei allen Ansätzen ist gegenüber dem Referenzszenario ein Anstieg der Flugzeuggröße sowie eine Reduzierung der Frequenz erkennbar. Dabei sind die Veränderungen bei *GF* und *MS* in Summe schwächer ausgeprägt als bei *MA* und *PG*, resultierend aus den gewählten Eingangswerten.

Des Weiteren sind eindeutige saisonale Muster zu erkennen, die sich teilweise vom Referenzszenario auf die Ergebnisse der Frequenzregulierungsansätze übertragen. So ist die durchschnittliche Frequenz in den verkehrsreicheren Monaten (Mär. bis Okt.) tendenziell höher als im Winter (Nov. bis Feb.). Die leichte Abnahme der Frequenzen in den Sommermonaten (Jun. bis Aug.) resultiert aus mehr Flügen auf eher touristischen Strecken in dieser Zeit, die eher nicht Teil der betrachteten höchstfrequentierten (vornehmlich Geschäftsreise-) Strecken sind.

Die Festlegungen fixer Zielwerte für das gesamte Jahr für die Frequenz und den Schedule Delay bei *GF* und respektive *MS* sind durch den vergleichsweise gleichmäßigen (nicht saisonalen) Anstieg der durchschnittlichen Flugzeuggröße sichtbar (Abbildung 5.1).

Die saisonalen Schwankungen der ATFM-Verspätung in den zugrunde liegenden Daten (Abbildung 4.6) sind dagegen in den Ansätzen *MA* und *PG* deutlicher zu erkennen, da sie den Parameter ATFM-Verspätung in ihrer Methodik beinhalten. ATFM-Verspätungen sind besonders im Sommer ausgeprägt, daher erfolgt hier eine stärkere Frequenzreduzierung und Erhöhung der Flugzeuggröße als im Winter.

Der teilweise Anstieg der Flugzeuggrößen in den Wintermonaten bei *MA* (Jan., Mär., Dez.) bildet hier eine Ausnahme. Zwar ist in diesen Monaten die durchschnittliche ATFM-Verspätung geringer, durch das Ziel der gleichen prozentualen Abnahme durchschnittlicher ATFM-Verspätung für sämtliche Monate bei diesem Ansatz, müssen in diesen Wintermonaten jedoch übermäßig Frequenzen reduziert werden.

Durch die Einbeziehung des Schedule Delay bei *PG* im Vergleich zu *MA* wird dieser Effekt gedämpft und Frequenzen werden vornehmlich im Sommer reduziert. Mit diesem Ansatz erfolgt die Frequenzreduzierung folglich dann, wenn mehr Frequenzen angeboten werden und eine höhere durchschnittliche ATFM-Verspätung herrscht. Der aufschwingende Verlauf der durchschnittlichen Flugzeuggröße bei *PG* resultiert aus der überproportional zunehmenden ATFM-Verspätung bis 2040 (Abbildung 4.8), dem durch ebenso starke Frequenzreduzierung und somit Flugzeuggrößenerhöhung entgegengewirkt wird.

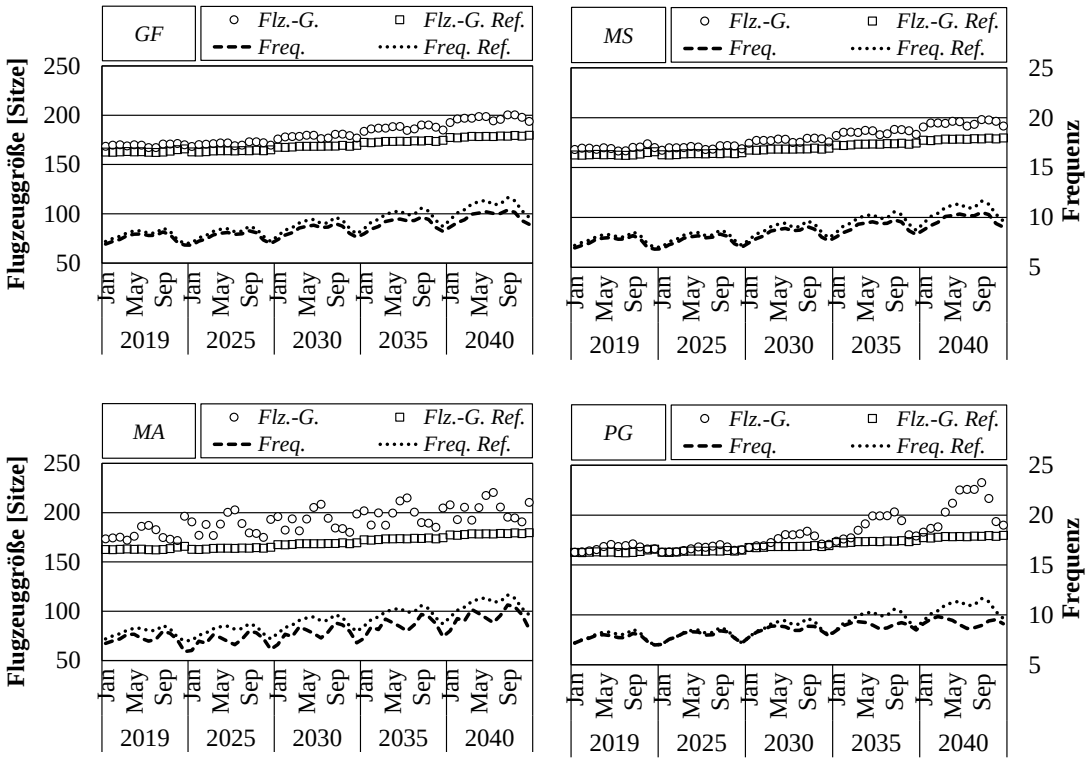

Abb. 5.1: Frequenzen und Zielflugzeuggrößen für Ansätze *GF, MS, MA* und *PG* auf den höchstfrequentierten Strecken von 2019 bis 2040

Abbildung 5.2 zeigt die Verläufe bei Angleichung der Flugzeuggrößen. Dabei sind zwei Unterschiede im Vergleich zu keiner Angleichung der Flugzeuggröße erkennbar:

- Die Verläufe der durchschnittlichen Zielflugzeuggrößen sind über die Jahre hinweg gleichförmiger und die Frequenzen geringer, unmittelbar resultierend aus der Angleichung der Flugzeuggröße über das Jahr hinweg.
- Die durchschnittlichen eingesetzten Flugzeuge sind jeweils noch größer und die Frequenzen noch niedriger. Dies resultiert daraus, dass die Flugzeuggröße auf jeder Strecke auf den Monat mit dem größten Wert angeglichen wird. Um folglich die gleiche durchschnittliche Flugzeuggröße über das Jahr hinweg zu erreichen, werden in einigen Monaten weitere Frequenzen reduziert.

Die Verläufe der Ansätze mit Kompensation zeigen auf dieser aggregierten Ebene ein ähnliches Bild wie die hier aufgeführten und finden sich daher im Anhang auf Abbildung D.1 und Abbildung D.2

Zur tieferen Ergründung dieser Effekte sind auf den Abbildungen 5.3, 5.4, D.3 und D.4 die Zielfrequenzen und -flugzeuggrößen für Juli 2040 für sämtliche frequenzreduzierte Strecken beispielhaft dargestellt. Dieser Monat wurde gewählt, da im

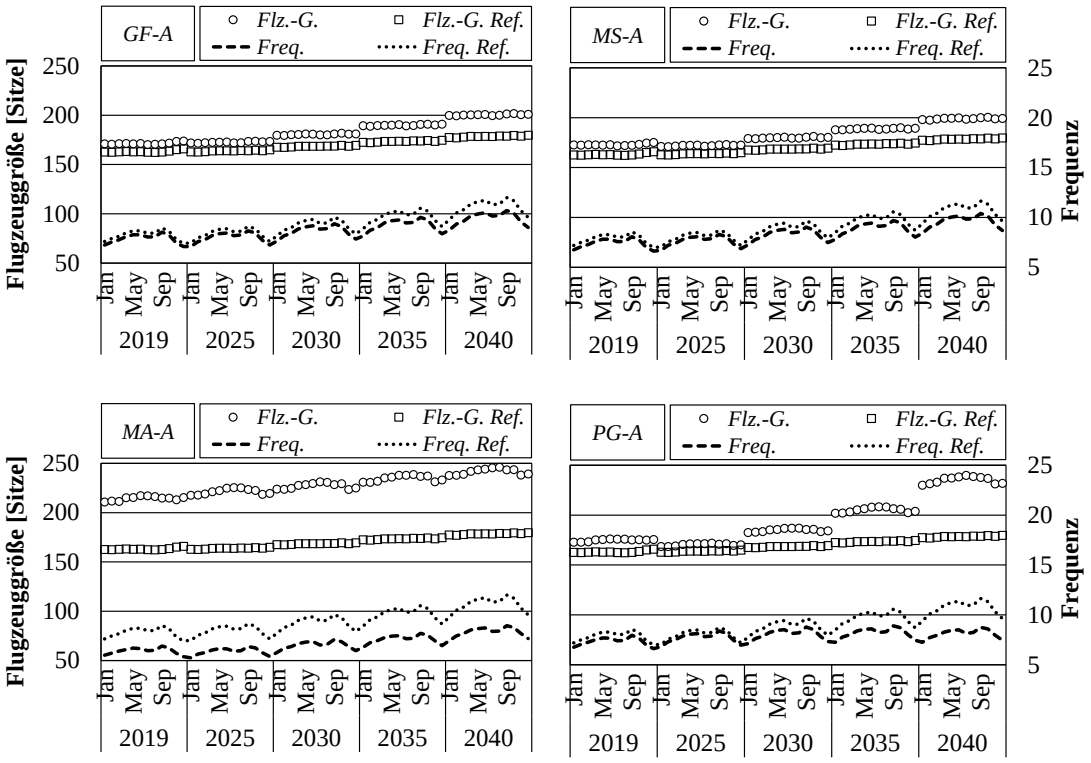

Abb. 5.2: Frequenzen und Zielflugzeuggrößen bei Angleichung der Flugzeuggröße auf den höchstfrequentierten Strecken von 2019 bis 2040

betreffenden Jahr die Auswirkungen, aufgrund des vorangeschrittenen Verkehrs- und ATFM-Verspätungswachstums, besonders gut sichtbar sind. Bei allen Ansätzen führt die Frequenzregulierung erwartungsgemäß zu einer Abnahme der durchschnittlichen Frequenz sowie einer Zunahme der durchschnittlichen Flugzeuggröße über sämtliche frequenzreduzierte Strecken gemittelt (große schraffierte Rauten und Quadrate). In allen Fällen wäre der teilweise Einsatz von *Twin-Aisle*-Flugzeugen auf Kurzstrecke notwendig.

Bei *GF* ist die Deckelung bei 15 Frequenzen (Unterabschnitt 3.3.1) klar sichtbar, da dieser Wert für keine Strecke unterschritten wird. *MS* zeigt von den Gesamtdurchschnittswerten her ein ähnliches Streubild. Dies liegt daran, dass der gewählte Mindest-Schedule Delay von 20 Minuten (Unterabschnitt 3.3.1), je nach Anteil der Direkt- und Umsteigepassagiere, etwa 12 bis 18 Frequenzen entspricht. Mit den gewählten Eingangswerten sind durchschnittlichen Zielfrequenzen von *MA* und *PG* geringer als die der beiden erstgenannten Ansätze. Außerdem ist eine größere Anzahl an Strecken betroffen (306 und 452 ggü. 132 und 120), erkennbar an der Anzahl der Datenpunkte.

Abbildung 5.4 zeigt die Ansätze mit Kompensation. Die Begrenzung der maximalen Flugzeuggröße bei 220 Sitzen pro Flug ist für alle Ansätze klar erkennbar, da die durchschnittliche Flugzeuggröße auf keiner Strecke darüber liegt. Die Anzahl

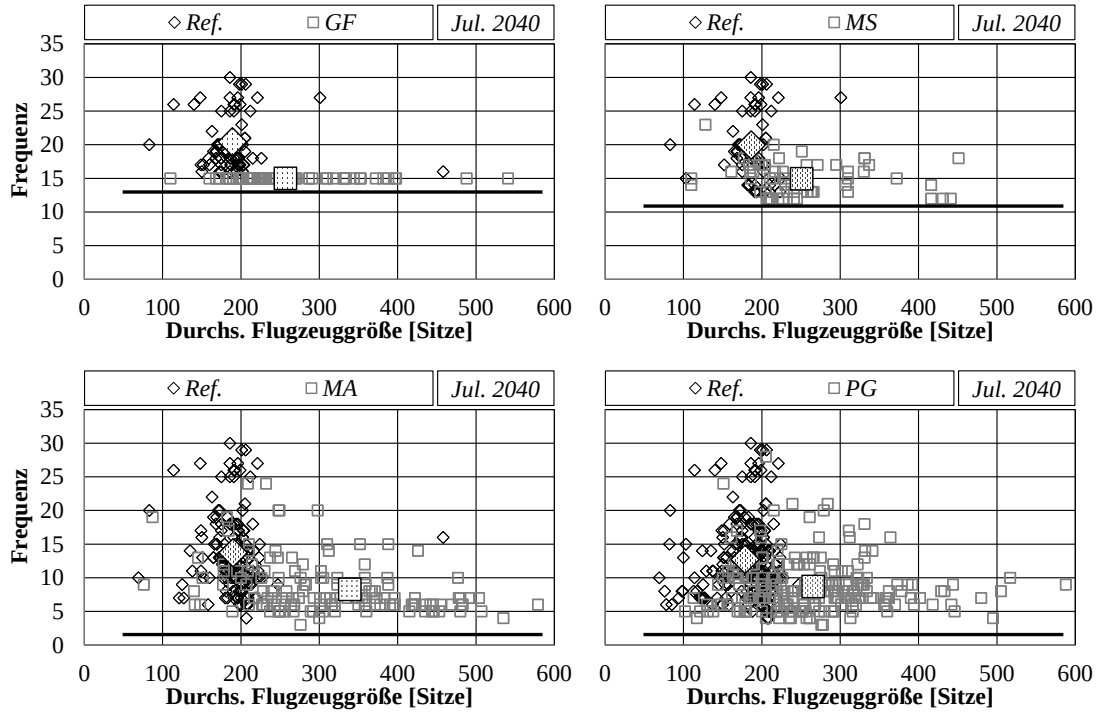

Abb. 5.3: Frequenzen und Zielflugzeuggrößen auf den frequenzreduzierten Strecken im Juli 2040 für Ansätze *GF, MS, MA* und *PG* (jeder Datenpunkt entspricht beiden Richtungen einer Strecke; große schraffierte Markierungen stellen die Gesamtdurchschnittswerte dar)

reduzierter Frequenzen ist bei *GFK* prinzipbedingt identisch wie bei *GF* (718), während die Anzahl reduzierter Strecken deutlich größer ist (322 ggü. 132). Dies resultiert daraus, dass für die Kompensation andere, zusätzliche Strecken zur Frequenzreduzierung herangezogen werden. Frequenzreduzierung erfolgt damit bei *GFK* dezentraler. Außerdem ist ersichtlich, dass die Kompensation im Vergleich zu *GF* dazu führt, dass die Zielfrequenz von 15 bis auf 9 heruntergesetzt wird, damit sämtliche Frequenzen kompensiert werden können.

Bei *MSK* ist die Anzahl reduzierter Frequenzen geringer als bei *MS* (374 ggü. 604) bei einer jeweils ähnlichen Anzahl frequenzreduzierter Strecken (122 ggü. 120). Die Ursache hierfür liegt darin, dass zur Kompensation insgesamt weniger Frequenzen reduziert werden müssen. Dies resultiert daraus, dass nicht reduzierbare Strecken bei *MSK* prinzipbedingt einen sehr niedrigen durchschnittlichen Schedule Delay aufweisen (<20 Minuten). Zur Kompensation werden im Umkehrschluss Strecken mit einem höheren durchschnittlichen Schedule Delay herangezogen. Aufgrund der abnehmenden Gesamt-Reduzierung im durchschnittlichen Schedule Delay $TDASD_{rmy}$ (Gleichung 3.4) bei zunehmender Frequenz (Abbildung 3.4) sind insgesamt weniger Frequenzen erforderlich, um den kumulierten Schedule Delay $ATASD$ (Gleichung 3.18) zu kompensieren.

Bei *MAK* wurde im Vergleich zu *MA* die zu erreichende Reduzierung in durchschnittlicher ATFM-Verspätung von 20% auf 5% begrenzt, da ansonsten nicht sämtliche nicht reduzierbare Frequenzen kompensiert werden können. Gleichermaßen wurde bei *PGK* der Gewichtungsfaktor d (Gleichung 3.10) von 2 auf 1,2 gesetzt.

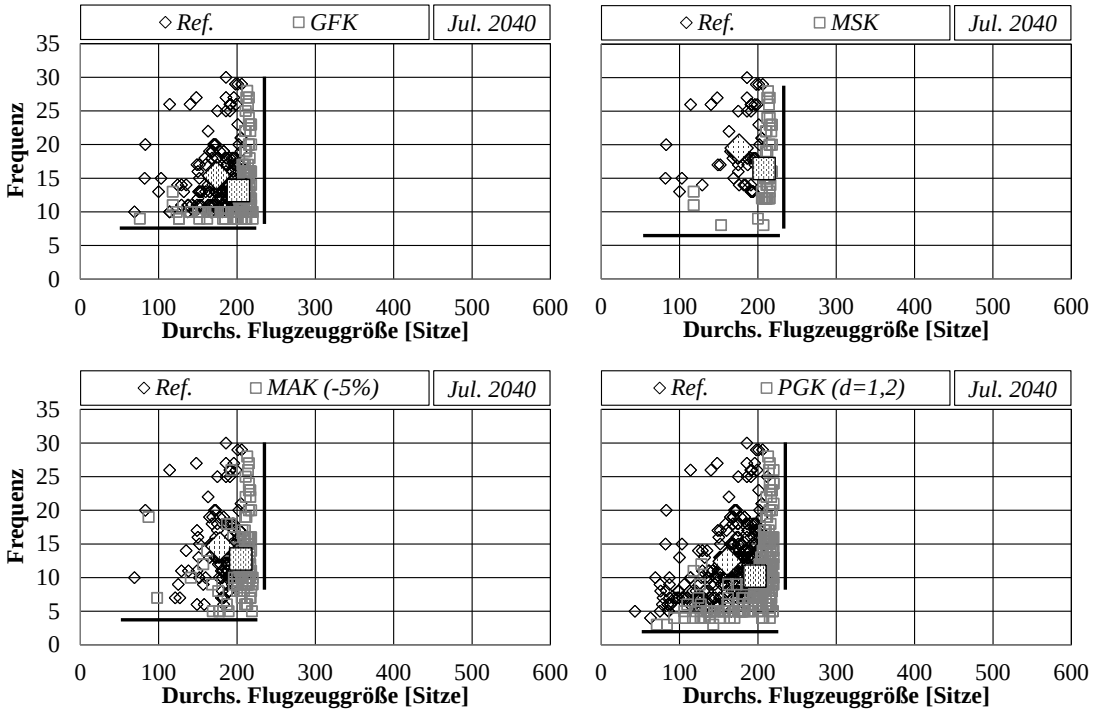

Abb. 5.4: Frequenzen und Zielflugzeuggrößen auf den frequenzreduzierten Strecken im Juli 2040 für Ansätze mit Kompensation (jeder Datenpunkt entspricht beiden Richtungen einer Strecke; große schraffierte Markierungen stellen die Gesamtdurchschnittswerte dar)

Beides resultiert aus der Konzentration von ATFM-Verspätungen auf einigen Strecken (Abbildung 4.3), bei gleichzeitig hohen Frequenzen und Flugzeuggrößen. Bei *MAK* lässt sich das ursprünglich vorgegebene ATFM-Verspätungsziel von 20% unter dem prognostizierten Durchschnittswert durch Frequenzreduzierung auf anderen Strecken aufgrund der ungleichen regionalen Verteilung folglich nicht mehr erreichen.

Ebenso bei *PGK*: Hier führt die ungleiche Verteilung zu einem besonders geringen negativen zeitlichen Grenznutzen $MTUF_{rmy}$ (Gleichung 3.10) auf einigen nicht reduzierbaren Strecken. Der negative kumulierte zeitliche Grenznutzen (Gleichung 3.20) dieser Strecken lässt sich nur bis zu einer bestimmten Grenze durch Frequenzreduzierung auf anderen Strecken mit geringerer ATFM-Verspätung und niedrigeren Frequenzen ausgleichen. Diese Grenze ist erreicht, wenn keine Strecken mehr zur Verfügung stehen, auf denen die Frequenz größer als eins ist und auf denen das gesetzte Flugzeuggrößenlimit noch nicht erreicht ist.

Schlussfolgernd ist festzuhalten, dass sämtliche Ansätze ohne Kompensation den Einsatz von *Twin-Aisle*-Flugzeugen des gesamten Größenspektrums erfordern. Wird keine Angleichung der Flugzeuggröße durchgeführt, variieren die Zielflugzeuggrößen über das Jahre hinweg zunehmend bis 2040 (Abbildung 5.1, Abbildung 5.2). In den nächsten Abschnitten folgen die Auswirkungen dieser Zielfrequenzen und -flugzeuggrößen auf die ATFM-Verspätung (Abschnitt 5.2), die Reisezeit (Abschnitt 5.3), die Flottendynamiken (Abschnitt 5.4) sowie die Betriebskosten und den Kerosinverbrauch (Abschnitt 5.5).

5.2 Flüge und ATFM-Verspätung

Bei sämtlichen Ansätzen wird erwartungsgemäß eine überproportional größere relative Reduzierung der durchschnittlichen ATFM-Verspätung pro Flug erzielt, als die relative Anzahl Flüge verringert wird (Abbildungen 5.5 bis 5.7 sowie D.5). Dies stimmt mit anderen Untersuchungen auf Basis angewandter Warteschlangentheorie im Luftfahrtkontext überein (Fan & Odoni, 2002; Odoni, 2001; Vaze & Barnhart, 2012b).

In allen Fällen sind saisonale Muster zu erkennen und für die meisten Ansätze außerdem ein zunehmendes Potenzial, über die Jahre hinweg ATFM-Verspätungen zu reduzieren. Teilweise sind in 2019 stärkere Veränderungen zu erkennen als in 2025. Dies resultiert daraus, dass die Regressionen zur Schätzung der durchschnittlichen ATFM-Verspätung hier geringfügig höhere Werte liefern als für die Vorhersage für 2025, die auf den Durchschnittswerten von 2016 bis 2019 beruht (Unterabschnitt 4.2.1). Insgesamt gibt es zwischen den Ansätzen deutliche Unterschiede dahingehend, wie stark die ATFM-Verspätungsreduzierung ausfällt, abhängig davon, auf welchen konkreten Strecken Frequenzen wie stark reduziert werden.

GF und *MS* zeigen auf Abbildung 5.5 ein ähnliches Bild. Bei *GF* wird durch eine Reduzierung der Flüge von 0,6% bis 2,6% ein Rückgang der durchschnittlichen ATFM-Verspätung von 1,3% bis 14,4% erzielt. Bei *MA* ist das Ziel der Reduzierung der durchschnittlichen ATFM-Verspätung von 20% als gerade Punktlinie sichtbar. Dies erfordert eine Verringerung der Fluganzahl zwischen 1% und 4,2%.

Durch den prinzipbedingten Fokus von *PG* auf Strecken, auf denen eine hohe durchschnittliche ATFM-Verspätung herrscht, wird hier ein Rückgang von bis zu 36,8% im September 2040 erreicht, während in diesem Monat lediglich 5,5% der Flüge reduziert werden. Bei allen Ansätzen handelt es sich folglich um eine geringe Reduzierung des Frequenzangebots im Vergleich zum ATFM-Verspätungsrückgang. Die konkrete Verrechnung des Rückgangs von ATFM-Verspätungen im Verhältnis zum Anstieg des Schedule Delay findet in Abschnitt 5.3 statt.

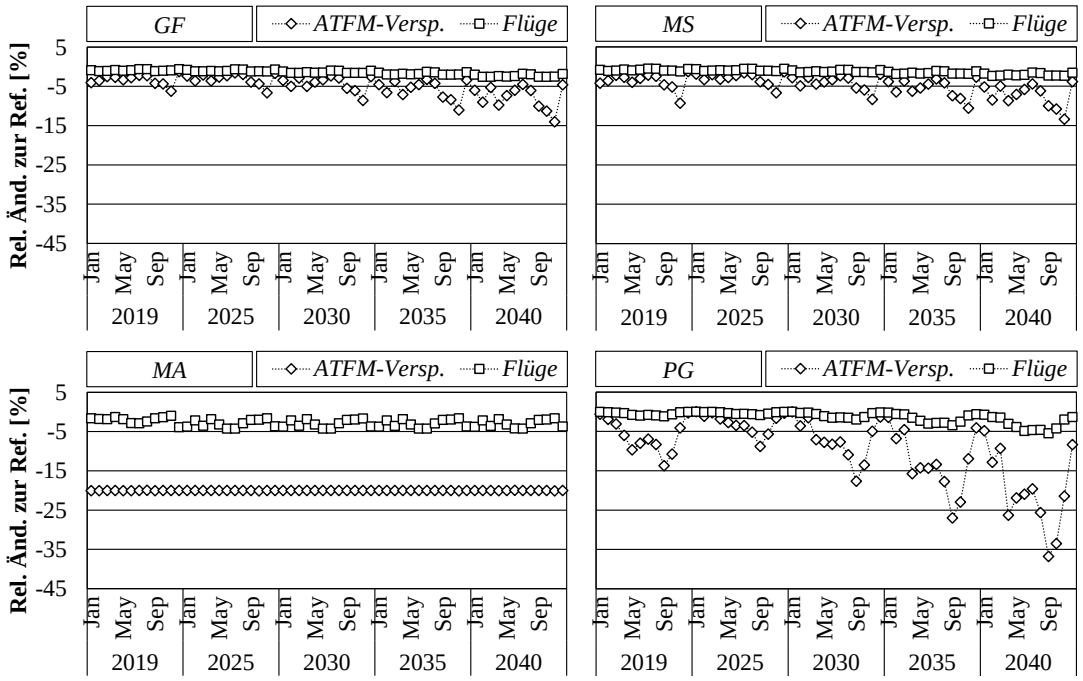

Abb. 5.5: Relative Änderung der Anzahl der Flüge und der durchschnittlichen ATFM-Verspätung im EUROCONTROL-Raum für Ansätze *GF, MS, MA* und *PG* im Vergleich zur Referenz

Der Kompensationsmechanismus (Abbildung 5.6) führt bei *MSK*, *MAK* und *PGK* dazu, dass weniger Flüge reduziert werden und der ATFM-Verspätungsrückgang geringer ist. Bei *MAK* ist der Rückgang aufgrund des geringeren Reduzierungsziels und bei *PGK* wegen des geringeren Gewichtungsfaktors d kleiner. Bei *GFK* ist es umgekehrt, d. h. auf Strecken mit initial weniger als 15 Frequenzen lassen sich ATFM-Verspätungen teils in größerem Ausmaß reduzieren.

Bei *PGK* ist außerdem der durchschnittliche ATFM-Verspätungsrückgang pro reduzierter Frequenz geringer. Die Ursache hierfür liegt darin, dass durch die Begrenzung der Flugzeuggröße Frequenzen nur bedingt auf den besonders überlasteten Strecken reduziert werden. Auf den weniger überlasteten Strecken muss die Anzahl reduzierter Flüge größer sein, um nicht-reduzierbare Frequenzen zu kompensieren.

Auf Abbildung 5.7 ist im Vergleich zu Abbildung 5.5 zu erkennen, dass eine Angleichung der Flugzeuggröße bei jedem Ansatz zu einem weiteren Rückgang der durchschnittlichen ATFM-Verspätung führt, da durch die Angleichung zusätzliche Frequenzen reduziert werden. Hier sei allerdings darauf hingewiesen, dass dieser Rückgang nur unter der angenommenen Angleichung auf die maximale Zielflugzeuggröße erreicht wird, was in der Praxis nicht zwangsläufig der Fall sein muss.

In absoluten Einheiten wird bei *PG-A* im Jahr 2025 ein Rückgang der EUROCONTROL-Raum-weiten ATFM-Verspätung von 1,6 Mio. und in 2040 von 26,7 Mio. Minuten erzielt. Unter der Annahme von 100 € Verspätungskosten pro Minute

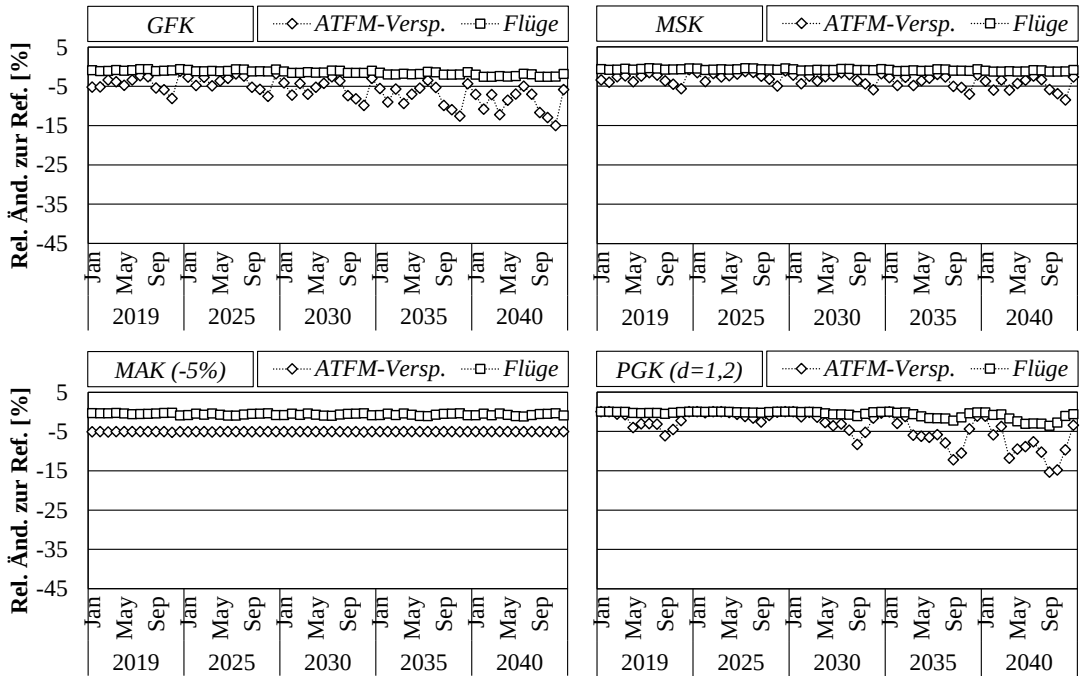

Abb. 5.6: Relative Änderung der Anzahl Flüge und der durchschnittlichen ATFM-Verspätung im EUROCONTROL-Raum für Ansätze mit Kompensation im Vergleich zur Referenz

ATFM-Verspätung (Cook & Tanner, 2015; EUROCONTROL, 2018g) und jeweiliger Inflationierung mit 2% p/a ergibt sich daraus ein ATFM-verspätungsbezogenes Kostenreduzierungspotenzial von 195 Mio. € in 2025 und von 4.380 Mio. € in 2040.

Diese Werte beziehen sich ausschließlich auf Kosten, die den Airlines durch verspätete Passagiere entstehen, z. B. Umbuchungen, Entschädigungen oder Hotelübernachtungen. Sie enthalten weder Opportunitätskosten noch ökologische Kosten oder soziale Kosten. Gleichzeitig weisen Cook und Tanner (2015) darauf hin, dass die Nutzung aggregierter Kostendurchschnittswerte im Verspätungskontext mit Vorsicht zu genießen ist, insbesondere aufgrund deren nichtlinearer Zunahme über die Verspätungsdauer.

Eine weitere Perspektive auf diese Einsparpotenziale ist die Anzahl zusätzlicher Flugzeuge, die Airlines aufgrund von ATFM-Verspätungen als Reserve vorhalten müssen. Mit einer durchschnittlichen jährlichen Ausnutzung von 2.848 Flugstunden pro Flugzeug im Kurz- und Mittelstreckenverkehr (Unterabschnitt 4.2.4) müssen durch die vermiedenen 1,6 Mio. ATFM-Verspätungsminuten (ca. 32.000 Stunden) aufgerundet und in Summe 11 Flugzeuge weniger bereit gehalten werden. Dieser Wert steigt in 2040 mit 26,7 Mio. vermiedenen ATFM-Verspätungsminuten (ca. 445.000 Stunden) auf 156 Flugzeuge.

Es sei angemerkt, dass es sich hierbei um einen hypothetischen Wert mit Einschränkungen handelt: Einerseits lässt sich argumentieren, dass nicht jede Minute

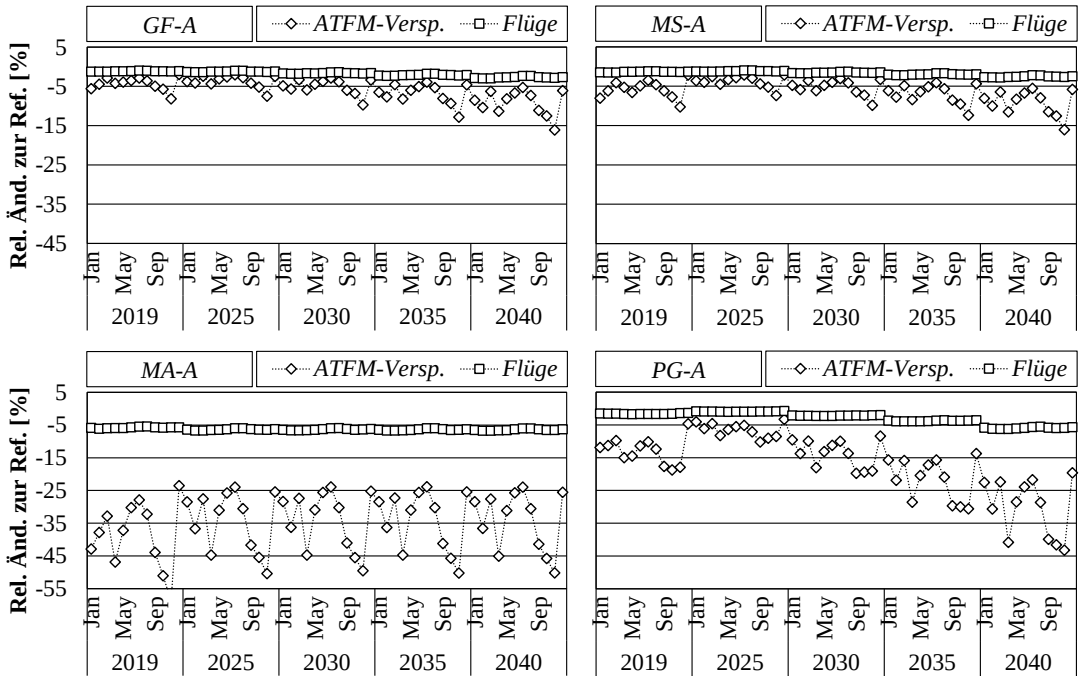

Abb. 5.7: Relative Änderung der Anzahl Flüge und der durchschnittlichen ATFM-Verspätung im EUROCONTROL-Raum bei Angleichung der Flugzeuggröße im Vergleich zur Referenz (abweichende Achsenskalierung bei *MA-A* und *PG-A* beachten)

ATFM-Verspätung dazu führt, dass ein Flugplan nicht eingehalten werden kann und dadurch an anderer Stelle ein Flugzeug fehlt, andererseits berücksichtigen Airlines bereits in der Flugplanentwicklung potenzielle Verspätungen (*schedule padding*, Unterabschnitt 3.2.3). Diese frühzeitige Einberechnung im Planungsprozess wiederum kann durchaus dazu führen, dass sich auch Auswirkungen auf Gesamtflottenebene ergeben. Dabei ist primär eine airlinestrategische Frage, inwiefern das mögliche Ausfallen eine Flugs in Kauf genommen wird und wie viele Reserveflugzeuge bereit gehalten werden.

Zu berücksichtigen ist bei den Werten für den Rückgang der ATFM-Verspätung, dass die Verwendung von c_{rmy} zur Modellierung streckenspezifischer Überlastungszustände (Gleichung 3.8) dazu führt, dass die ATFM-Verspätungswerte für die Frequenzregulierungsansätze mit zufälliger Iterationsreihenfolge (*GF, GFK, MS, MSK* sowie sämtliche Ansätze, wenn eine Angleichung der Flugzeuggröße durchgeführt wird) bei jedem Durchlauf leicht variieren. Zur Einschätzung dieser Ungenauigkeit wurde jeder dieser Ansätze zehn mal mit jeweils einer anderen, zufälligen Reduzierungsreihenfolge durchlaufen. Im Ergebnis streut die Veränderung der ATFM-Verspätung dabei maximal ±1,1% um den Durchschnittswert in jedem Monat, was einen vertretbaren Fehler darstellt.

Schlussfolgernd lässt sich festhalten, dass die Frequenzregulierungsansätze ihr zunehmendes Potenzial im Hinblick auf die Reduzierung von ATFM-Verspätungen

über die Jahre hinweg entfalten. Besonders in den verkehrs- und verspätungsintensiven Sommermonaten wirkt sich dies in Form geringerer ATFM-Verspätungen aus. Der Kompensationsmechanismus dämpft dieses Potenzial, wohingegen es durch eine Angleichung der Flugzeuggröße verstärkt wird.

ATFM-Verspätungskostenreduzierungen sind in den Größenordnungen von mehreren hundert Mio. € bis mehrere Mrd. € pro Jahr im EUROCONTROL-Raum möglich. Hierbei muss bedacht werden, dass sich die Einsparungen unterschiedlich stark auf sämtliche Airlines verteilen. Diese ungleiche Verteilung ist mitunter auch ein Grund, weshalb Bestrebungen einzelner Airlines, systemweite ATFM-Verspätungen durch freiwillige Frequenzreduzierung zu verringern, unwahrscheinlich sind, wie ebenfalls von Zou und Hansen (2014) geschlussfolgert.

5.3 Netto-Reisezeit

Aus Passagiersicht ist neben der Reduzierung von ATFM-Verspätungen auch die Zunahme des Schedule Delay durch Frequenzregulierung von Bedeutung. Während im vorherigen Abschnitt 5.2 ATFM-Verspätungen auf Flugebene und aus Airline-Perspektive betrachtet wurden, werden sie in diesem Abschnitt auf Passagierebene heruntergebrochen. Sie werden mit dem Anstieg des Schedule Delays verrechnet, um die Veränderung der Netto-Reisezeit $TCNTT_{my}$ (Gleichung 3.12a) und der gewichteten Netto-Reisezeit $WTCNTT_{my}$ (Gleichung 3.12b) zu bestimmen.

Die daraus resultierenden Verläufe über die Jahre 2019 bis 2040 hinweg sind auf den Abbildungen 5.8 und 5.9 sowie D.6 und D.7 dargestellt. Positive Werte bedeuten eine längere (gewichtete) Netto-Reisezeit, negative Werte eine Verkürzung. Zusätzlich sind die kumulierten Werte für das Jahr 2040 angegeben. Dieser Wert liefert einerseits eine Tendenz, welche Effekte die Ansätze langfristig haben. Andererseits gibt die Kumulation Aufschluss darüber, inwiefern sich saisonale Schwankungen über das Jahr hinweg ausgleichen.

Die Ansätze *GF* und *MS* (Abbildung 5.8) zeigen bezüglich $TCNTT_{my}$ und $WTCNTT_{my}$ ein ähnliches Bild. Durch die explizite Berücksichtigung des Schedule Delay im Frequenzregulierungsansatz bei *MS* sind die kumulierten Werte in 2040 für $TCNTT_{my}$ und $WTCNTT_{my}$ jeweils etwas geringer als bei *GF*, d. h. es werden größere Reisezeiteinsparungen erzielt.

Mit den gewählten Zielwerten für die maximale Frequenz und den Mindest-Schedule Delay sind die Veränderungen bis 2030 gering im Vergleich zu *MA* und *PG*. Folglich stehen die Reduzierung der ATFM-Verspätung und der Anstieg im Schedule Delay etwa im Gleichgewicht. Ab 2035 ist ein leichtes Aufschwingen nach unten erkennbar, entgegengesetzt zum überproportionalen Wachstum von ATFM-Verspätungen (Abbildung 4.8). Folglich ist hier die Reduzierung der durchschnittlichen ATFM-Verspätung größer als der Anstieg im Schedule Delay.

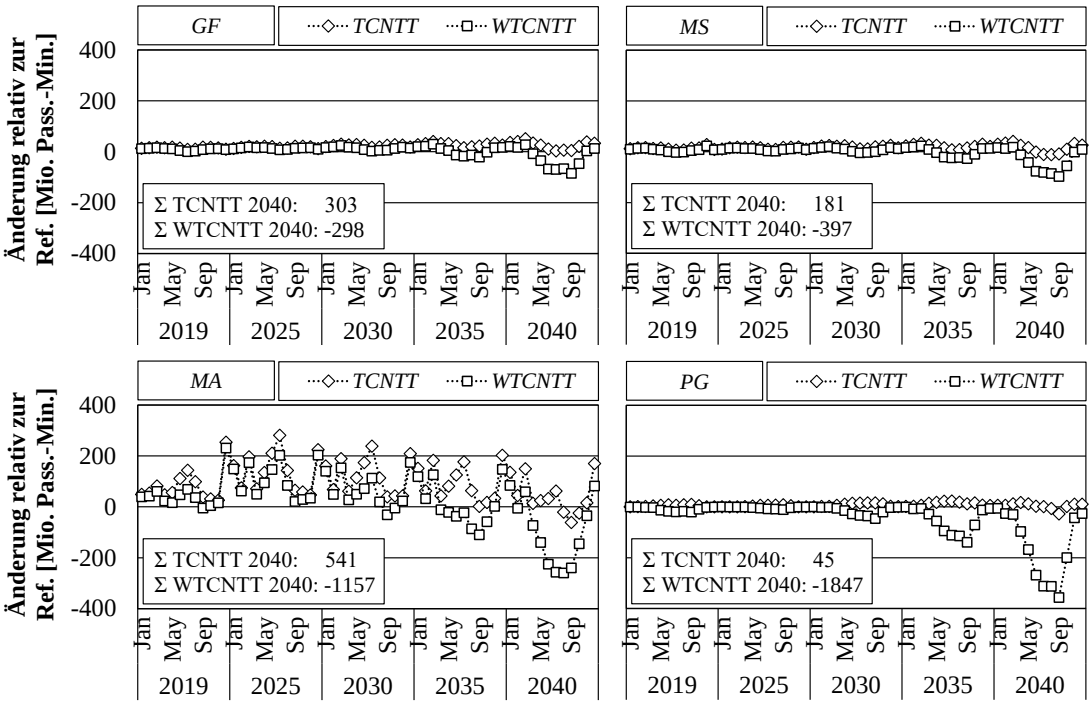

Abb. 5.8: Änderung der (gewichteten) Netto-Reisezeit in Passagierminuten im EUROCONTROL-Raum und kumulierte Werte für 2040 im Vergleich zum Referenzszenario

Analog zu der durchschnittlichen Reduzierung der ATFM-Verspätung (Abschnitt 5.2) sind auch in Bezug auf $TCNTT_{my}$ und $WTCNTT_{my}$ die Vorteile in den Sommermonaten größer. Durch die Vorgabe eines Zielwertes für das gesamte Jahr bei *GF* und *MS* steigt der Schedule Delay in den Wintermonaten stärker an, als ATFM-Verspätungen reduziert werden, die zu dieser Jahreszeit naturgemäß deutlich geringer ausgeprägt sind als in den Sommermonaten. Dem könnte dadurch entgegengewirkt werden, saison- oder monatsspezifische Zielwerte für die Frequenz oder den Mindest-Schedule Delay vorzugeben mit der Folge erhöhter regulatorischer Komplexität.

Bei *MA* ist ein saisonales Muster kaum zu erkennen (Abbildung 5.8). Dies resultiert aus der Vorgabe, die gleiche prozentuale Reduzierung durchschnittlicher ATFM-Verspätung in jedem Monat zu erreichen in Kombination mit der überproportionalen Zunahme von ATFM-Verspätungen in den verkehrsreichen Sommermonaten. Dadurch ist zwar die relative Änderung der durchschnittlichen ATFM-Verspätung jeden Monat identisch, die absolute und relative Anzahl Frequenzen, die reduziert werden müssen, schwankt jedoch über die Monate (Abbildung 5.5). Die gewichtete und ungewichtete Netto-Reisezeit hängt primär von der absoluten Anzahl reduzierter Frequenzen ab und variiert folglich ebenfalls.

Die Hochpunkte der durchschnittlichen ATFM-Verspätung im Referenzszenario

im März, Juli und Dezember (Abbildung 4.8) führen von 2025 bis 2035 dazu, dass $TCNTT_{my}$ besonders in diesen Monaten bei *MA* zunimmt. Folglich wird hier die Abnahme durchschnittlicher ATFM-Verspätung durch eine größere Zunahme des durchschnittlichen Schedule Delays erkauft. In 2040 ist dieser Effekt im Juli nur noch gering ausgeprägt, da bis zu diesem Jahr die durchschnittliche ATFM-Verspätung derart angestiegen ist, dass durch die Reduzierung verhältnismäßig weniger Frequenzen (im Vergleich zu den Vorjahren) die vorgegebene relative Abnahme durchschnittlicher ATFM-Verspätung erreicht werden kann.

Mit *PG* ist die Zunahme von $TCNTT_{my}$ am geringsten und die Abnahme von $WTCNTT_{my}$ am größten. Die stärkeren Ausschläge von $WTCNTT_{my}$ nach unten im Gegensatz zu den anderen Ansätzen resultieren aus dem inhärenten Fokus von *PG* auf Frequenzen mit einem negativen zeitlichen Grenznutzen $MTUF_{rmy}$ (Gleichung 3.10), d. h. die Reisezeitvorteile für Passagiere sind auf Systemebene besonders groß, wenn diese Frequenzen reduziert werden. Mit dem gewählten Gewichtungsfaktor von $d = 2$ liegen die Werte für $TCNTT_{my}$ teils im positiven und teils im negativen Bereich, die Werte für $WTCNTT_{my}$ sind dagegen in jedem einzelnen Monat negativ. In Unterabschnitt 5.7.1 werden Sensitivitätsanalysen von d durchgeführt, um besonders die Effekte auf die (gewichtete) Netto-Reisezeit zu beleuchten.

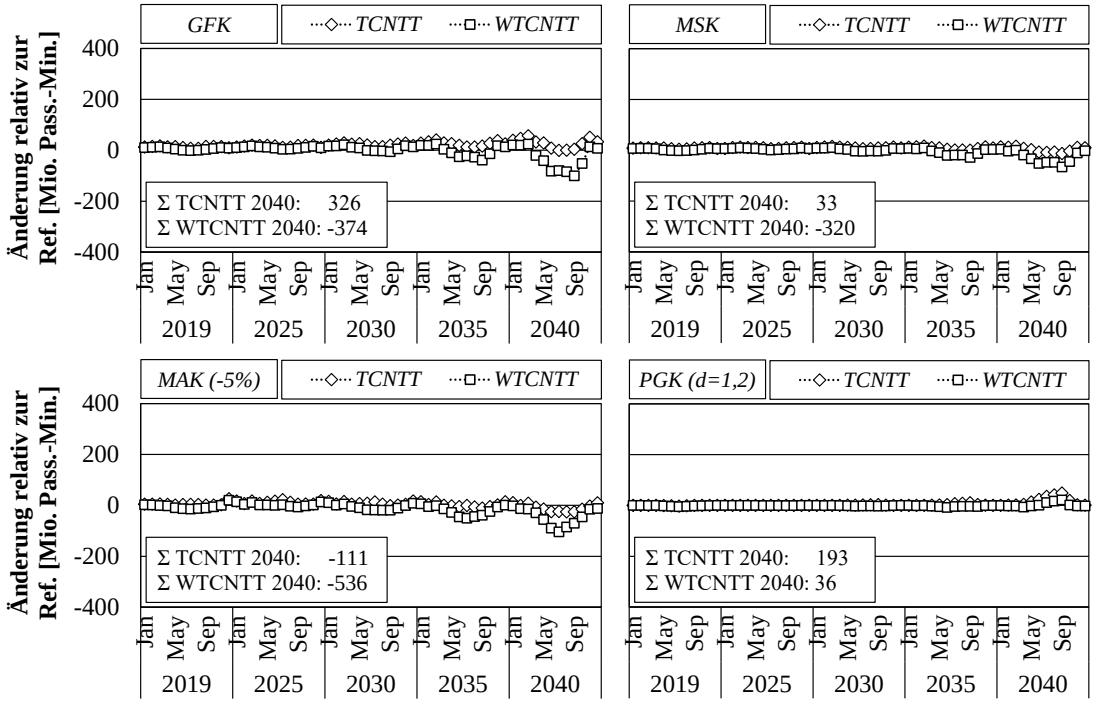

Abb. 5.9: Änderung der (gewichteten) Netto-Reisezeit in Passagierminuten im EUROCONTROL-Raum und kumulierte Werte für 2040 für Ansätze mit Kompensation im Vergleich zum Referenzszenario

Auf Abbildung 5.9 sind die Verläufe von $TCNTT_{my}$ und $WTCNTT_{my}$ für Ansätze mit Kompensation dargestellt. Bei *GFK* führt die Kompensation im Vergleich zu *GF* zu geringfügigen Unterschieden, da die gleiche Anzahl Frequenzen reduziert wird. Die konkret betroffenen Strecken unterscheiden sich zwar, weisen aber hinsichtlich der Reduzierung von ATFM-Verspätungen und dem Anstieg des Schedule Delay ähnliche Werte auf. Die geringere Anzahl reduzierter Frequenzen bei *MSK* im Vergleich zu *MS* äußert sich in Form kleinerer Ausschläge sowie einer geringeren Zunahme von $TCNTT_{my}$.

Bei *MAK* und *PGK* ist der Unterschied im Vergleich zu *MA* und *PG* größer, hier treten betragsmäßig geringere Änderungen von $TCNTT_{my}$ und $WTCNTT_{my}$ relativ zur Referenz auf. Dies resultiert aus dem erforderlichen Absenken der Reduzierungsziele, damit sämtliche nicht reduzierbaren Frequenzen kompensiert werden können (Abschnitt 5.1).

Zudem liegt insbesondere bei *PGK* der Fokus nicht mehr primär auf den besonders schädlichen Frequenzen, da diese teilweise zwar kompensiert, aber nicht reduziert werden können. Frequenzen, die zur Kompensation dienen, weisen prinzipbedingt einen positiven zeitlichen Grenznutzen auf (Abbildung 3.12), d. h. bei einer Reduzierung ist die Zunahme des Schedule Delay größer als die Abnahme der ATFM-Verspätung. Im Ergebnis nimmt dadurch die (gewichtete) Netto-Reisezeit eher zu.

Eine Angleichung der Flugzeuggröße (Abbildung D.6, Abbildung D.7) führt tendenziell zu einer Erhöhung von $TCNTT_{my}$ und $WTCNTT_{my}$ im Vergleich zu keiner Angleichung, da zusätzliche Frequenzen reduziert werden, deren zeitlicher Grenznutzen häufig positiv ist, je nach Ansatz. Die Reisezeitverlängerung ist hier bei den Ansätzen ohne Kompensation teils größer (*GF-A, MS-A, MA-A, PG-A* im Vergleich zu *GFK-A, MSK-A, MAK-A, PGK-A*), da die Frequenzen auf einigen Strecken relativ klein werden und die erforderlichen Flugzeuggrößen für das gesamte Jahr daran ausgerichtet werden. Bei den Ansätzen mit Kompensation erfolgt die Frequenzreduzierung auf einer größeren Anzahl unterschiedlicher Strecken, ist aber auf jeder einzelnen Strecke weniger stark.

Zusammengefasst wird deutlich, dass bei den meisten Ansätzen durch Frequenzregulierung eine Zunahme der Netto-Reisezeit $TCNTT_{my}$ entsteht. Bereits mit einem vorsichtigen Gewichtungsfaktor $d = 2$ führt Frequenzreduzierung allerdings in den meisten Fällen schon zu einer Reduzierung der gewichteten Netto-Reisezeit $WTCNTT_{my}$. Wie in Unterabschnitt 3.2.3 ausgeführt, ist die Bemessung von d subjektiv, daher sind diese Werte vor allem qualitativ zu interpretieren. Dennoch zeigen sie eine Tendenz an, dass die untersuchten Frequenzregulierungsansätze aus zeitlicher Passagierperspektive auf Systemebene überwiegend vorteilhaft sind.

Unter Berücksichtigung des monetären Zeitwertes von Passagieren (*passenger value of time*), der unter anderem je nach Quelle und Passagiertyp zwischen ca.

0,25 €/Minute und 0,5 €/Minute variiert (Adler et al., 2005; Landau et al., 2016), ließen sich mittels Frequenzregulierung in 2040 je nach Ansatz jährlich persönliche Kosten in der Größenordnung von mehreren Hundert Mio. € einsparen.

Im Verhältnis zur vorhergesagten Anzahl Passagiere im EUROCONTROL-Raum in 2040 von ca. 1,3 Mrd. (Tabelle C.2) liegen die Reisezeitveränderungen für die meisten Ansätze in 2040 von der Größenordnung her im Bereich von weniger als einer Minute pro Passagier und sind folglich in dieser Hinsicht gering.

Kritisch könnte bei starker Frequenzregulierung der Aspekt sein, dass gerade im Hub-Betrieb Flugausfälle oder Folgeverspätungen schwieriger abzufedern sind, wenn weniger alternative Frequenzen zur Verfügung stehen (Pai, 2010). In diesem Fall verlängert sich die Reisezeit ggf. überproportional, falls ein Weiterflug beispielsweise erst am nächsten Tag möglich ist. Andererseits lässt sich argumentieren, dass es durch die insgesamt entlasteten Luftverkehrsinfrastrukturen (Flughäfen, Lufträume) auch zu weniger kapazitätsbedingten Verspätungen und Ausfällen kommen dürfte.

Auch bei der Berechnung der Netto-Reisezeiten führt die Verwendung des strecken- und monatsspezifischen Überlastungsfaktors c_{rmy} (Gleichung 3.8) zu einer Streuung der Ergebnisse mit jedem neuen Durchlauf bei den Ansätzen mit zufälliger Iterationsreihenfolge (*GF, GFK, MS, MSK* sowie bei sämtlichen Ansätzen, wenn eine Angleichung der Flugzeuggröße durchgeführt wird). Der prozentuale Streuungsgrad ist umso größer, je geringer die betragsmäßige Veränderung der Netto-Reisezeit ist.

Dieser Zusammenhang resultiert daraus, dass eine geringe Veränderung der Netto-Reisezeit bedeutet, dass der Anstieg des Schedule Delay und der Rückgang der ATFM-Verspätung ähnlich groß sind (Gleichung 3.12). Die Streuung der Änderung der ATFM-Verspätung ist mit ±1,1% im extremsten Fall zwar relativ gering (Abschnitt 5.2), sie kann sich aufgrund ihrer Größenordnung ($> 10^7$ Passagierminuten pro Monat) bei Netto-Reisezeitveränderungen in einer Größenordnung von $< 10^7$ Passagierminuten pro Monat aber prozentual stärker auswirken.

So ergibt sich beispielsweise für den Ansatz *GF* in Monaten mit geringen Änderungen von $TCNTT_{my}$ (z. B. Juli 2040) eine Streuung von bis zu ±12% um den Durchschnittswert. In Monaten mit größeren Veränderungen (z. B. März 2040) liegt diese lediglich bei ±0,5%. Wird zusätzlich die Angleichung der Flugzeuggröße durchgeführt (*GF-A*), steigt die Streuung für Monate mit geringerer Veränderung der Netto-Reisezeit auf bis zu > ±200% (September 2040) an. Für das gesamte Jahr 2040 liegt die Streuung der kumulierten Netto-Reisezeitveränderungen bei diesem Ansatz wiederum bei lediglich ±0,7%.

Die höhere Streuung bei geringen Veränderungen ist hinsichtlich der Aussagekraft der Gesamtergebnisse als eher unkritisch einzustufen, da für die Bewertung von

Frequenzregulierung vor allem größere Veränderungen sowie die kumulierten Werte der Netto-Reisezeit von Bedeutung sind. Dennoch zeigen diese Streuungen, dass FRED bei der Bestimmung geringerer Veränderungen der Netto-Reisezeit an seine Grenzen stößt.

5.4 Flottendynamiken

In diesem Abschnitt wird gezeigt, welchen Einfluss die unterschiedlichen Frequenzregulierungsansätze auf die Flottenzuweisungen der Airlines auf frequenzreduzierten Strecken haben. Es wird nicht zwischen konkreten Airlines differenziert, sondern stets die Summe aller Airlines betrachtet. Für den Teil der höchstfrequentierten Strecken, der nicht von Frequenzregulierung betroffen ist, wird angenommen, dass die Flottenzuweisung gleich dem Referenzszenario ist und folglich unverändert bleibt (Unterabschnitt 3.6.2).

In den Flottenauswirkungen wird nicht berücksichtigt, dass aufgrund reduzierter ATFM-Verspätungen in Summe weniger Reserveflugzeuge benötigt werden. Die Unsicherheiten, die mit der Bestimmung der Anzahl Reserveflugzeuge verknüpft sind (Abschnitt 5.2), lassen eine sinnvolle Prognose nicht zu, was zusätzlich einer vorsichtigen Herangehensweise dient.

Einleitend zeigt Abbildung 5.10 die Abweichung an Flottensitzplatzkapazität (die Summe der Sitzplätze sämtlicher Flugzeuge), die sich für die einzelnen Frequenzregulierungsansätze gegenüber dem Referenzszenario auf den höchstfrequentierten Strecken ergibt. Auf den ersten Blick wird deutlich, dass die benötigte Flottensitzplatzkapazität zunimmt, bis auf wenige, betragsmäßig geringe Ausnahmen.

Bei den Ansätzen *GF* und *MS* ist dieser Effekt deutlich schwächer ausgeprägt als bei *MA* und *PG*. Dies ergibt sich daraus, dass bei *MA* und *PG* die saisonalen Unterschiede in den Zielflugzeuggrößen aufgrund der Einbeziehung der ATFM-Verspätung in die Regulierungsmethodik größer sind. Bei *GF* und *MS* erfolgt die Frequenzreduzierung durch die statische Zielvorgabe folglich eher gleichmäßig über das Jahr hinweg, während sie bei *MA* und *PG* vornehmlich im Sommer stattfindet und notwendige größere Flugzeuge im Winter nicht voll ausgelastet werden können. Erwartungsgemäß ist ebenfalls erkennbar, dass eine Angleichung der Flugzeuggröße zu einer geringeren Abweichung vom Referenzszenario führt. Dies resultiert daraus, dass die größeren Flugzeuge das gesamte Jahr über eingesetzt werden.

Auf den Abbildungen 5.11, 5.12, D.8 und D.9 ist im Detail aufgeschlüsselt, wie sich die Zusammensetzungen der Flottenzuweisungen für jeden Ansatz verändern. Die Abbildungen zeigen die Anzahl an Flugzeugen, die zusätzlich oder weniger eingesetzt werden, um die veränderten Flugpläne auf den höchstfrequentierten Strecken zu bedienen.

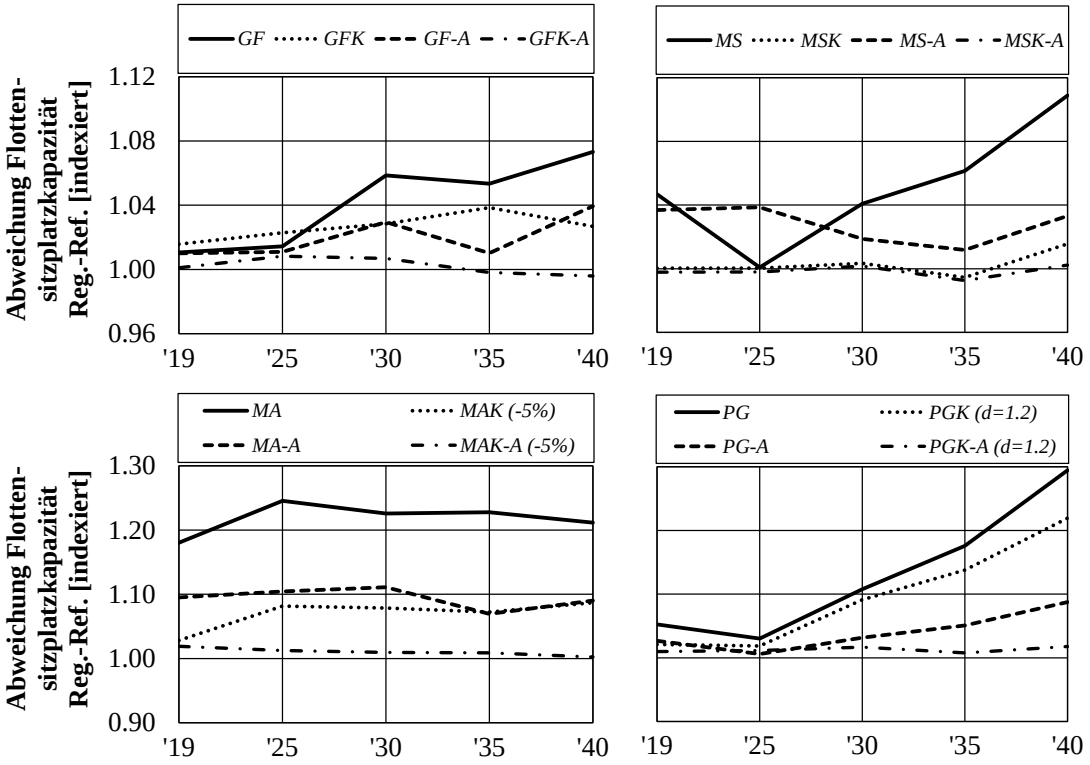

Abb. 5.10: Abweichung der Flottensitzplatzkapazität (die Summe der Sitzplätze über sämtliche Flugzeuge) auf den frequenzreduzierten Strecken zwischen den Frequenzregulierungsansätzen und dem Referenzszenario von 2019 bis 2040 (abweichende Achsenskalierungen beachten)

Zusätzlich zeigen die Kreise und Dreiecke die jährlichen Ausnutzungen (*Utilization*) in Flugstunden für jeden Flugzeugtyp an (Gleichung 3.29). Diese stehen in direktem Zusammenhang zur benötigten Flottensitzplatzkapazität auf Abbildung 5.10: ist die Flottensitzplatzkapazität höher als im Referenzszenario, bedeutet dies, dass die Ausnutzung pro Flugzeug im Durchschnitt abnimmt, da mehr Sitzplatzkapazität für weniger Flugstunden benötigt wird.

Auf den Abbildungen wird nicht explizit gezeigt, wie viele Flugzeuge im Jahr ein- oder ausgeflottet bzw. ge- oder verkauft werden. Sind beispielsweise im Jahr 2025 zehn und im Jahr 2030 25 Flugzeuge eines bestimmten Typs dargestellt, so würden die zehn Flugzeuge aus 2025 in 2030 weiter eingesetzt werden und 15 müssten neu dazukommen. Für die Anzahl Flugzeuge, die in jedem Jahr in die Flotten der betroffenen Airlines dazukommen, ist folglich die Veränderung zu der fünf Jahre vorher angegebenen Anzahl maßgeblich.

Die detaillierte Bezifferung der airlineindividuellen Kauf- und Verkaufsanzahlen sowie entsprechender Zeitpunkte würde es erfordern, die aktuelle Bestandsflotte sowie das Streckennetz jeder Airline aufzulösen (Rosskopf, 2013b). Für die Bewertung von Frequenzregulierung ist es hingegen hinreichend, die Veränderungen zur

Referenz aufzuzeigen. Diese geben Aufschluss darüber, wie stark die in den meisten Fällen rollierend stattfindende Flottenerneuerung angepasst werden müsste.

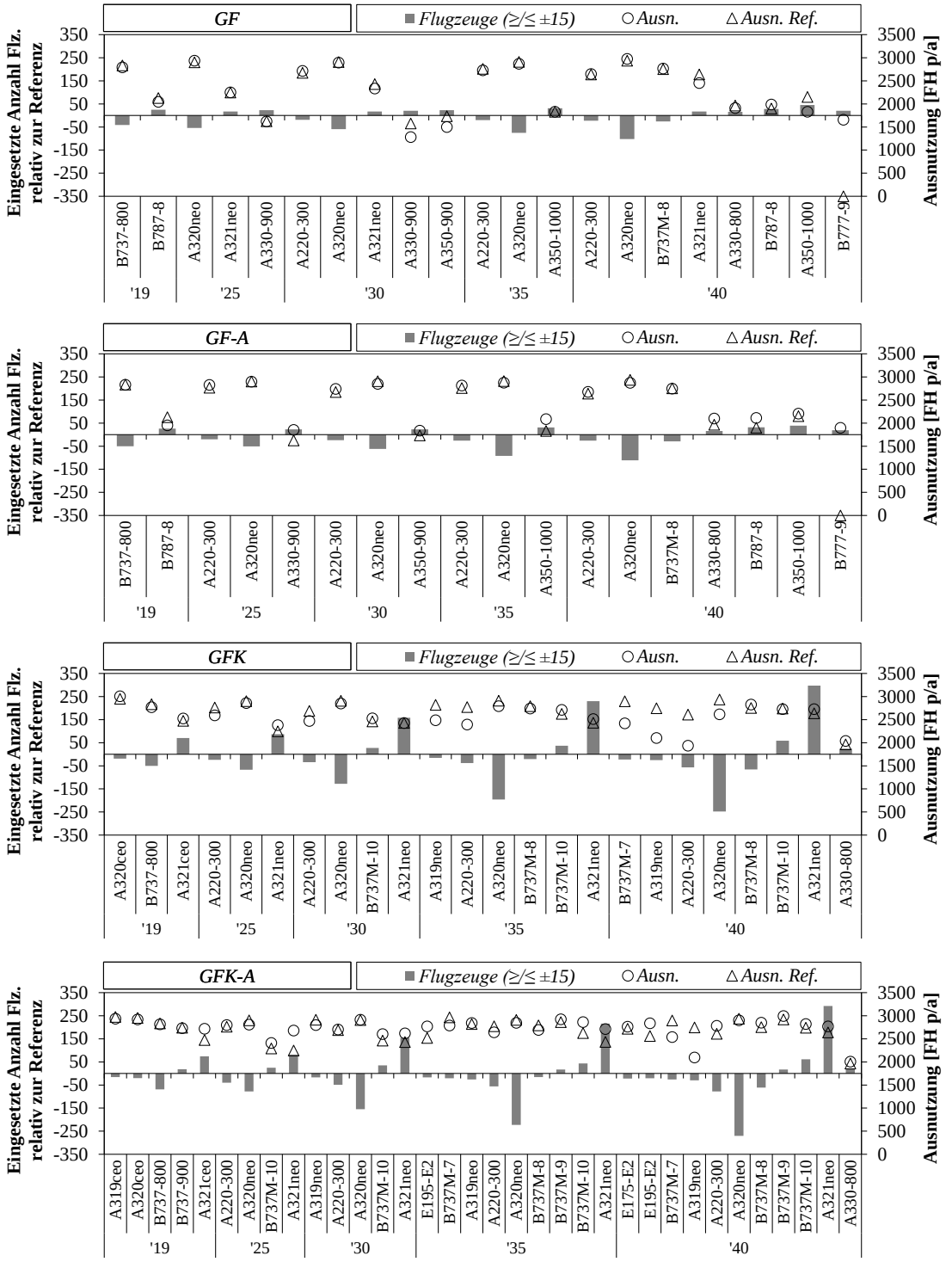

Abb. 5.11: Zusätzlich oder weniger eingesetzte Anzahl Flugzeugtypen (aufsteigend nach Größe sortiert) von 2019 bis 2040 zur Bedienung des Flugplans der höchstfrequentierten Strecken für die Ansätze *GF* sowie *GFK* mit und ohne Angleichung relativ zum Referenzszenario (zwecks Übersichtlichkeit sind nur Veränderungen $\geq$ / $\leq \pm 15$ gezeigt)

Abbildung 5.11 stellt die Flottenveränderungen für die Ansätze *GF* und *GFK* sowohl mit als auch ohne Angleichung der Flugzeuggröße dar. Es ist deutlich sichtbar, wie die relativ starke Frequenzreduzierung auf einigen Strecken (Abbildung 5.1) dazu führt, dass über den Zeitraum eine zunehmende Anzahl an *Twin-Aisle*-Flugzeugen eingesetzt wird, wenn keine Kompensation durchgeführt wird. Deren durchschnittliche Ausnutzung ist relativ gering, da sie teilweise nur saisonal eingesetzt werden. Hier kommt außerdem der Bestrafungsfaktor *up* für *Twin-Aisle*-Flugzeuge zum Tragen, um deren längere *Turnaround*-Zeiten abzubilden (Gleichung 3.30).

Den hinzukommenden *Twin-Aisle*-Flugzeugen stehen kleinere *Single-Aisle*-Flugzeuge gegenüber (insbesondere *A320neo*), die weniger benötigt werden. So werden mit *GF* im Jahr 2040 beispielsweise 148 größere Flugzeuge (ca. 60.100 Sitzplätze) zusätzlich und 204 kleinere Flugzeuge (ca. 35.200 Sitzplätze) weniger eingesetzt.

Bei *GFK* ist erkennbar, dass die Limitierung der maximalen Flugzeuggröße auf 220 Sitze vornehmlich zum Einsatz des *A321neo* führt. Insgesamt werden im Jahr 2040 393 größere Flugzeuge zusätzlich (ca. 86.100 Sitzplätze) und 458 kleinere Flugzeuge (ca. 77.000 Sitzplätze) weniger betrieben, insbesondere *A220-300, A320neo, B737M-8*. Gerade bei den Flugzeugen, die weniger benötigt werden, ist die Ausnutzung geringer, da die noch übrige Teilflotte nicht (mehr) das gesamte Jahr eingesetzt wird.

Bei Angleichung der Flugzeuggröße mit den Ansätzen *GF-A* und *GFK-A* wird eine größere Anzahl Flugzeuge nicht benötigt, um den Flugplan zu bedienen. So werden in 2040 bei *GF-A* 227 kleinere Flugzeuge mit ca. 40.000 Sitzplätzen weniger benötigt und 131 größere Flugzeuge mit ca. 53.300 Sitzplätzen zusätzlich. Bei *GFK-A* sind 518 kleinere Flugzeuge mit ca. 85.700 Sitzplätzen nicht erforderlich, dafür kommen 388 größere Flugzeuge mit ca. 84.300 Sitzplätzen dazu. Gleichzeitig ist die Ausnutzung im Vergleich zu keiner Angleichung der Flugzeuggröße höher. Erwartungsgemäß führt die Angleichung folglich dazu, dass die Flotten homogener und saisonal flexibler eingesetzt werden.

Der Einsatz einiger *Twin-Aisle*-Flugzeuge (*A330-800*) bei *GFK-A* trotz Limitierung der Flugzeuggröße rührt daher, dass diese für die Erreichung durchschnittlicher Flugzeuggrößen von etwa 220 Sitzen vereinzelt notwendig sind, da der *A321neo* lediglich 215 Sitze aufweist (Tabelle A.1).

Wie in den Dimensionen ATFM-Verspätung, Schedule Delay sowie Anzahl der Flüge im Gesamtsystem, sind auch bei den Flottendynamiken die Ergebnisse für *MS* und *MSK* (Abbildung D.8) ähnlich wie bei *GF* und *GFK*. Sie sind in ihrer Ausprägung allerdings weniger markant, da insgesamt eine geringere Anzahl Frequenzen reduziert wird (Abschnitt 5.1).

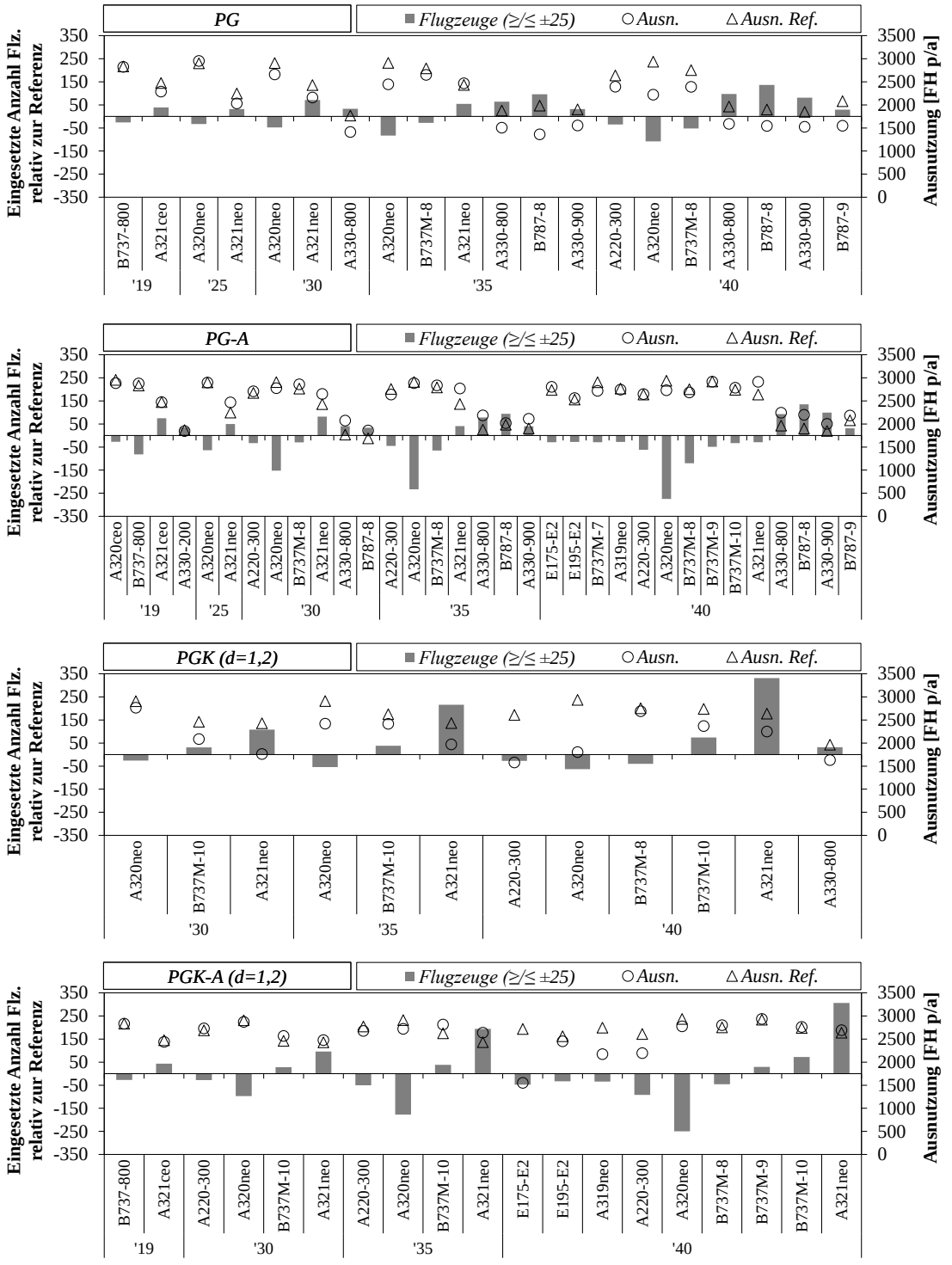

Abb. 5.12: Zusätzlich oder weniger eingesetzte Anzahl Flugzeugtypen (aufsteigend nach Größe sortiert) von 2019 bis 2040 zur Bedienung des Flugplans der höchstfrequentierten Strecken für die Ansätze *PG* sowie *PGK* mit und ohne Angleichung relativ zum Referenzszenario (zwecks Übersichtlichkeit sind nur Veränderungen $\geq$ / $\leq \pm 25$ gezeigt)

Größere Unterschiede zu den vorherigen Ansätzen ergeben sich für die Flottenzuweisungen von *MA* und *PG* auf Abbildung D.9 und Abbildung 5.12. Es werden nicht nur größere, sondern auch mehr Flugzeuge zur Bedienung des Flugplans eingesetzt. So sind bei *MA* im Jahr 2040 300 zusätzliche größere (ca. 123.300 Sitzplätze) und 286 weniger kleinere Flugzeuge (ca. 51.300 Sitzplätze) erforderlich. Bei *PG* sind es im gleichen Jahr 417 zusätzliche größere (ca. 144.800 Sitzplätze) und 266 weniger kleinere Flugzeuge (ca. 44.700 Sitzplätze), die zum Einsatz kommen. Die Ursache hierfür liegt in den saisonal stark variierenden Zielflugzeuggrößen und der daraus resultierenden ungleichmäßigen Ausnutzung über das Jahr.

Der herausstechende Einsatz von *A321neo* und einigen *B737M-10* ist für die Ansätze *MAK* und *PGK* ersichtlich. In 2040 werden 254 zusätzliche größere Flugzeuge mit ca. 55.700 Sitzplätzen betrieben (*MAK*), bei *PGK* sind es 462 größere Flugzeuge mit ca. 101.500 Sitzplätzen. Umgekehrt werden im gleichen Jahr 155 kleinere Flugzeuge bzw. ca. 26.100 Sitzplätze (*MAK*) und 168 Flugzeuge bzw. ca. 27.200 Sitzplätze (*PGK*) weniger benötigt.

Auch bei *MA-A, MAK-A, PG-A* und *PGK-A* führt die Angleichung der Flugzeuggröße dazu, dass auf mehr kleinere Flugzeuge verzichtet werden kann, als dass neue größere Flugzeuge zusätzlich notwendig sind. Die Verbesserungen in der Ausnutzung sind im Vergleich zu *GF-A, GFK-A, MS-A* und *MSK-A* jedoch geringer, aufgrund des insgesamt breiteren Flugzeuggrößenspektrums.

Die größten Veränderungen gemessen an der Anzahl Flugzeuge, die zusätzlich oder weniger eingesetzt werden, entstehen bei *MA-A* und *PG-A*. So führen der Einsatz größerer Flugzeuge sowie die Angleichung dazu, dass bei *PG-A* in 2040 420 größere Flugzeuge (ca. 150.200 Sitzplätze) zusätzlich eingesetzt werden, gleichzeitig aber 698 (ca. 120.400 Sitzplätze) kleinere weniger. Bei einigen *Twin-Aisle*-Flugzeugen nimmt die Ausnutzung im Vergleich zur Referenz deutlich zu, da diese nun auf mehr Strecken und das gesamte Jahr eingesetzt werden.

Schlussfolgernd lässt sich festhalten, dass Frequenzregulierung flottenseitig zu zahlreichen Wechselwirkungen führt. Durch die Frequenzregulierungsansätze mit Kompensation lassen sich die Flottenzusammensetzungen und -ausnutzungen erwartungsgemäß gezielt beeinflussen, teilweise kommt es dabei zu ausgeprägten Häufungen bestimmter Flugzeugtypen. Dadurch ist es für Airlines einerseits schwieriger, mit kurzfristigen sowie saisonalen Nachfrageschwankungen umzugehen. Andererseits erhöht sich dadurch die Flottenkommunalität mit daraus resultierenden Betriebskostenvorteilen im Bereich Crew-Training, MRO und Abfertigung (Husemann et al., 2018; Rosskopf et al., 2013).

Eine Zunahme der erforderlichen Flottensitzplatzkapazität einhergehend mit einer geringeren Ausnutzung in Form von jährlich erzielbaren Flugstunden der Flotte ist

aus ökologisch-ökonomischer Sicht grundsätzlich nicht sinnvoll, sofern die resultierende Kapitalkostenzunahme nicht beispielsweise durch geringere COC überkompensiert wird.

Aus strategischer Perspektive ist es notwendig, Airlines und Flugzeugherstellern ausreichend Vorlaufzeit zu geben, um ihre Flotten- und respektive Produktionsplanung anzupassen. Im Vergleich zur Gesamtflottengröße im EUROCONTROL-Raum (Ende 2019 ca. 2.200 Kurz- und Mittelstreckenflugzeuge bei den 30 größten europäischen Airlines gemäß CIRIUM (2019)) und unter Berücksichtigung des langfristigen Betrachtungszeitraums scheinen die notwendigen Flottenanpassungen aus rein zeitlicher Sicht realisierbar. Mutmaßlich müssten einige kleinere Flugzeuge früher ausgeflottet werden, dafür können einige größere Flugzeuge wiederum länger im Betrieb bleiben.

Externe, indirekte Eingriffe in die optimierte und aufeinander abgestimmte Flotten-, Flug-, Zuweisungs- und Rotationsplanung sind in jedem Fall mit Bedacht vorzunehmen, um kontraproduktive Konsequenzen zu vermeiden. Die konkreten ökologisch-ökonomischen Implikationen von Frequenzregulierung sind Gegenstand des folgenden Abschnitt 5.5.

5.5 Betriebskosten und Kerosinverbrauch

In diesem Abschnitt wird aufgezeigt, welche Effekte die unterschiedlichen Frequenzregulierungsansätze und die daraus folgenden Flottendynamiken auf die DOC und den Kerosinverbrauch haben. Die Betrachtung des Einflusses auf die Kapitalkosten erfolgt aufgrund der damit verbundenen Unsicherheiten (Unterabschnitt 2.2.2, Unterabschnitt 3.5.1) getrennt von den COC.

Änderungen der Betriebskosten und des Kerosinverbrauchs resultieren lediglich aus dem Einsatz größerer Flugzeuge. Aufgrund weniger überlasteter Luftverkehrsinfrastrukturen und damit notwendiger geflogener Umwege ist tendenziell eine zusätzliche Reduzierung der Betriebskosten und des Kerosinverbrauchs zu erwarten, die jedoch nicht berücksichtigt ist.

Die Abbildungen 5.13 und 5.14 sowie D.10 und D.11 zeigen für sämtliche Ansätze die Entwicklung der COC/ASK und des FC/ASK von 2019 bis 2040 auf den frequenzreduzierten Strecken. Die auf ASK-Ebene heruntergebrochenen Größen haben in diesem Zusammenhang eine größere Aussagekraft, weil sie modellbedingte Schwankungen der angebotenen Sitzplatzkapazität ausgleichen (Gleichung 3.36), zudem handelt es sich um etablierte relative Größen im Luftverkehr (Abschnitt 3.5). Da die Anzahl der frequenzreduzierten Strecken über die Jahre dennoch maßgeblich zunimmt (Abbildung 5.5 bis Abbildung 5.7), sind die absoluten Betriebskosten- und Kerosinverbrauchsänderungen (ΔCOC und ΔFC) zur Einordnung der Größenordnungen ebenfalls dargestellt.

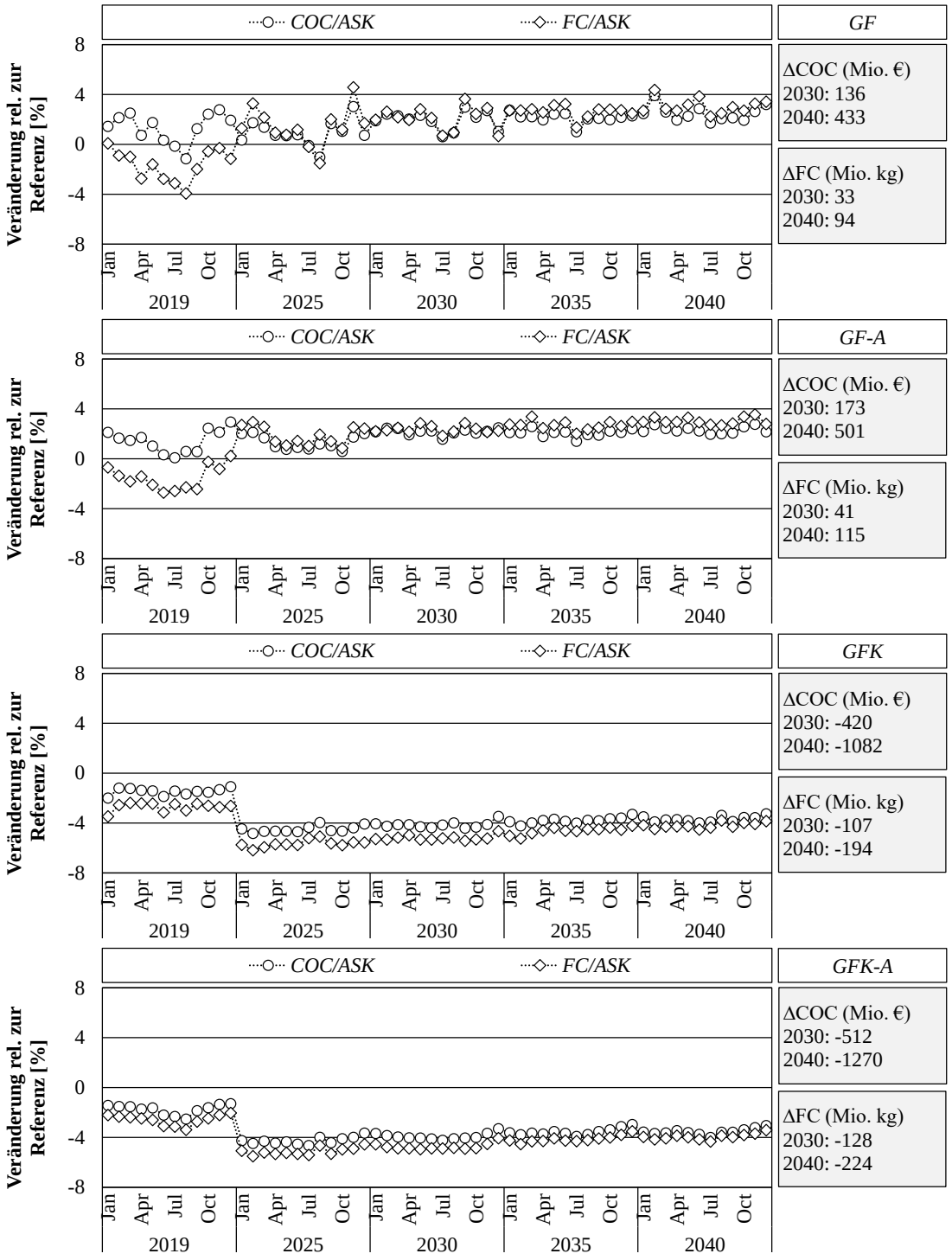

Abb. 5.13: Änderung der COC/ASK und des FC/ASK auf frequenzreduzierten Strecken für die Ansätze *GF* sowie *GFK* mit und ohne Angleichung relativ zum Referenzszenario

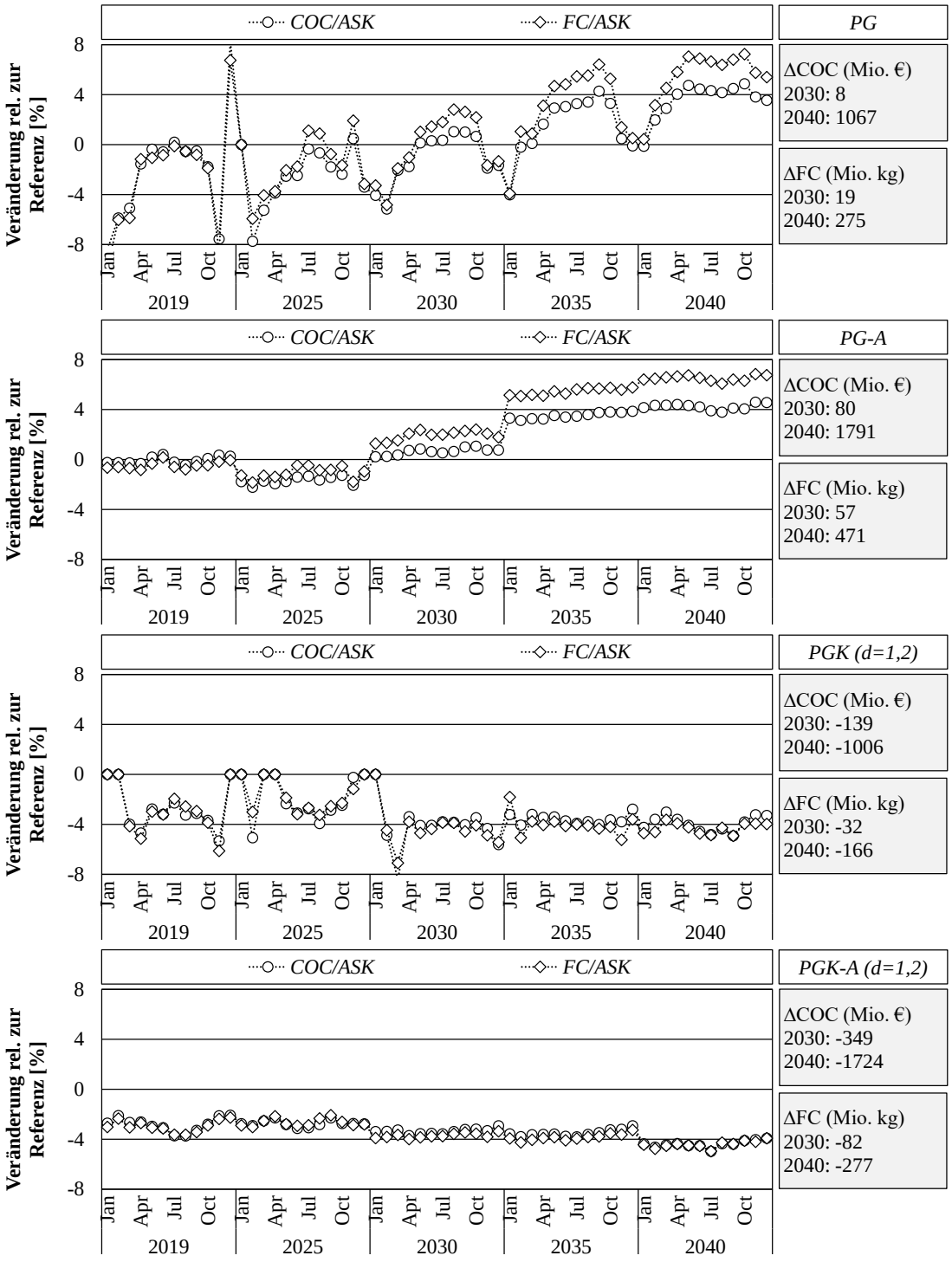

Abb. 5.14: Änderung der COC/ASK und des FC/ASK auf frequenzreduzierten Strecken für die Ansätze *PG* sowie *PGK* mit und ohne Angleichung relativ zum Referenzszenario

Die zunehmenden COC/ASK und der zunehmende FC/ASK sind für sämtliche Ansätze ohne Kompensation ersichtlich. Bei *GF, GF-A, MS* und *MS-A* liegt die Zunahme in 2040 für beide Parameter im Bereich von 2% bis 4%. Bei den Ansätzen *MA, MA-A, PG* und *PG-A* sind die eingesetzten Flugzeuge durchschnittlich noch

größer (Abbildung 5.1 und Abbildung 5.2), daher nehmen die COC/ASK und der FC/ASK um bis zu 5% und respektive 6% in 2040 zu.

Auffallend ist zudem, dass besonders bei *MA* und *PG* eine Zunahme der COC/ASK und des FC/ASK über die Jahre hinweg erkennbar ist. Dies resultiert daraus, dass die eingesetzten Flugzeuge mit zunehmender Frequenzreduzierung immer größer und damit ungeeigneter für die Kurzstrecke werden. Aufgrund der besonderen Berücksichtigung saisonaler ATFM-Verspätungsschwankungen ist vor allem bei *PG* ein saisonales Muster zu erkennen.

Sämtliche Ansätze mit Kompensation führen zu Rückgängen der COC/ASK und des FC/ASK, die in der Größenordnung von 3% bis 5% in 2040 liegen. Eine Ausnahme bilden die Ansätze *MSK* und *MSK-A* mit nur 1% bis 2% Verbesserung. Dies resultiert aus der vergleichsweise geringeren Anzahl reduzierter Frequenzen und dementsprechend eingesetzter *A321neo*.

Hinsichtlich der absoluten COC-Veränderungen sind die Ansätze *PG, PGK, PG-A* und *PGK-A* hervorzuheben. Ohne Kompensation entstehen hier im Jahr 2040 die größten Zusatzkosten, wohingegen mit Kompensation die höchsten COC-Einsparungen entstehen. Beides ergibt sich aus der jeweils hohen Anzahl frequenzreduzierter Strecken, auf denen entweder Effizienzverbesserungen oder -rückgänge entstehen.

Bedingt durch die Flottenhomogenisierung und die ganzjährige Frequenzreduzierung, die mit der Kompensation und der Angleichung der Flugzeuggröße einhergehen, zeigen die Verläufe für die entsprechenden Ansätze einen insgesamt gleichmäßigeren Verlauf. Der Versatz nach unten, der bei einigen Ansätzen nach 2019 entsteht, resultiert aus den Flugzeugtypen der neueren Generation (z. B. *A220-, A320neo-, B737M-8*-Familie), die erst ab 2020 zur Verfügung stehen (Unterabschnitt 4.3.2).

Sowohl bei den Ansätzen mit einem Anstieg als auch einer Reduzierung der COC/ASK ist der Kerosinverbrauch der Kostentreiber. Das bedeutet, in den meisten Fällen ist die Zunahme bzw. die Abnahme des FC/ASK größer als die der COC/ASK. Zumindest auf den frequenzreduzierten Strecken übersteigen diese Potenziale den von Morrell (2009) ermittelten Wert von <1% CO_2-Emissionsreduzierung durch „natürliches“ Flugzeuggrößenwachstum deutlich.

Abbildung 5.15 illustriert für exemplarisch gewählte Ansätze den Einfluss einzelner COC-Komponenten auf die COC/ASK der veränderten Flottenzuweisungen. *GF* und *PG* repräsentieren dabei Ansätze, bei denen die COC/ASK zunehmen, während sie bei *GFK* und *PGK* abnehmen.

Der Einsatz von durchschnittlich noch größeren Flugzeugen (Abbildung 5.3) führt bei *PG* dazu, dass die Kerosinkosten pro Sitzplatzkilometer im Vergleich zu den

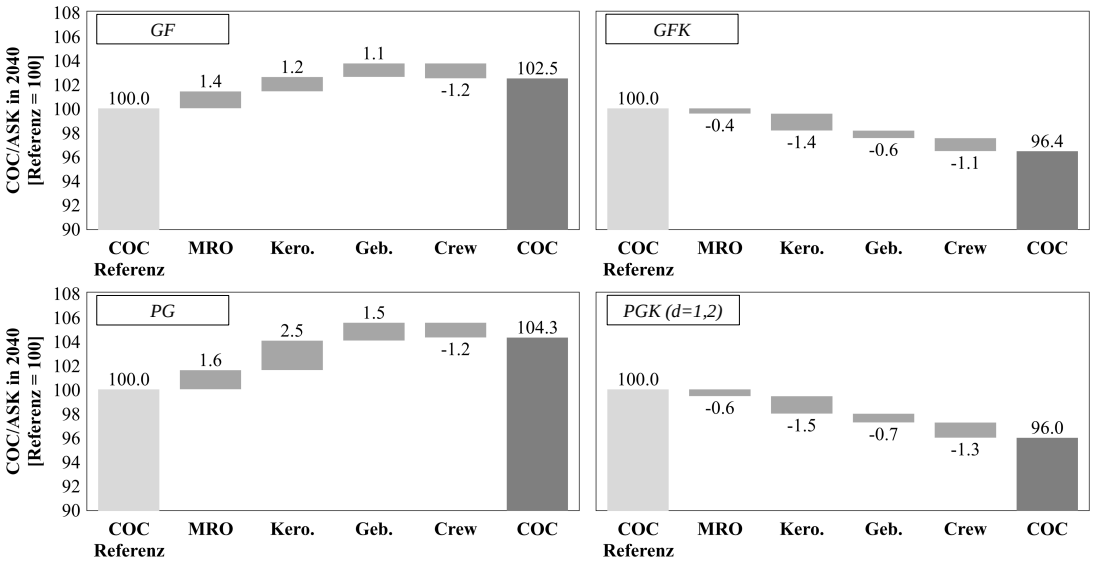

Abb. 5.15: Einfluss der einzelnen COC-Komponenten auf die Veränderung der COC/ASK auf frequenzreduzierten Strecken in 2040 für exemplarisch gewählte Ansätze relativ zum Referenzszenario

übrigen COC-Komponenten überproportional ansteigen. Dies erklärt die stärkere Zunahme der FC/ASK relativ zum Anstieg der COC/ASK (Abbildung 5.13, Abbildung 5.14). Folglich sind *Twin-Aisle*-Flugzeuge mit zunehmender Größe selbst mit reiner *Economy*-Bestuhlung auf Kurzstrecke überproportional verbrauchs- und somit auch kostenineffizienter. Dies resultiert gemäß Unterabschnitt 2.2.1 aus drei Effekten:

- Eine höhere MTOM und damit eine höhere OEM (und EM) pro Sitzplatz durch größere strukturelle Anforderungen;
- auf eine höhere MTOM ausgelegte Flügelgeometrien (Streckung, Profiltiefe, Profildicke), die abseits ihres Auslegungspunktes betrieben werden;
- der Tatsache, dass die wirkungsgradoptimale Reiseflughöhe auf Kurzstrecke mit *Twin-Aisle*-Flugzeugen aufgrund geringerer Steiggeschwindigkeiten meistens nicht erreicht wird.

Die COC-Komponenten MRO und Gebühren werden gemäß Thorbeck (2013) als Funktion der OEM und respektive der MTOM modelliert, daher nehmen die entsprechenden Kostenkomponenten ebenfalls zu. Für *Twin-Aisle*-Flugzeuge kommt bei den MRO-Kosten außerdem der Bestrafungsfaktor mp für den Betrieb auf Kurzstrecken hinzu. Bei den Crewkosten pro Sitzplatzkilometer ist hingegen bei allen Ansätzen ein Rückgang zu verzeichnen, resultierend aus dem vorteilhafteren Verhältnis aus Cockpit-Crewmitgliedern zu Sitzplätzen.

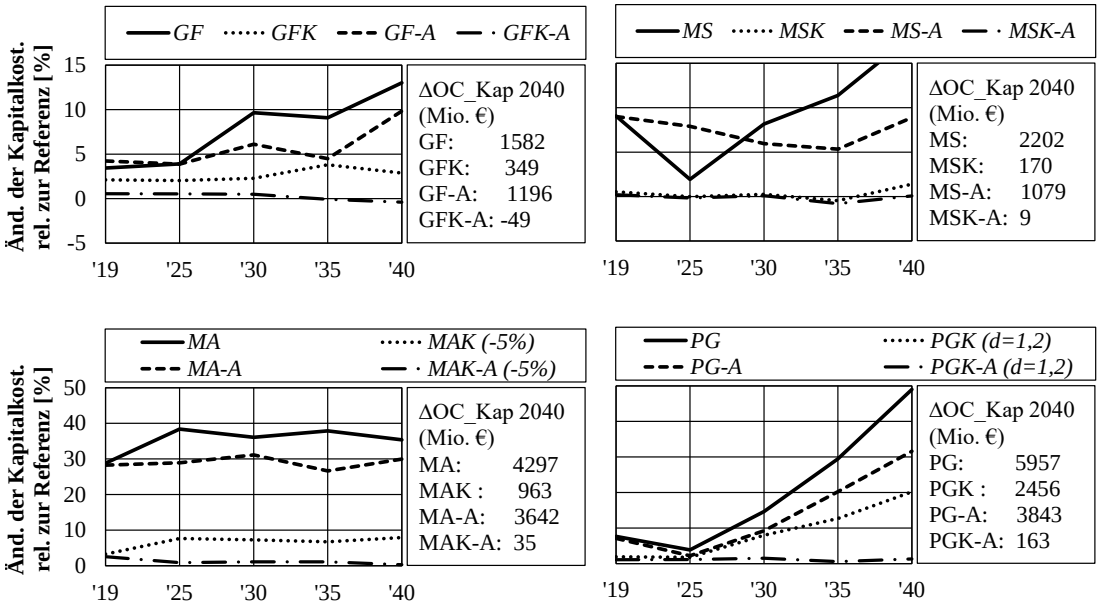

Abb. 5.16: Relative und absolute Änderung der Kapitalkosten OC_{Kap} für sämtliche Frequenzregulierungsansätze auf den frequenzreduzierten Strecken im Vergleich zum Referenzszenario

Die Analyse und Darstellung der Kapitalkosten für die einzelnen Frequenzregulierungsansätze erfolgt separat von den COC auf Abbildung 5.16. Die Kapitalkosten OC_{Kap} wurden mittels der isolierten Berechnung dieser Kostenkomponente aus dem verwendeten DOC-Modell bestimmt (Unterabschnitt 3.5.1) und sind eine Funktion der OEM sowie der Triebwerksmasse.

Analog zur Entwicklung der notwendigen Flottensitzplatzkapazität (Abbildung 5.10) führen sämtliche Ansätze zu einem Anstieg der Kapitalkosten, besonders bei *MA* und *PG* im Vergleich zu *GF* und *MS*. Der Anstieg kommt zum einen daher, dass mehr Flugzeuge benötigt werden und zum anderen, dass bei *Twin-Aisle*-Flugzeugen die OEM stärker zunimmt als die Sitzplatzkapazität.

Der Vergleich der absoluten Veränderungen der COC auf den Abbildungen 5.13, 5.14, D.10 und D.11 mit denen der Kapitalkosten offenbart, dass bei den Ansätzen *GFK, GFK-A, MSK, MSK-A, MAK-A* sowie *PGK-A* die Einsparungen in den COC in 2040 größer sind als die zusätzlichen Kapitalkosten. Dabei sind die positiven Effekte von weniger Verspätungen und somit geringeren Umwegen bezüglich der COC nicht berücksichtigt, sondern die Unterschiede entstehen lediglich durch die veränderte Flottenstruktur.

Schlussfolgernd lässt sich festhalten, dass nur zwei der acht Frequenzregulierungsansätze (*GFK, MSK*) auf DOC-Basis ökonomisch-ökologisch vorteilhaft sein können, wenn keine Angleichung der Flugzeuggröße stattfindet. Zu berücksichtigen ist, dass es sich um Ansätze mit Kompensation handelt, was die regulatorische

Komplexität tendenziell erhöht. Mit Angleichung der Flugzeuggröße führen vier Ansätze (*GFK-A, MSK-A, MAK-A, PGK-A*) zu aggregierten DOC-Einsparungen. Die Angleichung der Flugzeuggröße allerdings ist eine idealisierte Annahme, die bedeuten würde, dass Airlines freiwillig mehr Frequenzen reduzieren würden als erforderlich mit entsprechenden Risiken (Abschnitt 3.4).

Bei den anderen Ansätzen führen der Einsatz von langstreckenoptimierten *Twin-Aisle*-Flugzeugen auf Kurzstrecke oder die geringere Ausnutzung in Form der erzielbaren jährlichen Flugstunden zu einer Zunahme der DOC.

Eine Einschränkung der Ergebnisse ist, dass stets sämtliche Airlines auf den höchstfrequentierten Strecken betrachtet werden. Auch wenn einige Ansätze in Summe zu Betriebskosteneinsparungen führen, ist es möglich, dass dies für einzelne betroffene Airlines nicht der Fall ist. Dieser Fall kann beispielsweise eintreten, wenn eine Airline nur wenige frequenzreduzierte Strecken bedient, dafür aber trotzdem größere Flugzeuge beschaffen müsste, die möglicherweise nicht flexibel im gesamten Streckennetz eingesetzt werden könnten, was die jährlich erzielbaren Flugstunden mindert.

Zwar handelt es sich bei den möglichen Betriebskosten- und Kerosineinsparungen in Summe um nennenswerte Beträge. Selbst wenn sich diese gleichmäßig auf sämtliche Airlines verteilen, so ist die Höhe der Einsparungen in Relation zu den Gesamtausgaben und dem Gesamtkerosinverbrauch großer europäischer Airlines jedoch gering.

So wird von EEA, EASA, EUROCONTROL (2020) beispielsweise vorhergesagt, dass der Kerosinverbrauch sämtlicher in der Europäischen Union startenden Flüge in 2040 im Basisszenario ca. 65 Mrd. kg betragen wird. Die durch Frequenzregulierung zu erzielenden Kerosinverbrauchseinsparungen liegen in 2040 mit *PGK-A* bei maximal 277 Mio. kg (Abbildung 5.14), was einem Anteil von ca. 0,43% entspricht.

Dies unterstreicht nochmals den Aspekt, dass auch zur Realisierung von ökologisch-ökonomischen Effizienzgewinnen die Wahrscheinlichkeit freiwilliger Frequenzreduzierung zum Einsatz größerer Flugzeuge gering ist (Zou & Hansen, 2014). Das Kriterium, dass mindestens Betriebskosten- und Kerosinverbrauchsneutralität gegeben sein muss, damit Frequenzregulierung grundsätzlich annehmbar ist (Abschnitt 3.1), wird jedoch mit einigen Ansätzen erfüllt.

5.6 Neue Flugzeugentwürfe

Während in den bisherigen Abschnitten am Markt verfügbare Flugzeugtypen betrachtet wurden, werden in diesem Abschnitt zwei potenzielle zukünftige Flugzeugentwürfe untersucht, die im Zusammenhang mit Frequenzreduzierung relevant

sein können. Damit wird zum einen ermittelt, welches Effizienzsteigerungspotenzial Frequenzregulierung in Kombination mit diesen Entwürfen bergen kann. Zum anderen wird das Marktpotenzial ermittelt, das sich durch Frequenzregulierung für diese Entwürfe ergeben kann.

In Unterabschnitt 5.6.1 wird einleitend die Vorgehensweise hierfür erläutert. Entsprechend des Aufbaus der bisherigen Ergebnisauswertung erfolgt in Unterabschnitt 5.6.2 in kondensierter Form zuerst die Beschreibung der Effekte auf die Zielfrequenzen und -Flugzeuggrößen, der ATFM-Verspätungen, der Fluganzahl sowie der Reisezeit. In Unterabschnitt 5.6.3 werden anschließend die sich ergebenden Flottendynamiken mit den daraus resultierenden Betriebskosten- und Kerosinverbrauchseffekten dargestellt.

5.6.1 Vorgehensweise

Die Auswertung der bisherigen Ergebnisse zeigt, dass lediglich Ansätze mit Kompensation ökologisch-ökonomisch vorteilhaft sein können. Die durchschnittliche Größe der 2019 auf den höchstfrequentierten Strecken eingesetzten Flugzeuge ist mit 163 Sitzen pro Flug (Unterabschnitt 4.1.1) bereits relativ nah am größten verfügbaren *Single-Aisle*-Flugzeug, dem *A321neo* mit 215 Sitzen. Dadurch ist das mittels Frequenzregulierung zu realisierende Potenzial relativ begrenzt.

Für die Untersuchungen in diesem Abschnitt wird daher die Verfügbarkeit eines *New Midsize Airplane* (NMA) sowie eines *Large Aircraft for Short Ranges* (LASR) (Abschnitt 2.2), jeweils mit einem EIS in 2030, angenommen. Tabelle 5.3 zeigt die den neuen Entwürfen zugrunde liegenden Basisflugzeugtypen sowie die vorgenommenen Anpassungen wesentlicher Parameter für die Betriebskosten- und Kerosinverbrauchsberechnung. Sämtliche übrige Parameter wurden entsprechend Tabelle A.1 konstant gehalten.

Tab. 5.3: Untersuchte neue Flugzeugentwürfe mit einem angenommenen EIS in 2030 sowie verwendete Parameteranpassungen und Quellen

Bezeichnung	Basistyp	Anpassungen	Referenzen
NMA	*B757-300*	FC: -30% OEM: -10% MTOM: -10% EM: +15%	Dray et al. (2014), Graham et al. (2014) und Lee et al. (2001)
LASR	*A330-800*	FC: -16% OEM: -26% MTOM: -15% Reichw.: - 77%	Kenway et al. (2010)

Der NMA-Entwurf wurde von der *B757-300* abgeleitet, da diese, je nach Ausstattung und Beladung, mit einer Passagierkapazität von ca. 230 bis 280 Sitzplätzen und einer Reichweite von ca. 5.000 km bis 7.000 km (Boeing, 2002) eindeutig dem NMA-Segment zuzuordnen ist (Abschnitt 2.2). Auf Abbildung 5.17 ist die Draufsicht einer beispielhaften *Economy*-Bestuhlung in einer *B757-300* zu sehen. Für die *757-300* stehen umfangreiche Daten zur Verfügung, so dass die Ableitung eines neuen Entwurfs von diesem bestehenden Flugzeugtypen ein robustes Verfahren darstellt.

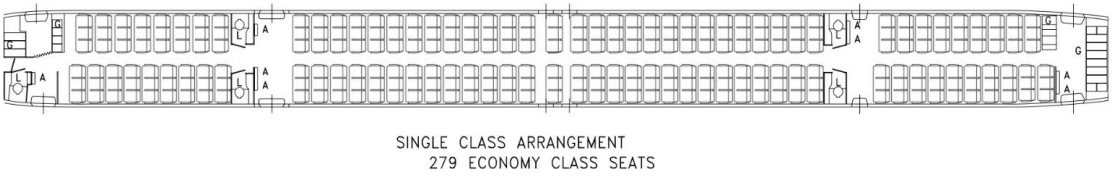

Abb. 5.17: Kabinendraufsicht der *B757-300* in beispielhafter *Economy*-Bestuhlung (Boeing, 2002)

Die Effizienzsteigerung im Kerosinverbrauch FC entspricht etwa einer durchschnittlichen Reduzierung von 1% pro Jahr (Lee et al., 2001) seit dem EIS der *B757-300* in 1999. Erzielt wird diese beim NMA sowohl durch modernere Triebwerke als auch durch leichtere Bauweise, letztere reduziert außerdem die OEM und die MTOM. Da neuere Triebwerke Effizienzsteigerungen u. a. durch höhere Nebenstromverhältnisse realisieren, erhöht sich der Durchmesser und damit die Triebwerksmasse EM (*Engine Mass*).

Das LASR basiert auf einem *A330-800*. Im Gegensatz zur *B757-300* handelt es sich dabei um ein *Twin-Aisle*-Flugzeug mit 257 Sitzen bei einem Langstreckenkabinenlayout und mit 321 Sitzen in reiner *Economy*-Bestuhlung (Airbus, 2019b). Die Anpassungen in Tabelle 5.3 stammen aus der Studie von Kenway et al. (2010), in der ein *A330-200* für den Betrieb auf Distanzen bis 2.780 km ausgelegt wurde. Da der *A330-800*, bis auf neuere Triebwerke, leicht gestreckte Flügel und Kohlefaser-Winglets, weitestgehend identisch mit dem *A330-200* ist, wurden die angegebenen relativen Veränderungen aus der zitierten Studie übernommen. Beim LASR handelt es sich folglich um ein kurzstreckenoptimiertes Derivat eines bestehenden Typs, während das NMA einen eigenen Flugzeugtyp darstellt.

Für beide Flugzeugtypen werden die Ansätze *GFK* und *PGK-A* noch einmal untersucht. Die Ansätze wurden ausgewählt, da sie zum einen beide einen positiven ökologisch-ökonomischen Effekt haben können (Abschnitt 5.5). Mit *PGK-A* werden außerdem die größten absoluten COC- und FC-Einsparungen erzielt. In Kombination mit einem neueren, potenziell sparsameren Flugzeugtypen gibt die Verwendung dieses Ansatzes somit Aufschluss über das maximale Effizienzsteigerungspotenzial von Frequenzregulierung unter Idealbedingungen.

Zum anderen sind die Ansätze relativ unterschiedlich hinsichtlich ihrer Funktionsweise und Komplexität. Während bei *GFK* eine Zielfrequenz explizit vorgeschrieben wird, ergibt sich diese bei *PGK-A* implizit durch Abwägung von ATFM-Verspätung und Schedule Delay (Unterabschnitt 3.3.1). Zusätzlich findet bei *PGK-A* eine Angleichung der Flugzeuggröße über das Jahr hinweg statt. Das NMA und das LASR werden jeweils getrennt voneinander untersucht, um die Effekte jedes Entwurfs klar herauszuarbeiten.

In den bisherigen Abschnitten wurde das Limit zur Begrenzung der maximalen Flugzeuggröße bei 220 Sitzen nach dem größten für die Kurz- und Mittelstrecke verfügbaren Flugzeugtyp *A321neo* bemessen. Für das Szenario mit der Verfügbarkeit eines NMA wird dieses Limit analog bei 280 Sitzen und für das Szenario mit dem LASR bei 320 Sitzen festgelegt.

Aus dieser Anhebung resultiert, dass Frequenzen auf einzelnen Strecken stärker reduziert werden können, da das Flugzeuggrößenlimit erst später erreicht wird. Dies hat zur Folge, dass auch bei *PGK-A* der Gewichtungsfaktor von $d = 2$ (Gleichung 3.11) gewählt werden kann, so wie es als angemessen erachtet wird (Unterabschnitt 3.2.3).

5.6.2 Temporale Implikationen

Auf Abbildung 5.18 ist zu sehen, wie die durchschnittliche Flugzeuggröße mit einem NMA bei *PGK-A* stärker zunimmt als bei *GFK* sowie beim Szenario ohne die neuen Flugzeugentwürfe (Abschnitt 5.1). Trotz der noch weiteren Anhebung der maximal zulässigen Flugzeuggröße beim LASR steigt die durchschnittliche Flugzeuggröße auf sämtlichen frequenzreduzierten Strecken jedoch nicht weiter an als beim NMA, die entsprechende Abbildung findet sich daher im Anhang (Abbildung D.12). Dies ist ein erstes Indiz dafür, dass zur Umsetzung dieses Ansatzes mit den gewählten Parametern ein Flugzeug in der Größenkategorie des NMA hinreichend wäre.

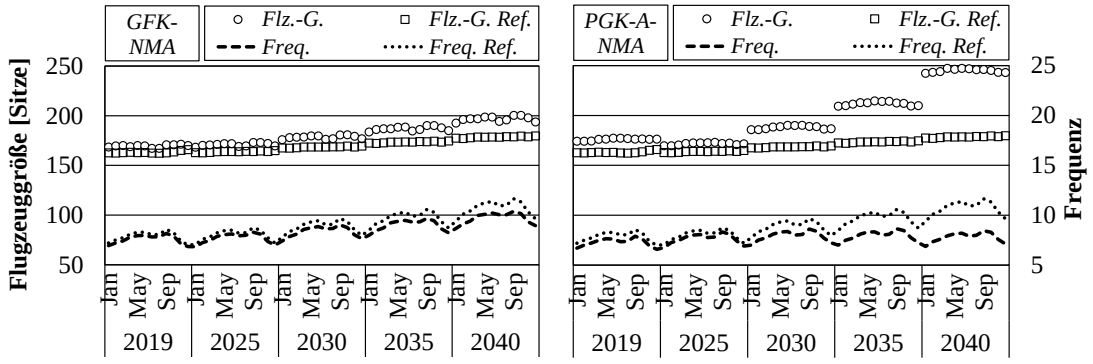

Abb. 5.18: Frequenzen und Zielflugzeuggrößen auf den höchstfrequentierten Strecken von 2019 bis 2040 bei Verfügbarkeit eines NMA ab 2030

Dies wird auch auf Abbildung 5.19 deutlich, wo mit beiden Flugzeugentwürfen für *GFK* die Zielfrequenz innerhalb der Kompensation auf 13 (*GFK-NMA*) und 14 (*GFK-LASR*) gesetzt wurde. Die jeweiligen Begrenzungen der maximalen Flugzeuggröße bei 280 (NMA) und 320 (LASR) Sitzen sind bei beiden Ansätzen erkennbar. Mit den gewählten Werten ist die Anzahl frequenzreduzierter Strecken mit dem NMA und dem LASR bei *PGK-A* größer als bei *GFK* (724 und respektive 666 statt 174 und respektive 154).

Wie bei den Ansätzen ohne das NMA und das LASR, werden gemäß Abbildung 5.20 bei *PGK-A* mehr Flüge auf Gesamtsystemebene reduziert als bei *GFK* (in 2040 ca. 7% statt ca. 2%). Der Einfluss auf den Rückgang der ATFM-Verspätung ist durch den methodikinhärenten Fokus auf besonders schädliche Frequenzen überproportional größer.

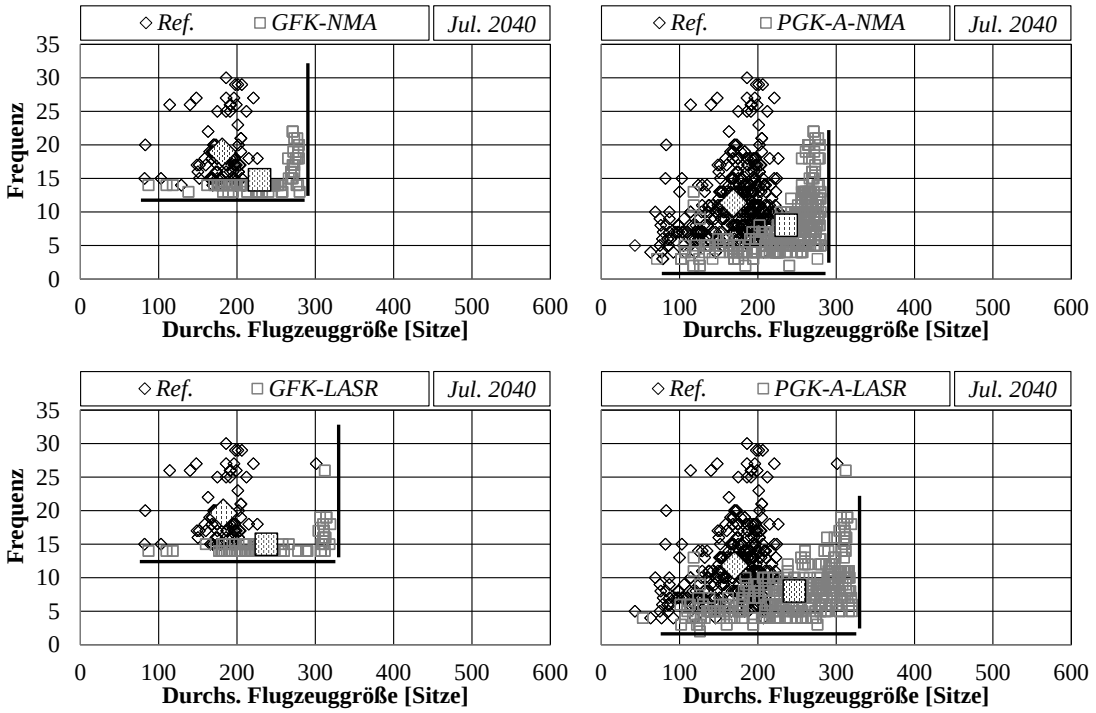

Abb. 5.19: Frequenzen und Zielflugzeuggrößen auf den frequenzreduzierten Strecken im Juli 2040 bei Verfügbarkeit eines NMA (oben) und eines LASR (unten) ab 2030 (jeder Datenpunkt entspricht beiden Richtungen einer Strecke, schraffierte große Markierungen stellen die Gesamtdurchschnitte dar)

Der Unterschied in der Reduzierung der ATFM-Verspätung bei *GFK* zwischen der Verfügbarkeit eines NMA, LASR oder keinem dieser Flugzeuge ist insgesamt gering, da die vorgegebene Maximalfrequenz von 15 Flügen pro Tag nicht verändert wurde. Das bedeutet, die Anzahl insgesamt reduzierter Flüge bleibt gleich, lediglich die frequenzreduzierten Strecken variieren und weisen hier offenbar eine ähnliche durchschnittliche ATFM-Verspätung auf.

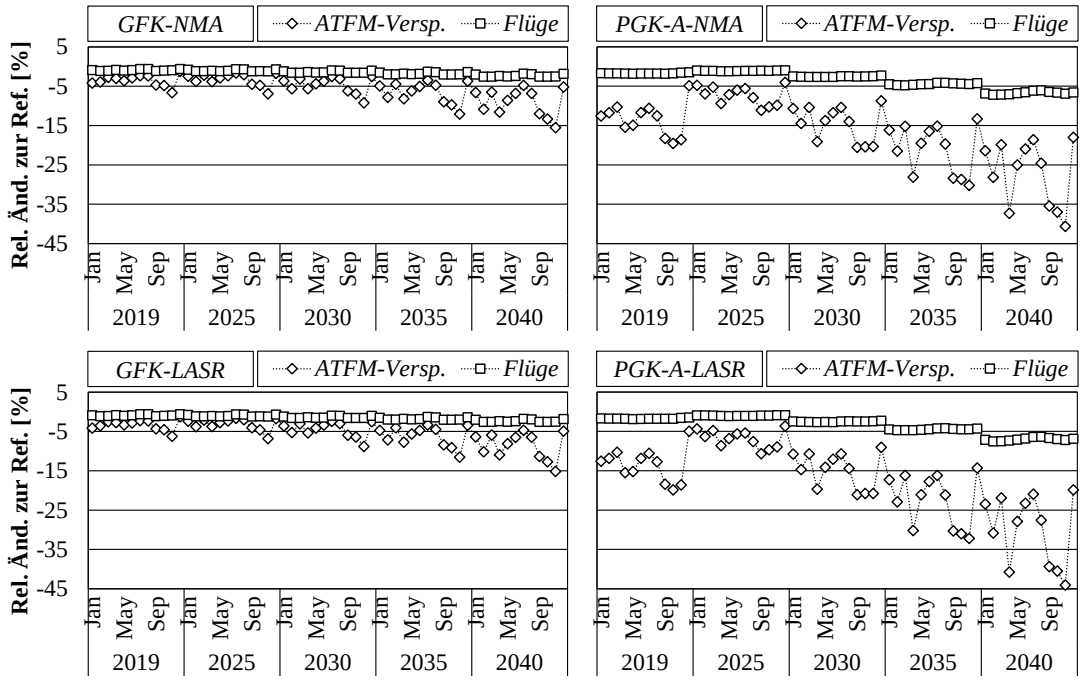

Abb. 5.20: Änderung der Anzahl Flüge und der durchschnittlichen ATFM-Verspätung im EUROCONTROL-Raum bei Verfügbarkeit eines NMA (oben) und eines LASR (unten) ab 2030 relativ zum Referenzszenario

Der größere ATFM-Verspätungsrückgang von *PGK-A-NMA* und *PGK-A-LASR* gegenüber *PGK-A* ist auf die Anhebung des Gewichtungsfaktors d zurückzuführen, mit dem der Negativnutzen von ATFM-Verspätungen gegenüber Schedule Delay bemessen wird (Gleichung 3.11). Dadurch werden zahlenmäßig mehr Frequenzen und somit mehr ATFM-Verspätungen reduziert. Die Reduzierung der durchschnittlichen ATFM-Verspätung ist bei *PGK-A-LASR* geringfügig größer als bei *PGK-A-NMA*, da mit dem LASR aufgrund des höheren Größenlimits von 320 Sitzen mehr schädliche Frequenzen reduziert und weniger Frequenzen kompensiert werden müssen.

Wie auf Abbildung 5.21 ersichtlich ist, sind die Differenzen zwischen dem NMA und dem LASR in Bezug auf die Netto-Reisezeit gering. Die Zunahme der Reisezeit in den Wintermonaten, besonders bei *PGK-A*, resultiert daraus, dass aufgrund der Angleichung der Flugzeuggröße auch in diesen Monaten Frequenzen reduziert werden. Dies erhöht den Schedule Delay bei gleichzeitig nur geringer Reduzierung der ATFM-Verspätung. Unter Berücksichtigung des Gewichtungsfaktors von $d = 2$ ergibt sich ab 2040 über das Jahr gemittelt für jeden Ansatz mit dem NMA und LASR eine Verkürzung der gewichteten Netto-Reisezeit $WTCNTT_{my}$.

Schlussfolgernd lässt sich festhalten, dass mit einem NMA sowie einem LASR besonders mit *PGK-A* (weiterer) Rückgang der ATFM-Verspätungen und der gewichteten Netto-Reisezeit erzielt werden kann, da unter Anwendung des Kompensationsmechanismus der Fokus der Frequenzreduzierung stärker auf schädliche

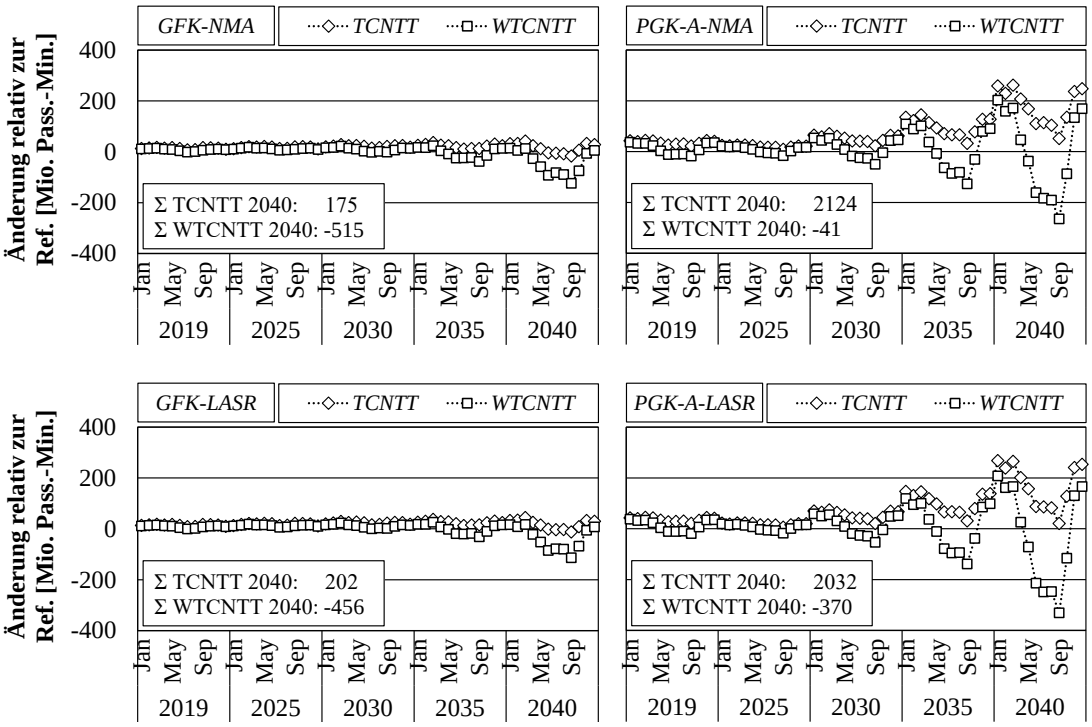

Abb. 5.21: Änderung der (gewichteten) Netto-Reisezeit in Passagierminuten im EUROCONTROL-Raum und kumulierte Werte für 2040 bei Verfügbarkeit eines NMA (oben) und eines LASR (unten) ab 2030 im Vergleich zum Referenzszenario

Frequenzen gelegt werden kann. Mit dem LASR sind die temporalen Vorteile dabei nochmals größer.

5.6.3 Ökonomisch-ökologische Implikationen

Die erforderliche Flottensitzplatzkapazität steigt mit dem NMA für beide Ansätze sowie mit dem LASR für *GFK* nicht weiter als 6% an, wie auf Abbildung 5.22 zu sehen ist. Die saisonalen Schwankungen der ATFM-Verspätungen führen mit dem LASR bei *PGK-A* zu einer Erhöhung der Flottensitzplatzkapazität um mehr als 13%. Dies resultiert daraus, dass die Bandbreite notwendiger Flugzeuggrößen (Abbildung 5.19) so groß wird, dass nicht mehr sämtliche Flugzeuge über das Jahr benötigt werden, trotz Angleichung der Flugzeuggröße.

Auf Abbildung 5.23 ist dargestellt, wie sich die Flottenzuweisung auf den höchstfrequentierten Strecken verändert. Beide neuen Flugzeugentwürfe werden von 2030 bis 2040 bei beiden Ansätzen zunehmend eingesetzt. Sie ersetzen den *A321neo* als dominanten Flugzeugtypen bei den Ansätzen mit Kompensation (Abschnitt 5.4). Erwähnenswert ist der zusätzliche Einsatz von 566 größeren Flugzeugen (ca. 158.300 Sitzplätze), darunter 460 NMA, mit *PGK-A* in 2040. Dem steht eine nicht benötigte Anzahl von 927 kleineren Flugzeugen (ca. 156.300 Sitzplätze) gegenüber, die weniger eingesetzt werden.

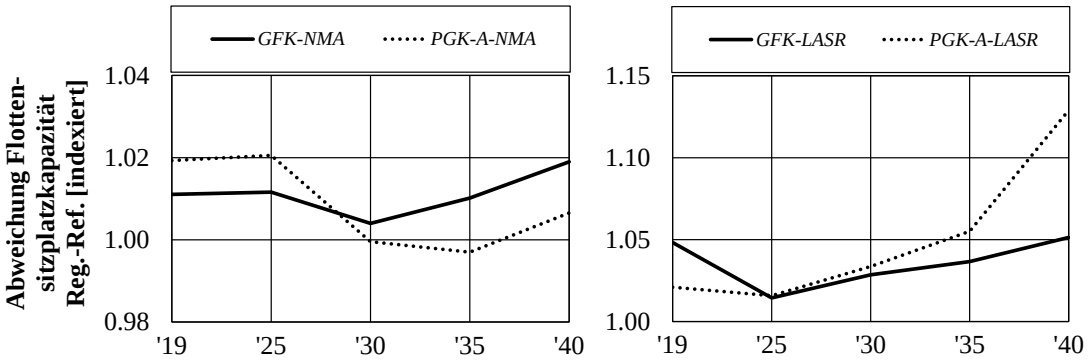

Abb. 5.22: Abweichung der Flottensitzplatzkapazität (die Summe der Sitzplätze über sämtliche Flugzeuge) auf den frequenzreduzierten Strecken von 2019 bis 2040 bei Verfügbarkeit eines NMA (links) und eines LASR (rechts) ab 2030 relativ zum Referenzszenario (abweichende Achsenskalierungen beachten)

Die für 2040 berechneten Stückzahlen zusätzlich eingesetzter NMAs im Vergleich zu einem Szenario ohne Frequenzregulierung sind für sich genommen mutmaßlich nicht ausreichend, um ein derartiges Flugzeugentwicklungsprogramm ökonomisch zu rechtfertigen. Unter Einbeziehung des weltweiten Absatzpotenzials können sie jedoch einen wesentlichen Teil ausmachen. Aus Herstellersicht muss dabei auch beachtet werden, dass kleinere Flugzeugtypen im Produktportfolio dann in geringerem Umfang benötigt werden (Kannibalisierung), z. B. aus der *A320neo*- oder der *B737M*-Familie.

Der *A330-800* kommt bei *GFK* und *PGK-A* auch mit angenommenen LASR weiterhin zum Einsatz, aufgrund der Modellierung der eingesetzen Flugzeuge über die Frequenzverteilung in Abhängigkeit der Flugzeuggröße (Unterabschnitt 3.6.2 und Unterabschnitt 3.6.3). Da dieser die gleiche Sitzplatzkapazität aufweist wie das LASR, kommt er grundsätzlich auch in Frage, um auf frequenzreduzierten Strecken mit entsprechender Zielflugzeuggröße eingesetzt zu werden.

Auch in der Praxis wäre dies nicht abwegig, wenn z. B. Airlines nicht extra ein LASR beschaffen würden, um frequenzreduzierte Strecken zu bedienen. Diese Vorgehensweise führt hinsichtlich der COC- und Kerosinverbrauchseffekte auf Systemebene zu eher konservativen Ergebnissen, da nicht in jedem Fall nur das kostenoptimale Flugzeug eingesetzt wird.

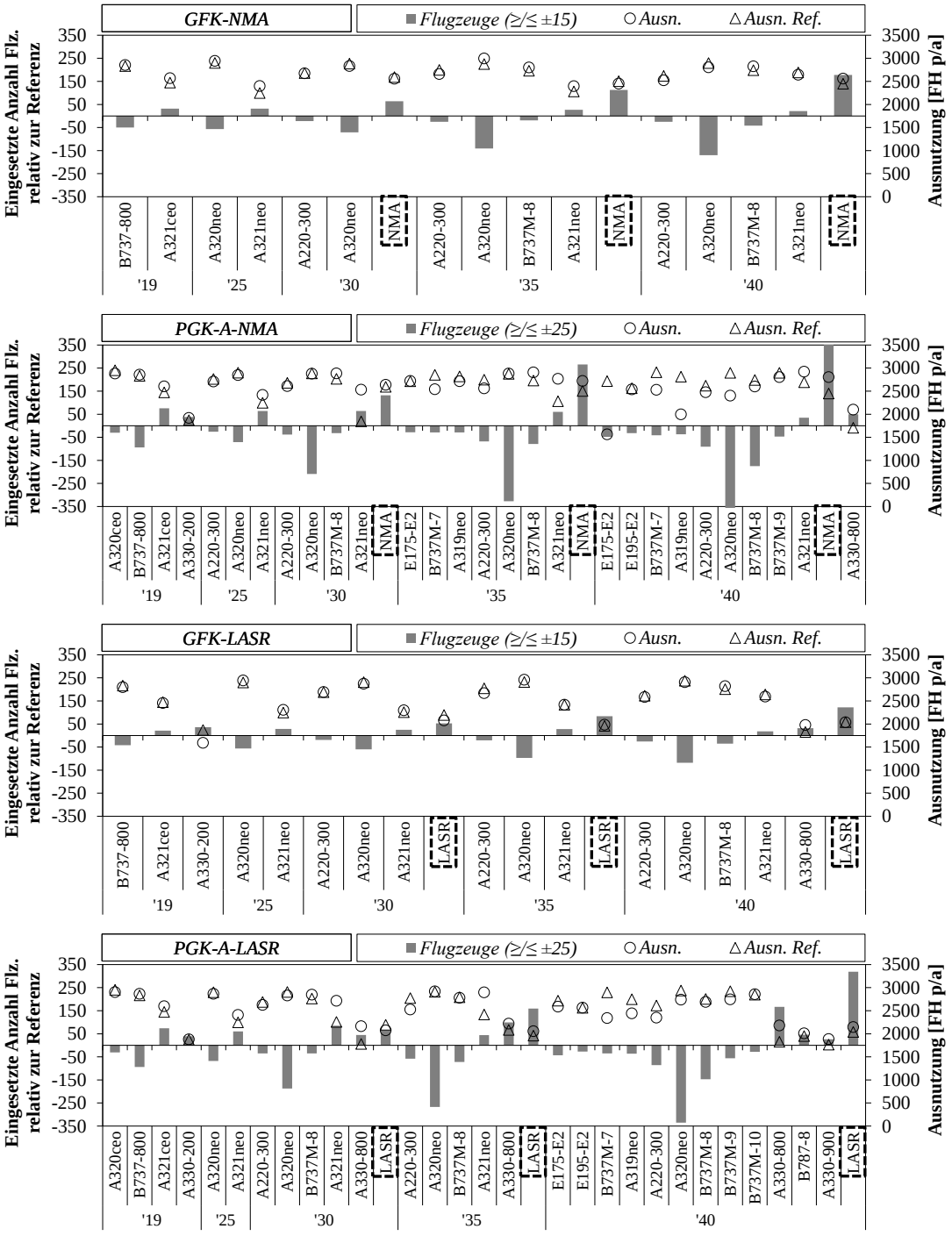

Abb. 5.23: Zusätzlich oder weniger eingesetzte Anzahl Flugzeugtypen (aufsteigend nach Größe sortiert) von 2019 bis 2040 zur Bedienung des Flugplans der höchstfrequentierten Strecken bei Verfügbarkeit eines NMA (oben) und eines LASR (unten) ab 2030 relativ zum Referenzszenario (zwecks Übersichtlichkeit sind nur Veränderungen $\geq$ / $\leq \pm 15$ bzw. ± 25 gezeigt)

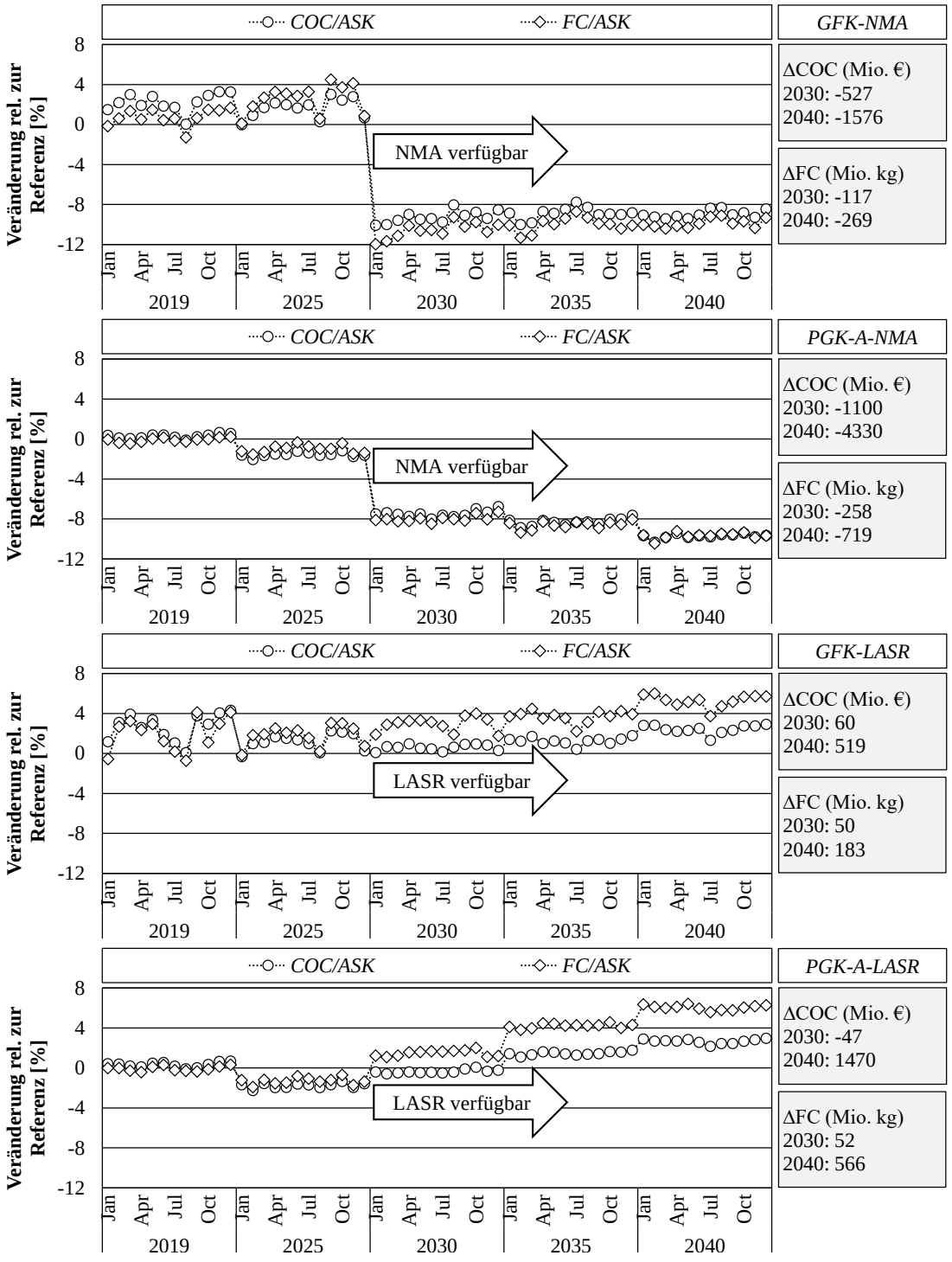

Abb. 5.24: Änderung der COC/ASK und des FC/ASK auf frequenzreduzierten Strecken bei Verfügbarkeit eines NMA (oben) und eines LASR (unten) ab 2030 relativ zum Referenzszenario

Der zunehmende Einsatz des NMA und des LASR ab 2030 ist auch in den Verläufen der COC/ASK und des FC/ASK auf Abbildung 5.24 deutlich zu sehen. Durch den Einsatz des NMA wird dabei ein Rückgang von bis zu 9% (COC/ASK)

bzw. 10% (FC/ASK) mit *GFK* und *PGK-A* in 2040 erzielt. Relativ zu den Ergebnissen ohne das NMA muss allerdings berücksichtigt werden, dass dieser Typ im Vergleich zum *A321neo* ein höheres Technologielevel aufweist.

Trotz der Modifizierung des LASR für die Kurzstrecke lassen sich damit nicht die gleichen Sitzplatzkosten und der gleiche Sitzplatzverbrauch wie mit *Single-Aisle*-Flugzeugen erzielen. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zum NMA, dessen Basisflugzeugtyp *B757-300* für den Kurz- und Mittelstreckenbetrieb ausgelegt ist. Diese Ergebnisse weichen von Kenway et al. (2010) ab, worin das LASR im Vergleich zum *A320* geringere Sitzplatzkosten aufweist. Allerdings werden für den *A320* in der Studie auch eine geringere Sitzplatzanzahl und damit höhere Sitzplatzkosten angenommen.

Inwiefern die Betriebskosten bei einem Derivat, das originär nicht auf Kurzstrecke ausgelegt ist, überhaupt signifikant geringer sein können als bei einem *Single-Aisle*-Flugzeug, ist aufgrund des relevanten reichweiteunabhängigen Anteils der OEM fraglich (Martinez-Val et al., 2011). Trotz OEM-Reduzierung beim LASR ist das Verhältnis aus OEM und Sitzplatzanzahl immer noch höher als beim NMA und gängigen *Single-Aisle*-Flugzeugen. Der Rückgang der COC/ASK und des FC/ASK bei *PGK-A* in 2025 entsteht lediglich durch den in diesem Jahr noch eingesetzten *A321*.

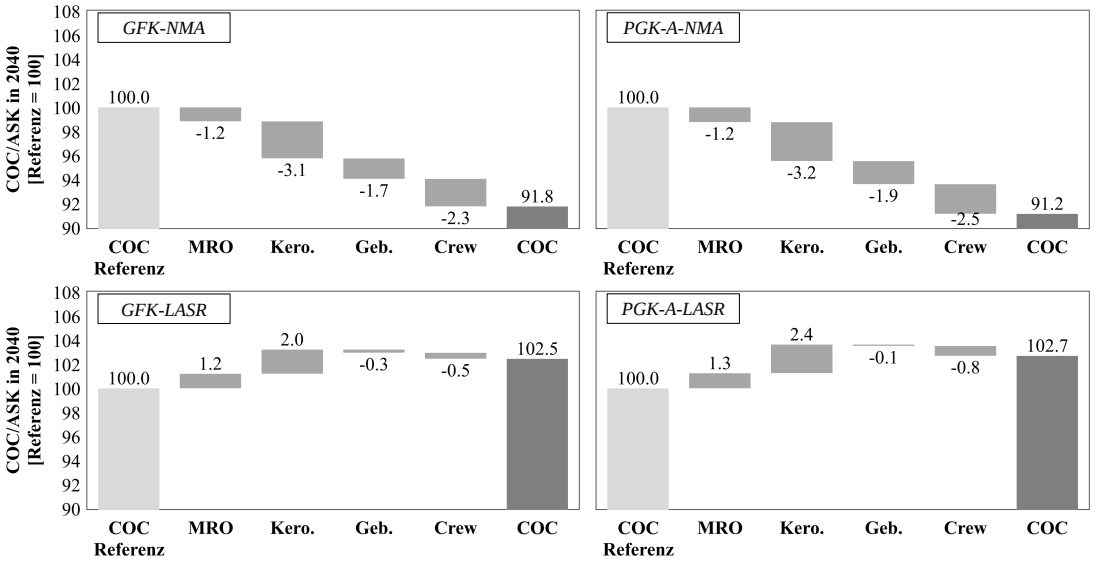

Abb. 5.25: Einfluss der einzelnen COC-Komponenten auf die Veränderung der COC/ASK auf frequenzreduzierten Strecken in 2040 für exemplarisch gewählte Ansätze bei Verfügbarkeit eines NMA (oben) und eines LASR (unten) ab 2030 relativ zum Referenzszenario

Haupttreiber für die Effizienzsteigerungen bzw. -verluste ist gemäß Abbildung 5.25 der Kerosinverbrauch. Beim NMA ist durch ein geringeres Verhältnis von Kabinencrewmitgliedern zu Sitzplätzen außerdem ein stärkerer Rückgang bei den Crewkosten zu verzeichnen (Unterabschnitt 3.5.1). Da es sich beim *A330-800*, als

Basistyp zum LASR, originär um ein Langstreckenflugzeug handelt, wirkt sich der Bestrafungsfaktor *mp* für die MRO-Kosten zusätzlich kostensteigernd aus.

Die Einbeziehung der Kapitalkosten auf Abbildung 5.26 unterstreicht, dass nur das NMA zu reduzierten DOC im Zusammenhang mit Frequenzregulierung führt. Diese Vorteile sind für die beiden untersuchten Ansätze deutlich höher als ohne dessen Verfügbarkeit. Die gewählte LASR-Konfiguration führt hingegen sowohl zu höheren COC als auch Kapitalkosten. Letztere werden zusätzlich durch den Bestrafungsfaktor *up* in der *Turnaround*-Zeit erhöht (Gleichung 3.30).

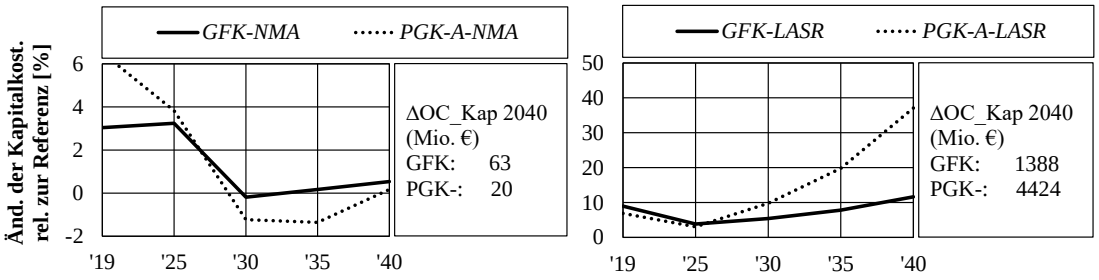

Abb. 5.26: Relative und absolute Änderung der Kapitalkosten OC_{Kap} für sämtliche Frequenzregulierungsansätze auf den frequenzreduzierten Strecken bei Verfügbarkeit eines NMA (links) und eines LASR (rechts) ab 2030 im Vergleich zum Referenzszenario (abweichende Achsenskalierungen beachten)

Es ist diskutabel, inwiefern die Bestimmungsmethode der Kapitalkosten in Abhängigkeit der OEM für ein Derivat wie das LASR gültig ist. Aufgrund niedrigerer struktureller Anforderungen wird zwar eine etwas geringere Menge Rohmaterialien für den Flugzeugrumpf benötigt, deren produktionstechnische Aufwände sowie die Anzahl kostentreibender Subsysteme (Triebwerke, Avionik, Hydraulik etc.) dürften jedoch gleich bleiben.

Die Produktionsstückkosten dürften folglich bei gleicher Produktkomplexität und potenziell kleineren Absatzzahlen, wenn überhaupt, nur geringfügig sinken. Dies würde sich ebenfalls im Flugzeugpreis widerspiegeln, der maßgeblich für die Kapitalkosten auf Airlineseite ist. In Summe ist folglich nicht davon auszugehen, dass die Kapitalkosten bei dem betrachteten LASR analog zur OEM um 26% (bzw. etwas weniger unter Berücksichtigung der konstanten Triebwerksmasse) abnehmen, was die Kapitalkostenzunahme auf Abbildung 5.26 noch einmal steigern würde.

Der Markt für ein LASR wäre, auch außerhalb von frequenzreduzierten Strecken, kleiner als für ein NMA, da die Abstufung zu bisherigen *Single-Aisle*-Flugzeugen größer ist. Selbst wenn geringere Sitzplatzkosten und -verbräuche als bei einem kleineren *Single-Aisle*-Flugzeug technisch möglich sind, wäre das globale Potenzial, Emissionen zu reduzieren, aufgrund weniger geeigneter Strecken möglicherweise begrenzter.

Schlussfolgernd verdeutlicht die Untersuchung der neuen Flugzeugentwürfe, dass bei der Umsetzung von Frequenzregulierung die ökologisch-ökonomische Leistungsfähigkeit der am Markt verfügbaren Flugzeugtypen berücksichtigt werden sollte. Ein neues Flugzeug in der Größenkategorie eines NMA und einem EIS in 2030 bringt im Vergleich zu aktuellen am Markt verfügbaren Flugzeugen nennenswerte weitere Betriebskostenreduzierungen (bis zu 9% geringere COC/ASK) und Kerosinverbrauchseinsparungen (bis zu 10% geringere FC/ASK).

Während mit dem LASR die temporalen Vorteile noch einmal größer sind als mit dem NMA (Unterabschnitt 5.6.2), können damit in der ökologisch-ökonomischen Dimension keine Effizienzgewinne im Vergleich zu aktuell am Markt verfügbaren *Single-Aisle*-Flugzeugen erzeugt werden.

5.7 Sensitivitätsanalysen

Zur Illustration des Einflusses einzelner Modellannahmen werden in diesem Abschnitt Sensitivitätsanalysen ausgewählter Parameter durchgeführt (Tabelle 5.4). Für die Sensitivitätsanalysen werden die Ansätze *GFK* und *PG* herangezogen. Diese unterscheiden sich sowohl hinsichtlich ihrer Komplexität als auch insofern, als mit *GFK* ökologisch-ökonomische Effizienzsteigerungen im Gegensatz zu *PG* möglich sind.

Dies hilft dabei, die teils komplexen Wechselwirkungen, die aufgrund der aggregierten Untersuchungsperspektive nicht immer intuitiv vorhersehbar sind, transparenter herauszuarbeiten. Zudem werden dabei die Grenzen des Modells sowie von den untersuchten Frequenzregulierungsansätzen sichtbar. Im Sinne des DLR-Bewertungsleitfadens (Liedtke et al., 2020) wird damit außerdem der mögliche Lösungsraum umfangreicher ausgeleuchtet und somit der wissenschaftliche Erkenntnisgewinn erhöht.

Tab. 5.4: Übersicht der für Sensitivitätsanalysen gewählten Parameter und Variationsbreite

Beschreibung	Parameter	Referenz	Variationsbreite
Gewichtungsfaktor des Negativnutzens von ATFM-Verspätungen	d	Gleichung 3.11	2 - 6
Abweichung Zielsitzplatzkapazität	dsc	Gleichung 3.36	1% - 20%
Jährlicher Kerosinpreisanstieg	FPI	Gleichung 3.26	3% - 10%

5.7.1 Gewichtung des Negativnutzens von ATFM-Verspätungen

Für die vorangegangen Auswertungen wurde ein vorsichtiger Faktor für die Gewichtung des Negativnutzens von ATFM-Verspätungen gegenüber Schedule Delay von $d = 2$ gewählt (Unterabschnitt 3.2.3). Aus diesem Grund erscheint vor allem eine Erhöhung von d hinsichtlich der Modellsensitivität interessant.

Eine Zunahme von d macht sich in den Ergebnissen auf zwei Arten bemerkbar:

- Die Anzahl reduzierter Frequenzen mit den Ansätzen *PG, PG-A, PGK* und *PGK-A* nimmt zu, da diese auf dem zeitlichen Grenznutzen einer Frequenz $MTUF_{rmy}$ (Gleichung 3.10) basieren, der mit zunehmendem d geringer wird und somit mehr Frequenzen als „schädlich“ eingestuft werden.
- Die gewichtete Netto-Reisezeit $WTCNTT_{my}$ (Gleichung 3.12b) verkürzt sich, da der Rückgang der ATFM-Verspätung gegenüber dem Anstieg des Schedule Delay übergewichtet wird.

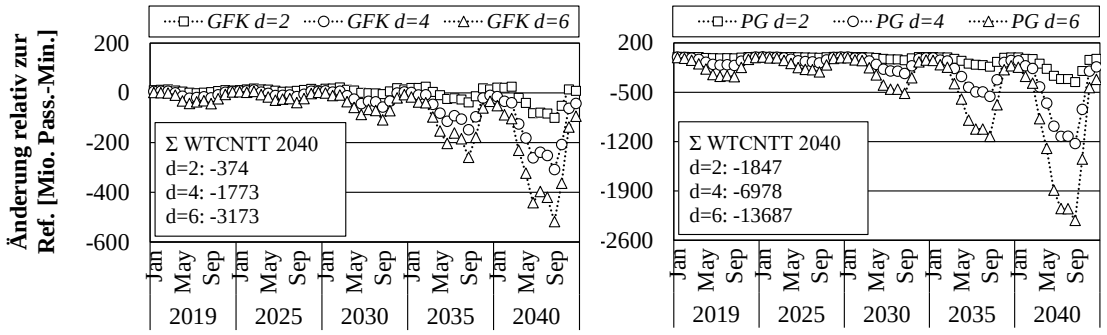

Abb. 5.27: Änderung der (gewichteten) Netto-Reisezeit in Passagierminuten im EUROCONTROL-Raum und kumulierte Werte für 2040 für unterschiedliche Werte von d für *GFK* und *PG* relativ zum Referenzszenario (abweichende Achsenskalierung beachten)

Unter Konstanthaltung sämtlicher anderer Parameter wurde d im Wertebereich von 2 bis 6 für *GFK* und *PG* variiert. Abbildung 5.27 zeigt die Ergebnisse für die gewichtete Netto-Reisezeit $WTCNTT_{my}$ hierzu. Da bei *GFK* für alle drei Fälle die gleiche Anzahl Frequenzen reduziert wird, führt eine Variation von d hier lediglich zu einer linearen Verschiebung von $WTCNTT_{my}$ nach unten. In diesem Fall führt eine Erhöhung von d um 2 zu einer Verkürzung von $WTCNTT_{my}$ von 1,4 Mrd. kumulierten Passagierminuten für das gesamte Jahr 2040.

Im Gegensatz dazu werden bei *PG* überproportional zunehmende Rückgänge von $WTCNTT_{my}$ bei steigendem d erreicht, da (1) eine größere Anzahl Frequenzen

einen negativen zeitlichen Grenznutzen aufweist (Gleichung 3.10) und (2) der ATFM-Verspätungsrückgang stärker gewichtet wird.

Zu beachten ist hierbei allerdings, dass bereits mit einem Gewichtungsfaktor von $d = 2$ einige Strecken relativ stark frequenzreduziert werden, was vereinzelt zu unrealistisch großen Zielflugzeuggrößen führt (Abbildung 5.3). Bei einer noch weiteren Steigerung von d auf 4 bis 6 wird dieser Effekt mit maximalen Flugzeuggrößen im Bereich von über 700 und respektive 800 Sitzen pro Flug nochmals verstärkt, wie auf Abbildung 5.28 ersichtlich ist. Da in dieser Größenkategorie keine Flugzeugtypen zur Verfügung stehen, kommt es dadurch teils zu größeren Abweichungen der Zielsitzplatzkapazität bei der darauf folgenden Flottenzuweisung.

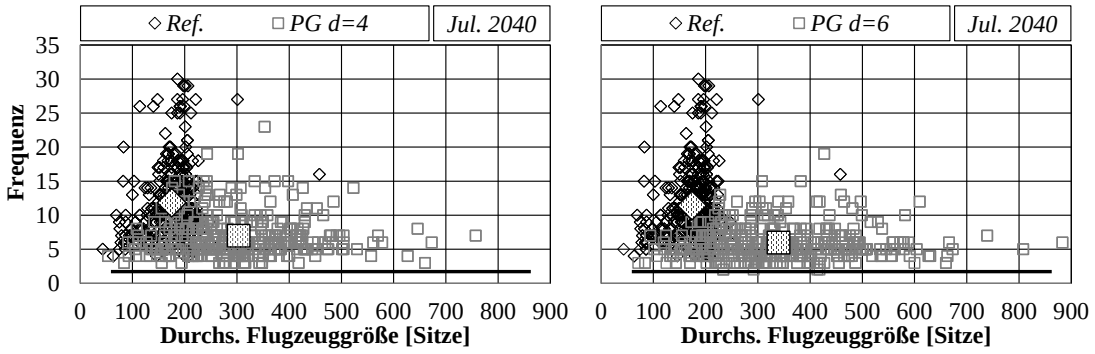

Abb. 5.28: Frequenzen und Zielflugzeuggrößen auf den frequenzreduzierten Strecken für *PG* und unterschiedliche Werte von d im Juli 2040 (jeder Datenpunkt entspricht einer Strecke, große schraffierte Markierungen stellen die Gesamtdurchschnittswerte dar)

Die Sensitvitätsanalyse von d zeigt, dass dieser Gewichtungsfaktor primär dazu dienen kann, die möglichen Zeitvorteile von Frequenzregulierung zu illustrieren. Zwar lässt sich für die Ansätze *PG, PG-A, PGK* und *PGK-A* damit auch die Anzahl der reduzierten Frequenzen steuern, die Variationsbandbreite ist hierbei unter realistischen Randbedingungen jedoch relativ schmal.

5.7.2 Abweichung Zielsitzplatzkapazität

Für die bisherigen Untersuchungen wurde angenommen, dass Airlines die Sitzplatzkapazität auf einer Strecke konstant halten, wenn sie mit Frequenzregulierung konfrontiert sind (Abschnitt 3.1). Daher wurde eine relativ geringe Abweichung von der Zielsitzplatzkapazität von $dsc = 1\%$ auf frequenzreduzierten Strecken definiert (Gleichung 3.36).

Eine Erhöhung von dsc erweitert das zulässige Zielkapazitätsband gleichermaßen nach oben und unten, führt aber dazu, dass die angebotene Sitzplatzkapazität

tendenziell abnimmt. Dies resultiert aus der Minimierung der COC für eine Flottenzuweisung (Gleichung 3.35), die für kleinere Flugzeuge tendenziell geringer sind als für größere unter der Randbedingung ähnlicher Technologiereifegrade.

Mit einer Variation von *dsc* lässt sich somit ergründen, welche flotten-, kosten- und kerosinverbrauchsseitigen Änderungen sich ergeben, wenn Airlines die Sitzplatzkapazität nicht konstant halten, sondern in größerem Ausmaß verringern. Airlines würden folglich die Frequenz bis auf den vorgegebenen Wert reduzieren, jedoch nicht die Flugzeuggröße in gleichem Maße erhöhen.

Drei Motive dafür könnten beispielsweise sein, dass (1) mit geringerer Nachfrage gerechnet wird (Abschnitt 2.1), (2) erforderliche größere Flugzeuge nicht in der Flotte vorhanden sind (Hansen, 2002) oder (3) der Einsatz von *Twin-Aisle*-Flugzeugen auf Kurzstrecke vermieden werden soll (Abschnitt 2.2). Im Ergebnis entspricht dies einer Angebotsverknappung, was sogar zu steigenden Ticketpreisen führen kann (Hansen et al., 2001). Unter Konstanthaltung sämtlicher anderer Parameter wurden für die folgenden Sensitivitätsanalysen Werte von 5%, 10% und 20% für *dsc* untersucht.

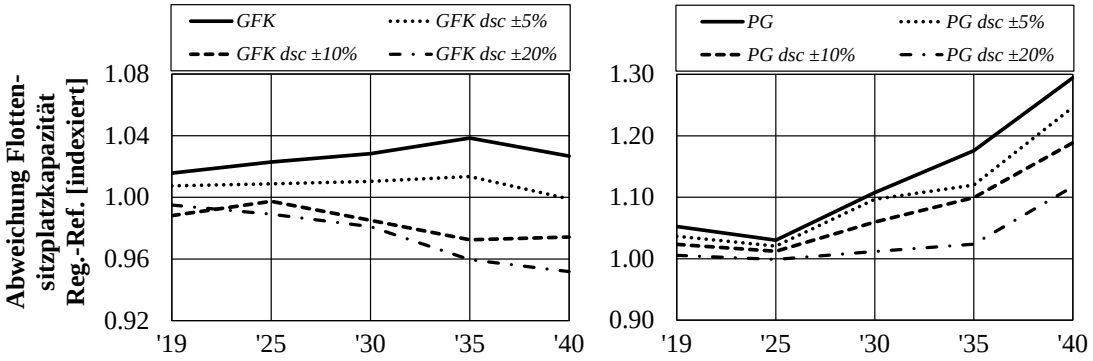

Abb. 5.29: Abweichung der Flottensitzplatzkapazität (die Summe der Sitzplätze über sämtliche Flugzeuge) auf den höchstfrequentierten Strecken mit *GFK* (links) sowie *PG* (rechts) bei unterschiedlichen zulässigen Abweichungen von der Zielsitzplatzkapazität *dsc* sowie dem Standardfall mit $dsc = 1\%$ relativ zum Referenzszenario (abweichende Achsenskalierungen beachten)

Abbildung 5.29 zeigt hierzu die Abweichung der Flottensitzplatzkapazität vom Referenzszenario für die unterschiedlichen Werte von *dsc* sowie für die Standardfälle ($dsc = 1\%$). Erwartungsgemäß nimmt die Flottensitzplatzkapazität für beide Ansätze bei einer Erhöhung von *dsc* im Vergleich zum Standardfall ab. Bei *PG* liegt die Flottensitzplatzkapazität für nahezu sämtliche Jahre und Werte für *dsc* dennoch weiterhin höher als im Referenzszenario, d. h. es wird mit mehr Flugzeugen weniger Transportleistung (ASK) angeboten.

Die zulässige Abweichung von der Zielsitzplatzkapazität nach unten wird dabei nicht vollständig ausgereizt, d. h. die Flottensitzplatzkapazität liegt beispielsweise

bei *PG* mit *dsc* = 20% etwa 4% (2019) bis 13% (2035) unterhalb des Standardfalls. Dies resultiert daraus, dass zwar die COC minimiert werden, aufgrund einer relativ begrenzten Anzahl unterschiedlicher Flugzeuggrößen aber nicht immer die Flottenzuweisung mit der geringsten Sitzplatzkapazität auch die COC-minimale Kombination darstellt und gleichzeitig sämtliche Nebenbedingungen erfüllt.

Bei *GFK* liegt die Flottensitzplatzkapazität für Werte von *dsc* von 10% und 20% sogar unterhalb des Referenzszenarios. Folglich wird hier mit weniger Flugzeugen eine geringere Transportleistung (ASK) angeboten.

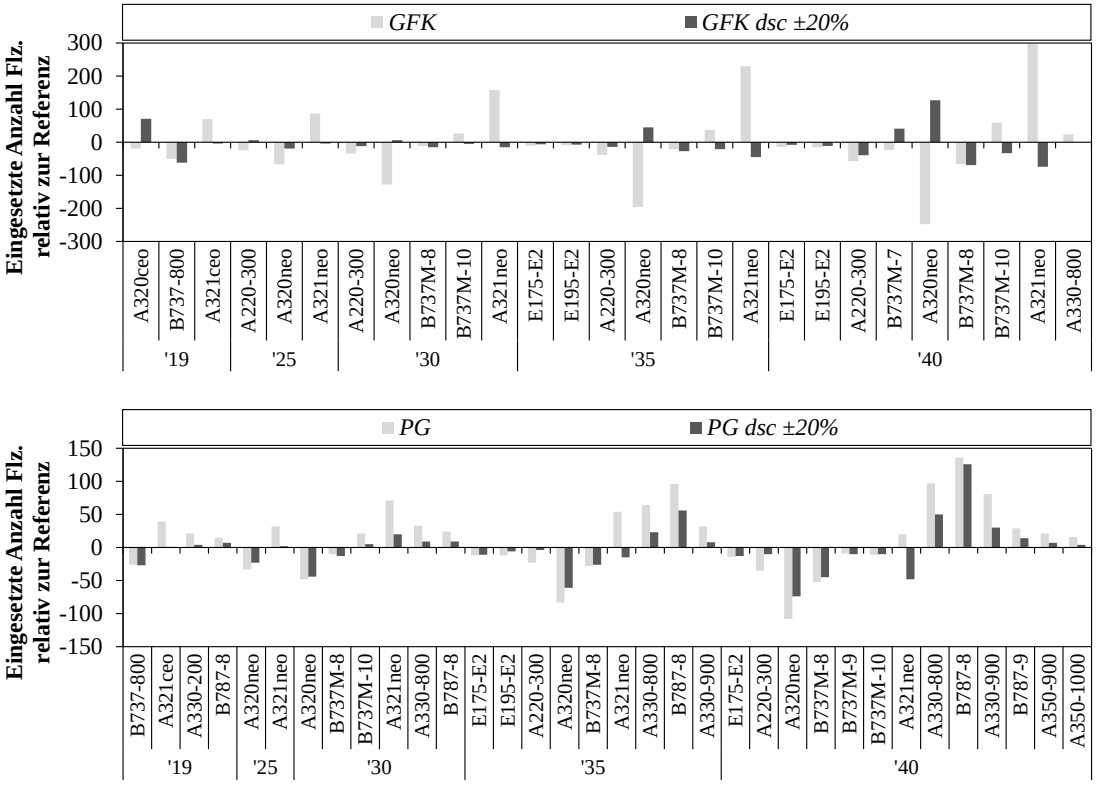

Abb. 5.30: Zusätzlich oder weniger eingesetzte Anzahl Flugzeugtypen (aufsteigend nach Größe sortiert) von 2019 bis 2040 zur Bedienung des Flugplans der höchstfrequentierten Strecken für *GFK* (oben) und *PG* (unten) für *dsc* = 1% (hellgrau) und *dsc* = 20% (dunkelgrau) relativ zum Referenzszenario

Abbildung 5.30 veranschaulicht die Flottenveränderungen auf Flugzeugtypebene für *GFK* und *PG*. Hier sind nur die Werte für *dsc* = 20% im Vergleich zum Standardfall gezeigt, um das Prinzip zu veranschaulichen. Dabei ist für beide Ansätze zu erkennen, dass (entsprechend dem Rückgang der Flottensitzplatzkapazität) durchschnittlich kleinere Flugzeuge bei einer Abnahme von *dsc* eingesetzt werden.

Während im Standardfall bei *GFK* vornehmlich *A321neo* zusätzlich benötigt werden, sind es mit *dsc* = 20% primär kleinere *A320neo*. Analog ist erkennbar, dass bei *PG* mit *dsc* = 20% einige größere Flugzeuge (*B787-9, B787-10, A350-1000*)

im Gegensatz zum Standardfall kaum eingesetzt werden. Dies wird teilweise kompensiert durch eine ebenfalls geringere Anzahl nicht benötigter *A320neo*.

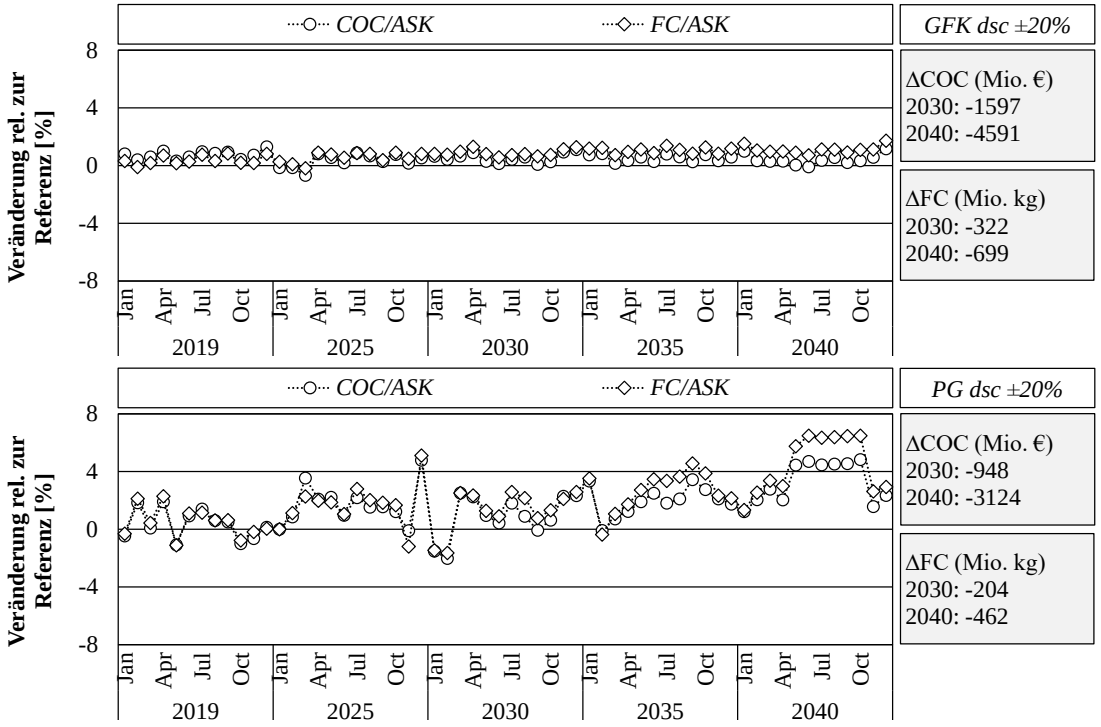

Abb. 5.31: Änderung der COC/ASK und des FC/ASK auf frequenzreduzierten Strecken für *GFK* und *PG* und mit *dsc* = 20% relativ zum Referenzszenario

Abbildung 5.31 zeigt, dass der veränderte Flottenmix bei *GFK* mit *dsc* = 20% eine geringfügige Zunahme der COC/ASK und des FC/ASK herbeiführt, im Gegensatz zum Standardfall mit *dsc* = 1% (Abbildung 5.13). Diese Zunahme resultiert aus dem Einsatz durchschnittlich kleinerer Flugzeuge mit höheren Sitzplatzkosten als im Referenzszenario. Da insgesamt eine geringere Transportleistung angeboten wird, kommt es in absoluten Werten zu einem wesentlichen Rückgang der COC und des FC.

Bei *PG* mit *dsc* = 20% verhält es sich hinsichtlich der absoluten COC- und Kerosinverbrauchseffekte ähnlich. Zwar sind hier weiterhin Saisonalitäten erkennbar und es kommt wegen des Einsatzes größerer Flugzeuge zu höheren COC/ASK und FC/ASK, analog zum Standardfall (Abbildung 5.14). Aufgrund einer insgesamt geringeren angebotenen Transportleistung nehmen jedoch auch hier die absoluten COC und der FC ab.

Die Variation von *dsc* veranschaulicht, dass Frequenzregulierung für Airlines einen Anreiz darstellen kann, die angebotene Sitzplatzkapazität zu reduzieren, um die bei einigen Ansätzen entstehende Zunahme der COC und des FC zu vermeiden. Dies wäre entsprechend nachteilig für Passagiere, falls dann ein Teil der vorhandenen Nachfrage nicht bedient werden kann.

Da das Optimierungsmodell zur Flottenzuweisung in FRED allerdings nur die Betriebskosten- und nicht die Umsatzseite abbildet, gelten diese Schlussfolgerungen lediglich eingeschränkt. Airlines würden vor allem die angebotene Sitzplatzkapazität reduzieren, wenn die dadurch entgangenen (erwarteten) Mehreinnahmen geringer sind als der entstehende Betriebskostenrückgang. Außerdem sind Marktdynamiken, wie das Wettbewerberverhalten oder eventuelle Opportunitäten, zu berücksichtigen.

5.7.3 Kerosinpreisanstieg

Für die bisherigen Untersuchungen wurde ein jährlicher Anstieg des Kerosinpreises FPI von 3% angenommen. Zunehmende Bestrebungen zur Bepreisung von CO_2-Emissionen (European Commission, 2020; Scheelhaase et al., 2018) könnten dazu führen, dass die kerosinverbrauchsbezogenen Kosten in Summe (Kerosin plus Zertifikate o. ä. für CO_2-Emissionen) allerdings stärker zunehmen. Derartige Entwicklungen wären auch für die Kosteneffekte von Frequenzregulierung relevant, die maßgeblich durch den Kerosinverbrauch und somit den Kerosinpreis getrieben sind.

Im Folgenden werden die Ansätze *GFK* und *PG* mit Werten für FPI von 5% und 10% bei sonst gleich bleibenden Parametern analysiert. Zwecks Konsistenz werden für die jeweiligen Referenzszenarien ebenfalls die erhöhten Werte für FPI verwendet.

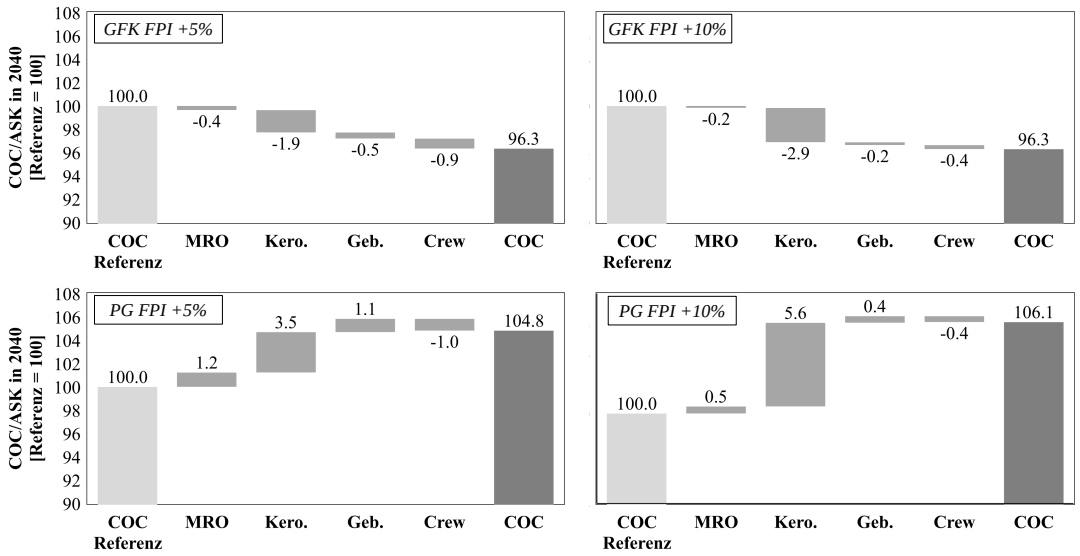

Abb. 5.32: Einfluss der einzelnen COC-Komponenten auf die Veränderung der COC/ASK auf frequenzreduzierten Strecken in 2040 für *GFK* und *PG* mit $FPI = 5\%$ und $FPI = 10\%$ relativ zum Referenzszenario

Abbildung 5.32 illustriert den zunehmenden Anteil der Kerosinkosten an den COC/ASK. Im Vergleich zum Standardfall mit $FPI = 3\%$ (Abbildung 5.15) haben diese nun einen noch größeren Einfluss auf die Veränderung der COC/ASK und das Gewicht der anderen COC-Komponenten nimmt folglich ab.

Analog zu den bisherigen Ergebnissen sind die möglichen Einsparungen mit limitierter maximaler Flugzeuggröße (GFK) prozentual geringer als die Kostensteigerungen für Ansätze ohne Kompensation (PG). Dies resultiert daraus, dass das Flugzeuggrößensteigerungspotenzial innerhalb des *Single-Aisle*-Bereichs begrenzt ist, da im Referenzszenario durchschnittlich bereits relativ große Flugzeuge eingesetzt werden. Bei GFK sind die COC/ASK mit $FPI = 10\%$ zwar gleich groß wie mit $FPI = 5\%$, dies gilt jedoch relativ zum Referenzszenario, in dem die absoluten COC mit $FPI = 10\%$ natürlich deutlich höher sind.

Abbildung 5.33 zeigt die Entwicklung der COC/ASK und des FC/ASK für $FPI = 10\%$. Diese sehen vom übergeordneten Verlauf ähnlich aus wie im Standardfall (Abbildung 5.13 und Abbildung 5.14), weisen im Detail jedoch zwei Unterschiede auf:

- Der Rückgang der absoluten COC durch Frequenzreduzierung ist bei GFK größer als im Standardfall. Analog zu der Veränderung der COC-Komponenten oben gilt dies jedoch relativ zur Referenz mit deutlich höheren COC insgesamt. Umgekehrt ist die Zunahme der absoluten COC bei PG größer, d. h. dieser Frequenzregulierungsansatz stellt mit zunehmendem Kerosinpreis eine noch größere ökonomische Belastung für Airlines dar.
- Der Rückgang der absoluten FC bei GFK ist geringer als im Standardfall. Hier führt der erhöhte Kerosinpreis dazu, dass im frequenzreduzierten Fall eher Flugzeuge mit besonders geringen Kerosinverbrauchkosten (relativ zu den übrigen COC-Komponenten) zugewiesen werden, um den Einfluss des höheren Kerosinpreises zu dämpfen. Die zusätzlichen Effizienzvorteile, die dann noch durch Frequenzregulierung generiert werden können, sind jedoch geringer.

Schlussfolgernd lässt sich festhalten, dass eine Erhöhung des Kerosinpreises insgesamt zu einer Akzentuierung der Ergebnisse der COC/ASK führt, da der Anteil der Treibstoffkosten an den COC zunimmt. Frequenzregulierungsansätze, die im Standardfall ökologisch-ökonomisch vorteilhaft sind, werden dadurch noch besser, nachteilige Ansätze werden noch schlechter im Vergleich zur Referenz.

Eine Einschränkung dieser Ergebnisse ist, dass mit zunehmendem Kerosinpreis mutmaßlich der durchschnittliche Ticketpreis steigen würde, da Airlines zumindest einen Teil der Betriebskosten weitergeben würden (Rosskopf, 2013b). Dies wiederum führt zu einer sinkenden Nachfrage und Airlines könnten ggf. die angebotene Sitzplatzkapazität reduzieren.

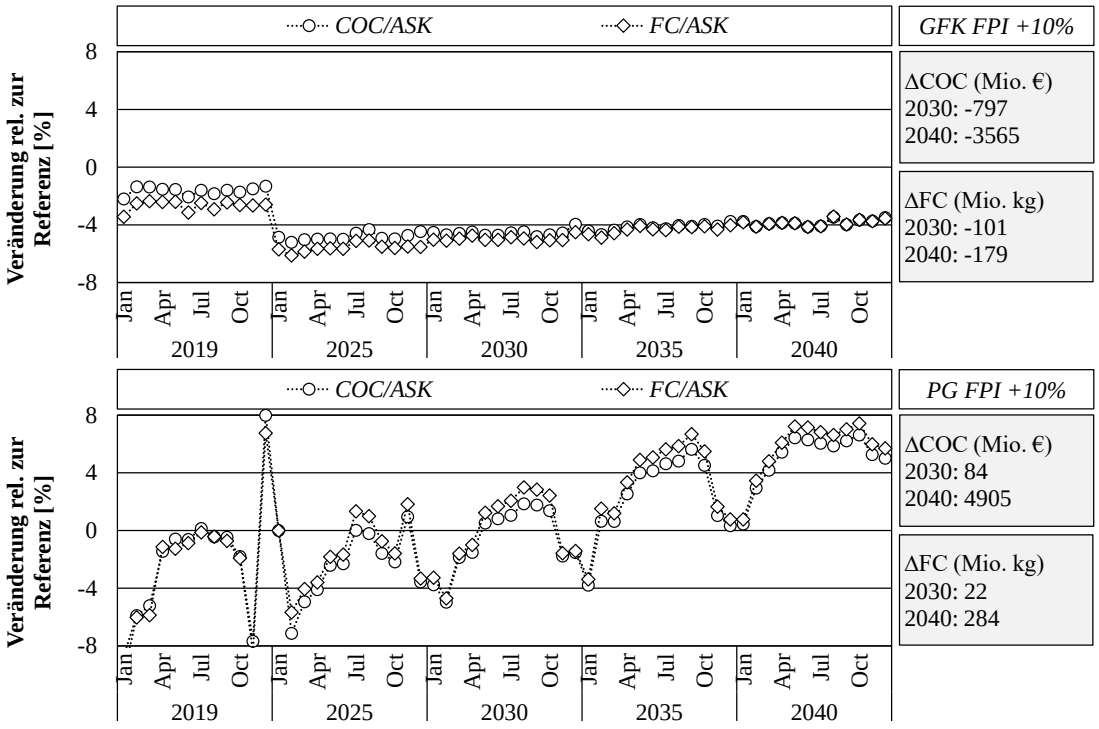

Abb. 5.33: Änderung der COC/ASK und des FC/ASK auf frequenzreduzierten Strecken für *GFK* und *PG* mit $FPI = 10\%$ relativ zum Referenzszenario

5.8 Dimensionsübergreifende Zusammenfassung der Ergebnisse

Ziel dieses Abschnitts ist es, die bisher präsentierten Ergebnisse so zusammenzufassen, dass die einzelnen Ansätze dimensionsübergreifend (ökologisch, ökonomisch, temporal) direkter verglichen werden können. Dazu dient Tabelle 5.5 als Grundlage, welche die kumulierten Veränderungen in 2040 der Bewertungsdimensionen ATFM-Verspätung, Betriebskosten und Kerosinverbrauch für jeden Frequenzregulierungsansatz zeigt. Folglich handelt es sich um die Parameter, die insbesondere für Airlines relevant sind. Die drei besten Werte jeder Dimension sind fett markiert, wobei die Untersuchungen zu den neuen Flugzeugentwürfen unten separat aufgelistet sind. Die dargestellten Spalten wurden folgendermaßen befüllt:

- Die Veränderung der ATFM-Verspätung bezieht sich auf Flugminuten (nicht Passagierminuten) und wurde gemäß Cook und Tanner (2015) inklusive Inflationierung bis 2040 in Verspätungskosten umgerechnet.
- Analog zum bisherigen Vorgehen werden die COC und die Kapitalkosten OC_{Kap} separat und in Summe als DOC ausgewiesen (Abschnitt 3.5).
- Die monetären Werte, die dem Kerosinverbrauch zugeordnet sind, reflektieren nur Kosten, die durch potenzielle CO_2-Kompensationmaßnahmen entstehen *können*. Die Veränderung der regulären Kerosinkosten OC_{Kero} sind

in den COC enthalten. Gemäß European Commission (2020) können die aus dem *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation* (CORSIA) resultierenden Preise pro Tonne CO_2 in 2035 je nach Szenario zwischen 1 € und 100 €pro Tonne liegen. Eine Tonne CO_2 entsteht dabei durch die Verbrennung von etwa 317,5 kg Kerosin (EUROCONTROL, 2018g). Zwecks Einfachheit ergibt sich unter der Annahme eines CO_2-Preises von 31,75 € pro Tonne ein Preis von 0,1 €/kg Kerosin.

- In der rechten Spalte von Tabelle 5.5 sind die Kostenveränderungen für jeden Ansatz aufsummiert. Dies dient vor allem der qualitativen Vergleichbarkeit der Ansätze. Eine wesentliche Einschränkung dieser Summe liegt darin, dass die aus geringerer ATFM-Verspätung resultierenden Kosteneinsparungen sämtlichen Airlines im EUROCONTROL-Raum zu Gute kommen, wohingegen Änderungen in den Betriebskosten nur die Airlines betreffen, die Frequenzreduzierung durchführen.

Unabhängig vom gewählten Frequenzregulierungsansatz läuft die konkrete Frequenzreduzierung im untersuchten EUROCONTROL-Raum, insbesondere bei den Ansätzen mit Kompensation, auf die gleichen oder zumindest ähnlich gearteten Strecken hinaus. Das bedeutet, dass sich zwar vielfältige weitere Frequenzregulierungsansätze entwickeln ließen. Um nennenswerte ökologisch-ökonomisch-temporale Effizienzgewinne zu erzeugen, ist es im Ergebnis immer erforderlich, dass ein Großteil der Strecken mit dem größten verfügbaren *Single-Aisle*-Flugzeug bedient wird.

Die Kostenveränderungen, die durch CO_2-Kompensationmaßnahmen entstehen, liegen eine bis zwei Größenordnungen unterhalb der anderen Dimensionen. Dies verdeutlicht, dass die Anreize in größere Flugzeuge zu investieren, die hierdurch gesetzt werden, eher gering sind.

TAB. 5.5: Veränderung der Airline-relevanten Bewertungsdimensionen jedes Ansatzes gegenüber dem Referenzszenario anhand der Gesamtjahreswerte für 2040 sowie mit Umrechnung in monetäre Einheiten (*Reflektiert nur Kosten, die durch potenzielle CO_2-Kompensationsmaßnahmen zusätzlich entstehen, reguläre Kerosinkosten OC_{Kero} sind in den COC enthalten)

Ansatz	Δ ATFM-Versp. (Flüge)		Δ DOC ($COC + OC_{Kap}$)			Δ Kerosinverbrauch		Σ [Mio. €]
	[Mio. min]	[Mio. €] (1 min ≙ 164 €)	COC [Mio. €]	OC_{Kap} [Mio. €]	DOC [Mio. €]	[Mio. kg]	[Mio. €] (1 kg ≙ 0,1 €)*	
GF	-7	-1.219	433	1.582	2.015	94	9	805
GF-A	-9	-1.408	501	1.196	1.696	115	11	300
GFK	-8	-1.371	**-1.082**	349	-733	**-194**	**-19**	**-2.124**
GFK-A	-9	-1.473	**-1.270**	**-49**	**-1.318**	**-224**	**-22**	**-2.814**
MS	-7	-1.150	428	2.202	2.629	91	9	1.488
MS-A	-9	-1.414	480	1.079	1.559	112	11	156
MSK	-4	-703	-560	170	-391	-106	-11	-1.104
MSK-A	-5	-883	-769	**9**	**-760**	-140	-14	-1.657
MA	-18	-2.994	525	4.297	4.822	162	16	1.844
MA-A	**-29**	**-4.812**	565	3.642	4.207	230	23	-582
MAK (-5%)	-5	-768	-351	963	612	-66	-7	-162
MAK-A (-5%)	-7	-1.144	-761	**35**	-726	-141	-14	-1.885
PG	**-20**	**-3.318**	1.067	5.957	7.024	275	28	3.734
PG-A	**-27**	**-4.383**	1.791	3.843	5.635	471	47	1.299
PGK (d=1.2)	-9	-1.510	-1.006	2.456	1.451	-166	-17	-76
PGK-A (d=1.2)	-11	-1.840	**-1.724**	163	**-1.561**	**-277**	**-28**	**-3.428**
GFK-NMA	-8	-1.356	-1.576	63	-1.513	-269	-27	-2.896
PGK-A-NMA	-25	-4.035	**-4.330**	**20**	**-4.310**	**-719**	**-72**	**-8.417**
GFK-LASR	-8	-1.306	519	1.388	1.907	183	18	620
PGK-A-LASR	**-27**	**-4.407**	1.470	4.424	5.894	566	57	1.544

Abbildung 5.34 zeigt die Veränderung der DOC sowie der ATFM-Verspätungskosten aus Tabelle 5.5 für jeden Ansatz. Bei den Ansätzen unterhalb der schrägen Linie sind die kumulierten ATFM-Kosteneinsparungen größer als die Zunahme der kumulierten DOC. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass auf Airlineeinzelebene die beiden Kostenarten nicht unmittelbar miteinander verrechnet werden können, da sich Kostenveränderungen nicht gleichmäßig auf alle betroffenen Airlines verteilen. Dennoch gibt diese Darstellung Aufschluss über das Verhältnis, in dem die beiden Kostenarten stehen.

Auf übergeordneter Ebene ist eine zahlenmäßige Häufung der Ansätze entlang des ersten Drittels der schrägen Linie zu beobachten. Das bedeutet, bei etwa der Hälfte der Ansätze stehen der Anstieg der DOC und der Rückgang der ATFM-Verspätungskosten grob im Gleichgewicht und befinden sich betragsmäßig in der Größenordnung zwischen 0,5 Mrd. € bis 2,5 Mrd. €.

Eine Reduzierung der DOC ist nur mit Ansätzen mit Kompensation möglich (Punkte unterhalb der waagerechten Linie), konkret gilt dies für *GFK, GFK-A, MSK, MSK-A, MAK-A* und *PGK-A*. Die Ansätze *MAK* und *PGK* führen zwar ebenfalls zu einem Rückgang der COC, dieser wird jedoch durch höhere Kapitalkosten OC_{Kap} überkompensiert.

Besonders ausgeprägte Reduzierungen in der ATFM-Verspätung lassen sich mit den Ansätzen ohne Kompensation erzielen, hierbei werden die Flugzeuge dann jedoch vergleichsweise groß, was zu schwächeren ökologisch-ökonomischen Ergebnissen führt, z. B. bei *MA, MA-A, PG* und *PG-A*. Die Verfügbarkeit eines NMA verbessert die Ergebnisse von *GFK* und *PGK-A* jeweils, während sie sich durch das LASR in der ökologisch-ökonomischen Dimension verschlechtern.

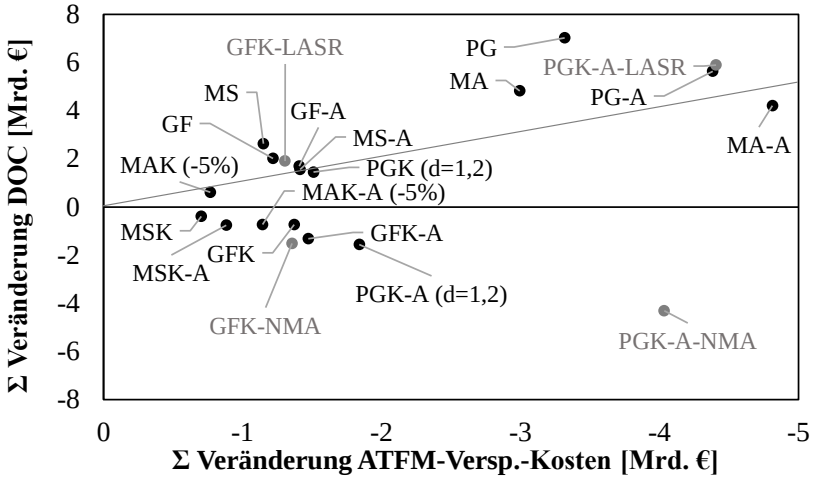

Abb. 5.34: Vergleich der untersuchten Ansätze bezüglich der Veränderung der DOC sowie der ATFM-Verspätungskosten in 2040 gemäß Tabelle 5.5

Auf Abbildung 5.35 sind die aufsummierten Kostenveränderungen aus der rechten Spalte von Tabelle 5.5 sowie die Simplizität der Ansätze gemäß Tabelle 3.2

dargestellt. Daraus lässt sich ableiten, dass keiner der Ansätze in sämtlichen Dimensionen besonders positiv heraussticht, sondern sich stets Kompromisse ergeben. Dies illustriert die Herausforderungen, mittels eines strategischen Ansatzes zur Beeinflussung des eingesetzten Flottenmixes, taktische Probleme, wie ATFM-Verspätungen, zu lösen und gleichzeitig ökologisch-ökonomische Vorteile zu erzielen.

Bis auf *MA-A* liegen lediglich Ansätze mit Kompensation in der unteren Hälfte der Matrix und erzeugen somit in Summe Kostenreduzierungen. Der Kompensationsmechanismus führt hingegen zu erhöhter regulatorischer Komplexität. Hervorzuheben sind die positiven ökologisch-ökonomisch-temporalen Effekte von *GFK* und *GFK-A* bei vergleichsweise hoher Simplizität. Bemerkenswert sind außerdem die zusätzlichen Effizienzgewinne, die ein NMA mit *PGK-A* liefern kann.

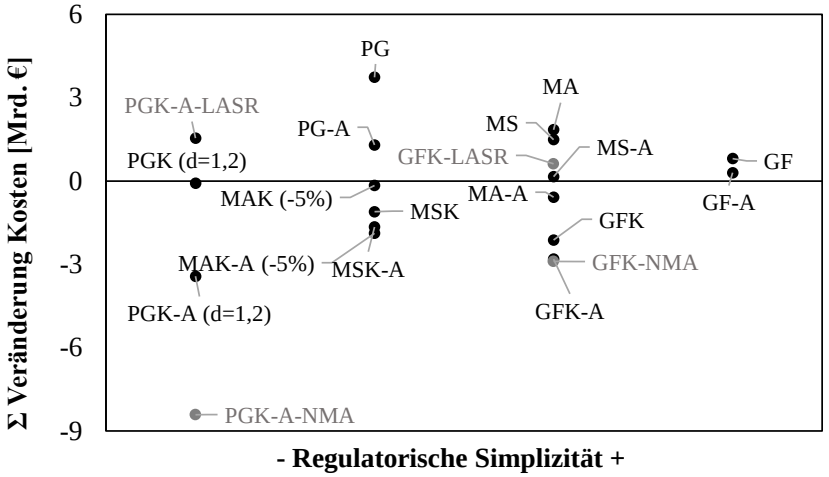

Abb. 5.35: Vergleich der untersuchten Ansätze bezüglich der aufsummierten Kostenveränderungen in 2040 aus rechter Spalte von Tabelle 5.5 sowie ihrer qualitativen Simplizität gemäß Tabelle 3.2

Tabelle 5.6 zeigt die Veränderungen der (gewichteten) Netto-Reisezeit in Passagierminuten. Die Darstellung erfolgt getrennt von Tabelle 5.5, da es sich hierbei um die aus Passagiersicht relevante Dimension handelt. Zumindest aus dieser Perspektive sind die Potenziale von Frequenzregulierung eindeutiger: Schon die zurückhaltende Gewichtung des Negativnutzens von ATFM-Verspätung gegenüber Schedule Delay mit $d = 2$ führt dazu, dass mit nahezu sämtlichen Ansätzen in 2040 subjektive Reisezeitverkürzungen erzeugt werden können. Das bedeutet, dass für den Passagier durch Frequenzregulierung in den meisten Fällen keine subjektiven temporalen Nachteile entstehen und die Veränderungen in den anderen Dimensionen vornehmlich fokussiert werden sollten.

Das Ziel der Europäischen Kommission, wonach 90% der Reisenden bis 2050 ihre Strecke innerhalb Europas von Tür zur Tür innerhalb von 4 Stunden zurücklegen können (European Commission, 2011), wird durch den Fokus auf hochfrequentierte

TAB. 5.6: Veränderung der ungewichteten $d = 1$ und gewichteten $d = 2$ (bzw. $d = 1{,}2$) Netto-Reisezeit gegenüber dem Referenzszenario anhand der Gesamtjahreswerte für 2040 (ein negativer Wert zeigt eine subjektive Reisezeitverkürzung an)

Ansatz	Δ Reisezeit (Passagiere)	
	$d = 1$ [Mio. min]	$d = 2$ (1,2 für *PGK(-A)*) [Mio. min]
GF	303	-298
GF-A	461	-232
GFK	326	-374
GFK-A	404	-348
MS	181	-397
MS-A	361	-349
MSK	**33**	-321
MSK-A	111	-333
MA	541	**-1.157**
MA-A	3.149	444
MAK (-5%)	**-111**	-536
MAK-A (-5%)	**-13**	-635
PG	45	**-1.847**
PG-A	1.498	**-950**
PGK (d=1,2)	193	36
PGK-A (d=1,2)	771	583
GFK-NMA	**175**	**-515**
PGK-A-NMA	2.124	-41
GFK-LASR	202	-456
PGK-A-LASR	2.032	-370

Strecken mutmaßlich nur in Ausnahmefällen torpediert. Im Fall von Flugausfällen stehen auf frequenzreduzierten Strecken zwar weniger Alternativen zur Verfügung (Pai, 2010), dies wird aber zumindest teilweise dadurch kompensiert, dass es aufgrund der geringeren Systemüberlastung zu weniger Störungen kommt.

Die Auswirkungen auf Airline-Flottenplanung und -zuweisung sind genau zu berücksichtigen, da ein externer Eingriff in langjährig optimierte Dynamiken erfolgt. Ökologisch-ökonomische Vorteile sind eine notwendige Voraussetzung, temporale Effizienzgewinne entstehen in unterschiedlichem Maße in jedem Fall. Dies gilt vor allem unter Berücksichtigung der im nächsten Abschnitt aufgezeigten weiteren Herausforderungen im Zusammenhang mit Frequenzregulierung.

5.9 Übergeordnete Herausforderungen und Lösungsansätze

In der bisherigen Ergebnisbeschreibung und -diskussion lag der Fokus auf den technisch-quantitativen Auswirkungen von Frequenzregulierung. Daneben existieren weichere, eher qualitativ zu diskutierende Aspekte, die zum Teil in der Literaturrecherche (Abschnitt 2.1, Abschnitt 2.3) sowie der Modellentwicklung (Abschnitt 3.1, Unterabschnitt 3.3.1) angeschnitten wurden.

Tab. 5.7: Kompatibilitätsprüfung von Frequenzregulierung, adaptiert von Madas und Zografos (2008) in Tabelle 2.6 (– – geringe bis ++ hohe Erfüllung des Kriteriums)

Kriterium	Indikator	Auspr.	Kommentar
Effizienz	Wettbewerb	–	Tendenziell wettbewerbsverzerrend; im Detail abhängig vom Zuteilungsmechanismus für Frequenzen
	Infrastruktur	++	Geringes Risiko, dass Frequenzen zu stark reduziert werden und Luftverkehrsinfrastruktur unausgelastet bleibt
Kosten	Implement.	+–	Sich teilweise amortisierender Investitionsaufwand, wenn verfügbare Flugzeugtechnologie und Auswirkungen auf Flottenzuweisung berücksichtigt werden
Implement.	Komplexität	–	Erfordert in der Ausgestaltung umfangreiche Beteiligung; in der Routine eine neutrale, transnationale Instanz zur Festlegung und Zuteilung von Frequenzen
	Flexibilität	+–	Streckenspezifische Zielfrequenzen lassen sich anpassen, gewisse Planungssicherheit ist jedoch erforderlich
	Entschädig.	+	Durch langfristige Planung und Beteiligung mutmaßlich vermeidbar
Akzeptanz	Trägheit	– –	Mutmaßlich hohe Widerstände, aufgrund relativ starken regulatorischen Eingriffs, zusätzlicher Betriebs- und Investitionsaufwände sowie teilweise unabsehbarer Marktrisiken
	Transparenz	+	Je nach Ansatz unterschiedlich komplex, insgesamt jedoch nachvollziehbar

Dazu wird zunächst das von Madas und Zografos (2008) entwickelte Schema zur Kompatibilitätsprüfung von Regulierungsmaßnahmen in adaptierter Weise auf Frequenzregulierung angewandt (Tabelle 5.7), welches in seiner Ursprungsform in

Tabelle 2.6 beschrieben ist. Da es sich bei Frequenzregulierung nicht um einen Preisansatz handelt, werden die diesbezüglichen Kriterien nicht beleuchtet. Aus Tabelle 5.7 lassen sich folgende Dimensionen ableiten, für die im Zusammenhang mit Frequenzregulierung Lösungen erforderlich sind und aus denen sich weiterer Forschungsbedarf ergibt (Abschnitt 6.2):

Wettbewerb und Zuteilung von Frequenzen

Ein wesentliches Kriterium für die Effizienz einer regulatorischen Maßnahme ist die Wettbewerbsförderung. Dies gilt insbesondere hinsichtlich der Vermeidung von Markteintrittsbarrieren und der Bevorteilung etablierter Airlines (Madas & Zografos, 2008). Die auch schon vor der COVID-19-Pandemie voranschreitende Konsolidierung im Airline-Bereich hat gezeigt, dass langfristig vor allem große Unternehmen bestehen, die organisationale Skaleneffekte realisieren können. Dies ist unkritisch, so lange es genügend fairen Wettbewerb gibt. Bedingt durch die COVID-19-Pandemie und dem daraus resultierenden gestiegenen staatlichen Einfluss bei Luftfahrtunternehmen besteht gemäß Abate et al. (2020) aktuell allerdings ein erhöhtes Risiko der Wettbewerbsverzerrung.

Im Zusammenhang mit Frequenzregulierung ist hier die entscheidende Frage, nach welchen Regeln welche Anzahl an Frequenzen welchen Airlines zugeteilt wird. Die Ausgestaltung dieses Mechanismus hat einen maßgeblichen Einfluss darauf, inwiefern wettbewerbliche Anforderungen erfüllt werden bzw. die Maßnahme insgesamt als fair erachtet wird. Denkbar wären ähnliche Konzepte wie bei der Zuteilung von Flughafenslots (Unterabschnitt 2.3.1), bei denen ebenfalls ein Kompromiss aus langfristiger Planbarkeit und Sicherstellung von Wettbewerb angestrebt wird.

Hierzu müssen unterschiedliche potenzielle Marktdynamiken und Randbedingungen beachtet werden: So ist es z. B. für größere Airlines investitions- und betriebsseitig leichter, neue Flugzeuge zu beschaffen und in die Flotte zu integrieren. Insgesamt wären vor allem Netzwerkairlines von Frequenzregulierung betroffen. Kleinere oder im Aufbau befindliche Airlines treten in der Regel über Nischen in den Markt ein und wachsen von dort aus.

Andererseits ist es auch möglich, dass eine kleine Airline nach Zuteilung von Frequenzen eine Strecke von einem Hub aus neu aufnimmt und dort kleinere Flugzeuge als der Streckendurchschnitt einsetzt. Entweder sinkt die Sitzplatzkapazität auf dieser Strecke dann (entgegen der Grundannahme der Frequenzregulierungsansätze, Abschnitt 3.1), was eine Angebotsverknappung darstellt. Diese kann zu höheren Ticketpreisen führen (Hansen et al., 2001) und wäre im Hinblick auf das übergeordnete Ziel zur Schaffung ökologisch-ökonomisch-temporaler Effizienzgewinne nicht abträglich (Unterabschnitt 5.7.2). Oder die bereits auf dieser Strecke operierenden Airlines

erhöhen im Gegenzug die Sitzplatzkapazität bzw. durchschnittliche Flugzeuggröße und greifen einen größeren Marktanteil ab. Derartige Dynamiken der Flugzeuggröße wären möglich, da regulatorisch lediglich die Frequenz vorgegeben wäre.

Unabhängig vom konkret implementierten Ansatz müssten im Sinne eines Regelkreises Kontrollparameter und -prozesse entwickelt werden, mit denen der Erfolg von Frequenzregulierung regelmäßig überprüft wird. Dies umfasst sowohl die Anpassung der sich ergebenden Zielfrequenzen als auch die Frequenzzuteilungsmechanismen. Damit wird auch der potenziellen Missachtung von Regularien vorgebeugt, wie sie aus dem Kontext von Flughafenslots bekannt ist (Fukui, 2012; Madas & Zografos, 2010; Sheng et al., 2019).

Regulatorischer Eingriff und alternative Ansätze

Frequenzregulierung stellt einen relativ starken regulatorischen Eingriff in die unternehmerische Entscheidungsfreiheit der Airlines dar (Abschnitt 3.1). Gleichzeitig müssten Airlines den Großteil der daraus resultierenden Investitionen in Form von Flottenanpassungen bewältigen. Selbst wenn diese in Summe durch geringere DOC und ATFM-Verspätungskostenreduzierungen kompensiert werden, so dauert es möglicherweise, bis diese Amortisation eintritt und ein Restrisiko bleibt stets bestehen.

Die COVID-19-induzierten Einbrüche im Luftverkehr reduzieren die Investitionsfähigkeit von Airlines und Flugzeugherstellern für die nächsten Jahre maßgeblich. In Form von finanziellen Unterstützungsmaßnahmen könnten hier jedoch Anreize gesetzt werden, dass bei Flottenmodernisierungen und Entwicklungsprogrammen größere Flugzeuge bevorzugt werden (aero.de Luftfahrtnachrichten, 2020b). Im Vergleich zu anderen (teil-) öffentlich finanzierten Maßnahmen, die die Lufttransportsystemkapazität erhöhen, z. B. der Bau neuer Lande- und Startbahnen, wäre die Förderung größerer Flugzeuge mit relativ wenig Kapitalaufwand umzusetzen.

Die harte regulatorische Vorgabe von Zielfrequenzen für jede Strecke wurde u. a. dazu gewählt, das maximale ökologisch-ökonomisch-temporale Potenzial von Frequenzregulierung zu ergründen (Abschnitt 1.1). Zur Erreichung des übergeordneten Ziels, dem Einsatz größerer Flugzeug bei weniger Flugbewegungen, sind auch andere, weichere Regulierungsmechanismen denkbar.

So könnte beispielsweise schon die Möglichkeit einen Effekt haben, dass zugewiesene Flughafenslots im Besitz der Airline bleiben bzw. nicht an Wettbewerber verfallen, wenn diese erwiesenermaßen aufgrund von Frequenzreduzierung nicht genutzt werden. Praktisch würde dies einer Reduzierung der Anzahl Flughafenslots gleichkommen, wie auch in Swaroop et al. (2012) und Vaze und Barnhart (2012b) untersucht. Die Verfügbarkeit eines NMA könnte hier zusätzlich verstärkend wirken. Gerade auf Strecken mit hohen

Frequenzen, die nur noch eine geringe Reduzierung des Schedule Delay erzeugen, könnte eine solche Regelung auch den Wettbewerbsdruck reduzieren, möglichst viele Frequenzen anzubieten.

Eine andere Möglichkeit wäre, jeder Airline, basierend auf zu definierenden Kriterien, eine Gesamtanzahl Flüge vorzugeben, die reduziert werden soll. Damit kann jedes Unternehmen selbst und basierend auf eigenen Kriterien (z. B. dem netzwerkbezogenen Gewinnbeitrag jeder Strecke) entscheiden, welche Frequenzen reduziert werden. Die Gesamtanzahl zu reduzierender Flüge wiederum ließe sich ableiten aus einem Emissions- oder Verspätungsziel auf Systemebene. Auch dieses Vorgehen würde die Möglichkeit erfordern, dass ungenutzte Flughafenslots nicht verfallen.

Wie am Ende von Abschnitt 5.8 ausgeführt, ist davon auszugehen, dass das ökologisch-ökonomisch-temporale Potenzial dieser Alternativen nicht größer ist als das der untersuchten Frequenzregulierungsansätze. Weitere mögliche Ansätze, bei denen die Frequenz oder die Flugzeuggröße berücksichtigt werden, sind in Hansen et al. (2001) skizziert.

Passagiernachfrage

Eine wesentliche Frage, die sich im Zusammenhang mit Frequenzregulierung für eine Airline stellt, ist der Einfluss auf die Nachfrage. Dies betrifft sowohl den Einfluss auf das absolute Nachfrageniveau als auch auf die Verteilung der Marktanteile auf verschiedene Wettbewerber.

Dabei sind teils gegenläufige Effekte zu berücksichtigen: Eine geringere Frequenz wirkt zwar in der Regel nachfragereduzierend. Unter bestimmten Umständen kann es durch den Rückgang von Verspätungen gemäß einiger Modelle aber auch zu einem Anstieg der Nachfrage kommen (Hsiao & Hansen, 2011). Eine Angebotsverknappung infolge geringerer Nachfrage könnte möglicherweise zu höheren Ticketpreisen und somit höherer Profitabilität führen (Hansen et al., 2001). Die Wahrscheinlichkeit, dass durch Frequenzreduzierung nennenswerte Umleitungen der Passagierströme auf Zugverbindungen aufgrund von Zeitvorteilen stattfinden, ist hingegen gering. Hierfür spräche eher die ökologische Motivation eines Passagiers.

Harmonisierung mit anderen Kapazitätsmanagementansätzen

Zur Realisierung von Frequenzregulierung müsste diese mit einem langfristigen Zeithorizont in andere Kapazitätsmanagementmaßnahmen integriert werden. Insbesondere ist eine Harmonisierung mit der Flughafenslotallokation notwendig. Nur, wenn eine Airline Flughafenslots am Start- und Zielflughafen hat, kann sie eine entsprechende Frequenz zugeteilt bekommen. Sollte ein Flughafenslot aufgrund von Frequenzreduzierung nicht mehr erforderlich sein, so muss sichergestellt werden, dass dieser nicht für einen anderen

Flug genutzt wird, ansonsten gingen zumindest die ökologisch-temporalen Vorteile wieder verloren.

Eine besondere Bedeutung käme auch der schrittweisen Einführung von Frequenzregulierung zu. Zwar erfolgt die Frequenzregulierung gemäß der vorgestellten Ansätze und den gewählten Eingangsparametern ausgehend von 2019 progressiv, dennoch ist davon auszugehen, dass einige Airlines den notwendigen Anpassungen schneller nachkommen können als andere, z. B. weil bereits größere Flugzeuge in der Flotte vorhanden sind.

Schlussfolgernd wird deutlich, dass das Vorhandensein von ökologisch-ökonomisch-temporalen Vorteilen bestimmter Frequenzregulierungsansätze eine notwendige, aber keine hinreichende Voraussetzung für einen positiven Gesamtnutzen von Frequenzregulierung ist. Wie auch von Madas und Zografos (2010) festgestellt, müssen hier unter Berücksichtigung sämtlicher Akteure die theoretischen und praktischen, teilweise im Zielkonflikt stehenden Aspekte gewichtet und zusammengeführt werden.

5.10 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurden die Ergebnisse nach Anwendung von FRED in den unterschiedlichen Untersuchungsdimensionen (ökologisch, ökonomisch, temporal) von Frequenzregulierung beschrieben und ausgewertet. Weiterhin wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, die Ergebnisse zusammengefasst und übergeordnete Herausforderungen sowie Lösungsansätze in Bezug auf Frequenzregulierung diskutiert.

In Summe ergibt sich ein gemischtes Bild in Bezug auf das Gesamtpotenzial von Frequenzregulierung. Einerseits lassen sich mit einigen Ansätzen, die besonders überlastete Strecken fokussieren, mittels einer geringen Reduzierung von Flügen (1% bis 5%) maßgebliche Rückgänge der durchschnittlichen ATFM-Verspätung (20% bis 40%) erzielen. Bereits mit einer vorsichtigen Nutzengewichtung des ATFM-Verspätungsrückgangs gegenüber dem Schedule Delay-Anstieg entsteht für einen Großteil der Ansätze insgesamt eine subjektive Reduzierung der Netto-Reisezeit für Passagiere.

Andererseits erfordern die Ansätze mit besonders hohem ATFM-Verspätungsreduzierungspotenzial den Betrieb von *Twin-Aisle*-Flugzeugen auf Kurzstrecke. Diese führen aufgrund ihrer Auslegung auf die Langstrecke zu höheren COC/ASK und FC/ASK. Sofern Frequenzreduzierung nur saisonal stattfindet, können größere Flugzeuge möglicherweise nicht das gesamte Jahr über gleichmäßig genutzt werden, d. h. es muss in Summe mehr Flottensitzplatzkapazität bereit gehalten werden. Beides macht diese Ansätze ökologisch und ökonomisch untauglich.

Ansätze, mit denen ökologisch-ökonomische Effizienzgewinne erzielt werden, erfordern eine Begrenzung der Flugzeuggröße auf die maximale *Single-Aisle*-Sitzplatzanzahl (ca. 220 Sitzplätze), da bis zu dieser Größe Skaleneffekte auf der Kurzstrecke realisierbar sind. Diese Ansätze sind jedoch in ihrer Methodik komplexer und betreffen mehr Strecken, d. h. sie stellen den regulatorisch härteren Eingriff dar. Im Ergebnis führen sie zu einem überwiegenden Einsatz des *A321neo* als größtes *Single-Aisle*-Flugzeug.

Die Einführung eines neuen Flugzeugtyps im Größenbereich eines NMA bzw. einer modernisierten *B757-300* mit einem EIS in 2030 erhöht das ökologisch-ökonomische (und teilweise temporale) Effizienzpotenzial von Frequenzregulierung. Ein speziell für die Kurzstrecke ausgelegtes LASR auf Basis eines *A330-800* hingegen erzeugt keine Reduzierung der COC/ASK und des FC/ASK.

Unter der Annahme typischer ATFM-Verspätungskosten von 100 €pro Minute ließen sich, je nach Ansatz, mehrere hundert Mio. € bis einige Mrd. € jährlich einsparen. Hier besteht jedoch die Einschränkung, dass sich diese Einsparungen ungleich auf Airlines verteilen und zwar nicht in dem Verhältnis, zu dem die jeweiligen Airlines zur Entlastung der Luftverkehrsinfrastrukturen beitragen.

Neben diesen quantitativen Vor- und Nachteilen sind auch qualitative Aspekte, wie der Einfluss von Frequenzregulierung auf den freien und fairen Wettbewerb, zu berücksichtigen. In der Praxis würde Frequenzregulierung einen Zuteilungsmechanismus erfordern, nach dem streckenspezifische Frequenzen an interessierte Airlines vergeben werden. Die regulatorisch weicheren, aber in Teilen bereits als wettbewerbsfeindlich bezeichneten Flughafenslotallokationsmechanismen lassen hier politische und rechtliche Hürden erwarten.

Hinzu kommen zusätzliche organisationsinterne Aufwände auf strategischer, operativer und taktischer Ebene bei Airlines, Flughäfen, Flugsicherungsorganisationen und öffentlichen Einrichtungen. Alternative Ansätze (auch freiwillige) zur Reduzierung von Frequenzen und Erhöhung der Flugzeuggröße könnten an den Großvaterrechten der Flughafenslotallokation ansetzen, die Airlines zwar einerseits Planungssicherheit bieten, aber mit einen Grund für den Frequenzwettbewerb darstellen.

6. Fazit

In diesem abschließenden Kapitel wird in Abschnitt 6.1 die eingangs formulierte Forschungsfrage (Abschnitt 1.2) kompakt beantwortet, gefolgt von einer Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit. Zudem wird dargestellt, wie der Stand der Wissenschaft methodisch und inhaltlich erweitert wurde. Davon abgeleitet wird in Abschnitt 6.2 weiterer Forschungsbedarf im Kontext von Frequenzregulierung skizziert.

6.1 Beantwortung der Forschungsfrage und Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde die Forschungsfrage untersucht, inwiefern Frequenzregulierung eine geeignete Kapazitätsmanagementmaßnahme darstellt, um Verspätungen zu reduzieren und von den ökologisch-ökonomischen Skaleneffekten größerer Flugzeuge zu profitieren. Als Bewertungsdimensionen wurden der Kerosinverbrauch, die Flugzeugbetriebskosten (COC, DOC), ATFM-Verspätungen und die Passagier-Reisezeit herangezogen. Basierend auf den Ergebnissen dieser Arbeit lässt sich die Forschungsfrage wie folgt beantworten:

> *Durch die Reduzierung von Flugfrequenzen und den Einsatz größerer Flugzeuge (bei konstanter Sitzplatzkapazität auf einer Strecke) lassen sich nennenswerte ökologisch-ökonomisch-temporale Effizienzgewinne realisieren. Diese werden durch die am Markt verfügbaren Flugzeugtypen sowie Saisonalitäten im Luftverkehr maßgeblich begrenzt und sind mit qualitativen Regulierungsimplikationen wie Komplexität, Wettbewerbsverzerrung und Marktrisiken abzuwägen.*

Die Motivation zur Untersuchung dieser Frage lag in den zunehmenden Kapazitätsengpässen im europäischen Luftverkehr sowie notwendigen ökologischen Effizienzsteigerungen (Kapitel 1). Zu den für Frequenzregulierung relevanten Aspekten (Marktdynamiken, Skaleneffekte von Flugzeuggröße, Kapazitätsmanagement im Luftverkehr) gibt es jeweils für sich genommen zahlreiche Publikationen (Kapitel 2). Frequenzen haben demnach eine hohe Relevanz in Bezug auf Marktanteile

und Passagierkomfort, führen aber auch zu negativen Konsequenzen, wie die ineffiziente Nutzung von Luftverkehrsinfrastruktur sowie höhere Emissionen. Mit zunehmender Flugzeuggröße innerhalb des *Single-* und *Twin-Aisle*-Bereichs existieren geringe bis moderate Skaleneffekte bezüglich der Betriebskosten und des Kerosinverbrauchs, deren Kapitalisierung wird allerdings durch technisch-operative Randbedingungen eingeschränkt. Bisherige Untersuchungen zu Kapazitätsmanagementmaßnahmen im Luftverkehr fokussieren vor allem auf Flughafenkapazitätsengpässe sowie marktbasierte Regulierungsansätze.

Zur umfassenden Untersuchung von Frequenzregulierung wurde das Modell FRED entwickelt (Kapitel 3). Im ersten Modellschritt sind darin unterschiedliche alternative Frequenzregulierungsansätze modelliert, die beschreiben, nach welchen Zielmetriken (Anzahl Flüge auf einer Strecke, Schedule Delay, ATFM-Verspätungen, zeitlicher Grenznutzen einer Frequenz) Frequenzen reduziert werden können. Die Ansätze basieren auf der Grundannahme, dass die angebotene Sitzplatzkapazität auf jeder Strecke konstant bleibt und unterscheiden sich außerdem hinsichtlich ihrer regulatorischen Komplexität sowie der Einbeziehung von am Markt verfügbaren Flugzeuggrößen. Im zweiten Modellschritt erfolgt die Flottenzuweisung zu frequenzreduzierten Strecken mittels eines kleinen ganzzahligen linearen Optimierungsproblems, das die COC für jede Strecke einzeln minimiert.

FRED wurde auf den EUROCONTROL-Raum angewendet (Kapitel 4), da für diese Region umfangreiche ATFM-Verspätungsdaten zur Verfügung stehen und diese sich als verkehrsgeografisch relativ abgeschlossenes System auffassen lässt. Zur langfristigen Bewertung von Frequenz erfolgte eine Projektion von Verkehrsdaten bis 2040 in Fünfjahresschritten unter der Annahme, dass sich der COVID-19-bedingte Luftverkehrseinbruch bis 2025 auf das 2019-Niveau erholt haben wird. Zuletzt wurden die Modellbestandteile mittels unterschiedlicher Methoden erfolgreich verifiziert und validiert.

Die Beschreibung und Diskussion der Ergebnisse erfolgte in den unterschiedlichen Bewertungsdimensionen (Kapitel 5). Dabei zeigte sich, dass nur Frequenzregulierungsansätze ökologisch-ökonomisch vorteilhaft sein können, bei denen die maximale Flugzeuggröße im *Single-Aisle*-Bereich liegt. Werden auf Langstrecke ausgelegte *Twin-Aisle*-Flugzeuge auf Kurzstrecke eingesetzt, lassen sich ATFM-Verspätungen zwar stärker reduzieren, die höheren Sitzplatzkosten und -kerosinverbräuche machen Ansätze ohne Berücksichtigung dieses Zusammenhangs jedoch unpraktikabel.

Die ausgeprägten Saisonalitäten im Luftverkehr führen dazu, dass der Einsatz größerer Flugzeuge primär im Sommer ATFM-Verspätungen reduziert. Um ihre Flugzeuge gleichmäßig über das Jahr hinweg auszulasten bzw. die Flottengrößen

nicht aufzublähen, müssten Airlines in den weniger verkehrsreichen Wintermonaten allerdings zusätzliche Frequenzen reduzieren. Hinsichtlich der Netto-Reisezeit-Effekte für Passagiere ist Frequenzreduzierung in Summe eher unkritisch, wenn der höhere Negativnutzen von kurzfristigen ATFM-Verspätungen gegenüber einer planbaren Erhöhung des Schedule Delays durch weniger Frequenzen gewichtet wird.

Neuere Flugzeugentwürfe im Größenbereich eines NMA können das ökologisch-ökonomisch-temporale Potenzial von Frequenzregulierung steigern. Übergeordnete Herausforderungen von Frequenzregulierung liegen darin, dass es sich um einen relativ harten regulatorischen Eingriff handelt, der potenziell wettbewerbsverzerrend sein und für Airlines teilweise schwer kalkulierbare Marktrisiken mit sich bringen kann. Diese Ergebnisse sind relevant für Airlines, Gesetzgeber, Flugsicherungen sowie Flughäfen.

Bisherige Untersuchungen zum Forschungsgebiet Frequenzregulierung lieferten methodisch hinsichtlich der Messung von (ATFM-) Verspätungen, der Berechnung von Schedule Delay, der Durchführung von Flottenzuweisung sowie der Berechnung von Betriebskosten und Kerosinverbräuchen gröbere Ansätze. Auf inhaltlicher Ebene sind diese regional und zeitlich begrenzter, berücksichtigen keine saisonalen Netzwerkeffekte, decken weniger Flugzeugtypen ab und fokussieren meist nur eine Bewertungsdimension, ohne die jeweiligen Wechselwirkungen zu analysieren.

Der Stand der Wissenschaft zum Thema Frequenzregulierung wurde mit der vorliegenden Arbeit folglich sowohl umfassender als auch differenzierter und dabei konkret um folgende Punkte erweitert:

Literatur

- *Überblick:* Umfassende Zusammenstellung, Zusammenfassung und Auswertung wesentlicher für Frequenzregulierung relevanter wissenschaftlicher Publikationen wirtschaftlicher, technischer und flugbetrieblicher Fachdisziplinen (Marktdynamiken, Skaleneffekte von Flugzeugen, Kapazitätsmanagement);

Methodik

- *Frequenzregulierungsansätze:* Entwicklung von 8 Frequenzregulierungsansätzen unterschiedlicher Komplexität und Wirkungsweise unter Einbeziehung der für Frequenzregulierung wesentlichen Parameter (ATFM-Verspätung, Schedule Delay, Flugzeuggröße) auf überregionaler Systemebene;
- *Flottenzuweisung:* Entwicklung eines kleinen ganzzahligen linearen Optimierungsmodells zur Zuweisung von realen Flottenmixen zu frequenzreduzierten Strecken unter Berücksichtigung von Flugzeuggrößenverteilungen;

- *Realitätsnähe:* Berücksichtigung zahlreicher realer Randbedingungen (Entkopplung von Gesetzgeber und Airline, Anlehnung an existierende Regulierungsmechanismen, Betriebsprofile eingesetzter Flugzeuge) und ausführliche Diskussion von annahmen- und methodikbedingten Unsicherheiten;

Inhalt

- *Quantifizierung ökologisch-ökonomisch-temporaler Wechselwirkungen:* Detaillierte Wechselwirkungsanalyse jedes Frequenzregulierungsansatzes aus der Perspektive von Airlines, Passagieren und Gesellschaft in ökologischer, ökonomischer und temporaler Dimension (ATFM-Verspätungen, Reisezeitveränderungen, Flottendynamiken, Flugzeugausnutzung, Flugzeugbetriebskosten, Kerosinverbrauch);
- *Dynamisierung:* Berücksichtigung der kurz- und langfristigen Zeitvarianz von Frequenzregulierung durch Einbeziehung saisonaler Verkehrsschwankungen sowie eines langfristiges Zeithorizontes von 20 Jahren inklusive möglicher zukünftiger Flugzeugtypen;
- *Auseinandersetzung:* Kritische Diskussion von quantitativen und qualitativen Auswirkungen von Frequenzregulierung über wesentliche Dimensionen hinweg.

6.2 Weiterer Forschungsbedarf

Der breite Untersuchungsansatz dieser Arbeit wirft weitere Forschungsfragen in mehreren Fachdisziplinen auf. Der erste Teil der folgenden Fragen resultiert unmittelbar aus der Methodik und den Ergebnissen. Der zweite Teil ergibt sich aus dem weiteren Kontext von Frequenzregulierung:

Im engeren Zusammenhang mit Frequenzregulierung

- *Frequenzzuteilung:* Wie könnten effiziente und mit Flughafenslotallokationsmechanismen abgestimmte Frequenzzuteilungsmechanismen ausgestaltet sein?
- *Experteninterviews:* Welche anderen Ansätze sind denkbar, um den Einsatz größerer Flugzeuge bei weniger Flugbewegungen zu fördern? Welches Potenzial bieten auf Freiwilligkeit basierende Frequenzregulierungsansätze, z. B. die Möglichkeit, Flughafenslots zu behalten, wenn diese aufgrund von Frequenzregulierung nicht genutzt wurden? Welche ökologisch-ökonomisch-temporalen Unterschiede ergeben sich zu marktorientierten Regulierungsansätzen wie der Bepreisung von CO_2?

- *Ökonometrie:* Welche Passagier-Nachfragedynamiken ergeben sich bei systemweiter Frequenzreduzierung? Hier wären die folgenden drei Möglichkeiten denkbar: (1) Die Nachfrage bleibt insgesamt konstant und verteilt sich wie vorher auf die frequenzreduzierten Strecken, wie in der vorliegenden Arbeit angenommen. (2) Die Nachfrage bleibt konstant und verteilt sich unterschiedlich und auch auf nicht frequenzreduzierte Strecken. (3) Es kommt zu einer insgesamt abnehmenden Nachfrage, die sich unterschiedlich und auch auf nicht frequenzreduzierte Strecken verteilt.

Im weiteren Zusammenhang mit Frequenzregulierung

- *Flugzeugentwurf:* Welche *Top Level Aircraft Requirements* ergeben sich an einen Flugzeugentwurf (oder einen Flugzeugfamilienentwurf) in Abhängigkeit des Frequenzreduzierungsausmaßes, mit dem sich die gesamte weltweit ausgestoßene Menge an Emissionen minimieren lässt? Hierbei geht es um den Zielkonflikt, dass ein größeres Flugzeug tendenziell geringere Sitzplatzemissionen aufweist (bis zu einem ebenfalls zu identifizierenden Punkt bei gegebener Technologiereife), sich allerdings auf weniger Strecken einsetzen lässt, was wiederum das Gesamtemissionsreduzierungspotenzial mindert.

- *Zukünftige Antriebstechnologien:* Welchen Effekt haben wasserstoffbasierte oder batterieelektrische Antriebstechnologien auf Flugzeuggröße-Frequenz-Dynamiken? Diese Frage zielt darauf ab, dass neue Antriebstechnologien tendenziell zuerst bei kleineren Flugzeugen zum Einsatz kommen. Eine dahingehende Verschiebung in der durchschnittlichen Flugzeuggröße würde die Zunahme von Frequenzen begünstigen.

- *Andere Anwendungsregionen:* Welches ökologisch-ökonomisch-temporale Effizienzpotenzial lässt sich in anderen Regionen und Märkten durch Frequenzregulierung realisieren? Hier würde sich beispielsweise der US-amerikanische Markt anbieten, aufgrund noch ausgeprägterer Verspätungen bei kleinerer durchschnittlicher Flugzeuggröße und höheren Frequenzen.

Die Vielfalt der potenziellen weiteren Forschungsfragen illustriert die Multidimensionalität von Frequenzregulierung und die Notwendigkeit, entsprechende Forschungsvorhaben stets daran auszurichten.

A. Verwendete Flugzeugtypen

TAB. A.1: Verwendete Flugzeugtypen und wesentliche Parameter (CIRIUM (2019) und Sabre Airline Solutions (2019) für *Single-Aisle*-Flugzeuge sowie Airbus (2019b, 2019c) und Boeing (1998, 2005, 2015, 2018c) für *Twin-Aisle*-Flugzeuge)

Flugzeug-typ	MTOM [kg]	OEM [kg]	Sitze (empir.)	Sitze (normiert)	EIS	EOP
A220-100	60.781	35.221	162	125	2020	2050
A220-300	65.317	36.106	175	145	2020	2050
A318	63.263	38.920	128	128	2003	2019
A319ceo	67.130	39.986	144	144	1996	2019
A319neo	68.294	38.311	150	150	2020	2050
A320ceo	74.369	42.061	175	174	1988	2019
A320neo	75.658	40.300	179	182	2020	2050
A321ceo	87.103	49.195	205	205	1994	2019
A321neo	90.704	48.339	209	215	2020	2050
A330-200	238.000	124.500	275	308	1998	2019
A330-300	238.000	127.000	295	365	1994	2019
A330-800	242.000	124.500	283	321	2020	2050
A330-900	242.000	127.000	298	377	2020	2050
A350-1000	311.000	133.100	334	482	2018	2050
A350-900	275.000	119.700	328	415	2015	2050
B737-700	69.578	38.684	141	141	1997	2019
B737-800	73.602	41.429	185	181	1998	2019
B737-900	83.608	44.194	185	187	2001	2019
B737M-10	89.765	49.500	204	204	2020	2050
B737M-7	80.285	42.340	147	153	2020	2050
B737M-8	82.190	45.070	185	185	2020	2050
B737M-9	88.314	48.078	191	193	2020	2050
B757-200	113.400	62.100	232	228	1992	2012
B757-300	122.470	64.330	276	279	1999	2018
B767-200	179.169	82.377	248	245	1980	2000
B767-300	186.880	90.011	248	290	1988	2008
B777-200	286.900	137.050	276	451	1995	2019
B777-300	299.370	160.530	355	568	1998	2019
B777-9	351.534	181.400	414	619	2023	2050
B787-10	254.011	135.500	330	434	2018	2050
B787-8	227.930	119.950	285	322	2013	2050
B787-9	254.011	128.850	272	383	2014	2050
E170	372.00	20.700	76	76	2004	2024
E175	387.90	21.500	85	89	2005	2021
E175-E2	44.600	30.500	89	90	2021	2050
E190	50.300	27.900	106	100	2005	2019
E190-E2	56.400	33.000	110	104	2020	2050
E195	50.790	28.700	118	112	2006	2019
E195-E2	61.500	35.750	122	126	2020	2050
LASR	139.600	92.100	321	321	2030	2050
NMA	110.200	57.900	279	279	2030	2050

TAB. A.2: Verwendete Flugzeugtypen in alphabetischer Reihenfolge mit Regressionsparametern zur Schätzung des Kerosinverbrauchs aus dem TCM sowie Kerosinverbrauch beim Taxiing und Startvorgang gemäß ICAO (2019)

Flugzeug-typ	γ_a	δ_a	ϵ_a	ζ_a	$FCTT_a$ [kg]
A220-100	4,31E-05	1,375608856	0,478423639	470,0775634	218
A220-300	4,53E-05	1,378358777	0,684579033	418,727569	249
A318	5,39E-05	1,71951107	0,598029549	587,5969542	304
A319ceo	5,66E-05	1,722948472	0,855723791	523,4094615	306
A320ceo	6,35E-05	1,85095398	0,884581643	598,2064384	332
A321ceo	7,06E-05	2,004025758	1,063346888	601,3874987	434
A319neo	4,86E-05	1,481735684	0,735922462	450,1321366	271
A320neo	5,46E-05	1,591820424	0,760740212	514,4575369	278
A321neo	6,07E-05	1,723462154	0,914478323	517,1932467	310
A330-200	0,00010651	3,896656139	1,617531695	1613,033092	769
A330-300	0,000104354	4,102515264	1,373737312	1614,976785	752
A330-800	9,27E-05	3,390090858	1,407252573	1403,338753	758
A330-900	9,08E-05	3,569188279	1,195151463	1405,029802	758
A350-1000	0,000119948	3,930687818	1,988559429	1428,45777	1036
A350-900	0,000107517	3,074360342	1,838034059	1581,825357	900
B737-700	5,58E-05	1,577189866	0,772566043	622,3003682	332
B737-800	5,98E-05	1,668425871	0,973833671	690,2703382	348
B737-900	6,97E-05	1,851748551	1,096848721	668,4692762	348
B737M-10	6,07E-05	1,723462154	0,914478323	517,1932467	312
B737M-7	4,80E-05	1,356383283	0,664406797	535,1783185	284
B737M-8	5,14E-05	1,434846253	0,837496956	593,6324851	302
B737M-9	6,00E-05	1,592503756	0,943289899	574,8835762	306
B757-200	8,54E-05	2,366149162	0,985251347	900,2609317	578
B757-300	0,000107276	2,69228019	1,516770621	866,8184944	608
B767-200	0,000103463	3,183649947	1,459924284	1160,766355	531
B767-300	0,000114307	3,235787185	1,780101898	1143,398099	708
B777-200	0,000150488	4,223994506	2,418039145	1632,858972	1012
B777-300	0,000169271	5,186237601	2,688393508	1557,284635	1012
B777-9	0,000143937	4,716825379	2,386271315	1714,14933	1260
B787-10	0,000110211	3,613714082	1,776930395	1459,596168	806
B787-8	9,75E-05	3,197977075	1,572504769	1291,677997	755
B787-9	0,000104359	3,421835464	1,682580106	1382,095471	778
E170	3,77E-05	1,20365775	0,418620683	411,3178667	200
E175	3,93E-05	1,255243083	0,43656157	428,9457748	208
E175-E2	3,23E-05	1,031706643	0,358817729	352,5581718	163
E190	4,64E-05	1,478779521	0,514305412	505,3333798	266
E190-E2	3,67E-05	1,169267528	0,406660093	399,565928	214
E195	4,69E-05	1,495974632	0,520285707	511,2093492	273
E195-E2	3,93E-05	1,255243083	0,43656157	428,9457748	219
LASR	7,78E-05	2,85E+00	1,18E+00	1,18E+03	758
NMA	7,5093E-05	1,884596133	1,061739435	606,7729461	486

B. 26 größte Airline-Hubs im EUROCONTROL-Raum

Tab. B.1: 26 größte Airline-Hubs im EUROCONTROL-Raum (exklusive Istanbul) sortiert nach Anzahl Starts in 2019, durchschnittliche ATFM-Verspätung pro abgehendem Flug und tägliche Betriebsdauern (EUROCONTROL, 2019c)

Flughafen-(IATA)	Flughafenname	Anzahl Starts	ATFM-Versp./ Flg. [min]	Tägliche Betriebsdauer [h]
FRA	Flughafen Frankfurt am Main	248.922	2,88	17
AMS	Luchthaven Schiphol Amsterdam	243.960	2,34	16
CDG	Aéroport Paris-Charles d. Gaulle	243.198	2,00	18
LHR	London Heathrow Airport	237.900	2,11	17
MAD	Aeropuerto A. S. Madrid-Barajas	201.472	2,28	18
MUC	Flughafen München F. J. Strauß	196.275	2,55	17
BCN	Aeropuerto de Barcelona El Prat	163.186	2,64	18
FCO	Aeroporto di Roma-Fiumicino	152.551	1,95	17
LGW	London Gatwick Airport	139.290	2,45	17
VIE	Flughafen Wien-Schwechat	131.245	3,74	18
CPH	Kastrup Lufthavn	125.127	1,44	17
ZRH	Flughafen Zürich	121.177	2,28	17
OSL	Oslo Lufthavn Gardermoen	119.212	0,71	17
DUB	Dublin Airport	113.894	2,16	17
ARN	Stockholm Arlanda Airport	110.899	1,33	17
MXP	Aeroporto di Milano-Malpensa	109.880	2,71	17
ORY	Aéroport Paris-Orly	107.754	1,65	16
LIS	Aeroporto da Portela Lissabon	107.056	2,62	19
BRU	Brussels Airport	106.829	3,99	16
DUS	Düsseldorf Airport	104.700	3,84	16
ATH	Athen E. V. Airport	103.235	2,16	19
MAN	Aeropuerto Palma de Mallorca	96.854	2,51	17
PMI	Manchester Airport	95.872	3,40	18
TXL	Flughafen Berlin-Tegel	93.087	2,99	17
STN	London Stansted Airport	91.496	2,65	17
HEL	Helsinki-Vantaan Lentoasema	91.131	1,10	18

C. Vorhersage von Verkehrs- und Verspätungsdaten

Tab. C.1: Flüge pro Tag im EUROCONTROL-Raum von 2019 bis 2040 (EUROCONTROL, 2018f, 2019c)

Monat	2019	2025	2030	2035	2040
Jan.	22.267	21.924	24.087	26.464	29.075
Feb.	22.770	22.953	25.218	27.707	30.441
Mär.	23.558	23.713	26.053	28.624	31.449
Apr.	26.071	26.089	28.664	31.492	34.600
Mai.	27.015	27.345	30.043	33.008	36.265
Jun.	28.878	28.989	31.850	34.992	38.445
Jul.	29.358	29.662	32.589	35.805	39.338
Aug.	29.347	29.790	32.730	35.959	39.508
Sep.	28.937	29.589	32.509	35.717	39.242
Okt.	26.790	27.445	30.153	33.129	36.398
Nov.	23.028	23.768	26.113	28.690	31.521
Dez.	22.380	22.840	25.094	27.571	30.291

Tab. C.2: Passagiere pro Tag im EUROCONTROL-Raum von 2019 bis 2040 (EUROCONTROL, 2018f; Sabre Airline Solutions, 2019)

Monat	2019	2025	2030	2035	2040
Jan.	1.847.818	1.801.971	2.038.764	2.306.675	2.609.791
Feb.	2.029.746	1.978.454	2.238.439	2.532.588	2.865.391
Mär.	2.135.956	2.118.008	2.396.331	2.711.229	3.067.507
Apr.	2.533.137	2.472.237	2.797.109	3.164.672	3.580.536
Mai.	2.604.059	2.603.731	2.945.883	3.332.996	3.770.979
Jun.	2.912.573	2.851.811	3.226.562	3.650.559	4.130.272
Jul.	2.974.495	3.000.118	3.394.358	3.840.405	4.345.065
Aug.	2.971.568	2.963.397	3.352.812	3.793.399	4.291.882
Sep.	2.870.600	2.885.309	3.264.463	3.693.440	4.178.788
Okt.	2.622.402	2.629.168	2.974.662	3.365.557	3.807.819
Nov.	2.504.477	2.192.863	2.481.023	2.807.050	3.175.920
Dez.	2.112.881	2.030.919	2.297.799	2.599.748	2.941.376

TAB. C.3: Durchschnittliche ATFM-Verspätung pro Flug [min] im EUROCONTROL-Raum von 2019 bis 2040 (EUROCONTROL, 2018b, 2019c)

Monat	2019	2025	2030	2035	2040
Jan.	0,79	1,14	1,61	2,26	3,19
Feb.	1,03	1,11	1,57	2,21	3,11
Mär.	1,65	1,70	2,39	3,37	4,75
Apr.	1,58	1,44	2,02	2,85	4,02
Mai.	2,46	2,51	3,54	4,98	7,02
Jun.	3,66	3,73	5,25	7,40	10,43
Jul.	4,06	4,23	5,96	8,40	11,84
Aug.	3,38	3,21	4,53	6,38	8,99
Sep.	2,51	2,55	3,59	5,06	7,12
Okt.	1,63	1,82	2,57	3,61	5,09
Nov.	0,71	0,94	1,33	1,87	2,64
Dez.	1,72	1,72	2,42	3,42	4,81

D. Ergebnisse

D.1 Zielfrequenzen und Zielflugzeuggrößen

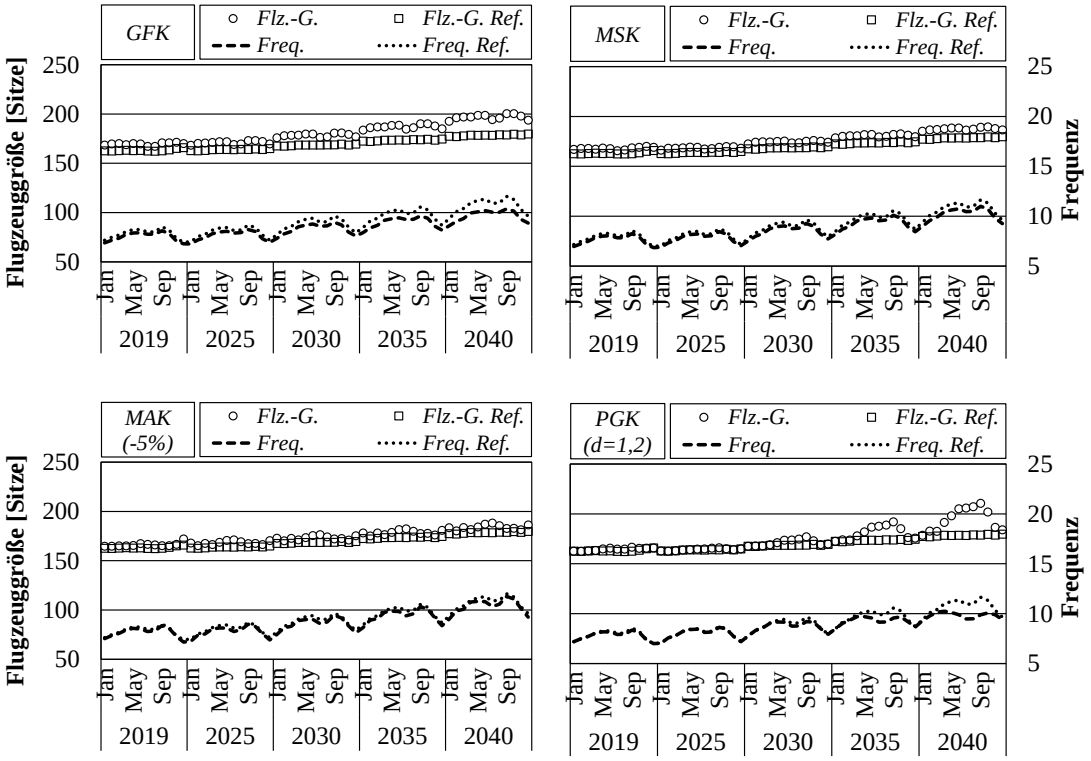

Abb. D.1: Frequenzen und Zielflugzeuggrößen für Ansätze mit Kompensation auf den höchstfrequentierten Strecken von 2019 bis 2040

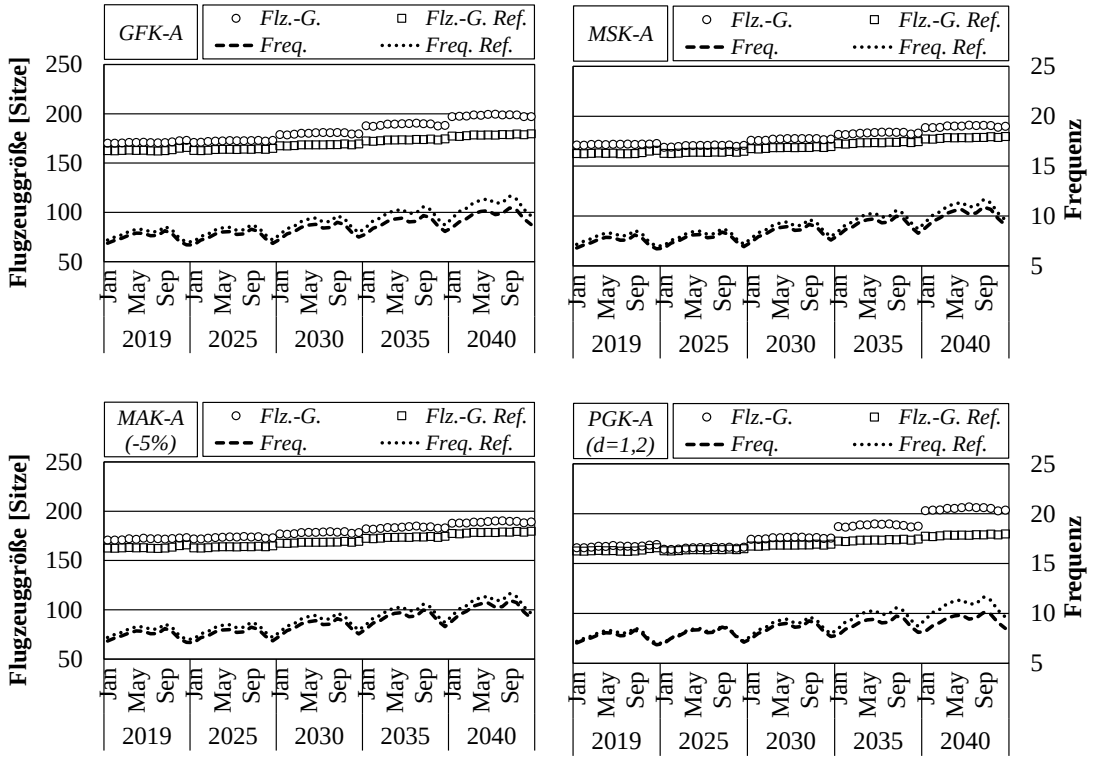

Abb. D.2: Frequenzen und Zielflugzeuggrößen für Ansätze mit Kompensation und bei Angleichung der Flugzeuggröße auf den höchstfrequentierten Strecken von 2019 bis 2040

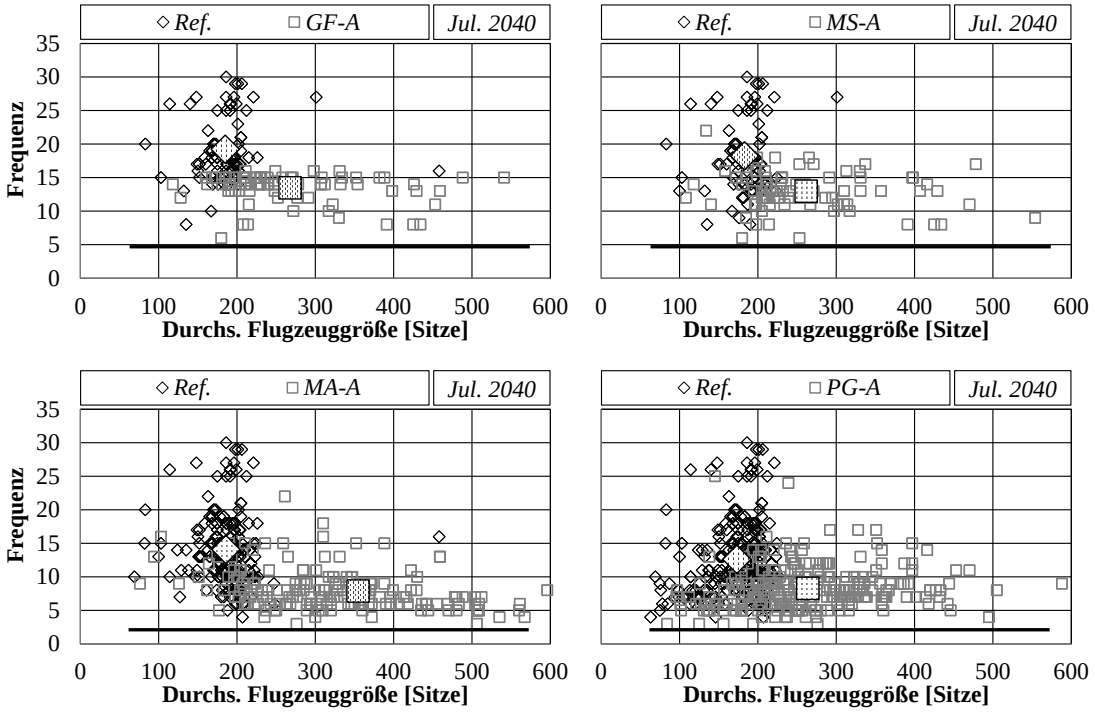

Abb. D.3: Frequenzen und Zielflugzeuggrößen auf frequenzreduzierten Strecken bei Angleichung der Flugzeuggröße im Juli 2040 (jeder Datenpunkt entspricht beiden Richtungen einer Strecke; große schraffierte Markierungen stellen die Gesamtdurchschnittswerte dar)

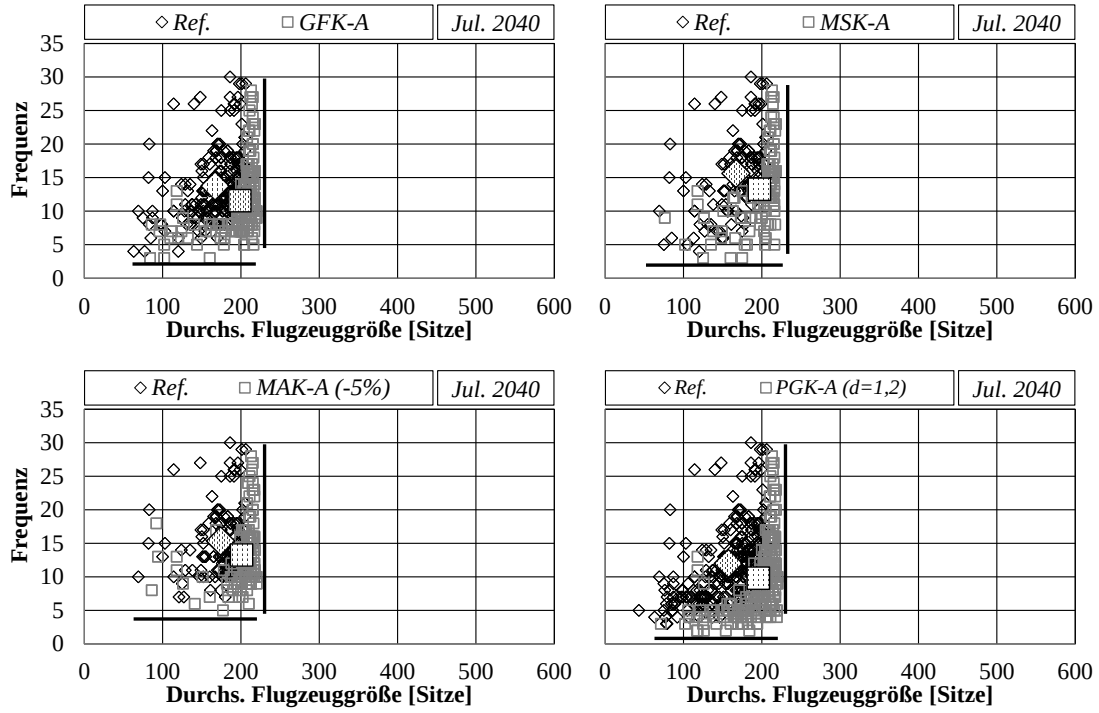

Abb. D.4: Frequenzen und Zielflugzeuggrößen auf frequenzreduzierten Strecken für Ansätze mit Kompensation und bei Angleichung der Flugzeuggröße im Juli 2040 (jeder Datenpunkt entspricht beiden Richtungen einer Strecke; große schraffierte Markierungen stellen die Gesamtdurchschnittswerte dar)

D.2 Flüge und ATFM-Verspätungen

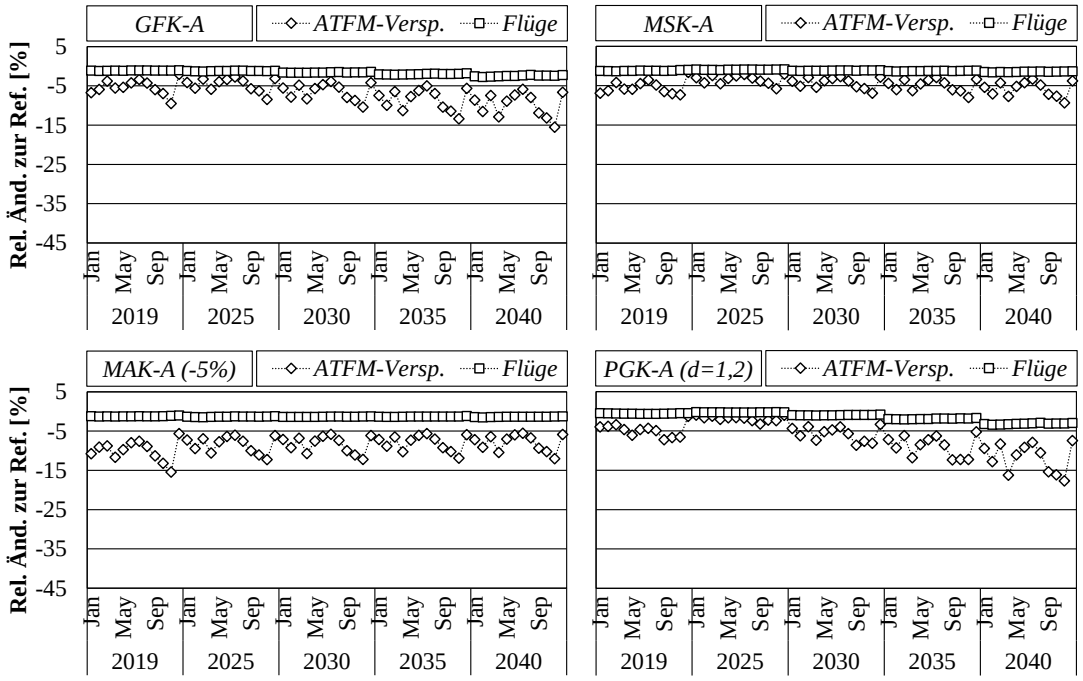

Abb. D.5: Änderung der Anzahl der Flüge und der durchschnittlichen ATFM-Verspätung im EUROCONTROL-Raum für Ansätze mit Kompensation und bei Angleichung der Flugzeuggröße relativ zum Referenzszenario

D.3 Netto-Reisezeit

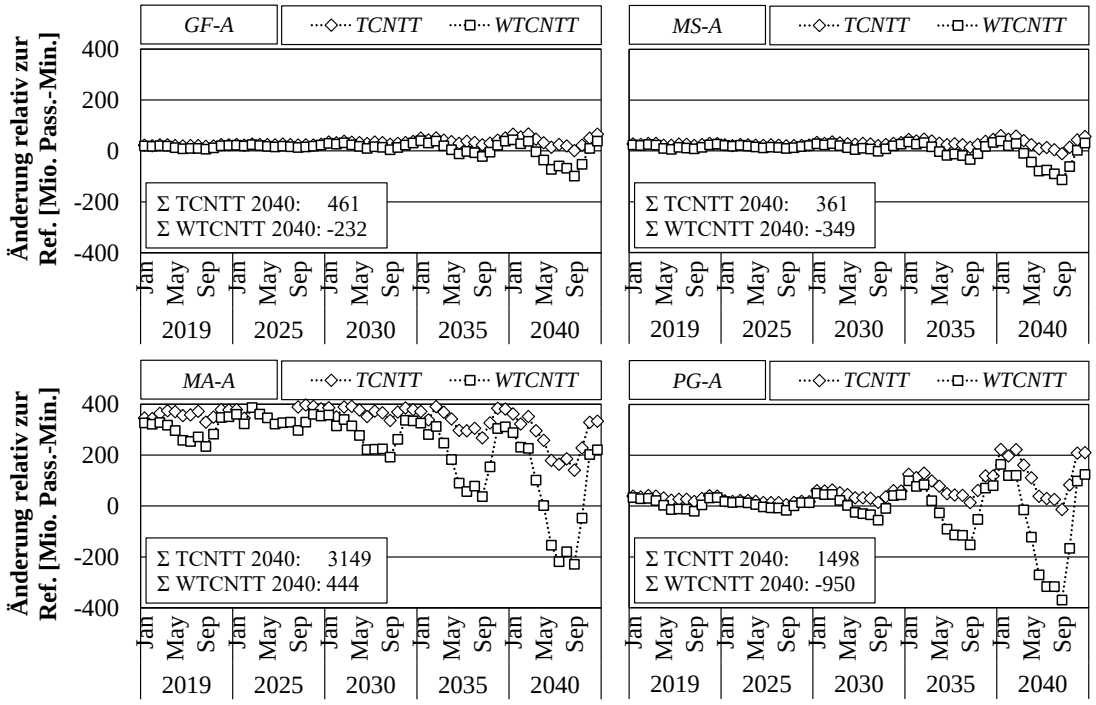

Abb. D.6: Änderung der (gewichteten) Netto-Reisezeit in Passagierminuten im EUROCONTROL-Raum und kumulierte Werte für 2040 bei Angleichung der Flugzeuggröße relativ zum Referenzszenario

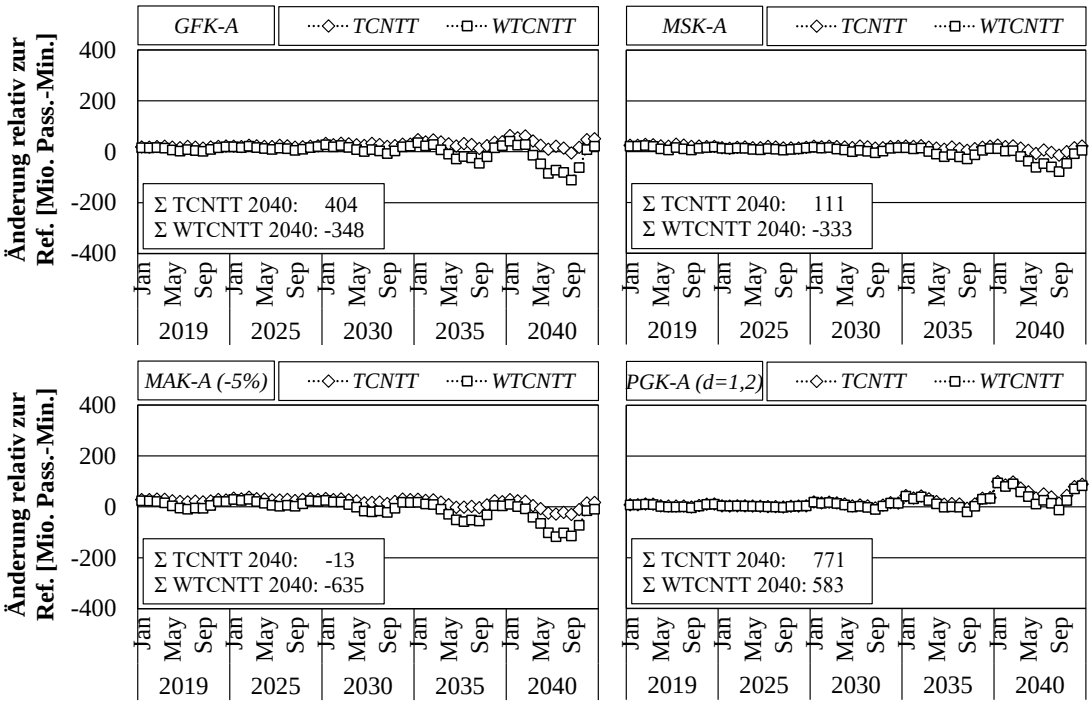

Abb. D.7: Änderung der (gewichteten) Netto-Reisezeit in Passagierminuten im EUROCONTROL-Raum und kumulierte Werte für 2040 für Ansätze mit Kompensation und bei Angleichung der Flugzeuggröße relativ zum Referenzszenario

D.4 Flottendynamiken

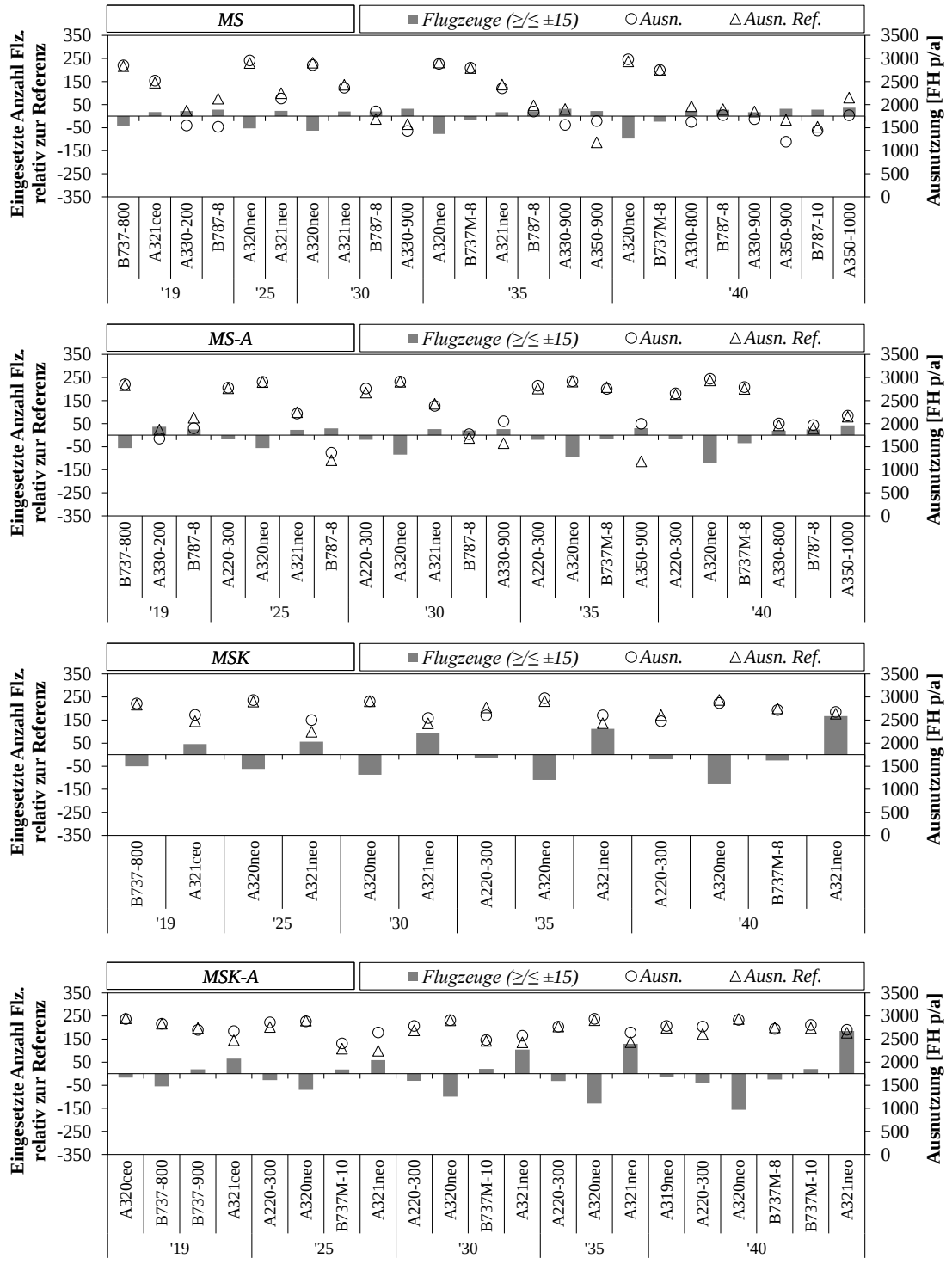

Abb. D.8: Zusätzlich oder weniger eingesetzte Anzahl Flugzeugtypen (aufsteigend nach Größe sortiert) von 2019 bis 2040 zur Bedienung des Flugplans der höchstfrequentierten Strecken für die Ansätze *MS* sowie *MSK* mit und ohne Angleichung relativ zum Referenzszenario (zwecks Übersichtlichkeit sind nur Veränderungen $\geq$ / $\leq \pm 15$ gezeigt)

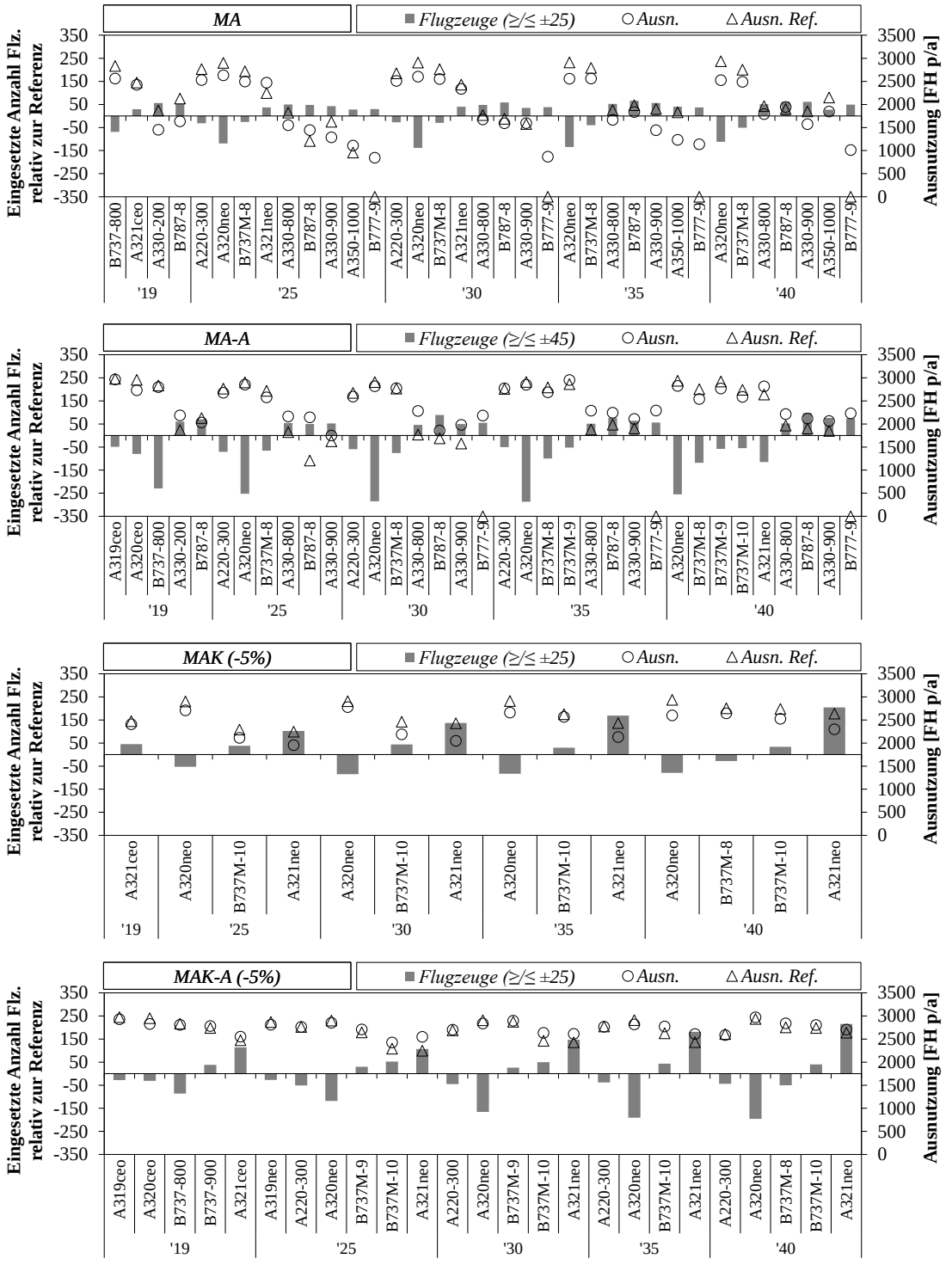

Abb. D.9: Zusätzlich oder weniger eingesetzte Anzahl Flugzeugtypen (aufsteigend nach Größe sortiert) von 2019 bis 2040 zur Bedienung des Flugplans der höchstfrequentierten Strecken für die Ansätze *MA* sowie *MAK* mit und ohne Angleichung relativ zum Referenzszenario

D.5 Betriebskosten und Kerosinverbrauch

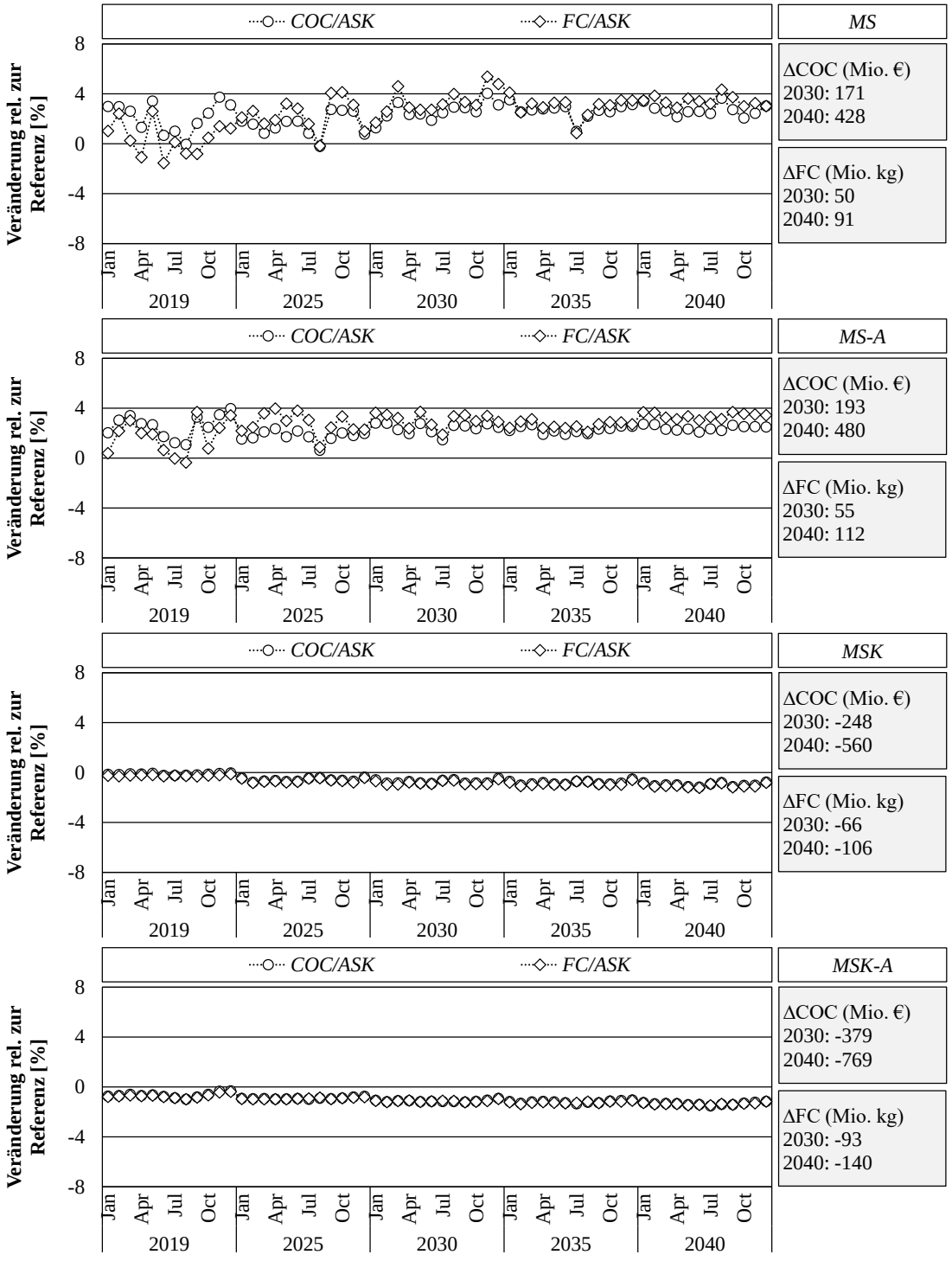

Abb. D.10: Änderung der COC/ASK und des FC/ASK auf frequenzreduzierten Strecken für die Ansätze *MS* sowie *MSK* mit und ohne Angleichung der Flugzeuggröße relativ zum Referenzszenario

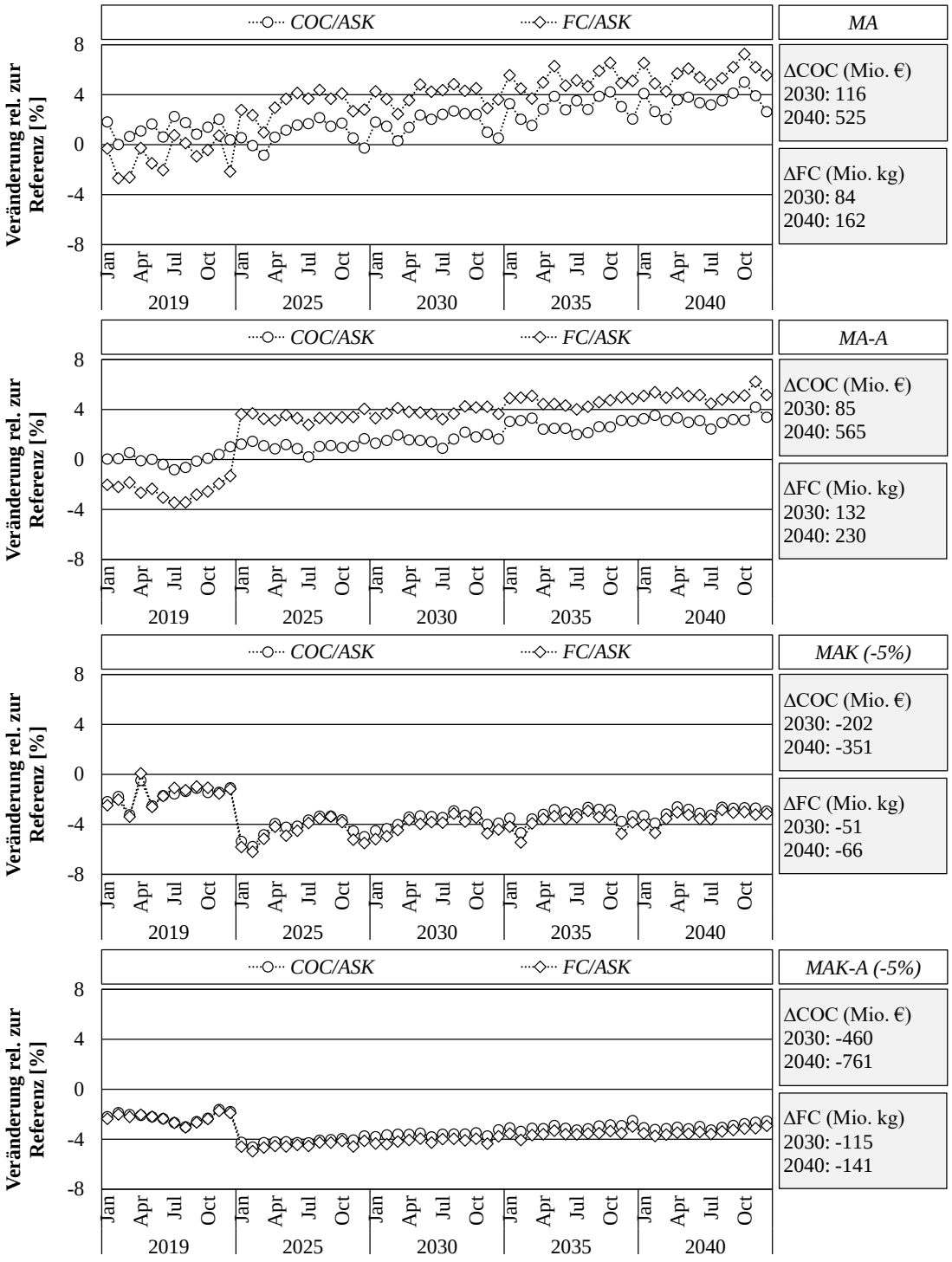

Abb. D.11: Änderung der COC/ASK und des FC/ASK auf frequenzreduzierten Strecken für die Ansätze *MA* sowie *MAK* mit und ohne Angleichung der Flugzeuggröße relativ zum Referenzszenario

D.6 Neue Flugzeugentwürfe

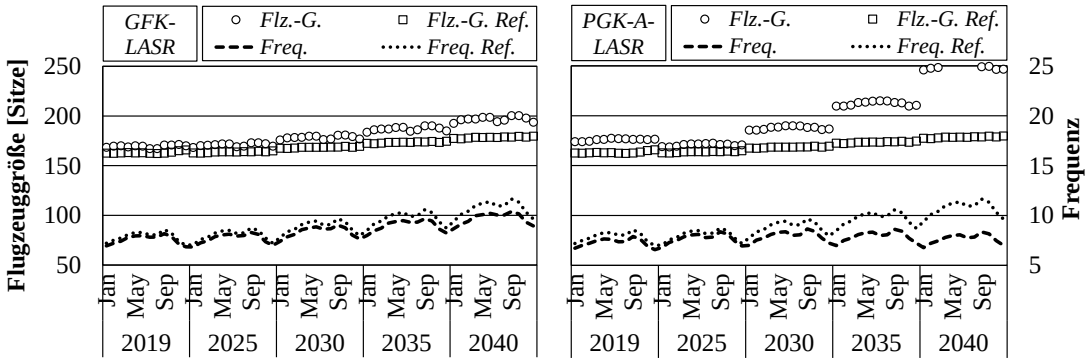

Abb. D.12: Frequenzen und Zielflugzeuggrößen auf den höchstfrequentierten Strecken von 2019 bis 2040 bei Verfügbarkeit eines LASR ab 2030

Abbildungsverzeichnis

1.1 Historische Entwicklung, Prognosekorridore (gepunktete Linie) und „wahrscheinlichste Entwicklung“ (Pfeile) von Flügen und durchschnittlicher ATFM-Verspätung pro Flug im EUROCONTROL-Raum von 2014-2040 basierend auf EUROCONTROL (2018b, 2019c) sowie der Annahme der Erreichung des Vor-COVID-19-Niveaus in 2025 (Airbus, 2020; IATA, 2020a) 1

1.2 Historische Entwicklung, Prognosekorridore (gepunktete Linie) und „wahrscheinlichste Entwicklung“ (Pfeile) von Flügen und CO_2-Emissionen von 2014-2040 in der EU (Werte ohne COVID-19-Anpassung und basierend auf EEA, EASA, EUROCONTROL (2020)) 2

1.3 Dimensionen, nach denen Frequenzregulierung untersucht wird . . . 5

2.1 Durchschnittliche Flugdistanz der top 10 *Single-* und *Twin-Aisle-*Flugzeugtypen nach weltweit erbrachten ASK in 2019 (Sabre Airline Solutions, 2019) 14

2.2 Draufsicht des in Kenway et al. (2010) untersuchten LASR (links), *A330-200* (Mitte) und *A320ceo* (rechts) 16

2.3 Anzahl Regulierungen und geografische Verteilung (je dunkler, desto größer die Anzahl Regulierungen) in Europa von Mai bis Oktober 2017 (Sanaei et al., 2021) 21

3.1 Überblick der zweistufigen Funktionsweise des Frequenzreduzierungsmodells FRED 35

3.2 Maximaler und durchschnittlicher Schedule Delay für Direkt- (links) und Umsteigepassagiere (rechts) für beispielhafte Strecke mit stündlichen Flügen 42

3.3 Durchschnittliche monatliche ATFM-Verspätung pro Flug im EUROCONTROL-Raum von 2014 bis 2019 und Regressionslinie; ermittelt durch Linearisierung und anschließender Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate (EUROCONTROL, 2019c) 45

3.4 Verlauf von $TDASD_{rmy}$ und $TIAPAD_{rmy}$ (links) sowie $MTUF_{rmy}$ für unterschiedliche Werte von d (rechts) für Strecke *NCE-LGW* (*Nizza - London Gatwick*) im Juni 2019 50

3.5 Aktivitätsdiagramm des Ansatzes *Gedeckelte Frequenz* 61

3.6 Aktivitätsdiagramm des Ansatzes *Mindest-Schedule Delay* 62

3.7 Aktivitätsdiagramm des Ansatzes *Maximale ATFM-Verspätung* . . 63

3.8 Aktivitätsdiagramm des Ansatzes *Positiver Grenznutzen* 64

3.9 Aktivitätsdiagramm des Ansatzes *Gedeckelte Frequenz mit Kompensation* 67

3.10 Aktivitätsdiagramm des Ansatzes *Mindest-Schedule Delay mit Kompensation* 69

3.11 Aktivitätsdiagramm des Ansatzes *Maximale ATFM-Verspätung mit Kompensation* 71

3.12 Aktivitätsdiagramm des Ansatzes *Positiver Grenznutzen mit Kompensation* 72

3.13 Aktivitätsdiagramm des Vorgehens zur Angleichung der Flugzeuggröße 76

3.14 COC/ASK in Abhängigkeit der geflogenen Distanz für empirische Sitzplatzanzahlen (links) und für normierte *Economy*-Bestuhlung (rechts) gemäß Tabelle A.1 mit einem Sitzladefaktor von 80% für ausgesuchte Flugzeugtypen der Größe nach sortiert (CIRIUM, 2019; Sabre Airline Solutions, 2019) 79

3.15 Schematische Darstellung der treibenden und limitierenden Faktoren idealisierter Frequenzverteilungen (gestrichelte Linien) in Abhängigkeit der Flugzeuggröße auf einer Strecke 84

3.16 Verteilung der Anzahl der Flüge in Abhängigkeit der Flugzeuggröße innerhalb des EUROCONTROL-Raums 2019 (links) sowie US-amerikanische Inlandsflüge 2019 (Sabre Airline Solutions, 2019) . . 85

3.17 Verteilung der Anzahl der Flüge in Abhängigkeit der Flugzeuggröße auf den höchstfrequentierten Strecken im EUROCONTROL-Raum 2019 (Sabre Airline Solutions, 2019) 86

3.18 Exemplarische Verteilungen der Flüge in Abhängigkeit der Flugzeuggröße auf ausgewählten Strecken (Sabre Airline Solutions, 2019) 86

4.1 Untersuchte 26 größte Flughäfen im EUROCONTROL-Raum nach Passagieren in 2019 (Tabelle B.1) 100

4.2 Historische Entwicklung der Flüge und der durchschnittlichen ATFM-Verspätung im EUROCONTROL-Raum (links) und auf den höchstfrequentierten Strecken (rechts) (EUROCONTROL, 2019c) . 101

4.3 Kumulierte relative ATFM-Verspätung und Flüge für den EUROCONTROL-Raum (links) und die höchstfrequentierten Strecken (rechts) in 2019, jeweils absteigend sortiert nach Anzahl der ATFM-Verspätungsminuten pro Strecke (EUROCONTROL, 2019c) 102

4.4 Durchschnittliche ATFM-Verspätung ausgehend von den 26 größten Airline-Hubs, getrennt nach höchstfrequentierten Strecken und den 26 größten Airline-Hubs in 2019 (EUROCONTROL, 2019c) 103

4.5 Anzahl täglicher Flüge und durchschnittliche Flugzeuggröße ausgehend von jedem der größten 26 Airline-Hubs, separiert nach den höchstfrequentierten Strecken (oben) sowie nur zwischen den größten 26 Airline-Hubs in 2019 (Sabre Airline Solutions, 2019) 103

4.6 Historische monatliche Entwicklung der durchschnittlichen ATFM-Verspätung und Anzahl täglicher Flüge im EUROCONTROL-Raum (EUROCONTROL, 2019c) 104

4.7 Historische Entwicklung der Ursachen für ATFM-Verspätungen (EUROCONTROL, 2019c) 105

4.8 Verwendete Datengrundlage zur monatlichen Entwicklung der durchschnittlichen ATFM-Verspätung und Anzahl täglicher Flüge im EUROCONTROL-Raum von 2019 bis 2040 (EUROCONTROL, 2018b, 2019c) 109

4.9 Regressionen und Funktionen zur Schätzung der durchschnittlichen ATFM-Verspätung in Abhängigkeit der Flüge im EUROCONTROL-Raum für 2025 und 2040 (EUROCONTROL, 2019c) 110

4.10 Durchschnittliche ATFM-Verspätung pro Flug auf Monatsebene basierend auf empirischen 2019-Daten (links) sowie die durchschnittliche ATFM-Verspätung pro Flug für ausgewählte Beispieltage basierend auf empirischen 2019-Daten von CODA (EUROCONTROL, 2019c) sowie berechnet durch das NFE 115

4.11 Vergleich der Modellergebnisse und empirischen 2019-Daten (Sabre Airline Solutions, 2019) des gleitenden Durchschnitts der erbrachten ASK in Abhängigkeit der eingesetzten Flugzeuggrößen für die höchstfrequentierten Strecken 117

4.12 Top 10 der zugewiesenen Flugzeugtypen nach ASK empirisch (links) gemäß Sabre Airline Solutions (2019) und im Modell (rechts) auf den höchstfrequentierten Strecken 118

5.1 Frequenzen und Zielflugzeuggrößen für Ansätze *GF, MS, MA* und *PG* auf den höchstfrequentierten Strecken von 2019 bis 2040 124

5.2 Frequenzen und Zielflugzeuggrößen bei Angleichung der Flugzeuggröße auf den höchstfrequentierten Strecken von 2019 bis 2040 . . . 125

5.3 Frequenzen und Zielflugzeuggrößen auf den frequenzreduzierten Strecken im Juli 2040 für Ansätze *GF, MS, MA* und *PG* (jeder Datenpunkt entspricht beiden Richtungen einer Strecke; große schraffierte Markierungen stellen die Gesamtdurchschnittswerte dar) . . . 126

5.4 Frequenzen und Zielflugzeuggrößen auf den frequenzreduzierten Strecken im Juli 2040 für Ansätze mit Kompensation (jeder Datenpunkt entspricht beiden Richtungen einer Strecke; große schraffierte Markierungen stellen die Gesamtdurchschnittswerte dar) 127

5.5 Relative Änderung der Anzahl der Flüge und der durchschnittlichen ATFM-Verspätung im EUROCONTROL-Raum für Ansätze *GF, MS, MA* und *PG* im Vergleich zur Referenz 129

5.6 Relative Änderung der Anzahl Flüge und der durchschnittlichen ATFM-Verspätung im EUROCONTROL-Raum für Ansätze mit Kompensation im Vergleich zur Referenz 130

5.7 Relative Änderung der Anzahl Flüge und der durchschnittlichen ATFM-Verspätung im EUROCONTROL-Raum bei Angleichung der Flugzeuggröße im Vergleich zur Referenz (abweichende Achsenskalierung bei *MA-A* und *PG-A* beachten) 131

5.8 Änderung der (gewichteten) Netto-Reisezeit in Passagierminuten im EUROCONTROL-Raum und kumulierte Werte für 2040 im Vergleich zum Referenzszenario 133

5.9 Änderung der (gewichteten) Netto-Reisezeit in Passagierminuten im EUROCONTROL-Raum und kumulierte Werte für 2040 für Ansätze mit Kompensation im Vergleich zum Referenzszenario 134

5.10 Abweichung der Flottensitzplatzkapazität (die Summe der Sitzplätze über sämtliche Flugzeuge) auf den frequenzreduzierten Strecken zwischen den Frequenzregulierungsansätzen und dem Referenzszenario von 2019 bis 2040 (abweichende Achsenskalierungen beachten) 138

5.11 Zusätzlich oder weniger eingesetzte Anzahl Flugzeugtypen (aufsteigend nach Größe sortiert) von 2019 bis 2040 zur Bedienung des Flugplans der höchstfrequentierten Strecken für die Ansätze *GF* sowie *GFK* mit und ohne Angleichung relativ zum Referenzszenario (zwecks Übersichtlichkeit sind nur Veränderungen $\geq$ / $\leq \pm 15$ gezeigt) 139

5.12 Zusätzlich oder weniger eingesetzte Anzahl Flugzeugtypen (aufsteigend nach Größe sortiert) von 2019 bis 2040 zur Bedienung des Flugplans der höchstfrequentierten Strecken für die Ansätze *PG* sowie *PGK* mit und ohne Angleichung relativ zum Referenzszenario (zwecks Übersichtlichkeit sind nur Veränderungen $\geq$ / $\leq \pm 25$ gezeigt) 141

5.13 Änderung der COC/ASK und des FC/ASK auf frequenzreduzierten Strecken für die Ansätze *GF* sowie *GFK* mit und ohne Angleichung relativ zum Referenzszenario 144

5.14 Änderung der COC/ASK und des FC/ASK auf frequenzreduzierten Strecken für die Ansätze *PG* sowie *PGK* mit und ohne Angleichung relativ zum Referenzszenario 145

5.15 Einfluss der einzelnen COC-Komponenten auf die Veränderung der COC/ASK auf frequenzreduzierten Strecken in 2040 für exemplarisch gewählte Ansätze relativ zum Referenzszenario 147

5.16 Relative und absolute Änderung der Kapitalkosten OC_{Kap} für sämtliche Frequenzregulierungsansätze auf den frequenzreduzierten Strecken im Vergleich zum Referenzszenario 148

5.17 Kabinendraufsicht der *B757-300* in beispielhafter *Economy*-Bestuhlung (Boeing, 2002) 151

5.18 Frequenzen und Zielflugzeuggrößen auf den höchstfrequentierten Strecken von 2019 bis 2040 bei Verfügbarkeit eines NMA ab 2030 . 152

5.19 Frequenzen und Zielflugzeuggrößen auf den frequenzreduzierten Strecken im Juli 2040 bei Verfügbarkeit eines NMA (oben) und eines LASR (unten) ab 2030 (jeder Datenpunkt entspricht beiden Richtungen einer Strecke, schraffierte große Markierungen stellen die Gesamtdurchschnitte dar) 153

5.20 Änderung der Anzahl Flüge und der durchschnittlichen ATFM-Verspätung im EUROCONTROL-Raum bei Verfügbarkeit eines NMA (oben) und eines LASR (unten) ab 2030 relativ zum Referenzszenario 154

5.21 Änderung der (gewichteten) Netto-Reisezeit in Passagierminuten im EUROCONTROL-Raum und kumulierte Werte für 2040 bei Verfügbarkeit eines NMA (oben) und eines LASR (unten) ab 2030 im Vergleich zum Referenzszenario 155

5.22 Abweichung der Flottensitzplatzkapazität (die Summe der Sitzplätze über sämtliche Flugzeuge) auf den frequenzreduzierten Strecken von 2019 bis 2040 bei Verfügbarkeit eines NMA (links) und eines LASR (rechts) ab 2030 relativ zum Referenzszenario (abweichende Achsenskalierungen beachten) 156

5.23 Zusätzlich oder weniger eingesetzte Anzahl Flugzeugtypen (aufsteigend nach Größe sortiert) von 2019 bis 2040 zur Bedienung des Flugplans der höchstfrequentierten Strecken bei Verfügbarkeit eines NMA (oben) und eines LASR (unten) ab 2030 relativ zum Referenzszenario (zwecks Übersichtlichkeit sind nur Veränderungen $\geq$ / $\leq \pm 15$ bzw. ± 25 gezeigt) 157

5.24 Änderung der COC/ASK und des FC/ASK auf frequenzreduzierten Strecken bei Verfügbarkeit eines NMA (oben) und eines LASR (unten) ab 2030 relativ zum Referenzszenario 158

5.25 Einfluss der einzelnen COC-Komponenten auf die Veränderung der COC/ASK auf frequenzreduzierten Strecken in 2040 für exemplarisch gewählte Ansätze bei Verfügbarkeit eines NMA (oben) und eines LASR (unten) ab 2030 relativ zum Referenzszenario 159

5.26 Relative und absolute Änderung der Kapitalkosten OC_{Kap} für sämtliche Frequenzregulierungsansätze auf den frequenzreduzierten Strecken bei Verfügbarkeit eines NMA (links) und eines LASR (rechts) ab 2030 im Vergleich zum Referenzszenario (abweichende Achsenskalierungen beachten) 160

5.27 Änderung der (gewichteten) Netto-Reisezeit in Passagierminuten im EUROCONTROL-Raum und kumulierte Werte für 2040 für unterschiedliche Werte von d für *GFK* und *PG* relativ zum Referenzszenario (abweichende Achsenskalierung beachten) 162

5.28 Frequenzen und Zielflugzeuggrößen auf den frequenzreduzierten Strecken für PG und unterschiedliche Werte von d im Juli 2040 (jeder Datenpunkt entspricht einer Strecke, große schraffierte Markierungen stellen die Gesamtdurchschnittswerte dar) 163

5.29 Abweichung der Flottensitzplatzkapazität (die Summe der Sitzplätze über sämtliche Flugzeuge) auf den höchstfrequentierten Strecken mit GFK (links) sowie PG (rechts) bei unterschiedlichen zulässigen Abweichungen von der Zielsitzplatzkapazität dsc sowie dem Standardfall mit $dsc = 1\%$ relativ zum Referenzszenario (abweichende Achsenskalierungen beachten) 164

5.30 Zusätzlich oder weniger eingesetzte Anzahl Flugzeugtypen (aufsteigend nach Größe sortiert) von 2019 bis 2040 zur Bedienung des Flugplans der höchstfrequentierten Strecken für GFK (oben) und PG (unten) für $dsc = 1\%$ (hellgrau) und $dsc = 20\%$ (dunkelgrau) relativ zum Referenzszenario 165

5.31 Änderung der COC/ASK und des FC/ASK auf frequenzreduzierten Strecken für GFK und PG und mit $dsc = 20\%$ relativ zum Referenzszenario 166

5.32 Einfluss der einzelnen COC-Komponenten auf die Veränderung der COC/ASK auf frequenzreduzierten Strecken in 2040 für GFK und PG mit $FPI = 5\%$ und $FPI = 10\%$ relativ zum Referenzszenario . 167

5.33 Änderung der COC/ASK und des FC/ASK auf frequenzreduzierten Strecken für GFK und PG mit $FPI = 10\%$ relativ zum Referenzszenario 169

5.34 Vergleich der untersuchten Ansätze bezüglich der Veränderung der DOC sowie der ATFM-Verspätungskosten in 2040 gemäß Tabelle 5.5 172

5.35 Vergleich der untersuchten Ansätze bezüglich der aufsummierten Kostenveränderungen in 2040 aus rechter Spalte von Tabelle 5.5 sowie ihrer qualitativen Simplizität gemäß Tabelle 3.2 173

D.1 Frequenzen und Zielflugzeuggrößen für Ansätze mit Kompensation auf den höchstfrequentierten Strecken von 2019 bis 2040 195

D.2 Frequenzen und Zielflugzeuggrößen für Ansätze mit Kompensation und bei Angleichung der Flugzeuggröße auf den höchstfrequentierten Strecken von 2019 bis 2040 196

D.3 Frequenzen und Zielflugzeuggrößen auf frequenzreduzierten Strecken bei Angleichung der Flugzeuggröße im Juli 2040 (jeder Datenpunkt entspricht beiden Richtungen einer Strecke; große schraffierte Markierungen stellen die Gesamtdurchschnittswerte dar) 197

D.4 Frequenzen und Zielflugzeuggrößen auf frequenzreduzierten Strecken für Ansätze mit Kompensation und bei Angleichung der Flugzeuggröße im Juli 2040 (jeder Datenpunkt entspricht beiden Richtungen einer Strecke; große schraffierte Markierungen stellen die Gesamtdurchschnittswerte dar) 198

D.5 Änderung der Anzahl der Flüge und der durchschnittlichen ATFM-Verspätung im EUROCONTROL-Raum für Ansätze mit Kompensation und bei Angleichung der Flugzeuggröße relativ zum Referenzszenario 199

D.6 Änderung der (gewichteten) Netto-Reisezeit in Passagierminuten im EUROCONTROL-Raum und kumulierte Werte für 2040 bei Angleichung der Flugzeuggröße relativ zum Referenzszenario 200

D.7 Änderung der (gewichteten) Netto-Reisezeit in Passagierminuten im EUROCONTROL-Raum und kumulierte Werte für 2040 für Ansätze mit Kompensation und bei Angleichung der Flugzeuggröße relativ zum Referenzszenario 201

D.8 Zusätzlich oder weniger eingesetzte Anzahl Flugzeugtypen (aufsteigend nach Größe sortiert) von 2019 bis 2040 zur Bedienung des Flugplans der höchstfrequentierten Strecken für die Ansätze *MS* sowie *MSK* mit und ohne Angleichung relativ zum Referenzszenario (zwecks Übersichtlichkeit sind nur Veränderungen $\geq$ / $\leq \pm 15$ gezeigt) 202

D.9 Zusätzlich oder weniger eingesetzte Anzahl Flugzeugtypen (aufsteigend nach Größe sortiert) von 2019 bis 2040 zur Bedienung des Flugplans der höchstfrequentierten Strecken für die Ansätze *MA* sowie *MAK* mit und ohne Angleichung relativ zum Referenzszenario 203

D.10 Änderung der COC/ASK und des FC/ASK auf frequenzreduzierten Strecken für die Ansätze *MS* sowie *MSK* mit und ohne Angleichung der Flugzeuggröße relativ zum Referenzszenario 204

D.11 Änderung der COC/ASK und des FC/ASK auf frequenzreduzierten Strecken für die Ansätze *MA* sowie *MAK* mit und ohne Angleichung der Flugzeuggröße relativ zum Referenzszenario 205

D.12 Frequenzen und Zielflugzeuggrößen auf den höchstfrequentierten Strecken von 2019 bis 2040 bei Verfügbarkeit eines LASR ab 2030 . 206

Tabellenverzeichnis

1.1 Parameter und primär eingenommene Perspektive, nach denen die jeweilige Bewertungsdimension untersucht wird 6

2.1 Übersicht der primär durch die Literatur abgedeckten Bewertungsdimensionen jedes Abschnitts in diesem Kapitel 7

2.2 Literatur zu den Wechselbeziehungen von Frequenz und untersuchte Dimensionen in alphabetischer Reihenfolge 8

2.3 Literatur zu den Skaleneffekten von Flugzeuggröße und untersuchte Dimensionen in alphabetischer Reihenfolge 15

2.4 Ökonomisch-ökologische Ergebnisse der Missionsanalysen auf Sitzplatzebene von Kenway et al. (2010) zum Einsatz eines LASR . . . 17

2.5 Literatur zu Kapazitätsmanagement im Luftverkehr und untersuchte Dimensionen getrennt nach der primär regulierten Luftverkehrsinfrastruktur sowie dem Regulierungsprinzip 25

2.6 Kompatibilitätskriterien für Regularien zum Kapazitätsmanagement an Flughäfen nach Madas und Zografos (2008), die Anwendung dieses Schemas auf Frequenzregulierung findet in Tabelle 5.7 statt 27

3.1 Erfüllung der Kriterien zur Wirkungsmodellierung in FRED nach Liedtke et al. (2020) 39

3.2 Frequenzregulierungsansätze mit qualitativer Berücksichtigung der regulatorischen Ziele Konnektivität, Überlastung, Emissionen/Kosten und Simplizität innerhalb ihrer Methodik (– – geringe bis ++ hohe Merkmalsausprägung) 59

4.1 Durchschnittliches jährliches Wachstum von Verkehrsdaten basierend auf EUROCONTROL (2018b) 106

4.2 Regressionsparameter und Bestimmtheitsmaß R^2 für untersuchte Jahre zur Messung der durchschnittlichen ATFM-Verspätung; zur Auflösung der Unterschiede zwischen einzelnen Flügen wurde bis auf acht Nachkommastellen gerundet 110

4.3 Nicht-flugzeugtypspezifische Parameter zur Berechnung der COC, DOC und der Ausnutzung eines Flugzeugs in Form von Flugstunden 111

4.4 Eingangswerte, Art der Verifizierung und durchschnittliche Abweichung 112

4.5 Validierung der absoluten COC/ASK und des absoluten FC/ASK . 119

5.1 Übersicht der primär betrachteten Bewertungsdimensionen jedes Abschnitts in diesem Kapitel 121

5.2 Frequenzregulierungsansätze mit Kodierung (N: Nein; J: Ja) 122

5.3 Untersuchte neue Flugzeugentwürfe mit einem angenommenen EIS in 2030 sowie verwendete Parameteranpassungen und Quellen . . . 150

5.4 Übersicht der für Sensitivitätsanalysen gewählten Parameter und Variationsbreite 161

5.5 Veränderung der Airline-relevanten Bewertungsdimensionen jedes Ansatzes gegenüber dem Referenzszenario anhand der Gesamtjahreswerte für 2040 sowie mit Umrechnung in monetäre Einheiten (*Reflektiert nur Kosten, die durch potenzielle CO_2-Kompensationsmaßnahmen zusätzlich entstehen, reguläre Kerosinkosten OC_{Kero} sind in den COC enthalten) 171

5.6 Veränderung der ungewichteten $d = 1$ und gewichteten $d = 2$ (bzw. $d = 1{,}2$) Netto-Reisezeit gegenüber dem Referenzszenario anhand der Gesamtjahreswerte für 2040 (ein negativer Wert zeigt eine subjektive Reisezeitverkürzung an) 174

5.7 Kompatibilitätsprüfung von Frequenzregulierung, adaptiert von Madas und Zografos (2008) in Tabelle 2.6 (– – geringe bis ++ hohe Erfüllung des Kriteriums) 175

A.1 Verwendete Flugzeugtypen und wesentliche Parameter (CIRIUM (2019) und Sabre Airline Solutions (2019) für *Single-Aisle*-Flugzeuge sowie Airbus (2019b, 2019c) und Boeing (1998, 2005, 2015, 2018c) für *Twin-Aisle*-Flugzeuge) 188

A.2 Verwendete Flugzeugtypen in alphabetischer Reihenfolge mit Regressionsparametern zur Schätzung des Kerosinverbrauchs aus dem TCM sowie Kerosinverbrauch beim Taxiing und Startvorgang gemäß ICAO (2019) 189

B.1 26 größte Airline-Hubs im EUROCONTROL-Raum (exklusive Istanbul) sortiert nach Anzahl Starts in 2019, durchschnittliche ATFM-Verspätung pro abgehendem Flug und tägliche Betriebsdauern (EUROCONTROL, 2019c) 191

C.1 Flüge pro Tag im EUROCONTROL-Raum von 2019 bis 2040 (EUROCONTROL, 2018f, 2019c) 193

C.2 Passagiere pro Tag im EUROCONTROL-Raum von 2019 bis 2040 (EUROCONTROL, 2018f; Sabre Airline Solutions, 2019) 193

C.3 Durchschnittliche ATFM-Verspätung pro Flug [min] im EURO-CONTROL-Raum von 2019 bis 2040 (EUROCONTROL, 2018b, 2019c) 194

Literaturverzeichnis

Abate, M., Christidis, P., & Purwanto, A. J. (2020). Government support to airlines in the aftermath of the COVID-19 pandemic. *Journal of Air Transport Management*, *89*. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101931

Abrahams, M. (1983). A service quality model of air travel demand: An empirical study [PII: 0191260783900079]. *Transportation Research Part A: General*, *17*(5), 385–393. https://doi.org/10.1016/0191-2607(83)90007-9

ACI Europe (Hrsg.). (2020). ACI EUROPE calls for integrated approach between airports and Air Traffic Management PRESS RELEASE. Verfügbar 15. Juni 2021 unter https://www.aci-europe.org/media-room/236-aci-europe-calls-for-integrated-approach-between-airports-and-air-traffic-management.html

Adler, T., Falzarano, C. S., & Spitz, G. (2005). Modeling Service Trade-Offs in Air Itinerary Choices. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *1915*(1), 20–26. https://doi.org/10.1177/0361198105191500103

aero.de Luftfahrtnachrichten. (2020a). *Airbus-Klausel blockiert Durchbruch bei Lufthansa-Rettung*. Verfügbar 13. Januar 2021 unter https://www.aero.de/news-35519/Lufthansa-soll-alle-Airbus-Auftraege-erfuellen.html

aero.de Luftfahrtnachrichten. (2020b). *Airlines hoffen auf Förderung für Flottenerneuerung*. Verfügbar 15. Dezember 2020 unter https://www.aero.de/news-37952/Airlines-hoffen-auf-Foerderung-fuer-Flottenerneuerung.html

Airbus. (2018). Global Market Forecast: Global Networks, Global Citizens [2018-2037]. https://www.airbus.com/content/dam/corporate-topics/strategy/global-market-forecast/GMF-2019-2038-Airbus-Commercial-Aircraft-book.pdf

Airbus. (2019a). A320 Aircraft Characteristics Airport and Maintenance Planning. *Airbus S.A.S.*

Airbus. (2019b). A330 Aircraft Characteristics Airport and Maintenance Planning. *Airbus S.A.S.*

Airbus. (2019c). A350 Aircraft Characteristics Airport and Maintenance Planning. *Airbus S.A.S.*

Airbus. (2020). *Airbus plans to further adapt to COVID-19 environment*. Airbus S.A.S. Verfügbar 19. November 2020 unter https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2020/06/airbus-plans-to-further-adapt-to-covid19-environment.html

Aircraft Commerce. (2003). The difference in unit cost performance of low-cost & major airlines.

Albers, S., & Rundshagen, V. (2020). European airlines' strategic responses to the COVID-19 pandemic (January-May, 2020). *Journal of Air Transport Management*, *87*. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101863

Azzam, M., Bonnefoy, P., & Hansman, R. J. (2010). Investigation of the Fuel Efficiency of the U.S. Air Transportation Network Structure. *10th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*. https://doi.org/10.2514/6.2010-9331

Ball, M. O., Barnhart, C., Dresner, M., Hansen, M., Neels, K., Odoni, A. R., Peterson, E., Sherry, L., Trani, A., & Zou, B. (2010). Total Delay Impact Study: A Comprehensive Assessment of the Costs and Impacts of Flight Delay in the United States [Final Report]. *NEXTOR - The National Center of Excellence For Aviation Operations Research*.

Barnhart, C., Belobaba, P., & Odoni, A. R. (2003). Applications of Operations Research in the Air Transport Industry. *Transportation Science*, *37*(4), 368–391. https://doi.org/10.1287/trsc.37.4.368.23276

Barnhart, C., Fearing, D., Odoni, A., & Vaze, V. (2012). Demand and capacity management in air transportation [PII: 6]. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, *1*(1-2), 135–155. https://doi.org/10.1007/s13676-012-0006-9

Barnhart, C., Kniker, T. S., & Lohatepanont, M. (2002). Itinerary-Based Airline Fleet Assignment. *Transportation Science*, *36*(2), 199–217. https://doi.org/10.1287/trsc.36.2.199.566

Belobaba, P., Odoni, A. R., & Barnhart, C. (2009). *The global airline industry* [Belobaba, Peter (Hrsg.)]. Wiley.

Berling, J., Lau, A., & Gollnick, V. (2017). European Air Traffic Flow Management with Strategic Deconfliction. In K. F. Dörner, I. Ljubic, G. Pflug & G. Tragler (Hrsg.), *Operations Research Proceedings 2015* (S. 279–286). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42902-1_38

Berster, P., Gelhausen, M. C., & Wilken, D. (2015). Is increasing aircraft size common practice of airlines at congested airports? [PII: S096969971500040X]. *Journal of Air Transport Management*, *46*, 40–48. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2015.03.012

Billette de Villemeur, E. (2004). Regulation in the air: price-and-frequency caps [PII: S1366554504000560]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *40*(6), 465–476. https://doi.org/10.1016/j.tre.2004.08.005

BMWI. (2020). *EU-Kommission genehmigt Stabilisierungspaket für die Lufthansa* [Pressemitteilung]. Verfügbar 13. Januar 2021 unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2020/20200625-eu-kommission-genehmigt-stabilisierungspaket-fuer-die-lufthansa.html

Boeing. (1998). 777-200/300 Airplane Characteristics for Airport Planning. *Boeing Commercial Airplanes*.

Boeing. (2002). 757-200/300 Airplane Characteristics for Airport Planning. *Boeing Commercial Airplanes*.

Boeing. (2005). 767 Airplane Characteristics for Airport Planning. *Boeing Commercial Airplanes*.

Boeing. (2015). 787 Airplane Characteristics for Airport Planning. *Boeing Commercial Airplanes*.

Boeing. (2018a). 777X Airplane Characteristics for Airport Planning. *Boeing Commercial Airplanes*.

Boeing. (2018b). 787 Airplane Characteristics for Airport Planning. *Boeing Commercial Airplanes*.

Boeing. (2018c). Commercial Market Outlook: 2018-2037.

Boeing. (2019). 737 MAX Airplane Characteristics for Airport Planning. *Boeing Commercial Airplanes*.

Boeing. (2020). 737 Airplane Characteristics for Airport Planning. *Boeing Commercial Airplanes*.

Bolić, T., Castelli, L., Corolli, L., & Rigonat, D. (2017). Reducing ATFM delays through strategic flight planning [PII: S1366554516305427]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *98*, 42–59. https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.12.001

Brey, R., & Walker, J. L. (2011). Latent temporal preferences: An application to airline travel [PII: S0965856411000681]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *45*(9), 880–895. https://doi.org/10.1016/j.tra.2011.04.010

Brooke, A. S., Caves, R. E., & Pitfield, D. E. (1994). Methodology for predicting European short-haul air transport demand from regional airports [PII: 0969699794900299]. *Journal of Air Transport Management*, *1*(1), 37–46. https://doi.org/10.1016/0969-6997(94)90029-9

Brueckner, J. K. (2002a). Airport Congestion When Carriers Have Market Power. *American Economic Review*, *92*(5), 1357–1375. https://doi.org/10.1257/000282802762024548

Brueckner, J. K. (2002b). Internalization of airport congestion: A network analysis: CESIFO Working Paper No. 756 [PII: S016771870500072X], *23*(7-8), 599–614.

Brueckner, J. K. (2004). Network Structure and Airline Scheduling. *Journal of Industrial Economics*, *52*(2), 291–312. https://doi.org/10.1111/j.0022-1821.2004.00227.x

Brueckner, J. K. (2009). Price vs. quantity-based approaches to airport congestion management [PII: S0047272709000097]. *Journal of Public Economics*, *93*(5-6), 681–690. https://doi.org/10.1016/j.jpubeco.2009.02.009

Brueckner, J. K., & Flores-Fillol, R. (2007). Airline Schedule Competition [PII: 9140]. *Review of Industrial Organization*, *30*(3), 161–177. https://doi.org/10.1007/s11151-007-9140-1

Brueckner, J. K., & Girvin, R. (2008). Airport noise regulation, airline service quality, and social welfare [PII: S0191261507000562]. *Transportation Research*

Part B: Methodological, *42*(1), 19–37. https://doi.org/10.1016/j.trb.2007.05.005

Brüggen, A., & Klose, L. (2010). How fleet commonality influences low-cost airline operating performance: Empirical evidence [PII: S0969699710000293]. *Journal of Air Transport Management*, *16*(6), 299–303. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2010.02.006

Burghouwt, G., & de Wit, J. (2005). Temporal configurations of European airline networks [PII: S0969699704000559]. *Journal of Air Transport Management*, *11*(3), 185–198. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2004.08.003

Button, K., & Drexler, J. (2005). Recovering Costs by Increasing Market Share: An Empirical Critique of the S-Curve. *Journal of Transport Economics and Policy*, *39*.

CIRIUM. (2019). *FleetsAnalyzer: Commercial Database*. LexisNexis Risk Solutions.

Clark, P. (2017). *Buying the big jets: Fleet planning for airlines* (Third edition). Routledge.

Cook, A., & Tanner, G. (2015). European airline delay cost reference values: Updated and extended values. *University of Westminster*.

Deutsche Bahn AG. (2015). Perspektiven: Der neue Fernverkehr - mehr grüne Mobilität, bessere Anbindung, höherer Komfort (Deutsche Bahn AG, Hrsg.).

Deutsche Bahn AG. (2019). *Mehr neue Züge, mehr Fahrten – und so preiswert wie nie: Pressemitteilung*. Verfügbar 27. Januar 2021 unter https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart_zentrales_uebersicht/Mehr-neue-Zuege-mehr-Fahrten-und-so-preiswert-wie-nie-4635722

Deutsche Welle. (2020). *Lufthansa mulls options as Air France state aid strings revealed*. Verfügbar 2. Februar 2021 unter https://www.dw.com/en/lufthansa-mulls-options-as-air-france-state-aid-strings-revealed/a-53325173

Doganis, R. S. (2019). *Flying off course: Airline economics and marketing* (5th Edition). Routledge.

Douglas, G. W., & Miller, J. C. (1974). *Economic Regulation of Domestic Air Transport: Theory and Policy* (Bd. 10).

Dray, L. (2013). An analysis of the impact of aircraft lifecycles on aviation emissions mitigation policies [PII: S0969699712001652]. *Journal of Air Transport Management*, *28*, 62–69. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2012.12.012

Dray, L. (2014). Time constants in aviation infrastructure [PII: S0967070X1400047X]. *Transport Policy*, *34*, 29–35. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.02.016

Dray, L., Evans, A., Reynolds, T., Schäfer, A. W., Vera-Morales, M., & Bosbach, W. (2014). Airline fleet replacement funded by a carbon tax: An integrated assessment [PII: S0967070X14000523]. *Transport Policy*, *34*, 75–84. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.02.021

Dzikus, N. M., Bartosch, S., & Schaefer, M. (2015). The Impact of Mitigation Measures for System Capacity Constraints on the Future Air Transportation System. https://doi.org/10.2514/6.2015-3404

EASA. (2015). Large Aeroplane Evacuation Certification Requirements – Cabin Crew Members Assumed to be On Board: Notification of a Proposal to issue a Certification Memorandum [EASA Proposed CM No.: Proposed CM–CS-008 Issue 01 issued 16 September 2015].

EASA. (2018). Easy Access Rules for Large Aeroplanes (CS-25) (Initial issue).

EEA, EASA, EUROCONTROL. (2020). European Aviation Environmental Report 2019. https://doi.org/10.2822/309946

Eriksson, L., Garvill, J., & Nordlund, A. M. (2006). Acceptability of travel demand management measures: The importance of problem awareness, personal norm, freedom, and fairness [PII: S0272494406000260]. *Journal of Environmental Psychology*, *26*(1), 15–26. https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2006.05.003

Eriksson, L., Garvill, J., & Nordlund, A. M. (2008). Acceptability of single and combined transport policy measures: The importance of environmental and policy specific beliefs [PII: S0965856408000827]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *42*(8), 1117–1128. https://doi.org/10.1016/j.tra.2008.03.006

EUROCONTROL. (2002a). Performance Review Report (PRR 5): An Assessment of Air Traffic Management in Europe during the Calendar Year 2001. *EUROCONTROL*.

EUROCONTROL. (2002b). Performance Review Report (PRR 5): Annexes. *EUROCONTROL*.

EUROCONTROL. (2016). *User Driven Prioritisation Process*. EUROCONTROL. Verfügbar 22. März 2021 unter https://ext.eurocontrol.int/lexicon/index.php/User_Driven_Prioritisation_Process

EUROCONTROL. (2018a). CODA Digest Q3 2018: All-Causes Delay and Cancellations to Air Transport - Q3 2018. *EUROCONTROL*.

EUROCONTROL. (2018b). European Aviation in 2040 - Challenges of Growth. *EUROCONTROL*.

EUROCONTROL. (2018c). European Aviation in 2040 - Challenges of Growth: Annex 2 Adapting Aviation to a Changing Climate. *EUROCONTROL*.

EUROCONTROL. (2018d). European Aviation in 2040 - Challenges of Growth: Annex 4 Network Congestion. *EUROCONTROL*.

EUROCONTROL. (2018e). European Aviation in 2040 - Challenges of Growth: Annex 3 Mitigation Measures. *EUROCONTROL*.

EUROCONTROL. (2018f). European Aviation in 2040 - Challenges of Growth: Annex 1 Flight Forecast to 2040. *EUROCONTROL*.

EUROCONTROL. (2018g). Standard Inputs for EUROCONTROL Cost-Benefit Analyses. *EUROCONTROL*.

EUROCONTROL. (2019a). *ATFM delay*. EUROCONTROL. Verfügbar 29. März 2019 unter https://ext.eurocontrol.int/lexicon/index.php/ATFM_delay

EUROCONTROL. (2019b). *Base of Aircraft Data (BADA): Aircraft Performance Model* (4.1). EUROCONTROL.

EUROCONTROL. (2019c). *CODA ATFM Delay Database*. EUROCONTROL.

EUROCONTROL. (2019d). *Taxi Times Winter 2018/2019 and Summer 2019*. EUROCONTROL. Verfügbar 22. Februar 2021 unter https://www.eurocontrol.int/library?keywords=taxi%20times&sort_by=search_api_relevance

EUROCONTROL. (2020a). *Network Operations: Powered by the Network Manager Operations Centre*. EUROCONTROL. Verfügbar 8. Dezember 2020 unter https://www.eurocontrol.int/network-operations

EUROCONTROL. (2020b). PRR 2019: Performance Review Report 2019 [An Assessment of Air Traffic Management in Europe during the Calendar Year 2019]. *EUROCONTROL*.

EUROCONTROL. (2021a). *Airport Arrival ATFM Delay Dataset*. EUROCONTROL. Verfügbar 11. Januar 2021 unter https://ansperformance.eu/reference/dataset/airport-arrival-atfm-delay/

EUROCONTROL. (2021b). *En-Route ATFM Delay Dataset (FIR)*. EUROCONTROL. Verfügbar 11. Januar 2021 unter https://ansperformance.eu/reference/dataset/en-route-atfm-delay-fir/

European Commission. (2011). Flightpath 2050: Europe's vision for aviation ; maintaining global leadership and serving society's needs ; report of the High-Level Group on Aviation Research. *European Commission*.

European Commission. (2020). Assessment of ICAO's global market-based measure (CORSIA) pursuant to Article 28b and for studying cost passthrough pursuant to Article 3d of the EU ETS Directive (Directorate-General for Climate Action, Hrsg.). *European Commission*.

Evans, A., & Schäfer, A. (2011). The impact of airport capacity constraints on future growth in the US air transportation system [PII: S0969699711000470]. *Journal of Air Transport Management*, *17*(5), 288–295. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2011.03.004

Evans, A., & Schäfer, A. W. (2014). Simulating airline operational responses to airport capacity constraints [PII: S0967070X14000444]. *Transport Policy*, *34*, 5–13. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.02.013

FAA and EUROCONTROL. (2019). U.S. - Europe comparison of Air Traffic Management related operational performance. *On behalf of the European Union*.

Fan, T. P., & Odoni, A. R. (2002). A Practical Perspective on Airport Demand Management. *Air Traffic Control Quarterly*, *10*(3), 285–306. https://doi.org/10.2514/atcq.10.3.285

flightglobal.com. (2019). *Airbus stops publishing aircraft list-price data*. Verfügbar 9. Februar 2021 unter https://www.flightglobal.com/programmes/airbus-stops-publishing-aircraft-list-price-data/133395.article

Flores-Fillol, R. (2010). Congested hubs [PII: S0191261509001210]. *Transportation Research Part B: Methodological*, *44*(3), 358–370. https://doi.org/10.1016/j.trb.2009.10.004

Forbes. (2020). *Air France-KLM Uneasy With French Government's 'Good Airbus Customer' Mandate For Coronavirus Aid*. Verfügbar 2. Februar 2021 unter https://www.forbes.com/sites/willhorton1/2020/05/09/air-france-klm-uneasy-with-governments-good-airbus-customer-mandate-for-coronavirus-state-aid/?sh=11da3cd81669

Frändberg, L., & Vilhelmson, B. (2011). More or less travel: personal mobility trends in the Swedish population focusing gender and cohort [PII: S0966692311000974]. *Journal of Transport Geography*, *19*(6), 1235–1244. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2011.06.004

Fuchte, J., Dzikus, N. M., Nagel, B., & Gollnick, V. (2011). Cabin Design for Minimum Boarding Time. *German Aeronoutics and Astronoutics Conference*.

Fuchte, J., Nagel, B., & Gollnick, V. (2012). Twin Aisle Aircraft for Short Range Operations - An Economically Attractive Alternative? *AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference and 14th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference*. https://doi.org/10.2514/6.2012-5408

Fukui, H. (2012). Do carriers abuse the slot system to inhibit airport capacity usage? Evidence from the US experience [PII: S0969699712000725]. *Journal of Air Transport Management*, *24*, 1–6. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2012.04.001

Gathon, H.-J., & Pestieau, P. (1995). Decomposing efficiency into its managerial and its regulatory components: The case of European railways [PII: 037722179400133W]. *European Journal of Operational Research*, *80*(3), 500–507. https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00133-W

Gelhausen, M. C., Berster, P., & Wilken, D. (2019). *Airport Capacity Constraints and Strategies for Mitigation: A Global Perspective*. Elsevier.

Gillen, D., Jacquillat, A., & Odoni, A. R. (2016). Airport demand management: The operations research and economics perspectives and potential synergies [PII: S0965856415302640]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *94*, 495–513. https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.10.011

Givoni, M., & Rietveld, P. (2009). Airline's choice of aircraft size – Explanations and implications [PII: S0965856409000147]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *43*(5), 500–510. https://doi.org/10.1016/j.tra.2009.01.001

Givoni, M., & Rietveld, P. (2010). The environmental implications of airlines' choice of aircraft size [PII: S0969699709000519]. *Journal of Air Transport Management*, *16*(3), 159–167. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2009.07.010

Gollnick, V. (2014). Stagnation der Luftfahrt - Chancen und Konsequenzen: 3. Symposium Lufttransport der Zukunft, Weniger Wachstum mehr Innovation, Chancen für KMU. *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.*

Gollnick, V. (2020a). *Luftfahrzeugentwurf 1: 3. Kapitel - Rumpf und Kabine - Wintersemester 2020/2021* [Vorlesungsunterlagen]. Technische Universität Hamburg [Institut für Lufttransportsysteme].

Gollnick, V. (2020b). *Luftfahrzeugentwurf 1: Kapitel 4 - Aerodynamik - Wintersemester 2020/2021* [Vorlesungsunterlagen]. Technische Universität Hamburg [Institut für Lufttransportsysteme].

Gosling, G., & Hansen, M. (2001). Prospects for Increasing Average Aircraft Size at Congested Airports. *Transportation Research Record 1744*, (01-3024).

Gössling, S., Broderick, J., Upham, P., Ceron, J.-P., Dubois, G., Peeters, P., & Strasdas, W. (2007). Voluntary Carbon Offsetting Schemes for Aviation: Efficiency, Credibility and Sustainable Tourism. *Journal of Sustainable Tourism*, *15*(3), 223–248. https://doi.org/10.2167/jost758.0

Gössling, S., Hanna, P., Higham, J., Cohen, S., & Hopkins, D. (2019). Can we fly less? Evaluating the 'necessity' of air travel [PII: S0969699719303229]. *Journal of Air Transport Management*, *81*, 101722. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2019.101722

Graham, W. R., Hall, C. A., & Vera Morales, M. (2014). The potential of future aircraft technology for noise and pollutant emissions reduction [PII: S0967070X14000481]. *Transport Policy*, *34*, 36–51. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.02.017

Hansen, M. (2002). Micro-level analysis of airport delay externalities using deterministic queuing models: a case study [PII: S096969970100045X]. *Journal of Air Transport Management*, *8*(2), 73–87. https://doi.org/10.1016/S0969-6997(01)00045-X

Hansen, M., Gosling, G., Margulici, J.-D., & Wei, W. (2001). Influence of Capacity Constraints on Airline Fleet Mix [Research Report]. *UC Berkeley*. https://escholarship.org/uc/item/965114nc

Hansen, M., & Liu, Y. (2015). Airline competition and market frequency: A comparison of the s-curve and schedule delay models [PII: S0191261515000946]. *Transportation Research Part B: Methodological*, *78*, 301–317. https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.04.012

Harvey, G. (1987). Airport choice in a multiple airport region [PII: 0191260787900331]. *Transportation Research Part A: General*, *21*(6), 439–449. https://doi.org/10.1016/0191-2607(87)90033-1

Henderson, R. P., Martins, J. R. R. A., & Perez, R. E. (2012). Aircraft conceptual design for optimal environmental performance [PII: S000192400000659X]. *The Aeronautical Journal*, *116*(1175), 1–22. https://doi.org/10.1017/S000192400000659X

Hirschi, C., Schenkel, W., & Widmer, T. (2002). Designing sustainable transportation policy for acceptance: a comparison of Germany, the Netherlands and Switzerland. https://doi.org/10.5167/UZH-157758

Hisschemöller, M., & Hoppe, R. (1995). Coping with intractable controversies: The case for problem structuring in policy design and analysis [PII: BF02832229]. *Knowledge and Policy*, *8*(4), 40–60. https://doi.org/10.1007/BF02832229

Hsiao, C.-Y., & Hansen, M. (2011). A passenger demand model for air transportation in a hub-and-spoke network [PII: S1366554511000718]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *47*(6), 1112–1125. https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.05.012

Humphreys, I., & Francis, G. (2002). Policy issues and planning of UK regional airports [PII: S0966692302000406]. *Journal of Transport Geography*, *10*(4), 249–258. https://doi.org/10.1016/S0966-6923(02)00040-6

Husemann, M., Schäfer, K., & Stumpf, E. (2018). Flexibility within flight operations as an evaluation criterion for preliminary aircraft design [PII: S0969699718301431]. *Journal of Air Transport Management*, *71*, 201–214. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2018.04.007

IATA. (2020a). COVID-19: Outlook for air transport and the airline industry. *International Air Transport Association*. Verfügbar 19. Februar 2021 unter https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/covid-19-outlook-for-air-travel-in-the-next-5-years/

IATA. (2020b). Worldwide Airport Slot Guidelines (WASG). *International Air Transport Association*.

ICAO. (2019). *Aircraft Engine Emissions Databank*. International Civil Aviation Organization. Verfügbar 11. August 2020 unter https://www.icao.int/environmental-protection/pages/modelling-and-databases.aspx

ICAO. (2021). Effects of Novel Coronavirus (COVID-19) on Civil Aviation: Economic Impact Analysis. *International Civil Aviation Organization*.

ICCT. (2020). CO2 emissions from commercial aviation: 2013, 2018, and 2019. *The International Council on Clean Transportation*.

ILR Aachen. (2016). *CeRAS - Central Reference Aircraft Data System: DOC Tool*. Institut für Luft- und Raumfahrtsysteme RWTH Aachen University. Verfügbar 9. Februar 2021 unter http://ceras.ilr.rwth-aachen.de/trac/wiki/CeRAS/ToolsAndMethodologies/DOC

Ivanov, N., Netjasov, F., Jovanović, R., Starita, S., & Strauss, A. (2017). Air Traffic Flow Management slot allocation to minimize propagated delay and improve airport slot adherence [PII: S0965856416300052]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *95*, 183–197. https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.11.010

Jimenez, H., Pfänder, H., & Mavris, D. (2010). Environmental Tradeoff Analysis of Operational Concepts. *27th International Congress of the Aeronautical Sciences*.

Jovanović, R., Tošić, V., Čangalović, M., & Stanojević, M. (2014). Anticipatory modulation of air navigation charges to balance the use of airspace network capacities [PII: S0965856414000068]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *61*, 84–99. https://doi.org/10.1016/j.tra.2014.01.005

Kenway, G., Henderson, R., Hicken, J., Kuntawala, N., Zingg, D., Martins, J., & McKeand, R. (2010). Reducing Aviation's Environmental Impact Through Large Aircraft for Short Ranges, 639. https://doi.org/10.2514/6.2010-1015

Kölker, K., Bießlich, P., & Lütjens, K. (2016). From passenger growth to aircraft movements [PII: S0969699716301636]. *Journal of Air Transport Management*, *56*, 99–106. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.04.021

Landau, S., Gosling, G. D., Small, K., & 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. https://doi.org/10.3141/2569-03

Larsson, J., Elofsson, A., Sterner, T., & Åkerman, J. (2019). International and national climate policies for aviation: a review. *Climate Policy*, *19*(6), 787–799. https://doi.org/10.1080/14693062.2018.1562871

Lau, A., Berling, J., Linke, F., Gollnick, V., & Nachtigall, K. (2015). Large-Scale Network Slot Allocation with Dynamic Time Horizons. *Eleventh USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2015)*.

Lau, A., Budde, R., Berlin, J., & Gollnick, V. (2014). The Network Flow Environment: Slot Allocation Model Evaluation with Convective Nowcasting. *29th International Congress of the Aeronautical Sciences*.

Lee, J. J., Lukachko, S. P., Waitz, I. A., & Schafer, A. (2001). Historical and Future Trend in Aircraft Performance, Cost, and Emissions. *Annual Review of Energy and the Environment*, *26*(1), 167–200. https://doi.org/10.1146/annurev.energy.26.1.167

Liebeck, R. H., Andrastek, D. A., Chau, J., Girvin, R., Lyon, R., Rawdon, B. K., Scott, P. W., & Wright, R. A. (1995). Advanced Subsonic Airplane Design & Economic Studies. *McDonnel Douglas Aerospace for NASA*.

Liedtke, G., Lütjens, K., Piendl, R., Bahamonde Birke, F., Grimme, W., Hedemann, L., Maertens, S., O'Sullivan, M., Scheelhaase, J., Scheier, B., Viergutz, K., Schöpfer, A., Winkler, C., Frieske, B., & Österle, I. (2020). Leitfaden zur Entscheidungsfindung und Bewertung von Maßnahmen und Technologien im Verkehr: ÖKONVER - Ökonomisch fundierte Bewertung neuer Technologien und Maßnahmen im europäischen Verkehrssystem, TP 1000 Bewertungsmethoden. *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.* Verfügbar 11. Februar 2021 unter https://elib.dlr.de/140664/

Linke, F. (2015). Trajectory Calculation Module (TCM) V2.0: Software-Dokumentation. *DLR-Lufttransportsysteme*.

Linke, F. (2016). *Ökologische Analyse operationeller Lufttransportkonzepte* [Ph. D. Thesis]. Technische Universität Hamburg [Institut für Lufttransportsysteme]. Hamburg.

Liu, Y., Hansen, M., & Zou, B. (2013). Aircraft gauge differences between the US and Europe and their operational implications [PII: S0969699712001548]. *Journal of Air Transport Management*, *29*, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2012.12.001

Lohatepanont, M., & Barnhart, C. (2004). Airline Schedule Planning: Integrated Models and Algorithms for Schedule Design and Fleet Assignment. *Transportation Science*, *38*(1), 19–32. https://doi.org/10.1287/trsc.1030.0026

Madas, M. A., & Zografos, K. G. (2006). Airport slot allocation: From instruments to strategies [PII: S0969699705000724]. *Journal of Air Transport Management*, *12*(2), 53–62. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2005.08.001

Madas, M. A., & Zografos, K. G. (2008). Airport capacity vs. demand: Mismatch or mismanagement? [PII: S0965856407000717]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *42*(1), 203–226. https://doi.org/10.1016/j.tra.2007.08.002

Madas, M. A., & Zografos, K. G. (2010). Airport slot allocation: a time for change? [PII: S0967070X10000338]. *Transport Policy*, *17*(4), 274–285. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2010.02.002

Martinez-Val, R., Roa, J., Perez, E., & Cuerno, C. (2011). Effects of the Mismatch Between Design Capabilities and Actual Aircraft Utilization. *Journal of Aircraft*, *48*(6), 1921–1927. https://doi.org/10.2514/1.C031348

McKinsey&Company. (2017). A better approach to airline costs. https://www.mckinsey.com/industries/travel-logistics-and-infrastructure/our-insights/a-better-approach-to-airline-costs

Morrell, P. (2009). The potential for European aviation CO2 emissions reduction through the use of larger jet aircraft [PII: S0969699708001178]. *Journal of Air Transport Management*, *15*(4), 151–157. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2008.09.021

Niemeier, H.-M. (2002). Regulation of airports: the case of Hamburg airport—a view from the perspective of regional policy [PII: S0969699701000382]. *Journal of Air Transport Management*, *8*(1), 37–48. https://doi.org/10.1016/S0969-6997(01)00038-2

Nollau, A., & Thießen, F. (2019). Optimierung der Flugbewegungszahlen in Europa: Möglichkeiten zur Reduktion der Zahl der Flugbewegungen in Europa unter Berücksichtigung der Verbindungsgüte. *Technische Universität Chemnitz*.

Object Management Group. (2017). OMG Unified Modeling Language (OMG UML): Version 2.5.1.

Odoni, A. R. (2001). Congestion Pricing for Airports and for En Route Airspace. In L. Bianco, A. La Bella, P. Dell'Olmo & A. R. Odoni (Hrsg.), *New Concepts and Methods in Air Traffic Management* (S. 31–44, Bd. 60). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04632-6_3

Pai, V. (2010). On the factors that affect airline flight frequency and aircraft size [PII: S0969699709000775]. *Journal of Air Transport Management*, *16*(4), 169–177. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2009.08.001

Park, Y., & O'Kelly, M. E. (2014). Fuel burn rates of commercial passenger aircraft: variations by seat configuration and stage distance [PII: S0966692314001793]. *Journal of Transport Geography*, *41*, 137–147. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.08.017

Park, Y., & O'Kelly, M. E. (2018). Examination of cost-efficient aircraft fleets using empirical operation data in US aviation markets [PII: S0969699716302204]. *Journal of Air Transport Management*, *69*, 224–234. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2017.02.002

Parker, R. A., & Walker, J. L. (2006). Estimating the Utility of Time-of-Day Demand for Airline Schedules.

Pita, J. P., Adler, N., & Antunes, A. P. (2014). Socially-oriented flight scheduling and fleet assignment model with an application to Norway [PII: S0191261513002257]. *Transportation Research Part B: Methodological*, *61*, 17–32. https://doi.org/10.1016/j.trb.2013.12.006

Pita, J. P., Barnhart, C., & Antunes, A. P. (2013). Integrated Flight Scheduling and Fleet Assignment Under Airport Congestion. *Transportation Science*, *47*(4), 477–492. https://doi.org/10.1287/trsc.1120.0442

Presto, F. (2021). Frequency Reduction Model (FRED): Software Documentation [Institutsbericht]. *TUHH Institute of Air Transportation Systems*.

Presto, F., Gollnick, V., Lau, A., & Lütjens, K. (2022). Flight frequency regulation and its temporal implications. *Transport Policy*, *116*, 106–118. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.11.022

Presto, F., Gollnick, V., & Lütjens, K. (2021). Fleet Upgauging and Reducing Flight Frequency. *Journal of Air Transportation*, 1–14. https://doi.org/10.2514/1.D0244

Raffarin, M. (2004). Congestion in European Airspace: A Pricing Solution? *Journal of Transport Economics and Policy*, *38*, 109–126.

Risse, K., Schäfer, K., Schültke, F., & Stumpf, E. (2016). Central Reference Aircraft data System (CeRAS) for research community [PII: 177]. *CEAS Aeronautical Journal*, *7*(1), 121–133. https://doi.org/10.1007/s13272-015-0177-9

Rosskopf, M. (2013a). Fleet Optimization Model (FLOP): Software Documentation. *DLR Air Transportation Systems*.

Rosskopf, M. (2013b). *Modell zur Planung und Bewertung von Airline-Flotten nach ökonomischen und ökologischen Kriterien* [Dissertation]. Technische Universität Hamburg. Hamburg.

Rosskopf, M., Lehner, S., & Gollnick, V. (2014). Economic–environmental trade-offs in long-term airline fleet planning [PII: S0969699713001142]. *Journal of Air Transport Management*, *34*, 109–115. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2013.08.004

Rosskopf, M., Lehner, S., & Lütjens, K. (2013). Impact of single-aisle aircraft with reduced design range on airline operations and dynamics of fleet composition. *Journal of Aerospace Operations*, 99–113. https://doi.org/10.3233/AOP-130036

Sabre Airline Solutions. (2019). *Sabre Data & Analytics Market Intelligence 6.3*. SABRE GLBL INC.

Sanaei, R., Lau, A., & Gollnick, V. (2021). A study of capacity regulations to define European air traffic management network states. *Transportation Planning and Technology*, *44*(4), 337–355. https://doi.org/10.1080/03081060.2021.1919346

Schade, J., & Schlag, B. (2003). Acceptability of urban transport pricing strategies [PII: S1369847802000463]. *Transportation Research Part F: Traffic*

Psychology and Behaviour, *6*(1), 45–61. https://doi.org/10.1016/S1369-8478(02)00046-3

Scheelhaase, J., Maertens, S., Grimme, W., & Jung, M. (2018). EU ETS versus CORSIA – A critical assessment of two approaches to limit air transport's CO 2 emissions by market-based measures [PII: S0969699717303277]. *Journal of Air Transport Management*, *67*, 55–62. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2017.11.007

Schmidt, M., Heinemann, P., & Hornung, M. (2017). Boarding and Turnaround Process Assessment of Single- and Twin-Aisle Aircraft, 681. https://doi.org/10.2514/6.2017-1856

Sheng, D., Li, Z.-C., & Fu, X. (2019). Modeling the effects of airline slot hoarding behavior under the grandfather rights with use-it-or-lose-it rule [PII: S1366554518306744]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *122*, 48–61. https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.11.006

Starkie, D. (2002). Airport regulation and competition [PII: S0969699701000151]. *Journal of Air Transport Management*, *8*(1), 63–72. https://doi.org/10.1016/S0969-6997(01)00015-1

Swan, W. M., & Adler, N. (2006). Aircraft trip cost parameters: A function of stage length and seat capacity [PII: S1366554505000761]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *42*(2), 105–115. https://doi.org/10.1016/j.tre.2005.09.004

Swaroop, P., Zou, B., Ball, M. O., & Hansen, M. (2012). Do more US airports need slot controls? A welfare based approach to determine slot levels [PII: S0191261512000380]. *Transportation Research Part B: Methodological*, *46*(9), 1239–1259. https://doi.org/10.1016/j.trb.2012.03.002

The Wall Street Journal. (2012). *The Secret Price of a Jet Airliner: Discounts of 50% or More Off the Sticker Number Are Common as Plane Makers and Buyers Haggle*. Verfügbar 7. Juli 2021 unter https://www.wsj.com/articles/SB10001424052702303649504577494862829051078

The World Bank. (2021). *DataBank: World Development Indicators*. The World Bank Group. Verfügbar 25. Februar 2021 unter https://databank.worldbank.org/reports.aspx?source=2&series=IS.AIR.PSGR&country=#

Thorbeck, J. (2013). DOC-Assessment Method: TU Berlin - DOC Method [With remarks in red by D. Scholz]. *TU Berlin Aircraft Design & Aero Structures*.

Vaze, V., & Barnhart, C. (2012a). An assessment of the impact of demand management strategies for efficient allocation of airport capacity. *International Journal of Revenue Management*, *6*(1/2), 5. https://doi.org/10.1504/IJRM.2012.044513

Vaze, V., & Barnhart, C. (2012b). Modeling Airline Frequency Competition for Airport Congestion Mitigation. *Transportation Science*, *46*(4), 512–535. https://doi.org/10.1287/trsc.1120.0412

Wang, K., Gong, Q., Fu, X., & Fan, X. (2014). Frequency and aircraft size dynamics in a concentrated growth market: The case of the Chinese domestic market [PII: S096969971300152X]. *Journal of Air Transport Management*, *36*, 50–58. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2013.12.008

Wei, W. (2006). Impact of landing fees on airlines' choice of aircraft size and service frequency in duopoly markets [PII: S0969699706000512]. *Journal of Air Transport Management*, *12*(6), 288–292. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2006.07.008

Wei, W., & Hansen, M. (2003). Cost Economics of Aircraft Size. *Journal of Transport Economics and Policy*, *37*, 279–296.

Wei, W., & Hansen, M. (2005). Impact of aircraft size and seat availability on airlines' demand and market share in duopoly markets [PII: S136655450400050X]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *41*(4), 315–327. https://doi.org/10.1016/j.tre.2004.06.002

Yimga, J., & Gorjidooz, J. (2019). Airline schedule padding and consumer choice behavior [PII: S0969699718304952]. *Journal of Air Transport Management*, *78*, 71–79. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2019.05.001

Zou, B., & Hansen, M. (2014). Flight delay impact on airfare and flight frequency: A comprehensive assessment [PII: S1366554514000933]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *69*, 54–74. https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.05.016