

Technische Universität München
Institut für Luft- und Raumfahrt
Lehrstuhl für Luftfahrtsysteme
Univ. Prof. Dr.-Ing. Hornung



**Szenariobasierte Modellierung der zivilen Weltflugzeugflotte
unter Berücksichtigung dynamischer Einflussparameter**

**Scenario-based model of the world civil aircraft fleet
taking into account external dynamic parameters**

Technische Universität München
Lehrstuhl für Luftfahrtsysteme
Boltzmannstr. 15
85748 Garching b. München

Kurzzusammenfassung

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit der Weiterentwicklung eines *evolutionären Flottenmodells*, welches in einer vorangegangenen Arbeit am Lehrstuhl für Luftfahrtsysteme der Technischen Universität München erarbeitet wurde. Dafür wird, ausgehend von einem *System Dynamics* Ansatz, in der *Matlab/Simulink*-Umgebung ein Modell aufgebaut, welches es ermöglicht, den Einfluss von neuen Flugzeugtypen oder neuartigen Flugzeugtechnologien auf die globale, zivile Flottenentwicklung zu untersuchen. Das simulierte Wachstum der Flotte ist dabei durch die Entwicklung der Transportleistungsnachfrage bestimmt, welche ein Modelleingangsparameter ist und über Szenarien bestimmt werden kann. Das abstrahierte Flottenmodell beschreibt den globalen Luftverkehr über 21 Routen-Gruppen sowie durch maximal 12 Flugzeug-Cluster. Auf jährlicher Basis wird, ausgehend vom Jahr 2008 bis zum Jahr 2050, die Typen-, Alters- und Einsatzverteilung sowie der Treibstoffverbrauch der Flugzeugflotte berechnet. In der Flottenmodellierung dieser Arbeit werden am Lehrstuhl für Luftfahrtsysteme gewonnene Erkenntnisse zum *Flottenzuweisungsproblem*, zu *Überlebenskurven* und *Produktionskapazitäten* sowie zur *Flugleistungsberechnung* integriert. Unter anderem durch die Möglichkeit, neue Flugzeugtypen differenziert beim dynamischen, treibstoffverbrauchsoptimierten Flottenwachstum zu betrachten, bietet das hier entwickelte *Fleet Development Model (FDM)* die Möglichkeit, den Einfluss von Technologie auf den Treibstoffverbrauch der Gesamtflotte zu identifizieren, um den zukünftigen Anforderungen der Luftfahrtindustrie gerecht zu werden.

Abstract

This master thesis develops a *Fleet Development Model (FDM)* based on an existing *evolutionary fleet model* developed at the Institute of Aircraft Design at Technische Universität München. In this thesis, a *Matlab/Simulink* dynamic fleet model based on a *System Dynamics* approach is developed that allows to identify the influence of new types of aircraft or aircraft technology improvements on the global aircraft fleet. The simulated fleet growth is driven by the demand for air transportation, which is a model input parameter and can thus be defined by scenarios. The fleet model describes the global air traffic in 21 air traffic route groups and by 12 aircraft clusters at maximum. For the period from year 2008 to 2050, the fleet size, composition, and age distribution as well as the fuel consumption of the civil aircraft fleet are calculated on annual basis. New insights gained at the Institute of Aircraft Design concerning the *fleet assignment problem*, *retirement curves*, *production capacity* and *aircraft performance calculation* are integrated in the fleet model developed in this thesis. By considering new types of aircraft in terms of dynamic, fuel-consumption-optimized fleet growth, the *FDM* is able to identify the influence of technology on the fleet-wide fuel consumption in order to cope with the future challenges of the aviation industry.

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung	I
Abstract.....	II
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation	1
1.2 Vorhergehende Studien	2
1.3 Zielstellung.....	4
1.4 Vorgehensweise	5
2 Grundlagen und Ausgangsbasis	6
2.1 Von System Dynamics zu Matlab/Simulink	6
2.2 Flottenentwicklung auf Mikro- und Makroebene.....	8
2.3 Vorhergehende Untersuchungen am LLS	9
2.3.1 Evolutionäres Flottenmodell.....	9
2.3.2 Flottenzuweisungsproblem	11
2.3.3 Überlebenskurven	12
2.3.4 Produktionskapazitäten	14
2.3.5 FCCT-Tool / Global Fleet Mission Calculator	15
3 Umsetzung des Fleet Development Model	16
3.1 Grundstruktur der Modellierung	16
3.1.1 Routenmodellierung.....	17
3.1.2 Clustermodellierung.....	18
3.1.3 Flotteneinsatzmodellierung.....	19
3.2 Systems Dynamics Grundgedanke	22
3.3 Aufbau des FDM in Matlab/Simulink.....	23
3.3.1 Modul Vorberechnung/FCCT	24
3.3.2 Modul FAP	29
3.3.3 Modul Retirement	30
3.3.4 Modul New Fleet	31
3.4 Eingangs- und Ausgangsgrößen.....	37
4 Verarbeitungsbeispiel eines Szenarios	40
4.1 Szenario-Kenngrößen.....	40

4.2	Modelldurchlauf	40
4.3	Simulationsergebnisse und Auswertung.....	42
5	Zusammenfassung und Ausblick	47
	Literaturverzeichnis	49
	Eidesstattliche Versicherung	51

Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Grundaufbau eines System Dynamics Modells (STERMAN 2000)</i>	7
<i>Abbildung 2: Außerdienststellungskurve, Beispiel Cluster 9 (ENGELKE 2014)</i>	13
<i>Abbildung 3: Theoretische Produktionskapazität für single-aisle Flugzeuge (ENGELKE 2014)</i>	15
<i>Abbildung 4: Definition der 6 Regionen und 21 Routen (RANDT 2013)</i>	17
<i>Abbildung 5: System Dynamics Aufbau des neuen FDM</i>	22
<i>Abbildung 6: Modulaufbau des FDM in Matlab</i>	24
<i>Abbildung 7: Aufbau Modul „Vorbereitung/FCCT“</i>	25
<i>Abbildung 8: ASKS-Leistungsdifferenz einer Route</i>	31
<i>Abbildung 9: Aufbau Modul „New Fleet“</i>	32
<i>Abbildung 10: Simulink Modell als „abgeschlossenes System“</i>	34
<i>Abbildung 11: Flussdiagramm Produktionskapazitäten</i>	35
<i>Abbildung 12: Ein- und Ausgabedaten des FDM</i>	38
<i>Abbildung 13: Aufbau der Ausgabevariablen „z_FleetIS_Route_trend“</i>	38
<i>Abbildung 14: Aufbau der Ausgabevariablen „z_FleetIS_trend“</i>	39
<i>Abbildung 15: Aufbau der Ausgabevariable „z_age_distribution_trend“</i>	39
<i>Abbildung 16: Entwicklung der Gesamtflotte</i>	42
<i>Abbildung 17: Hinzugefügte Flugzeuge zur Gesamtflotte</i>	43
<i>Abbildung 18: Globale RPKS-Nachfrageentwicklung</i>	44
<i>Abbildung 19: Kraftstoffverbrauch der Gesamtflotte</i>	45

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: clusterspezifische β-Parameter der Außerdienststellungsfunktionen (ENGELKE 2014)</i>	14
<i>Tabelle 2: Clusterzuordnung für Cluster 1-9</i>	18
<i>Tabelle 3: neue Cluster 10,11 und 12</i>	19
<i>Tabelle 4: Start ASKS- und ATKS-Leistung des Jahres 2008 (OAG 2008).....</i>	21
<i>Tabelle 5: Zuordnung allgemeiner Einsatztyp der Cluster (ZWENZNER 2014)</i>	27
<i>Tabelle 6: Vergleich neu ausgelieferte Flugzeuge 2014-2033 (AIRBUS 2014)</i>	44
<i>Tabelle 7: Vergleich Anzahl der Flugzeuge in der Flotte (AIRBUS 2014).....</i>	45
<i>Tabelle 8: Flugzeug Treibstoffverbrauch (U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION 2014)</i>	46

Abkürzungsverzeichnis

ACAS	Aircraft Analytical System (dt. Flugzeuganalysesystem)
ASKS	Available Seat Kilometers (dt. verfügbare Sitzkilometer)
ATKS	Available Ton Kilometers (dt. verfügbare Tonnenkilometer)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
EFM	Evolutionäres Flottenmodell
FAP	Fleet Assignment Problem (dt. Flottenzuweisungsproblem)
FCCT	Fuel Consumption Calculation Tool (dt. Treibstoffverbrauch-Berechnungsprogramm)
FDM	Fleet Development Model (dt. Flottenentwicklungsmodell)
GFMC	Global Fleet Mission Calculator (dt. globaler Flottenmissionsberechner)
LLS	Lehrstuhl für Luftfahrtsysteme
NO _x	Stickoxide
OAG	Official Airline Guide (dt. Offizieller Airline Guide)
RPKS	Revenue Passenger Kilometers (dt. erbrachte Passagierkilometer)
RTKS	Revenue Ton Kilometers (dt. erbrachte Tonnenkilometer)

1 Einleitung

1.1 Motivation

Große Herausforderungen warten auf die Luftfahrt. Auf der einen Seite steht ein starkes Luftverkehrswachstum, welches insbesondere durch Wirtschaftswachstum, steigende Urbanisierung, eine wachsende gesellschaftliche Mittelklasse und ein steigendes Reiseverhalten getrieben wird (AIRBUS 2014). Folgt man der Berechnung von Airbus, wird sich der Luftverkehr in den nächsten 15 Jahren verdoppeln. Auf der anderen Seite stehen staatliche Organisationen und nicht staatliche Institutionen, welche gezwungenermaßen, bedingt durch den Einfluss des Luftverkehrs auf die Luftverschmutzungen und den Klimawandel, ehrgeizige Ziele aufstellen. So sieht die Europäische Union in ihrem *Flightpath 2050* Bericht eine Reduktion der CO₂-Emissionen von 75% und eine Senkung der NO_x-Emissionen von sogar 90% pro Sitzplatzkilometer vor (EUROPÄISCHE UNION 2011).

Neben weiteren Aspekten, wie zum Beispiel der notwendigen Anpassung der luft- und bodenseitigen Infrastruktur an den wachsenden Flugverkehr, treiben insbesondere die Klimaziele den Wunsch voran, die Entwicklung des globalen Flugverkehrs für die Zukunft abzuschätzen. Dazu ist es notwendig, Technologieaspekte in der Entwicklung und Weiterentwicklung von Flugzeugen mit einzukalkulieren. Allein durch sie kann es möglich werden, bei steigender Nachfrage die Emissionen zu senken. Eine genaue Vorhersage der Entwicklung ist nicht möglich. Mittels verschiedener Szenarien hinsichtlich der Nachfrageentwicklung und der Verfügbarkeit von technischen Weiterentwicklungen ist es dennoch möglich, die Realisierbarkeit von Zielsetzungen zu überprüfen oder die Geschwindigkeit und Lokalität bei der Verbreitung der verbrauchssenkenden technologischen Entwicklung zu bewerten.

Gewünscht wird eine Darstellung der zukünftigen Entwicklung der globalen Flugzeugflotte und deren Einsatz auf den globalen Luftverkehrsmärkten. Entscheidend zur Berechnung der Emissionen ist hier der Flugzeugmix, also die Anzahl der verschiedenen Flugzeugtypen, deren Einsatz auf den Flugrouten sowie das Alter der eingesetzten Flugzeuge. Um eine solche Entwicklung des komplexen Flottensystems der Zukunft basierend auf Szenarien vorherzusagen, wird ein abstrahiertes Modell benötigt, welches das Systemverhalten ausreichend beschreibt. Ein erstes Modell wurde bereits am Lehrstuhl für Luftfahrtsysteme umgesetzt. Auf Grund der Komplexität der Flottenentwicklung wird eine weiterentwickelte Modellierung benötigt, welche ausgewählte Details besser modelliert und damit eine fundiertere Vorhersage ermöglicht.

1.2 Vorhergehende Studien

Das am Lehrstuhl bereits entwickelte Modell zur Flottenentwicklung sowie weitere am Lehrstuhl entstandene Arbeiten, welche eine Relevanz für die Ausarbeitung haben, werden in *Abschnitt 2.3* vorgestellt. An dieser Stelle werden weitere wissenschaftliche Arbeiten präsentiert, welche die Modellierung der dynamischen Flottenentwicklung zur Betrachtung der Emissionsbelastung und den Einfluss von Technologieentwicklungen auf diese untersuchen.

TETZLOFF/CROSSLEY (2009) untersuchen in ihrer Studie den Einfluss von neuer Technologie auf die Schadstoff- und Lärmemission einer Flugzeugflotte. Der Luftverkehr wird dabei auf Flottenebene betrachtet. Dabei berücksichtigen sie ausschließlich den US-Markt und modellieren ihn als Netz, bestehend aus 102 Flughäfen. Die Flugzeugtypen, welche den Markt bedienen, werden in 6 Cluster nach ihrer Passagierkapazität zusammengefasst. Für jedes Cluster werden ein „representative-in-class“ (dt. „Repräsentatives der Klasse“) und ein „best-in-class“ (dt. „Beste der Klasse“) Flugzeug ausgewählt. Ausgehend vom Jahr 2005 werden die Emissionen für die Jahre 2015 und 2025 berechnet. Es wird ein Szenario betrachtet, welches von einem jährlichen Wachstum der Nachfrage von 2% ausgeht. TETZLOFF/CROSSLEY führen für ihre Studie zwei Untersuchungen durch.

Bei der ersten wird der Luftverkehr des Jahres 2005 nachgebildet. Um den Einfluss neuer Technologien abzubilden, werden die „representative-in-class“ Flugzeuge durch die „best-in-class“ Flugzeuge ersetzt, ohne dass eine Neuverteilung der Flugzeuge auf das Streckennetz stattfindet. Die erreichten Werte für die Emissionen können nun als Bezugsbasis verwendet werden, um den weiteren Effekt von technologischen Entwicklungen zu bewerten.

In der zweiten Untersuchung verwenden TETZLOFF/CROSSLEY einen Optimierungsalgorithmus, der das *Flottenzuweisungsproblem* löst und damit den Einsatz der verfügbaren Flugzeugflotte optimiert. Die zu minimierende Zielfunktion enthält neben den DOC (Direct Operating Costs (dt. direkte Betriebskosten)) weitere Variablen, welche die verursachten schädlichen Emissionen der Flugzeuge beschreiben. Die einzelnen Bestandteile der Zielfunktion werden über Faktoren gewichtet. Neben der Randbedingung für die Erfüllung der gesamten Nachfrage auf allen Routen, existiert eine weitere für die Einsatzzeit der Flugzeuge. Sie besitzen ein Grenzwert an maximal durchführbaren Flugstunden, um die benötigte Zeit für Instandhaltungsarbeiten zu beschreiben. TETZLOFF/CROSSLEY stützen sich dabei auf Angaben des Flugzeugherstellers Boeing, welcher nach ihrer Aussage angibt, dass für jede operationelle Flugstunde dreieinhalb Stunden Instandhaltungsarbeit am Flugzeug anzusetzen sind. Optional werden in dem *Flottenzuweisungsproblem* weitere Randbedingungen für die maximal erlaubten Emissionen betrachtet. Es werden 9 Szenarien berechnet. Diese bestehen aus einer Variation der technologischen Flottenzusammensetzung und den angesprochenen optionalen Emissionsbegrenzungen. TETZ-

LOFF/CROSSLEY zeigen mit den ausgewählten Szenarien, wie schwierig es ist, die gesetzten Emissionsgrenzen einzuhalten. Die CO₂- Emissionsziele werden beispielsweise in jedem ihrer Szenarien verfehlt.

ZHAO U.A. (2010) präsentieren in ihrer Studie, die auf der oben genannten Studie von TETZLOFF/CROSSLEY aufbaut, ein dynamisches Flottenmodell, das neben dem Einfluss von Technologie, auch Veränderungen in den Rahmenbedingungen auf die zukünftigen Emissionen des Luftverkehrs mit einberechnet. Sie entwickeln ein Hilfswerkzeug, welches den flottenweiten Einfluss von Technologieentwicklungen auf die Flugzeugemissionen für unterschiedliche Wachstumsszenarien abbildet. Die Vielzahl an durchgeführten Modellierungen wird in einem *System Dynamics* Modell gebündelt. Zentraler Punkt ist das *Flottenzuweisungsproblem*, welches die optimale Verteilung der Flotte auf die Flugrouten vornimmt.

Eine Erkenntnis aus den Ergebnissen der verwendeten Szenarien ist, dass eine stetige technologische Weiterentwicklung nötig ist, um die schädlichen Emissionen auf dem Level des Jahres 2005 zu halten. So könnten höhere Ticketpreise zwar die Nachfrage senken und damit die Emissionen sogar unter den Stand von 2005 fallen lassen. Dabei wird in dem Modell aber nicht beachtet, dass der Verkehr sich auf andere Transportmittel verlagern und dort zusätzliche Emissionen verursachen wird.

PFAENDER/JIMENEZ/MAVRIS (2010) untersuchen in ihrer Studie den Einfluss von neuen Flugzeugtechnologien auf die globale Schadstoffemission, ausgehend vom Jahr 2006 bis zum Jahr 2050. In ihrem *System Dynamics* Modell stehen die durchgeführten Flugoperationen im zentralen Betrachtungspunkt. Die Operationen werden von Flugzeugen mit unterschiedlichen Technologiegenerationen, und damit verbundenen verschiedenen Emissionen, durchgeführt. In der Modellierung werden diese Technologiegenerationen zu bestimmten Zeitpunkten verfügbar gemacht, um den Effekt auf die Flottenentwicklung und die Emissionen zu untersuchen. Das altersbedingte Ausscheiden von Flugzeugen aus dem aktiven Dienst, und damit der Wegfall von Flugoperationen, basiert auf Außerdienststellungskurven. Diese Kurven basieren auf historischen Daten und beschreiben statistisch das Ausscheiden eines Flugzeugtyps aus dem Dienst.

Bei der Betrachtung eines als realistisch angenommenen Szenarios für das Wachstum der Passagiernachfrage bis zum Jahr 2050 zeigt die Studie, dass neue Flugzeugtechnologien dem Zuwachs der Emissionen entgegenwirken können, wenn diese schnellstmöglich eingeführt werden.

SCHAEFER/JUNG/PABST (2013) präsentieren in ihrer Studie eine prognostizierte Entwicklung der globalen Flugzeugflotte. Zur Untersuchung des Treibstoffverbrauchs, der

CO₂- und NO_x-Emissionen einer zukünftigen Flotte, werden neben den aktuell verfügbaren Flugzeugmodellen ebenso zukünftige Neuentwicklungen beachtet. Ebenso wird analysiert, in welcher Region auf der Welt die Emissionen verursacht werden.

In einer ersten Berechnung werden auf Basis von *Official Airline Guide (OAG (dt. Offizieller Airline Guide))* Daten für den Zeitraum 2000 bis 2010 die Emissionen des Jahreszeitraums nachkalkuliert. Anschließend wird mittels eines globalen Flottenmodells die Entwicklung für den Zeitraum 2010 bis 2030 berechnet.

Auf Basis des Jahres 2010 wird die Nachfrage nach Verkehrsleistung mit Hilfe von jährlichen Wachstumsfaktoren berechnet, diese werden aus Vorhersagen des Flugzeugherstellers Airbus entnommen. Ebenso werden altersbedingte Ausflottungen beachtet, welche auf statistischen Ausflottungskurven basierend zu einer sinkenden verfügbaren Verkehrsleistung führen, die durch neue Flugzeuge ausgeglichen werden muss. Zur Erfüllung der geforderten Verkehrsleistung werden neue Flugzeuge in die Flotte aufgenommen. Bezogen auf das Basisjahr wird dabei ein ähnlich großer Flugzeugtyp mit einer ähnlichen Reichweite, unter den verfügbaren des aktuellen Jahres ausgewählt. Zudem gibt es einen Modellinputparameter, der eine Zielverteilung der ausgelieferten Flugzeuge beschreibt. In der vorgestellten Studie verwenden SCHAEFER/JUNG/PABST hierfür Vorhersagen der Flugzeugbauer Airbus und Embraer. Eine Schlussfolgerung der Studie ist, dass die von der Fluggesellschaftsindustrie gesetzten Emissionsziele schwierig zu erreichen sind. Hauptgrund hierfür ist das global starke Verkehrswachstum.

1.3 Zielstellung

Ziel dieser Masterarbeit ist die Entwicklung eines dynamischen Flottenmodells, welches auf Basis veränderter, geforderter Transportleistungen die Änderungen der globalen Flottenstruktur hinsichtlich Zusammensetzung, Verteilung auf die Regionen und Altersstruktur sowie Treibstoffverbrauch berechnet. Dabei soll es möglich sein, den Einfluss von Technologieentwicklungen in der Flugzeugentwicklung mit zu modellieren und den Einfluss auf die globale Flotte abzubilden. Die gesamte Transportleistung des kommerziellen zivilen Luftverkehrs wird dabei auf 21 global verteilte Routen getrennt nach Passagier- und Frachtleistung betrachtet. Es soll die Möglichkeit bestehen, die hochdynamische weltweite Flottenentwicklung bis zum Jahr 2050 zu modellieren. Entscheidende Modelleingangsparameter sollen einerseits von Szenarien abgeleitete Wachstumsfaktoren der Verkehrsnachfrage sein und andererseits auf der Flottenzusammensetzung und dem Flotteneinsatzes des Jahres 2008 beruhen. Aufbauen soll das Modell auf einem einfachen dynamischen Flottenmodell, welches mit Hilfe von *System Dynamics* Methoden in der proprietären Softwareumgebung *Vensim* am Lehrstuhl für Luftfahrtsysteme in einer vorhergehenden Arbeit umgesetzt wurde. Dieses vorhergehende Flottenmodell ist auf Grund der Modellierung und Softwareumgebung hinsichtlich seiner Fähigkeiten beschränkt. Im

Rahmen der Neuimplementierung in der *Matlab/Simulink* Umgebung sollen neue Erkenntnisse zu dem *Fleet Assignment Problem* (dt. Flottenzuweisungsproblem) sowie zu *Überlebenskurven* geprüft, und angepasst in das neue Modell mit eingebunden werden. Der *System Dynamics* Grundgedanke des vorhergehenden Flottenmodells soll beibehalten werden. Des Weiteren soll das am Lehrstuhl entwickelte *Fuel Consumption Calculation Tool* (*FCCT-Tool* (dt. Treibstoffverbrauch Berechnungsprogramm)) zur Berechnung von flugzeugspezifischen Leistungsparametern mit der weiteren Berechnung verknüpft werden. Entscheidende Einflüsse für eine verbesserte Modellierung des hochdynamischen Systems sollen gefunden werden und entsprechend umgesetzt werden. Als Beispiel hierfür kann die Beschränkung der jährlichen *Produktionskapazitäten* für neue Flugzeuge genannt werden.

1.4 Vorgehensweise

Bevor die detaillierte Umsetzung des neuen Flottenmodells beschrieben wird, müssen einige grundlegende Modellierungsannahmen erläutert werden. *Kapitel 2* beschäftigt sich mit den Grundlagen und der Ausgangsbasis des Modells. Dazu gehören einerseits das Modellkonzept *System Dynamics*, andererseits Modellierungsannahmen und Randbedingungen, wie sie aus bisherigen Modellierungen am Lehrstuhl für Luftfahrtsysteme übernommen werden. Das vorangegangene *evolutionäre Flottenmodell* wird in *Abschnitt 2.3.1* vorgestellt. Wie in *Abschnitt 1.3* beschrieben, sollen die neuen Erkenntnisse aus Lehrstuhlarbeiten zum *Fleet Assignment Problem* und zu *Überlebenskurven* in das neue Flottenmodell eingebracht werden. Die Arbeiten zu diesen Forschungsgegenständen werden in *Abschnitt 2.3.2* und *Abschnitt 2.3.3* vorgestellt. Ein zusätzliches Feature, welches die Modellierung verbessern kann, ist die Beachtung von *Produktionskapazitäten* der großen zivilen Flugzeughersteller. Die Ausarbeitung hierzu wird in *Abschnitt 2.3.4* präsentiert. Für die Berechnung von flugzeugspezifischen Leistungsparametern wird das am Lehrstuhl entwickelte *FCCT-Tool* eingebunden. Es wird in *Abschnitt 2.3.5* vorgestellt. Mit den Erkenntnissen zu dem vorhandenen Ausgangsmodell und den neuen Erweiterungen wird in *Kapitel 3* das neue Flottenmodell aufgebaut und der gesamte Modellaufbau beschrieben.

Auch zur Anleitung für einen Benutzer des neuen *Matlab/Simulink* Modells wird in *Abschnitt 4* ein Schritt-für-Schritt Durchlauf des Programms durchgeführt. Anhand eines ausgewählten Beispielszenarios wird die Flottenentwicklung simuliert und ein Vergleich mit Prognosen des Flugzeugherstellers Airbus durchgeführt.

Kapitel 5 fasst die Erkenntnisse und Möglichkeiten, die mit dem neuen Flottenmodell gewonnen wurden, zusammen. Auch mögliche Entwicklungspotentiale und Ansätze für zukünftige Weiterentwicklungen werden hier diskutiert.

2 Grundlagen und Ausgangsbasis

In diesem Kapitel werden die Ausgangspunkte für das in *Kapitel 3* entwickelte neue Flottenmodell vorgestellt. Das neue Flottenmodell wird nachfolgend auch als *FDM* (*Fleet Development Model* (dt. Flottenentwicklungsmodell)) bezeichnet. Zuerst wird in *Abschnitt 2.1* die Entscheidung für eine *System Dynamics* Umsetzung in *Matlab* begründet und *System Dynamics* als Methode vorgestellt. *Abschnitt 2.2* beschäftigt sich mit den in der realen Welt vorhandenen, treibenden Kräften der Flottenentwicklung, um später die gewählten Modellierungsansätze begründen zu können. In *Abschnitt 2.3* folgt dann die Beschreibung der Hauptmerkmale des verwendeten, abstrahierten Flottenmodells. Auch werden hier die am Lehrstuhl für Luftfahrtsysteme verfassten Arbeiten vorgestellt, mit deren Unterstützung in *Kapitel 3* das neue Flottenmodell aufgebaut wird.

2.1 Von System Dynamics zu Matlab/Simulink

System Dynamics ist eine Methode, um das Verständnis von dynamischen, komplexen Systemen zu steigern. „Dynamisch“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die betrachtete Entwicklung eine Zeitabhängigkeit aufweist. Die Komplexität muss dabei nicht durch eine besonders große Anzahl an Komponenten entstehen. Auch scheinbar einfache Systeme können auf Grund von „dynamischer Komplexität“, welche durch die Interaktion der beteiligten Komponenten entsteht, eine große Herausforderung für das Verständnis sein (STERMAN 2000).

Mit Hilfe von *System Dynamics* lässt sich ein dynamisches System grafisch abbilden und erfassen. *System Dynamics* fokussiert sich sowohl auf die Modellierung der *Stocks* (dt. Bestandsvariable) und *Fluss* Variablen, als auch die Änderungsraten dieser Zustandsvariablen, welche mittels *Hilfsvariablen* dargestellt werden. *Abbildung 1* zeigt die graphische Darstellung eines solchen Modells. Dabei handelt es sich bei den *Stocks* um jene Variablen, dessen Veränderungen im Laufe der Zeit betrachtet werden sollen. Verändern können sich die Zustände der *Stocks* dabei ausschließlich durch einen *Zu-* oder *Abfluss*. Die Grundidee von *System Dynamics* ist, alle Beeinflussungen der Variablen untereinander einzeln darzustellen, um dann mittels einer Simulation die zeitlichen Entwicklungen iterativ zu berechnen. Durch Verbindungswege über mehrere Variablen hinweg können sich sogenannte *Feedback-Schleifen* ausbilden, was dazu führt, dass einzelne Variablen eine indirekte Einwirkung auf sich selbst haben. (*Siehe auch ASSENHEIMER (2012) Abschnitt 3.1*)

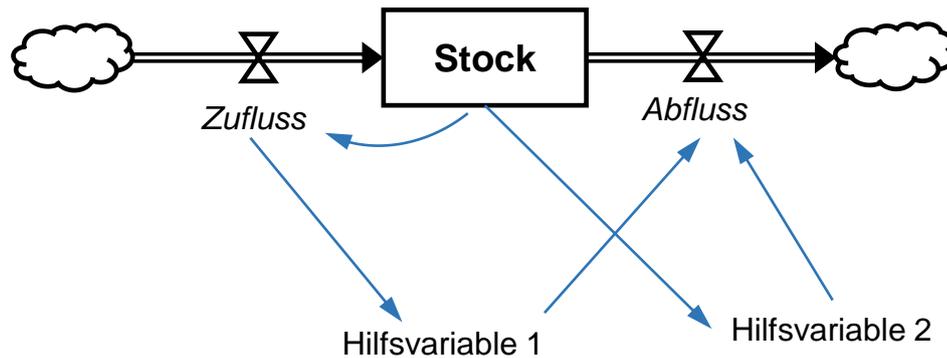


Abbildung 1: Grundaufbau eines System Dynamics Modells (STERMAN 2000)

Die in *Abschnitt 2.3.1* vorgestellte Ausarbeitung von ASSENHEIMER (2012) baut ein dynamisches Flottenmodell nach den Konventionen von *System Dynamics* auf. Der Wechsel von der dort verwendeten proprietären Softwareumgebung *Vensim* hin zu *Matlab/Simulink* für das hier weiterentwickelte Flottenmodell ist begründet durch technische Einschränkung in der Software und dem Wunsch nach der Option, das Simulationsmodell in *Matlab/Simulink* an weitere Softwarewerkzeuge anzubinden. Die technischen Einschränkungen in der am Lehrstuhl für Luftfahrtssysteme verfügbaren Version von *Vensim* führen dazu, dass gewünschte Modellierungsaspekte dort nicht umgesetzt werden können.

Matlab ist ein Softwarepaket, das in der numerischen Mathematik Anwendung findet. Das Erweiterungspaket *Simulink* bietet eine grafische Oberfläche und ermöglicht eine Systemmodellierung mittels Signalflussgraphen. Die auszeichnende Stärke von *Matlab/Simulink* ist die Matrizenrechnung, weshalb sich die Software gut zum Verarbeiten von großen Datensätzen eignet. (ANGERMANN 2011)

Bei der Umsetzung in *Matlab/Simulink* bleibt zwar die Grundidee des hervorgehenden Flottenmodells bestehen, die Umsetzung erfordert dennoch einen vollständigen Neuaufbau. Ein geringfügiger Nachteil der Umsetzung in *Matlab*, der sich im Laufe des *Kapitels 3* zeigen wird, ist die damit einhergehende Unübersichtlichkeit des Modells. Hierbei ist der Zugang zur Auswertung von „Feedback-Schleifen“ besonders erschwert. Der Grund dafür ist, dass nicht mehr die standardisierten Schaltbilder dargestellt werden, sondern in *Matlab* eine reine Code-Programmierung vorliegt, die keine graphische Darstellung des Modells bereithält. Wegen der Möglichkeiten in *Matlab*, das Modell beliebig komplex zu gestalten, werden diese Einschränkungen in Kauf genommen. Um den Überblick zu wahren und das Verständnis für das in *Matlab* umgesetzte Flottenmodell zu steigern, werden in *Abschnitt 3.2* die Zusammenhänge mittels schematischer Ablaufdiagramme dargestellt.

2.2 Flottenentwicklung auf Mikro- und Makroebene

Bei der Beschreibung der Entwicklung des globalen kommerziellen Luftverkehrs auf der Makroebene ist es notwendig, sich mit den treibenden Kräften auf der Mikroebene zu beschäftigen. An dieser Stelle kommen die Fluggesellschaften in den Fokus, welche den Luftverkehr abwickeln. Entscheidend ist, wie die Flottenentwicklung durch die einzelnen Fluggesellschaften betrieben wird und welche abstrahierten Modellierungsannahmen daraus für ein Flottenmodell auf Makroebene getroffen werden können und müssen, um die komplexe Flottenentwicklung abbilden zu können. Dabei darf ebenso der Zweck des Modells nicht außer Acht gelassen werden. Ziel ist es nicht, den realen Flugverkehr in seinen Einzelheiten nachzustellen, sondern mit dem Blick „von oben“ die Flottenentwicklung global zu beschreiben, um zu sehen, wie beispielsweise Technologieentwicklungen oder neue Flugzeuge das Gesamtsystem hinsichtlich der Emissionen beeinflussen können.

Betrachtet man die globale Flottenentwicklung als ein System, kann untersucht werden, welchen Einfluss ausgewählte Stellgrößen auf das Gesamtsystem haben. Hierbei muss akzeptiert werden, dass eine weniger detaillierte Beschreibung von individuellen Elementen des Systems notwendig und auch nur möglich ist. (PALM 2014)

Fluggesellschaften, die das entscheidende Glied bei der Flottenentwicklung sind, betrachten ihre eigene Flottenplanung als Teil der strategischen Planung des Unternehmens. Betrachtet werden langfristige Verkehrsprognosen und angestrebte Marktanteile auf dem möglichen Streckennetz. (MENSEN 2003)

Die Gesellschaften sind bei der langfristigen Planung bedacht, sich ein Maß an Flexibilität zu erhalten, um auf unterwartete Entwicklungen in der Nachfrage oder den regulatorischen Randbedingungen reagieren zu können (CLARK 2007).

Bei den Marktanteilen kommt zu tragen, dass auf den Verkehrsrouten mehrere Gesellschaften operieren. Für das Wachstum der Gesamtflotte ist dieser Aspekt aber zu vernachlässigen, wenn man annimmt, dass die Auslastung der Flugzeuge (*load factor*) allein über die Flugrouten und unabhängig von den Fluggesellschaften festgelegt wird und die Menge der Verkehrsnachfrage auf jeder Route einen sinnvollen Einsatz für jedes der in Frage kommenden Flugzeugtypen ermöglicht. In dem Flottenmodell wird deshalb eine monopolistische Fluggesellschaft betrachtet, die global operiert.

Eine Abgrenzung der Aufgaben der Flottenplanung in einer Fluggesellschaft ist schwierig. Die wesentliche Funktion aber ist, festzustellen, welche Flugzeuge zur Erfüllung der Transportbedürfnisse benötigt werden. Das Flugzeug wird dabei als Produktionsmittel verstanden, welches eine kostengünstige Produktion der Passagier und Frachtleistung zu erbringen hat. (MENSEN 2003)

Für ein Flottenmodell muss nicht genau modelliert werden, wie eine Nachfrageveränderung nach Passagier- oder Frachttransportleistung entsteht. Im Folgenden wird die Welt daher als ein Einheitsmarkt betrachtet, in dem alle Teilregionen gleichberechtigt bedient werden. Die Veränderungen der Transportleistungsnachfrage werden aus Szenarien abgeleitet. Eine wichtige Bedingung an die betrachtete monopolistische Fluggesellschaft ist,

dass die in den Szenarien bestimmte, nachgefragte Transportleistung erbracht wird. Die Flottenentwicklung folgt somit der Entwicklungen der vordefinierten Nachfrage nach Transportleistung. Dem Aspekt, dass eine Fluggesellschaft bemüht ist, möglichst kostengünstig die geforderte Transportleistung zu erzeugen, wird insbesondere dem in dieser Arbeit weiterentwickeltem Flottenmodell Aufmerksamkeit zuteil. Für die Betrachtung der Kosten wird hierbei angenommen, dass diese allein über die Kraftstoffpreise definiert sind, welche auf Sitzplatzkilometer, beziehungsweise Tonnenkilometer, bezogen werden. Da diese Kosten für die Transportleistung nur für einen Vergleich der in Frage kommenden Flugzeugtypen zur Erfüllung der Transportleistung verwendet werden und gefordert wird, dass diese festgelegte Transportleistung durch die betrachtete Gesellschaft erzeugt wird, kann zur Vereinfachung der Einfluss von weiteren Kostentreibern vernachlässigt werden. Durch diesen Ansatz versucht die modellierte Fluggesellschaft nicht nur niedrige Kosten, sondern auch niedrige Emissionen zu erzielen.

2.3 Vorhergehende Untersuchungen am LLS

In diesem Abschnitt werden Modelle und Tools vorgestellt, die am Lehrstuhl für Luftfahrtsysteme entwickelt wurden und welche entweder eine Ausgangsbasis für das in dieser Arbeit neu entwickelte *FDM* bilden oder direkte Integration in dem Modell finden.

Abschnitt 2.3.1 beschreibt die Grundannahmen zur Modellierung der Weltflotte nach RANDT (2013) und das *Evolutionäre Flottenmodell* nach ASSENHEIMER (2012), welches mit Hilfe der Software *Vensim* umgesetzt wurde. Das *EFM* bildet die Basis für das neue Flottenmodell *FDM*. Die in dem Modell vorhandenen prinzipiellen Strukturen sollen für das neue *FDM* beibehalten werden. In *Abschnitt 2.3.2* wird das *Fleet Assignment Problem* vorgestellt. Es wird im *FDM* in modifizierter Form genutzt, um die Ausgangsflotte des Jahres 2008 auf die Flugrouten zu verteilen. *Abschnitt 2.3.3* beschreibt ein mögliches Verfahren, wie das Ausscheiden von Flugzeugen aus dem aktiven Dienst mit *Überlebenskurven* möglichst realitätsnah modelliert werden kann. In *Abschnitt 2.3.4* werden die *Produktionskapazitäten* als mögliche obere Begrenzung des Flottenwachstums vorgestellt. Die Flugleistungen von einzelnen Flugzeugtypen auf vordefinierten Flugrouten, insbesondere die Flugdauer und der Kerosinverbrauch, wird mit Hilfe des *Global Fleet Mission Calculator (GFMC)* aus dem *Fuel Consumption Calculation Tool (FCCT-Tool)* berechnet, welches in *Abschnitt 2.3.5* präsentiert wird.

2.3.1 Evolutionäres Flottenmodell

RANDT (2013) und ASSENHEIMER (2012) stellen das am Lehrstuhl für Luftfahrtsysteme entwickelte *Evolutionäre Flottenmodell (EFM)* (bei RANDT: *Fleet System Dynamics Model*) vor. Die Grundidee ist, die Entwicklung der Flotte in Abhängigkeit von Transportleistungen, innerhalb von definierten Regionen, zu modellieren. Das Wachstum der

Transportleistung wird dabei mittels Wachstumsfaktoren beschrieben, welche mit Hilfe von Szenarienbetrachtungen gewonnen wurden. Untersucht wird die Veränderung des zivilen kommerziellen Luftverkehrs ausgehend vom Startjahr 2008. Dabei wird zwischen der Transportleistung von Passagieren und Fracht unterschieden. Fracht wird dabei allein durch ihre Masse beschrieben. Die Transportleistung wird definiert über die *available seat kilometer (ASKS)* und die *available ton kilometers (ATKS)*.

Die *revenue passenger kilometers (RPKS)* und die *revenue ton kilometers (RTKS)* sind die tatsächlich verkauften Sitzeinheiten, beziehungsweise Frachttonnen. Die Definitionen sind in *Gleichung (2.1) und (2.2)* für die Passagierleistung auf mehreren Flugrouten dargestellt. Ersetzt man in den Gleichungen die Sitze durch Frachttonnen, erhält man die Frachtleistungen analog. In den Gleichungen bezeichnet j die verschiedenen Flugrouten und i die möglichen Flugzeuge auf diesen. Die einzelnen Faktoren der Gleichungen werden hier in Stichpunkten aufgelistet:

- S – Sitzplatzkapazität
- D – Flugdistanz
- f – Flugfrequenz
- n – Anzahl der Flugzeuge gleichen Typs
- LF – Load Factor
- i – verschiedene Flugzeugtypen
- j – verschiedene Flugrouten

$$ASKS = \sum_j ASKS_j = \sum_{j,i} (S_{j,i} \cdot D_{j,i} \cdot f_{j,i} \cdot n_{j,i}) \quad (2.1)$$

$$RPKS = \sum_j RPKS_j = \sum_j (ASKS_j \cdot LF_j) \quad (2.2)$$

Es ist weder möglich, jede Flugoperation auf der Welt einzeln zu betrachten, noch diese in einem sinnvollen Maße für die Zukunft vorherzusagen. Zur Reduzierung der Komplexität wird deshalb die Modellannahme getroffen, dass für den gesamten Luftverkehr 21 Flugrouten Gruppen zur Verfügung stehen. Die Welt wird in 6 vordefinierte Regionen eingeteilt. Es gibt je eine Flugroute zwischen den definierten Regionen und je eine innerhalb, über die der gesamte Verkehr abgewickelt wird. Ebenfalls reduziert werden muss die Anzahl der rund 200 verschiedenen Flugzeugtypen, die den Luftverkehr durchführen. Flugzeuge mit ähnlichen Merkmalen werden zu 9 Clustern zusammengefasst, welche durch einen typischen Vertreter repräsentiert werden.

Für die 21 Flugrouten kann jeweils eine *RSKS*- und *RTKS*-Leistung bestimmt werden, die in Summe die weltweite Leistung ergibt. Auf den 21 Routen haben die 9 Cluster jeweils

clusterspezifische, jedoch zeitlich konstante Parameter für Anzahl der Sitze, Fracht, Distanz und Flugfrequenz. Für das Jahr 2008 wird aus der ACAS Datenbank die Startflotte extrahiert. Die Flugverkehrsdaten für das Startjahr stammen aus der OAG Datenbank des gleichen Jahres.

Für das *EFM* wurde zur Bestimmung der clusterspezifischen Flugfrequenzen auf den Routen eine Rückwärtsrechnung durchgeführt. Die Ausgangsflotte wurde dafür nach ihren Anteilen an der Verkehrsleistung des Jahres 2008 auf die Routen verteilt. Anschließend wurden aus den bekannten Verkehrsleistungen des Startjahres, mittels Umformung der *Gleichungen 2.1* und *2.2*, die dafür nötigen Flugfrequenzen der einzelnen Cluster routenspezifisch bestimmt.

Das *EFM* simuliert die Entwicklung der Flotte jahresweise. Tritt zwischen der verfügbaren Verkehrsleistung der Flotte eines Jahres und der gewünschten Leistung eines Folgejahres eine Differenz auf, so werden Flugzeuge entsprechend einer festgelegten Clusterverteilung routenbasiert hinzugefügt, beziehungsweise entfernt. Diese Clusterverteilung, die die Aufteilung der veränderten Verkehrsleistung auf einer Route beschreibt, wurde anhand der Clusterverteilung der Ausgangsflotte bestimmt. Nachgefragte Flugzeuge stehen dem Modell immer sofort zur Verfügung, und bei Überkapazitäten findet unabhängig von der weiteren Nachfrageentwicklung eine sofortige Ausflottung statt. Das von ASSENHEIMER aufgebaute *EFM* simuliert die Flottenentwicklung für jede Route unabhängig voneinander, das bedeutet Flugzeuge können bei Bedarfsunterschieden nicht von einer zur anderen Gruppe wechseln. Die nachgefragte Transportleistung von Passagieren und Fracht entwickelt sich unabhängig voneinander und wird, wie bereits erwähnt, allein über festlegbare Wachstumsfaktoren beschrieben. Neben der gestiegenen oder auch gesunkenen Nachfrage wird ebenfalls berücksichtigt, dass Flugzeuge altersbedingt aus dem aktiven Dienst ausscheiden. Der Rückgang der Transportleistung durch dieses Ausscheiden, wird dann im Folgejahr ebenfalls beachtet.

Mit dem umgesetzten *EFM* lässt sich die Flottenentwicklung abbilden. Wie bei jeder Modellierung besitzen die berechneten Ergebnisse auf Grund vereinfachter Modellierungsannahmen eine gewisse Unschärfe.

Einige der hier genannten Modellierungsdetails wurden erst in einer am Lehrstuhl für Luftfahrtsysteme durchgeführten Erweiterung des EFM eingeführt, beachte auch Hinweise Abschnitt 3.

2.3.2 Flottenzuweisungsproblem

ZWENZNER (2014) beschäftigt sich in seiner Arbeit mit dem *Flottenzuweisungsproblem (FAP)*. Das *FAP* betrachtet die genaue Zuweisung von einzelnen Flugzeugen auf die möglichen Flugrouten, um ein vordefiniertes Ziel bestmöglich zu erreichen.

Betrachtet man eine Fluggesellschaft, kann dieses Ziel beispielsweise die Maximierung des Gewinns sein, der mit dem Verkauf der Flugtickets erzielt werden kann. Ein individuelles Flugzeug wird beim Einsatz auf den möglichen Flugrouten verschiedene Kosten und Gewinne für die Fluggesellschaft erzeugen. Möchte man den Gesamtgewinn maximieren, so müssen alle verfügbaren Flugzeuge optimiert verteilt werden.

Komplex wird das Problem durch eine Vielzahl von Randbedingungen, welche eine Verteilung der Flugzeuge auf Flugrouten beschränken. Auch diese können verschiedener Form sein. So ist beispielweise die Anzahl der zur Verfügung stehenden Flugzeuge begrenzt oder eine definierte Transportleistung muss auf einer Flugroute erbracht werden. Die verfügbaren Flugzeuge können verschiedenen Typs sein und damit unterschiedlich viele Passagiere und Fracht transportieren. Außerdem muss beachtet werden, dass Flugzeuge nicht nur einen einzigen Flug durchführen, sondern eingeschränkt durch ihre Fluggeschwindigkeit mehrere Flüge, gegebenenfalls auch auf verschiedenen Flugrouten, durchführen können.

ZWENZNER stellt in seiner Arbeit eine Möglichkeit vor, wie ein solches *FAP* mit Hilfe der *Matlab* Softwareumgebung gelöst werden kann. Dafür verwendet er die *Matlab fmincon*-Funktion. Diese Funktion bietet die Möglichkeit, das Minimum einer beschränkten, nicht-linearen, multivariablen Funktion zu finden. Die wichtigsten Variablen die in ihr verarbeitet werden, sind die Zielfunktion sowie die linearen und die nicht-linearen Randbedingungen.

2.3.3 Überlebenskurven

ENGELKE (2014) untersucht in seiner Arbeit das Außerdienststellungsverhalten der sich im Einsatz befindlichen Flugzeuge. Eine Außerdienststellung kann nach seiner Definition vier Ursachen haben: Neben den trivialen Ursachen *Verschrottung auf Grund von Unwirtschaftlichkeit* oder *Unfälle, bei denen das Flugzeug zerstört wird*, gibt es die *langfristige Stilllegung*. Hierbei handelt es sich um einen Vorgang, bei dem ein Wiedereintritt in die Flotte so unsicher ist, dass die Flugzeuge als „außer Dienst gestellt“ betrachtet werden. Die vierte Ursache ist der *Umbau von Passagiermaschinen zu reinen Frachtflugzeugen*. (ENGELKE 2014, S. 53 f.)

ENGELKE entwickelt für die Flugzeugcluster basierend auf der Clustereinteilung nach RANDT (2013) und ASSENHEIMER (2012) Außerdienststellungsfunktionen, welche einen statischen Verlauf für den Flugzeugzustand in Abhängigkeit vom Flugzeugalter darstellen. Dabei lassen sich die Zustände „im Dienst“ oder „ausgeflogtet“ unterscheiden. Sie werden auf Basis vergangener Außerdienststellungen erzeugt. Die von ENGELKE nach der *FESG-Methodik (Forecasting and Economic Analysis Support Group)* für die Flugzeugcluster erstellten *Überlebenskurven* geben an, wie groß der Anteil der noch im Dienst befindlichen Flugzeuge je Flugzeugalter in Bezug zu den ursprünglich im selben

Jahr produzierten Flugzeugen ist. Datenbasis für ENGELKE zur Erstellung der clusterspezifischen Außerdienststellungskurven ist eine Flottendatenbank der Internetseite *airlinerlist.com*. Die diskreten Außerdienststellungen werden von ENGELKE mittels einer Approximation in die mathematische Gleichung (2.3) überführt. In der Gleichung beschreibt p den Anteil aktiver Flugzeuge, welche in dem betrachteten Jahr das Alter x haben.

$$p = \frac{1}{1 + e^{-\beta_0 - \beta_1 \cdot x}} \quad (2.3)$$

Die Ausprägung der S-förmigen Kurve wird über die beiden Parameter β_0 und β_1 beschrieben. *Abbildung 2* zeigt beispielhaft den Verlauf der Kurve mit den von ENGELKE gefundenen Parametern für das Cluster 9.

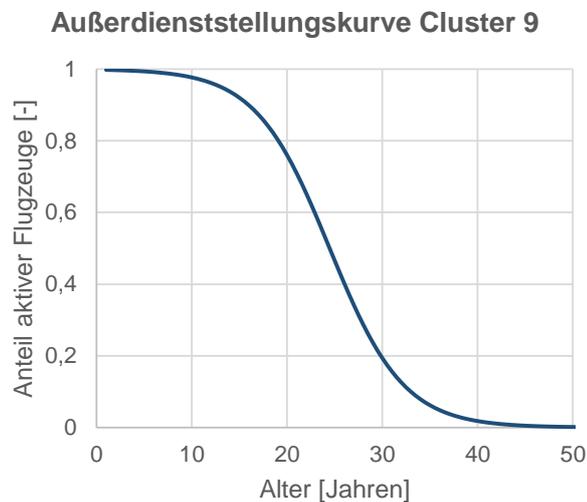


Abbildung 2: Außerdienststellungskurve, Beispiel Cluster 9 (ENGELKE 2014)

Ergebnis der Ausarbeitung sind 9 clusterspezifische Außerdienststellungsfunktionen, wobei an dieser Stelle darauf hingewiesen wird, dass für Cluster 1 die Kurve von Cluster 2 übernommen wurde. Der Grund hierfür ist, dass die von ENGELKE verwendete Flottendatenbank keine „Versionsunterscheidung“ der Kombi-Flugzeugtypen im Cluster 1 erlaubt (ENGELKE 2014, S. 67 f.). Die von ENGELKE für die 9 Flugzeugcluster festgelegten Außerdienststellungsfunktionen werden für das neue Flottenmodell *FDM* übernommen. *Tabelle 1* zeigt die clusterspezifischen Parameter.

Tabelle 1: clusterspezifische β -Parameter der Außerdienststellungsfunktionen (ENGELKE 2014)

Cluster	β_0	β_1
1	5,1709	-0,2230
2	5,1709	-0,2230
3	7,7140	-0,2390
4	3,4838	-0,1152
5	5,2561	-0,1946
6	2,7935	-0,1006
7	7,1386	-0,2974
8	5,3458	-0,1938
9	6,0485	-0,2578

2.3.4 Produktionskapazitäten

ENGELKE (2014) untersucht in seiner Arbeit ebenfalls die Indienststellung neuer, ziviler, kommerzieller Verkehrsflugzeuge. Er verwendet dabei die Definition, dass eine Indienststellung der erstmalige Eintritt eines Verkehrsflugzeugs in den Luftverkehr ist. Die Untersuchung ist auf die drei großen Flugzeugproduzenten Airbus, Boeing und Embraer beschränkt. Sie decken 85% der Flugzeuge der Ausgangsflotte des EFM ab. Die weiteren 15% werden von ENGELKE vernachlässigt.

ENGELKE betrachtet die Indienststellung der drei Flugzeughersteller im Zeitraum 1980 bis 2012 und erstellt auf Grundlage dieser zwei Kurven der theoretischen Produktionskapazität. Die theoretischen Produktionskapazitäten stellen eine von ENGELKE prognostizierte Obergrenze der Flugzeugproduktion dar. Dabei werden *single-* und *twin-aisle* Flugzeuge (dt. Einzel- und Doppelgang Flugzeuge) getrennt voneinander betrachtet. Die theoretischen Produktionskapazitäten der drei Hersteller werden dabei jeweils addiert. Für die Jahre 2013 bis 2050 werden die zwei Funktionen extrapoliert.

Gleichungen (2.4) und (2.5) zeigen die von ENGELKE ermittelten Kurven. Dabei ist $f(x)$ die theoretische Anzahl an produzierten Flugzeugen im Jahr x .

$$\textit{single-aisle:} \quad f(x) = 270 \cdot 1,0438^{(x-1980)} \quad (2.4)$$

$$\textit{twin-aisle:} \quad f(x) = 154 \cdot 1,0212^{(x-1980)} \quad (2.5)$$

Die Funktionen zeigen dabei exponentiellen Charakter. *Abbildung 3* zeigt beispielhaft den Verlauf der Kurve für die *single-aisle* Flugzeugproduktion.

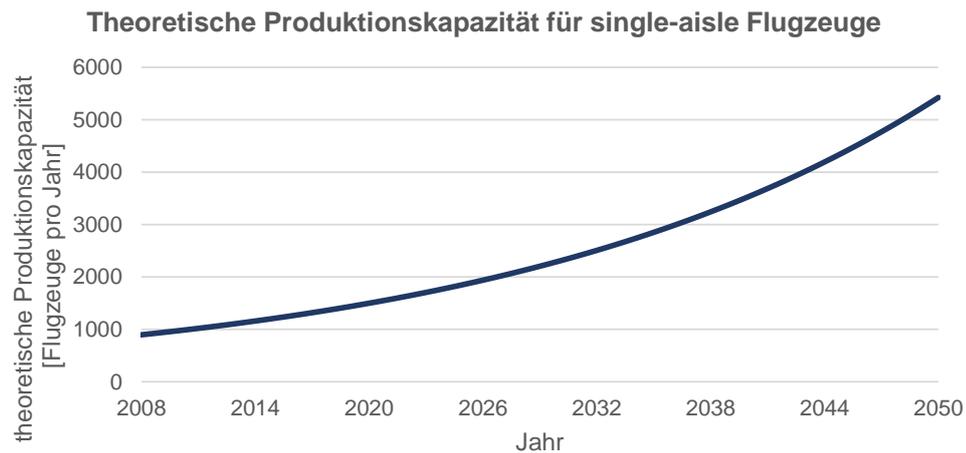


Abbildung 3: Theoretische Produktionskapazität für single-aisle Flugzeuge (ENGELKE 2014)

2.3.5 FCCT-Tool / Global Fleet Mission Calculator

Das *FCCT-Tool* (*Fuel Consumption Calculation Tool*), welches im Rahmen einer Studienarbeit am Lehrstuhl für Luftfahrtsysteme von ITTEL (2014) entwickelt wurde, bietet mit dem *Global Fleet Mission Calculator* (*GFMC*) die Möglichkeit, Flugmissionsleistungsdaten für unterschiedliche Flugzeugtypen zu berechnen. In den *GFMC* werden für die verschiedenen Flugzeugtypen die Parameter *Flugdistanz*, *Initial Cruise Altitude*, *Sitz-* und *Frachtkonfiguration* und die jeweiligen *load factor* eingelesen. Das Tool berechnet dann die für das neue Flottenmodell *FDM* benötigten Werte der Flugdauer und des Treibstoffverbrauchs für eine Flugmission.

3 Umsetzung des Fleet Development Model

In diesem Kapitel werden der Aufbau und die verwendeten Modellierungsansätze des neuen *Fleet Development Model* präsentiert. Der *Abschnitt 3.1* stellt die aus dem *EFM* übernommen und teils angepassten Grundstrukturen der Routen-, Cluster-, und Flotteneinsatzmodellierung vor. *Abschnitt 3.2* beschäftigt sich mit der *System Dynamics* Grundstruktur des Modells, welches dann in *Abschnitt 3.3* in *Matlab/Simulink* umgesetzt wird.

Das Grundkonzept für das neue Flottenmodell *FDM* wird aus der vorhergehenden Arbeit von ASSENHEIMER (2012) übernommen. Anzumerken ist, dass das von ASSENHEIMER aufgebaute Modell zwischenzeitlich am Lehrstuhl für Luftfahrtsysteme in Details verändert und um weitere Fähigkeiten erweitert wurde. Wird in den folgenden Abschnitten von einer verbesserten Modellierung im Vergleich zum bisherigen Flottenmodell *EFM* gesprochen, so bezieht sich das auf die am Lehrstuhl für Luftfahrtsysteme verfügbare, aktuelle Version.

Die Veränderungen im Vergleich zum *EFM* bestehen aus einer Vielzahl von neuen und verbesserten Detailmodellierungen, welche zu einer deutlich verbesserten Beschreibung der zukünftigen Entwicklung des zivilen, kommerziellen Luftverkehrs beitragen.

Besonders wichtig sind die geänderten Ansätze zur Verteilung der Ausgangsflotte des Jahres 2008 sowie zur Generierung der neuen Flugzeugflotte für die Folgejahre. Die neu eingeführten Modellierungen geben dem Modell die Möglichkeit, sich deutlich dynamischer zu verhalten. Somit ist die Flottenentwicklung nicht mehr von dem Zustand der Flugzeugverteilung des Jahres 2008 vorbestimmt. Dieser Umstand erst macht es dem *FDM* möglich, die Entwicklung des globalen Luftverkehrs auf Flottenebene, verstärkt unter Berücksichtigung von technologischen Entwicklungen der Flotte, zu beschreiben.

3.1 Grundstruktur der Modellierung

In dem *FDM* wird die Entwicklung der globalen Flugzeugflotte ausgehend vom Jahr 2008 modelliert. Ausgang ist eine monopolistische Fluggesellschaft, die sämtliche globale Nachfrage nach Transportleistung bedienen muss. Wie in *Abschnitt 2.3.1* beschrieben, ist damit die Entwicklung der Flotte durch die Nachfrage nach *RPKS*- und *RTKS*-Leistung getrieben. Eine langfristige Flottenplanung der Fluggesellschaft gibt es dabei nicht. Das führt dazu, dass die modellierte Entwicklung sich besonders dynamisch und flexibel verhält.

Simuliert wird die Entwicklung der Flugzeugflotte schrittweise auf jährlicher Basis. Für das Ausgangsjahr 2008 stehen die benötigten Ausgangsdaten zur Verkehrsleistung und Startflotte am Lehrstuhl für Luftfahrtsysteme zur Verfügung.

Zur Erfüllung der dynamischen Transportleistungsnachfrage verfolgt das Modell einen routenbasierten „*beste Wahl*“ Ansatz. Für den Fall, dass ein neues Flugzeug in der Flotte

FDM ebenfalls vordefiniert. Die *OAG* Datenbank ist eine kommerziell vertriebene Datenbank, welche alle weltweit geplanten Flüge des kommerziellen Luftverkehrs enthält (*OAG AVIATION WORLDWIDE LIMITED 2014*).

3.1.2 Clustermodellierung

Die weltweite, kommerzielle Flugzeugflotte besteht aus einer Vielzahl von verschiedenen Flugzeugtypen. Für die Modellierung in dem *EFM* wurden diese Flugzeugtypen zu 9 Clustern zusammengefasst. Jedes Cluster, das jeweils ähnliche Flugzeugtypen in sich bündelt, wird durch einen repräsentativen Flugzeugtyp definiert. Die Einteilung dieser Cluster wird aus dem *EFM* übernommen. Mit diesen 9 Clustern lässt sich die Ausgangsflotte des Jahres 2008 vollständig beschreiben.

Jedes Cluster besitzt eine routenspezifische Sitzplatz- und Frachtkapazität. Die verwendeten Daten basieren dabei auf der *OAG* Datenbank des Jahres 2008 und wurden am Lehrstuhl für Luftfahrtsysteme herausgearbeitet.

Die Wahl der repräsentativen Flugzeugtypen hat sich im Vergleich zum *EFM* verändert, sie basiert auf neuen Daten des Lehrstuhls und wird in *Tabelle 2* dargestellt. Wie bereits beim *EFM*, beinhalten die Cluster 3 und 5 ausschließlich reine Frachtflugzeuge, welche keine Passagiere transportieren können.

Tabelle 2: Clusterzuordnung für Cluster 1-9

Cluster ID	Beschreibung	neuer repräsentativer Flugzeugtyp
1	Long Range Combi	McDonnell Douglas MD-11
2	Long Range Heavy	Boeing 747-400
3	Mid Range Freighter	Airbus A300-600F
4	Commuter	Bombardier CRJ900
5	Long Range Freighter	Boeing 747-400F
6	Turboprop	ATR 72-500
7	Mid Range	Boeing 767-300
8	Long Range	Airbus A330-200
9	Narrowbody	Airbus A320

Eine Aufgabe des neuen Flottenmodells ist, technologische Weiterentwicklungen der Flugzeuge mit zu modellieren. Dafür werden neben den 9 Clustern 3 weitere neue, „variable“ Cluster eingeführt. Mit Hilfe dieser neuen Clusterplätze 10, 11 und 12 können neuartige oder verbesserte Flugzeugtypen dem Modell zugeführt werden (siehe *Tabelle 3*).

Abhängig vom gewünschten Szenario, können in diese Cluster vom Anwender gewünschte, neue Flugzeuge oder weiterentwickelte Typen geladen werden, die dann zu einem gewünschten Zeitpunkt in dem Simulationsablauf der Flottenentwicklung verfügbar sind.

Tabelle 3: neue Cluster 10,11 und 12

Cluster ID	Beschreibung / repräsentativer Flugzeugtyp
10	<i>nach Anwenderwunsch / szenarioabhängig</i>
11	<i>nach Anwenderwunsch / szenarioabhängig</i>
12	<i>nach Anwenderwunsch / szenarioabhängig</i>

Das *FDM* berechnet neben der Entwicklung der Anzahl der Flugzeuge auch die Entwicklung der Altersstruktur. Das Alter der Flugzeuge wird hierfür in Jahren betrachtet. Die Altersstruktur umfasst für jedes Cluster einen Altersbereich von 0 bis 50 Jahren. Es wird definiert, dass Flugzeuge spätestens mit 51 Jahren ausgeflottet werden. Für die Ausgangsflotte des *FDM* wurde bereits von ASSENHEIMER (2012) für das *EFM* die Altersstruktur auf Basis der ACAS Datenbank bestimmt.

Bei der ACAS Datenbank handelt es sich um eine kommerziell vertriebene Datenbank, welche leichten Zugang zu Flugzeug- und Flottenhistorien bietet (FLIGHTGLOBAL 2014). In dieser sind jedoch Gruppen für die Alter 26-30, 31-35 und > 35 Jahre vorhanden. Für die Ausgangsflotte des *FDM* werden die Flugzeuge innerhalb der Jahresgruppen gleichmäßig verteilt.

3.1.3 Flotteneinsatzmodellierung

Die einzelnen Flugzeuge werden in jedem Simulationsjahr genau einer Modellroute zugeordnet, die sie bedienen. Da die Modellrouten jeweils eine große Anzahl an Flugverbindungen in sich bündeln, bedeutet das für den Einsatz der Flugzeuge, dass sie innerhalb des Jahres nur zwischen genau zwei Regionen oder innerhalb genau einer solchen eingesetzt werden. Für jede Route gibt es dabei zwei zeitlich konstante *load factors* für die Passagier- und Frachtauslastung, welche über die Zielwerte der global operierenden Fluggesellschaft bestimmt sind. Für das *FDM* sind die Faktoren nach Erfahrungswerten des Lehrstuhls für Luftfahrtsysteme festgelegt.

Des Weiteren wird jedem Flugzeugcluster für jeder der 21 Routen eine *Frequenz* zugeordnet, die beschreibt, wie oft ein Flugzeug des Clusters innerhalb eines Jahres auf dieser fliegen kann. Diese Anzahl ist durch die Flugdauer, die der repräsentative Flugzeugtyp für die Routendistanz benötigt, die Zeit, die zur Wartung des Flugzeugs benötigt wird und die Abfertigungszeit am Flughafen beschränkt.

Wie bereits erwähnt, wird die Nachfrage nach Transportleistung routenbasiert betrachtet und erfüllt. Wie und wo die Nachfrage dabei auf einer Route entsteht, wird nicht betrachtet. Damit ist es auch nicht notwendig festzulegen, dass die Flugzeuge immer einen vollständigen Umlauf fliegen.

Die Grundannahme zur Bedienung der Frachtnachfrage durch die Cluster folgt dem *EFM*. Da die normalen Passagiermaschinen neben den Passagieren auch Fracht transportieren, wird bei der Erfüllung der Nachfrage zuerst die *RSKS*-Leistung betrachtet. Anschließend wird die *RTKS*-Leistung, die nicht durch Passagiermaschinen mit bedient werden kann, durch zusätzliche, reine Frachtflugzeuge bedient.

Anders als im *EFM*, können Flugzeuge bei der Erstellung der neuen Flotte von einer Route zur anderen wechseln, soweit in einem Folgejahr auf einer Route eine Überkapazität und auf eine andere Route ein Mangel an Verkehrsleistung besteht.

Die Ausgangstransportleistung auf den 21 Routen wird mit Hilfe eines Datensatzes aus der *OAG* Datenbank des Jahres 2008 berechnet. Die Transportleistungen werden aus den Mittelwerten der monatlich geplanten Flüge berechnet, welche cluster- und routenspezifisch aufgeschlüsselt sind. Relevant sind dabei die *Flugdistanz*, die *Passagieranzahl* und die *Frachtmenge* sowie die *Anzahl der monatlich geplanten Flüge*. *Tabelle 4* zeigt die gewonnenen jährlichen *ASKS*- und *ATKS*-Leistungen für das Startjahr 2008 auf den 21 Routen.

Aus dem *Airbus Global Market Forecast 2014* lässt sich für das Jahr 2008 eine real erbrachte *RPKS*-Leistung von $4,7 \cdot 10^{12}$ [Passagiere·km] und eine *RTKS*-Leistung von $1,7 \cdot 10^{11}$ [Tonnen·km] bestimmen (AIRBUS 2014, S. 58 u. 76). Für den *load factor* der Passagiere ergibt sich für das Gesamtjahr 2008 ein ungefährender Wert von 75% (IATA 2014) und für den *load factor* der Fracht ein ungefährender Wert von 44% (IATA 2014). Mit diesen Werten lassen sich die real verfügbaren *ASKS*- und *ATKS*-Leistungen des Jahres 2008 abschätzen und mit den *OAG* Daten des Gesamtmarktes vergleichen (vgl. *Tabelle 4, letzte Zeile*). Die mit Hilfe der *OAG* Datenbank bestimmten *ASKS*- und *ATKS*-Verkehrsleistungen weichen um rund 4%, beziehungsweise 8%, nach unten ab. Die für das *FDM* verwendeten *OAG* Daten beschreiben die Ausgangsverkehrsleistung des Jahres 2008 damit ausreichend.

Tabelle 4: Start ASKS- und ATKS-Leistung des Jahres 2008 (OAG 2008)

Routen ID	Routenbezeichnung nach <i>EFM</i>	ASKS-Leistung [Sitze · km]	ATKS-Leistung [Tonnen · km]
1	EU-EU	$7,54 \cdot 10^{11}$	$1,42 \cdot 10^{10}$
2	EU-AS	$5,08 \cdot 10^{11}$	$5,52 \cdot 10^{10}$
3	EU-ME	$1,41 \cdot 10^{11}$	$1,78 \cdot 10^{10}$
4	EU-AF	$1,77 \cdot 10^{11}$	$1,09 \cdot 10^{10}$
5	EU-LA	$2,21 \cdot 10^{11}$	$1,53 \cdot 10^{10}$
6	EU-NA	$5,57 \cdot 10^{11}$	$3,84 \cdot 10^{10}$
7	AS-AS	$1,18 \cdot 10^{12}$	$6,04 \cdot 10^{10}$
8	AS-ME	$1,71 \cdot 10^{11}$	$1,91 \cdot 10^{10}$
9	AS-AF	$2,76 \cdot 10^{10}$	$1,83 \cdot 10^9$
10	AS-LA	$5,25 \cdot 10^9$	$1,70 \cdot 10^8$
11	AS-NA	$3,88 \cdot 10^{11}$	$5,16 \cdot 10^{10}$
12	ME-ME	$4,64 \cdot 10^{10}$	$1,94 \cdot 10^9$
13	ME-AF	$4,87 \cdot 10^{10}$	$2,99 \cdot 10^9$
14	ME-LA	$2,72 \cdot 10^9$	$1,40 \cdot 10^8$
15	ME-NA	$4,56 \cdot 10^{10}$	$2,62 \cdot 10^9$
16	AF-AF	$6,37 \cdot 10^{10}$	$2,63 \cdot 10^9$
17	AF-LA	$2,60 \cdot 10^9$	$8,55 \cdot 10^8$
18	AF-NA	$1,43 \cdot 10^{10}$	$6,14 \cdot 10^8$
19	LA-LA	$1,89 \cdot 10^{11}$	$9,76 \cdot 10^9$
20	LA-NA	$2,27 \cdot 10^{11}$	$1,15 \cdot 10^{10}$
21	NA-NA	$1,27 \cdot 10^{12}$	$3,90 \cdot 10^{10}$
Summe	---	$6,04 \cdot 10^{12}$	$3,57 \cdot 10^{11}$

Bei der Berechnung der Flottenentwicklung für die einzelnen Jahre wird die Anzahl der Flugzeuge in jedem der 12 Cluster auf den 21 Routen bestimmt. Das *Matlab FDM* ist, anders als das *EFM*, in der Lage, die Entwicklung der einzelnen Flotten parallel zu berechnen. Das bedeutet, dass für die Flottenabbildung eines Jahres in *Matlab* eine *12x21 Matrix* genutzt werden kann.

3.2 Systems Dynamics Grundgedanke

Hinter der Umsetzung des *FDM* in *Matlab/Simulink* steht eine Modellierung der Flottenentwicklung mit *System Dynamics*. *Abbildung 5* zeigt das entwickelte *System Dynamics* Modell.

Der *Stock* „*Fleet*“ (dt. *Flotte*) wird durch die *Flüsse* „*aircraft add*“ (dt. *Flugzeug hinzufügen*) und „*aircraft remove*“ (dt. *Flugzeug entfernen*) verändert. Seine Startzusammensetzung basiert auf der Ausgangsflotte des Startjahres. Auf die *Flüsse* wirkt neben einer Vielzahl von *Variablen* auch der *Stock* selbst ein, da durch ihn die Notwendigkeit des Hinzufügens oder Entfernens von Flugzeugen bestimmt wird. Auch der *Zufluss* „*aircraft add*“ selbst kann eine Einwirkung auf die Variable „*Wachstumsfaktoren*“ haben.

An dieser Stelle werden die einzelnen Variablen vorgestellt, um ihre Aufgabe in dem Modell zu verdeutlichen und damit die Fähigkeiten des *FDM* zu beschreiben. Ihre spätere Verwendung, wie auch die der weiteren Bestandteile des dargestellten *System Dynamics* Modells, lässt sich in der Implementierung in *Matlab* nur schwer visuell erfassen, da das *FDM* zum Großteil in einem Programmcode beschrieben ist. Im nächsten *Abschnitt 3.3* wird der Aufbau des Modells in *Matlab* detailliert dargestellt. Die Beschreibung der Umsetzung der Variablen und deren genaue Beeinflussungen finden sich dort wieder.

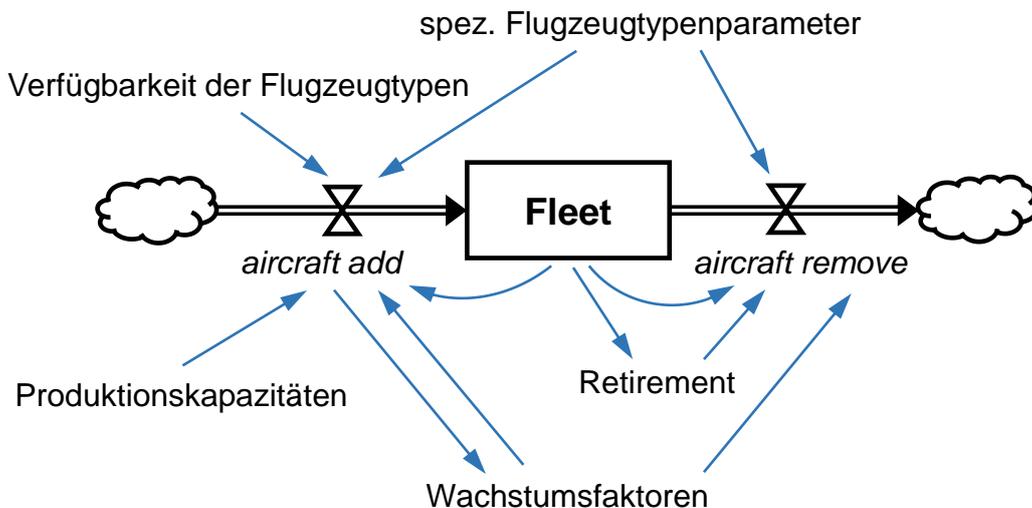


Abbildung 5: System Dynamics Aufbau des neuen FDM

Wie in den grundsätzlichen Modellierungsannahmen beschrieben, wird die Veränderung der Flotte maßgeblich durch die *Wachstumsfaktoren* der *RPKS*- und *RTKS*-Leistung getrieben.

Bei den *spezifischen Flugzeugtypenparametern* handelt es sich um Leistungsparameter, welche die unterschiedlichen Flugzeugtypen hinsichtlich ihres Treibstoffverbrauchs bewerten. Das *Retirement* bezeichnet das altersabhängige Ausscheiden von Flugzeugen aus

der Flotte. Die *Verfügbarkeit der Flugzeugtypen* kann zeitabhängig sein. So ist es möglich, dass ein neuer Flugzeugtyp erst ab einem definierten Zukunftsjahr zur Verfügung steht. Das Hinzufügen von neuen Flugzeugen zur Flotte kann durch *Produktionskapazitäten* der Flugzeughersteller begrenzt sein. Optional kann mit dem *FDM* modelliert werden, dass das durch die *Produktionskapazitäten* begrenzte Flottenwachstum zu einer Absenkung der *Wachstumsfaktoren* führt.

3.3 Aufbau des FDM in Matlab/Simulink

Wie in *Abschnitt 3.1* beschrieben, verläuft die Berechnung der Flottenentwicklung schrittweise auf jährlicher Basis. *Abbildung 6* zeigt die Grundstruktur des in Matlab umgesetzten Modells, bestehend aus vier Modulen. Die Iterationsschleife vom vierten zum dritten Modul dient der Berechnung der Flottenentwicklung für ein weiteres Folgejahr.

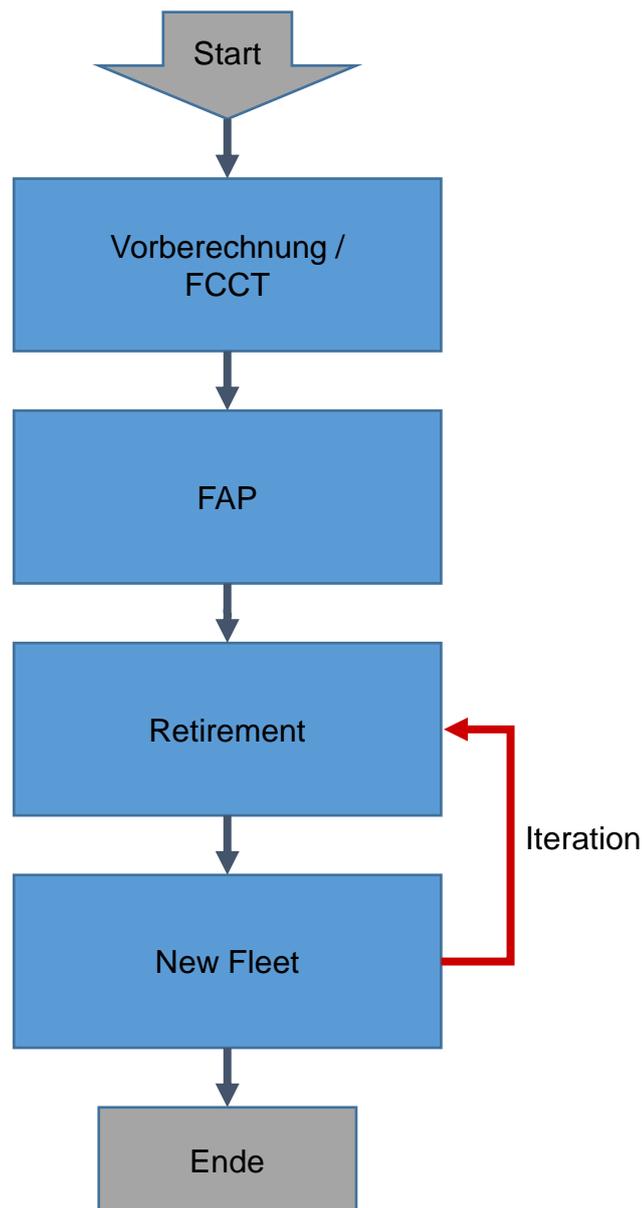


Abbildung 6: Modulaufbau des FDM in Matlab

In dem Modul „*Vorbereitung / FCCT*“ werden einmalig benötigte Berechnungen durchgeführt, auf dessen Ergebnisse bei der Berechnung der Flottenentwicklung der einzelnen Jahre zurückgegriffen wird. In dem Modul „*FAP*“ wird das *Flottenzuweisungsproblem* für die Ausgangsflotte des Jahres 2008 gelöst. Die zwei nachfolgenden Module werden zur Berechnung der jährlichen Flottenentwicklung iterativ aufgerufen.

3.3.1 Modul Vorbereitung/FCCT

Das Modul „*Vorbereitung/FCCT*“ wird zur Berechnungen von Konstanten genutzt. *Abbildung 7* zeigt die in dem Modul enthaltenen Submodule, die im Folgenden vorgestellt werden.

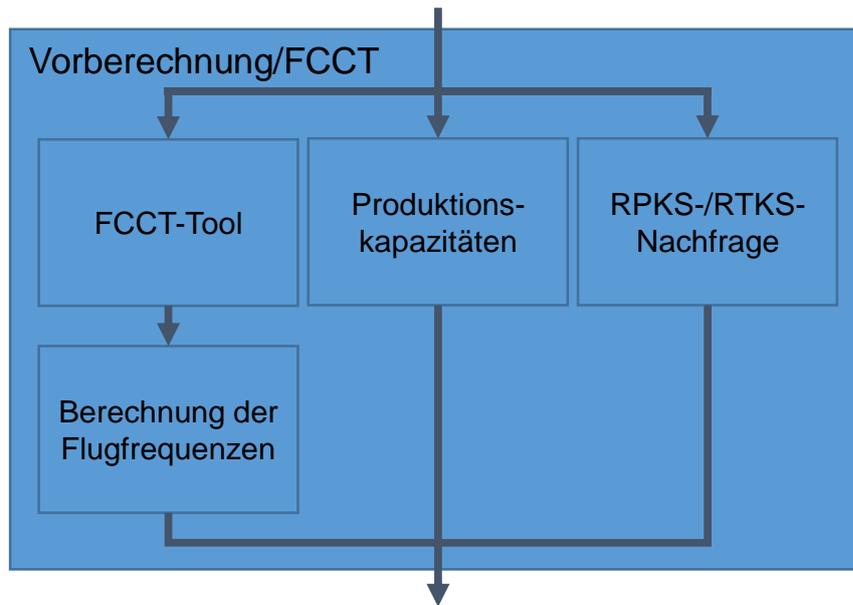


Abbildung 7: Aufbau Modul „Vorbereitung/FCCT“

In das Modul „Vorbereitung/FCCT“ ist das in *Abschnitt 2.3.5* vorgestellte *FCCT-Tool* mit eingebunden. Das *FCCT-Tool* berechnet für die 12 Cluster auf den 21 Routen mit Hilfe einer Missionsrechnung den Treibstoffverbrauch und die benötigte Flugdauer. Dazu wird neben den Cluster- und Routenparametern die cluster- und routenspezifische *Initial Cruise Altitude* benötigt. Die Wahl der *Initial Cruise Altitude* Parameter für diese Arbeit basieren auf Erfahrungswerten des Lehrstuhls für Luftfahrtsysteme.

Zu beachten ist, dass das *FCCT-Tool* für das *FDM* in einem Aspekt seiner Funktion leicht angepasst wurde. Findet der Missionsrechner für einen Flugzeugtyp bedingt durch eine zu große Flugdistanz auf einer Route keine Lösung, hat das *FCCT-Tool* zusätzliche die Möglichkeit, die Sitzplatzanzahl sowie die Frachtmasse schrittweise herabzusenken, um mit der dadurch reduzierten Flugmasse erneut nach einer Lösung zu suchen. Ist es dem Tool dann möglich, eine Mission zu berechnen, so wird die neue Sitz- und Frachtkonfiguration des Clusters auf der betroffenen Route für den weiteren *FDM* Ablauf übernommen.

Im Anschluss einer vollständigen *FDM*-Berechnung sollten die verwendeten Flugzeugkonfigurationen deshalb auf Plausibilität geprüft werden.

Im Gegensatz zum *EFM*, wo die Frequenzen über eine Rückwärtsrechnung kalkuliert wurden (vgl. *Abschnitt 2.3.1*), wird im *FDM* ein neuer Ansatz gewählt. Mit Hilfe der berechneten Flugdauern wird die jährliche Flugfrequenz berechnet, die ein Flugzeugtyp auf einer Route maximal erreichen kann. Für den Einsatz eines Flugzeugtyps auf einer Route wird in dem *FDM* dann angenommen, dass er dort mit der maximal möglichen Frequenz fliegt.

Die jeweilige Frequenz eines Clusters i auf einer Route j wird nach *Gleichung (3.1)* berechnet. Die Anzahl der Stunden eines Jahres wird dafür durch die *Utilization Hours (UH)* (dt. Nutzungszeit) geteilt. Die *UH* ist definiert als die Gesamtzeiten, die für eine vollständige Flugoperation angesetzt wird. Nach *Gleichung (3.2)* setzt sie sich aus der reinen Reisezeit „*Block Hours*“ (BH), der Abfertigungszeit am Flugsteig „*Turnaround Hours*“ (TH) und der Instandhaltungszeit „*Maintenance Hours*“ (MH) zusammen.

$$Freq_{ij} = \frac{8760h}{UH_{ij}} \quad (3.1)$$

$$UH_{ij} = BH_{ij} + MH_{ij} + TH \quad (3.2)$$

$$UH_{ij} = \alpha_{ij} \cdot BH_{ij} + 1 \quad (3.3)$$

TETZLOFF/CROSSLEY (2009) setzen in ihrer Studie für die TH eine Dauer von einer Stunde an. Diese Abschätzung wird für das *FDM* übernommen. Bei der MH wird eine Abhängigkeit von der Flugdauer angenommen. Dabei muss beachtet werden, dass Flugzeuge im Kurzstreckendienst einen deutlich größeren Wert für die MH besitzen, da durch die häufigen Starts und Landungen die Triebwerke und die Flugzeugstruktur besonders stark belastet werden. Die MH wird deshalb mit Hilfe eines α -Faktors über die Flugzeiten bestimmt. Damit ergibt sich *Gleichung (3.3)*. Die repräsentativen Flugzeuge des *FDM* werden einem typischen Einsatzverhalten zugeordnet. Dabei wird zwischen Kurz-, Mittel- und Langstreckendienst unterschieden.

Tabelle 5 zeigt die verwendete Zuordnung, die von ZWENZNER (2014) bestimmt wurde.

Tabelle 5: Zuordnung allgemeiner Einsatztyp der Cluster (ZWENZNER 2014)

Cluster ID	allgemeiner Einsatztyp
1	Langstrecke
2	Langstrecke
3	Mittelstrecke
4	Kurzstrecke
5	Langstrecke
6	Kurzstrecke
7	Mittelstrecke
8	Langstrecke
9	Kurzstrecke
10	<i>nach Anwenderangabe</i>
11	<i>nach Anwenderangabe</i>
12	<i>nach Anwenderangabe</i>

Der Flugzeughersteller Boeing stellt in einer Präsentation die typischen Nutzungszeiten einer Boeing 777 und einer Boeing 737NG vor (BOEING 2013). Hierbei handelt es sich zum einen um ein typisches Langstrecken- und zum anderen um ein typisches Kurzstreckenflugzeug. Aus den in der Präsentation genannten Verwendungszeiten lässt sich der α -Faktor für ein Flugzeugtyp i nach Gleichung (3.4) berechnen. Zu beachten ist, dass bei der MH die „Not Utilized“ (dt. nicht verwendet) Zeit addiert wird (vgl. Gleichung (3.5)). Die BH setzt sich aus der Flugzeit und der Rollzeit am Boden zusammen (vgl. Gleichung (3.6)). Für den α -Faktor eines Langstreckenflugzeugs ergibt sich der α -Faktor 1,5. Für den Kurzstreckentyp ergibt sich ein α -Faktor von 2,2.

$$\alpha_i = 1 + \frac{MH_i}{BH_i} \quad (3.4)$$

$$MH_i = \text{Daily Check}_i + A, C\&D \text{ Checks}_i + \text{Not Utilized}_i \quad (3.5)$$

$$BH_i = \text{Flight Time}_i + \text{Taxi Time}_i \quad (3.6)$$

ZHAO U.A. (2010) betrachten in ihrer Studie den α -Faktor typenunabhängig. Basierend auf Angaben von Boeing geben Sie einen deutlich größeren Faktor von 4,5 an. Diesen verwenden sie für alle von ihnen betrachteten Flugzeugcluster.

Um die Wahl der α -Faktoren für das *FDM* zu erläutern, muss an dieser Stelle etwas vorgegriffen werden. Die nach BOEING (2013) Angaben berechneten α -Faktoren werden leicht angepasst. Für die Bestimmung der Faktoren wird folgende Überlegung angestellt: Betrachtet wird das Ausgangsjahr 2008, für das sowohl die Zusammensetzung der Flugzeugflotte, als auch die planmäßigen Transportleistungen bekannt sind. In *Abschnitt 3.3.2* wird das *FAP-Tool* vorgestellt. Im *FDM* hat es die Aufgabe, die verfügbaren Flugzeuge so auf die Routen zu verteilen, dass die geforderten Transportleistungen mit geringstmöglichem Gesamtreibstoffbedarf erreicht werden. Dabei spielt die Frequenz, mit der die Flugzeuge verkehren, eine wichtige Rolle. Ist sie zu gering, kann die geforderte Transportleistung mit der Ausgangsflotte nicht erreicht werden. Die α -Faktoren der verschiedenen Flugzeugtypen werden durch schrittweises Testen soweit vom Ausgangswert in Richtung 4,5 gesteigert, bis das *FAP-Tool* keine Lösung mehr für das *Flottenzuweisungsproblem* der Ausgangsflotte finden kann. Für den α -Faktor der Mittelstreckenflugzeuge wird dabei jeweils der Mittelwert aus den Kurz- und Langstrecken α -Faktoren gebildet. Durch dieses Vorgehen wird die Verkehrsleistung der Ausgangsflotte an die gewünschte Ausgangsverkehrsleistung angepasst.

Es ergibt sich ein maximaler α -Faktor von 3,25 für die Kurzstreckenflugzeugtypen und ein Faktor von 1,7 für die Langstreckenflugzeugtypen. Für die Mittelstreckenflugzeuge ergibt sich der α -Faktor zu 2,475.

Um den Einsatz von Mittel- und Langstreckenflugzeugen auf kurzen Flugrouten nicht zu bevorzugen, beziehungsweise um die dort gesteigerte Instandhaltungszeit abzubilden, wird eine Ausnahme bei der Verwendung der ursprünglich nur clusterspezifischen α -Faktoren eingeführt. Mit Hilfe der *OAG* Datenbank des Jahres 2008 wird für jedes der Cluster 1 bis 9 eine „typische“ Flugdistanz berechnet. Dies geschieht durch die Mittelwertbildung aus den 21 Routendistanzen und der Gewichtung durch die Anzahl der geplanten Operationen. Weicht für ein Cluster in dem Flottenmodell die einzelne Flugdistanz einer Route um mehr als den Faktor 0,5 von der „typischen“ Flugdistanz nach unten ab, wird für die Mittel- und Langstreckenflugzeugtypen der α -Faktor des Kurzstreckentyps auf dieser Route übernommen.

Ebenfalls dem *FDM*-Modul „*Vorbereitung/FCCT*“ zugehörig ist die Berechnung der *Produktionskapazitäten*. Wie in *Abschnitt 2.3.4* beschrieben, werden die *Produktionskapazitäten* der drei großen Hersteller für die Zukunft vorhergesagt. Die von ENGELKE (2014) berechneten Funktionen, die dieses Verhalten beschreiben, werden für das *FDM* leicht variiert übernommen.

An dieser Stelle wird schon einmal darauf hingewiesen, dass sich in der Modellierung des *FDM* beim Hinzufügen neuer Flugzeuge in die Flotte die Betrachtung der *Produktionskapazitäten* nur auf die Passagierflugzeuge und nicht auf die reinen Frachtflugzeuge

bezieht. Des Weiteren weist ENGELKE in seiner Arbeit darauf hin, dass die von ihm betrachteten drei großen Flugzeughersteller nur 85% der Flugzeuge der verwendeten Ausgangsflotte produziert haben. Für das *FDM* wird angenommen, dass die nicht erfassten 15%, zum Großteil *single-aisle* Passagierflugzeuge anderer Hersteller sind, da es im Jahr 2014 neben Airbus und Boeing keinen weiteren Produzenten von *twin-aisle* Passagierflugzeugen gibt. Die *single-aisle Produktionskapazitäten* jedes Jahres wird aus diesem Grund in einem ersten Ansatz um 15% nach oben korrigiert.

Die letzte Aufgabe des Moduls „*Vorbereitung/FCCT*“ ist, die jährliche Nachfrage nach *RPKS*- und *RTKS*-Leistung für die Simulationsjahre zu berechnen. Ausgehend von den bekannten Verkehrsleistungen des Jahres 2008, werden mittels der Wachstumsfaktoren die geforderten Verkehrsleistungen für jedes Jahr hochgerechnet.

3.3.2 Modul FAP

Das Modul „*FAP*“ hat die Aufgabe, die Ausgangsflotte des Jahres 2008 auf die 21 Routen optimal zu verteilen. Optimal bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der geringstmögliche Treibstoffverbrauch auf Gesamtflottenniveau erreicht wird.

Randbedingungen für die Optimierung sind die geforderten Transportleistungen des Jahres 2008 auf den 21 Routen. Das von ZWENZNER (2014) entwickelte *FAP-Tool* soll diese Aufgabe in dem *FDM* übernehmen.

Die Optimierungsfunktion arbeitet mit den zur Verfügung stehenden Flugzeugen je Cluster sowie den geforderten *ASKS* und *ATKS*-Leistungen. Zur Optimierung werden weitere Variablen benötigt, welche zum Teil in dem vorhergehenden Modul „*Vorbereitung/FCCT*“ berechnet wurden (*Abschnitt 3.3.1*). Benötigt werden die cluster- und routenspezifischen *Distanzen*, *Sitz-* und *Frachtkonfigurationen* sowie *Treibstoffverbräuche* und *Flugfrequenzen*.

Das ursprünglich von ZWENZNER entwickelte *FAP-Tool* sah vor, dass die Frequenzen, mit denen die Flugzeuge auf den Routen verkehren, ebenfalls Optimierungsvariablen sind. Der *FAP*-Algorithmus gab nach erfolgreicher Optimierung die Anzahl der Flugzeuge pro Cluster und Route sowie die jährliche Frequenz, mit der diese verkehren sollen, aus. Da die Flugzeuge nach der *FDM*-Modellierung aber jahresweise genau einer Route zugewiesen werden und nur auf dieser verkehren können, hätte das Vorhandensein der Frequenz-Variablen keine exaktere Modellierung zur Folge, sondern würde dazu führen, dass der Luftverkehr des Startjahres nicht mit der geringstmöglichen Anzahl an Flugzeugen durchgeführt wird. Es wird daher die bereits erwähnte Modellierungsannahme getroffen, dass die Flugzeuge auf den Routen nur mit der maximalen Flugfrequenz eingesetzt werden. Die Frequenzen werden also nicht als Optimierungsvariable betrachtet.

Bei dem *Flottenzuweisungsproblem* wird in der Literatur von einem ganzzahligen Optimierungsproblem gesprochen. Da der *Matlab* Optimierungsalgorithmus aber mit reellen Zahlen rechnet und das Verwenden dieser anstelle von ganzen Zahlen zu keinem großen Modellierungsfehler führt, kann auf eine Rundung verzichtet werden (ZWENZNER 2014, S. 46). In dem gesamten *FDM* wird deshalb mit reellen Zahlen gerechnet. Ausgangsgröße des „*FAP*“ Moduls ist die Flottenverteilung für das Startjahr 2008 auf die 21 Routen. Im Sinne der Flottenmodellierung werden Flugzeuge, die nicht zum Erreichen der Verkehrsleistung benötigt werden, nach dem Lösen des *Flottenzuweisungsproblems* ausgeflottet. Dabei werden clusterweise die jeweils ältesten Flugzeuge aus der Flotte entfernt.

3.3.3 Modul Retirement

Das Modul „*Retirement*“ gehört zu dem Teil des *FDM*, welcher iterativ für jedes Simulationsjahr durchlaufen wird (vgl. *Abbildung 6*).

Das „*Retirement*“ Modul hat die Aufgabe, am Ende jedes simulierten Jahres die vorhandene Flotte um ein Jahr „altern zu lassen“ und dabei ebenfalls die altersabhängige Ausflottung im Sinne der in *Abschnitt 2.3.3* vorgestellten *Überlebenskurven* vorzunehmen. Mit den in *Tabelle 1* dargestellten β -Parametern sind die clusterspezifischen *Überlebenskurven* bekannt.

Für eine Anwendung der *Überlebenskurven* im *FDM*, muss die *Gleichung (2.3)* in eine Vorschrift überführt werden. Diese Vorschrift ist in *Gleichung (3.7)* dargestellt. Sie gibt die Anzahl der aktiv bleibenden Flugzeuge der Flottencluster mit dem aktuellen Alter x für das Folgejahr an. Für Flugzeuge, welche erst in dem aktuell betrachteten Jahr hinzugefügt wurden und die damit das Alter 0 Jahre haben, wird die Vorschrift nach *Gleichung (3.8)* angewendet.

$$A(x + 1) = A(x) \cdot \frac{1 + e^{-\beta_0 - \beta_1 \cdot x}}{1 + e^{-\beta_0 - \beta_1 \cdot (x+1)}} \quad (3.7)$$

$$A(1) = A(0) \cdot \frac{1}{1 + e^{-\beta_0 - \beta_1}} \quad (3.8)$$

Wie in *Abschnitt 3.1* beschrieben, wird die Entwicklung der Flotte routenbasiert betrachtet. Bei der Altersstruktur kann das *FDM* jedoch nur die Gesamtflotte abbilden, die Altersstrukturen der einzelnen Routen werden nicht getrennt betrachtet. Dieser verwendete Ansatz geht von gleichförmigen Altersverteilungen auf den 21 Routen für jedes betrachtete Cluster und Jahr aus.

3.3.4 Modul New Fleet

Das Modul „*New Fleet*“ wird, wie das Modul „*Retirement*“, welches in *Abschnitt 3.3.3* vorgestellt wurde, iterativ für jedes Simulationsjahr aufgerufen (vgl. *Abbildung 6*).

Die Aufgabe des Moduls „*New Fleet*“ ist, die nach dem „*Retirement*“ verbleibende Flotte eines Jahres so anzupassen, dass die geforderten Verkehrsleistungen des Folgejahres erreicht werden. *Abbildung 8* zeigt das schematisch am Beispiel der Passagiertransportleistung einer Route. Die ASKS-Leistung des Jahres i wurde durch die altersabhängige Ausflottung (*Retirement*) gesenkt. Die Differenzleistung zum Jahr $i+1$ kann nur durch neue Flugzeuge erbracht werden.

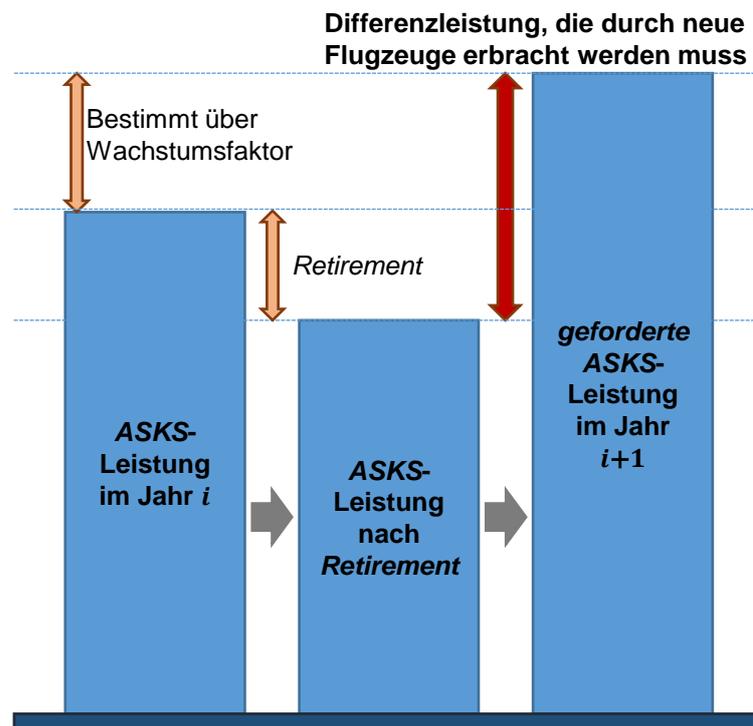


Abbildung 8: ASKS-Leistungsdifferenz einer Route

Die Auswahl der neuen Flugzeuge, die der Flotte hinzugefügt werden müssen, beziehungsweise die Auswahl der Flugzeuge, die aus der Flotte entfernt werden müssen, ist von einer Vielzahl an Variablen abhängig (vgl. *Abbildung 5*). Dabei bietet das *FDM* mehrere optionale Detailmodellierungen an, die vom Anwender aktiviert werden können.

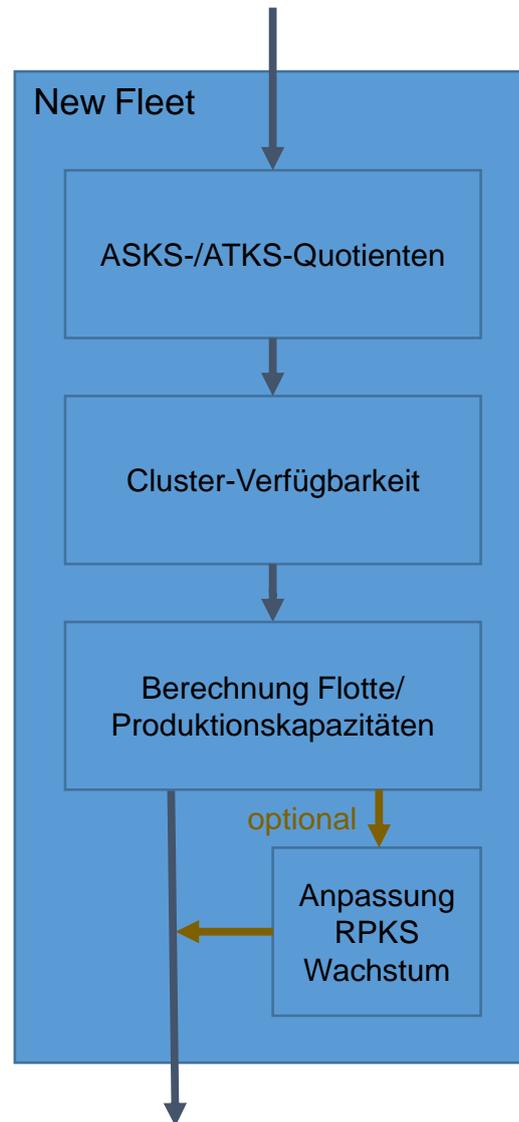


Abbildung 9: Aufbau Modul „New Fleet“

Abbildung 9 zeigt den Aufbau des Moduls „New Fleet“. Zur Bewertung der Treibstoffverbräuche pro Transportleistung der Cluster auf den einzelnen Routen werden im ersten Schritt „ASKS-“ und „ATKS-Quotienten“ berechnet.

$$ASKS-Quotient_{ij} = \frac{FB_{ij}}{D_{ij} \cdot S_{ij}} \quad (3.9)$$

$$ATKS-Quotient_{ij} = \frac{FB_{ij}}{D_{ij} \cdot F_{ij}} \quad (3.10)$$

- FB – Treibstoffverbrauch für eine Flugoperation
- D – Flugdistanz
- S – Sitzplatzkapazität
- F – Frachtkapazität
- i – Flugzeugcluster
- j – Route

Die Quotienten nach *Gleichung (3.9)* und *(3.10)* geben den Sitzplatzkilometer-spezifischen Kraftstoffverbrauch beziehungsweise Tonnenkilometer-spezifischen Kraftstoffverbrauch eines Flugzeugclusters i auf der Route j an. Die benötigten Faktoren sind aufgelistet.

Werden auf einer Route neue Flugzeuge benötigt, so wird der routenspezifisch bestmögliche Flugzeugtyp hinzugefügt, welcher über den kleinsten Quotienten bestimmt ist. Müssen Flugzeuge entfernt werden, wird routenspezifisch der verfügbare Typ entfernt, welcher über den größten Quotienten verfügt.

Dabei muss beachtet werden, dass die Clusterverfügbarkeit und -auswahl durch mehrere Faktoren eingeschränkt sein kann. Eine dieser Beschränkungen wird in dem zweiten Sub-Modul „*Cluster-Verfügbarkeit*“ umgesetzt. Nach Anwenderwunsch können Cluster nur zu bestimmten Jahren beim Hinzufügen verfügbar sein. Wie in *Abschnitt 3.1.2* beschrieben, stehen neben den 9 Clustern der Ausgangsflotte 3 weitere Cluster zur Verfügung. In diesen Clustern können neuartige Flugzeugtypen hinterlegt sein. Es ist dann sowohl möglich, ein Start-Verfügbarkeitsjahr für die Cluster 10 bis 12 als auch ein End-Verfügbarkeitsjahr für die Cluster 1-12 festzulegen. Damit wird es möglich, neue Flugzeugtechnologien zeitdefiniert einzuführen.

Die Berechnung der benötigten Flugzeuge zum Erbringen der Transportleistungen des Folgejahres findet in dem Modul „*Berechnung Flotte/Produktionskapazitäten*“ statt. Die Bestimmung der Anzahl der Flugzeuge, die der Flotte hinzugefügt oder die aus der Flotte entfernt werden müssen, wird in dem *FDM* mit Hilfe eines *Simulink* Modells berechnet. Es ist auf Grund seines Umfangs in *Abbildung 10* als „abgeschlossenes System“ dargestellt. Mit Kenntnis der nötigen Parameter wird die aktuelle Verkehrsleistung bestimmt und mit der Zielleistung des Folgejahres verglichen. Zum Ausgleich der Differenz in der

Verkehrsleistung wird routenspezifisch die benötigte Differenz-Flugzeuganzahl berechnet. Die Auswahl der zu nutzenden „beste Wahl“-Cluster wurde vorher in Matlab über die *ASKS*- und *ATKS*-Quotienten bestimmt. Ausgabevariable des Simulink Modells ist die benötigte Differenz, welche auch negativ sein kann.

Bei der Berechnung der Frachtflugzeuganzahl wird in dem *Simulink* Modell Rechnung getragen, dass reine Frachtmaschinen nur die durch Passagiermaschinen nicht erbrachte, übrige Frachttransportleistung erbringen sollen.

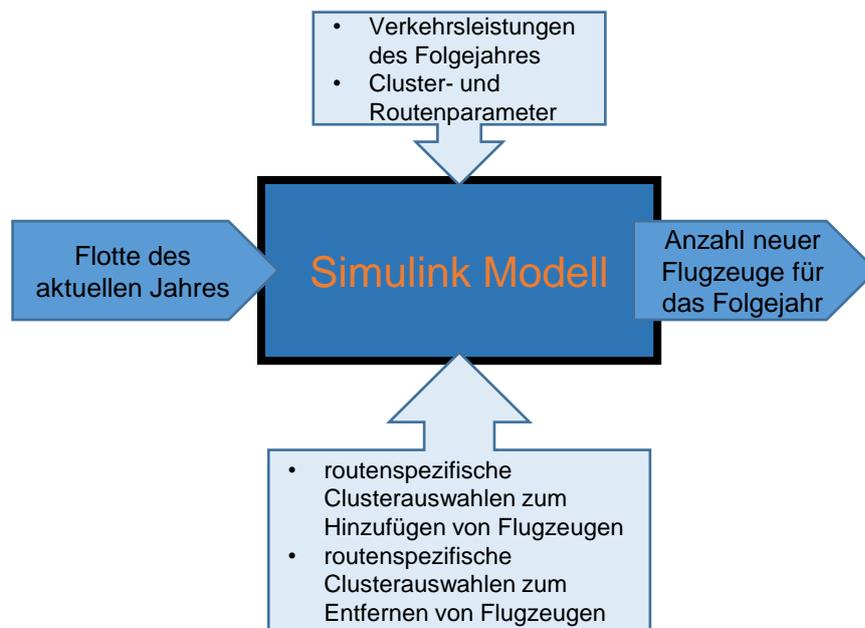


Abbildung 10: Simulink Modell als „abgeschlossenes System“

Das *FDM* bietet optional die Möglichkeit, bei der Berechnung der Flugzeuge, die der Flotte neu hinzugefügt werden, die *Produktionskapazitäten* für die Passagiermaschinen zu beachten. Dabei ist es dem *FDM* nicht möglich, die neu hinzugefügten, reinen Frachtmaschinen bei den *Produktionskapazitäten* mit zu beachten. Da die in *Abschnitt 2.3.4* berechneten *Produktionskapazitäten* Frachtflugzeuge mit einschließen, folgt daraus, dass diese berechneten Kapazitäten tendenziell etwas zu hoch angesetzt sind.

Durch die Beachtung der *Produktionskapazitäten* wird das *FDM* bei der Auswahl der neuen Passagierflugzeuge unter Umständen weiter eingeschränkt. Die „beste Wahl“-Strategie muss in diesem Fall angepasst werden.

Die *Produktionskapazitäten* aus *Abschnitt 2.3.4* unterscheiden *single*- und *twin-aisle* Flugzeuge. Die Cluster müssen deshalb einem der beiden Typen zugewiesen werden. Für die Cluster 10, 11 und 12 wird diese Zuordnung durch den Anwender bestimmt. Die

Cluster 1 bis 9 werden entsprechend der von ENGELKE (2014) vorgeschlagenen Zuordnung zugeteilt. Danach enthalten die Cluster 4, 6 und 9 *single-aisle* und die Cluster 1, 2, 7, 8 *twin-aisle* Flugzeugtypen.

Abbildung 11 zeigt ein prinzipielles Flussdiagramm der Abläufe, welche bei der Berechnung der neuen Flotte in Bezug auf die Produktionskapazitäten durchlaufen werden.

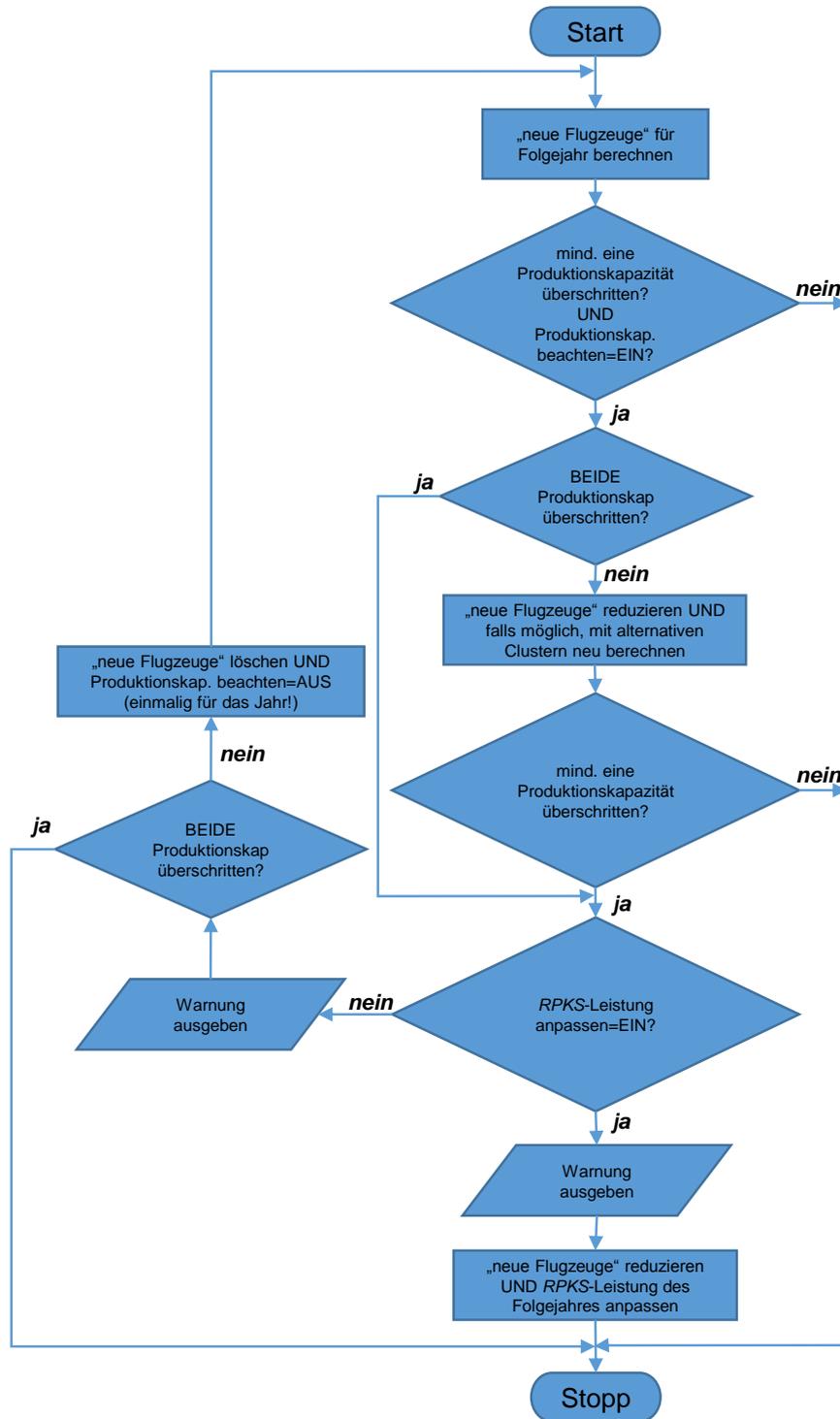


Abbildung 11: Flussdiagramm Produktionskapazitäten

Wird die Option zum Beachten der *Produktionskapazitäten* aktiviert und übersteigt die Zahl der neu geforderten Flugzeuge eine der *Produktionskapazitäten* des Jahres, versucht das *FDM*, die überschüssigen Flugzeuge durch Flugzeuge des anderen Typs zu ersetzen. Für die Flugzeugtypen, welche die Produktionskapazität übersteigen, wird dann die Zahl der geforderten Flugzeuge gleichmäßig auf das Produktionskapazitätsniveau gesenkt. Gleichmäßig heißt dabei insbesondere unabhängig von Cluster- und Routenparametern. Anschließend wird eine variierte „*beste Wahl*“-Strategie verwendet. Die Auswahl der alternativen Flugzeuge, welche die entstandene Transportleistungslücke auffüllen müssen, geschieht erneut nach den *ASKS*-Quotienten. Dabei werden, soweit möglich, nur die Cluster beachtet, die nicht zu einer erneuten Überhöhung der gerade als problematisch ausgemachten *Produktionskapazität* führen.

Gelingt es dem *FDM* nicht, und mindestens eine *Produktionskapazitätsgrenze* wird bei dem Versuch erneut verletzt oder werden anfangs beide *Produktionskapazitäten* überschritten, gibt es zwei Optionen. Bei der ersten Option wird eine Warnung an den Anwender ausgegeben und die Berechnung der neu geordneten Flugzeuge wird ohne Beachtung der *Produktionskapazitäten* für das aktuelle Jahr komplett neu ausgeführt, sodass nur die bestmöglichen Flugzeugtypen hinzugefügt werden.

Alternativ kann von dem Anwender das Sub-Modul „*Anpassung RPKS Wachstum*“ aktiviert werden, was hier die zweite Option darstellt.

Der Anwender hat die Wahl, dass eine erneute oder doppelte Produktionskapazitätsüberschreitung dazu führt, dass die geforderte *RPKS*-Leistung des Folgejahres herabgesenkt wird. Das führt dazu, dass die *Produktionskapazitäten* eingehalten werden, dafür aber die Wachstumsfaktoren routenspezifisch für das aktuelle Jahr gesenkt werden.

Wird die zweite Option ausgeführt, findet, soweit notwendig, erneut eine gleichmäßige Reduzierung der neu eingesetzten Flugzeuge auf das *Produktionskapazitätsniveau* statt. Aufbauend auf den erreichten Transportleistungen für das Folgejahr wird für die weiteren Folgejahre durch Anwendung der zugehörigen *RPKS*-Wachstumsfaktoren die neue geforderte Transportleistung bestimmt. Eine Absenkung der *RPKS-Leistung* wirkt sich damit auf alle dem Folgejahr folgenden Simulationsjahre insofern aus, als dass die mengenmäßig geforderte Transportleistung gesenkt wird. Im Anschluss an die *FDM* Simulation lassen sich dann die erreichten *RPKS*-Wachstumsfaktoren der einzelnen Jahre und Routen berechnen, so dass ein Vergleich mit den ursprünglich eingegebenen Wachstumsfaktoren möglich ist.

Nach Abschluss der Bestimmung der neuen Flugzeuge steht die neue Flottenzusammensetzung für das Folgejahr fest. Der in *Abbildung 6* dargestellte iterative Sprung wird durchgeführt, um die Flotte für ein weiter folgendes Simulationsjahr zu berechnen. Wird das Ziel-Berechnungsjahr erreicht, ist die Simulation abgeschlossen.

3.4 Eingangs- und Ausgangsgrößen

In diesem Abschnitt sollen zusammengefasst die Eingabeparameter und Ausgabedaten vorgestellt werden, welche vom *FDM* angeboten werden. *Abbildung 12* zeigt diese in Gruppen zusammengefasst, die im Folgenden beschrieben werden.

Die erste Gruppe der Eingabeparameter beschreibt die Ausgangsflotte und die Ausgangs-transportleistung des Jahres 2008. Für das *FDM* sind dazu die Altersverteilung und die *ASKS*- und *ATKS*-Leistung in Variablen hinterlegt. Daneben gibt es eine weitere Variable, welche die gemittelte Anzahl der monatlich geplanten Flüge des Jahres 2008 cluster- und routenspezifisch auf Basis der *OAG* Datenbank enthält. Sie wird benötigt, um die in *Abschnitt 3.3.1* beschriebene Korrektur der α -Faktoren vorzunehmen.

Zur Anwendung des *FDM* werden die Parameter, die das jährliche Wachstum der *RPKS*- und *RTKS*-Leistungen beschreiben, in *Matlab*-Variablen hinterlegt. Sie gehören der zweiten Gruppe der Eingabeparameter an.

Die dritte Gruppe enthält die Variablen der Cluster- und Routendefinition.

Sie werden über eine Excel-Tabelle dem *Matlab*-Tool zugeführt. Definiert sind hier die routenspezifischen Parameter der repräsentativen Flugzeugtypen. Dazu gehören die *Flugdistanzen*, *Sitz-* und *Frachtkonfiguration* sowie die *load factors* und die jeweilige *Initial Cruise Altitude*.

Weitere wichtige Parameter, die in der vierten Gruppe zusammengefasst sind, fragt das *FDM* im Programmablauf vom Anwender ab. Dazu gehören das Ziel-Simulationsjahr und Parameter die das Verhalten der neuen Cluster 10-12 beschreiben. Auch können hier die optionalen Beachtung der *Produktionskapazitäten* aktiviert werden.

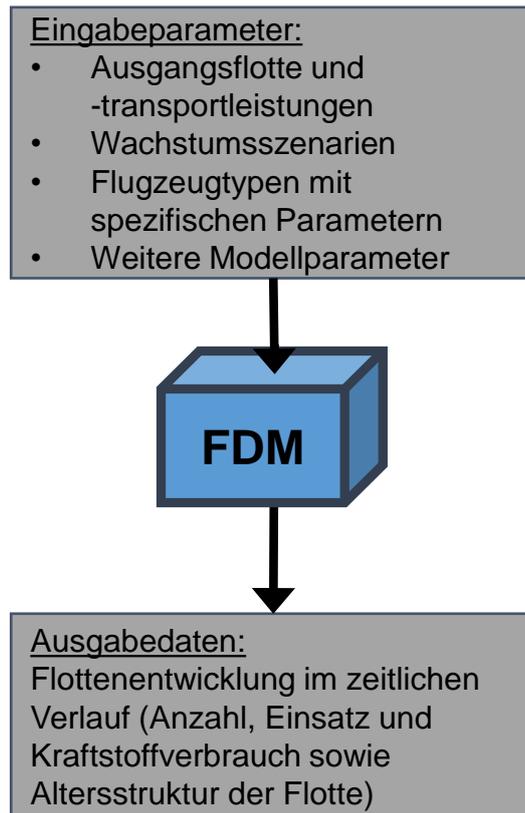


Abbildung 12: Ein- und Ausgabedaten des FDM

Das *Matlab/Simulink* Modell des FDM bietet eine große Zahl an Ausgabewerten. Von besonderem Interesse ist die Flottenentwicklung im zeitlichen Verlauf. Der Übersicht halber werden die Ausgangsvariablen der Matlab Berechnung an dieser Stelle einzeln aufgezählt:

1. Das *FDM* gibt die Anzahl der Flugzeuge je Cluster und Route im zeitlichen Verlauf aus. *Abbildung 13* zeigt den Aufbau der Matlab-Variablen „z_FleetIS_Route_trend“.

Flotte Jahr 2012	Route 1	Route 2	...	Route 21
Flotte Jahr 2011	Route 1	Route 2	...	Route 21
Flotte Jahr 2010	Route 1	Route 2	...	Route 21
Flotte Jahr 2009	Route 1	Route 2	...	Route 21
Flotte Jahr 2008	Route 1	Route 2	...	Route 21
Cluster 1	20	10	...	0
Cluster 2	8	9	...	0
Cluster 3	0	0	...	8
Cluster 4	0	42	...	0
...
Cluster 12	0	10	...	23

Abbildung 13: Aufbau der Ausgabevariablen „z_FleetIS_Route_trend“

2. Die Gesamtflottenentwicklung, welche der Anzahl der Flugzeuge in Summe über alle Routen entspricht, ist in der Variablen *„z_FleetIS_trend“* zu finden. Der Aufbau ist ein *Abbildung 14* dargestellt.

Flotte	Σ Routen Jahr 2008	Σ Routen Jahr 2009	Σ Routen Jahr 2010
Cluster 1	120	130	150
Cluster 2	33	30	30
Cluster 3	40	56	68
Cluster 4	300	330	335
...
Cluster 12	190	220	255

Abbildung 14: Aufbau der Ausgabevariablen „z_FleetIS_trend“

3. Für die Betrachtung der Anzahl der hinzugefügten Flugzeuge pro Jahr gibt das *FDM* die Variablen *„z_added_acft_Route_trend“* und *„z_added_acft_total_trend“* aus, welche den gleichen Aufbau wie die Variablen unter 1. und 2. aufweisen. Die hinzugefügten Flugzeuge eines Jahres werden dabei erstmals in dem Folgejahr in der Flotte eingesetzt.
4. Die Variable *„z_age_distribution_trend“* beinhaltet die Altersverteilung der Gesamtflotte im zeitlichen Verlauf. Der Aufbau für ein zur Betrachtung ausgewähltes Jahr ist in *Abbildung 15* dargestellt. Der Aufbau der Variable *„z_age_distribution_trend“* besitzt für jedes Simulationsjahr eine solche Matrix. Diese sind, wie in *Abbildung 13* dargestellt, gestapelt.

Flotte Altersverteilung	0 Jahre	1 Jahr	...	50 Jahre	51 Jahre
Cluster 1	3	5	...	1	0
Cluster 2	5	4	...	0	0
Cluster 3	0	3	...	1	0
Cluster 4	4	2	...	0	0
...	0
Cluster 12	2	5	...	1	0

Abbildung 15: Aufbau der Ausgabevariable „z_age_distribution_trend“

5. Der Kraftstoffverbrauch der Flotte wird routen- und clusterspezifisch in kg pro Jahr in der Variable *„z_FB_Route_trend“* gespeichert. Der Aufbau gleicht der *Abbildung 13*.

4 Verarbeitungsbeispiel eines Szenarios

In diesem Abschnitt soll ein Szenario der Flottenentwicklung bis zum Jahr 2033 mit dem neuen Flottenmodell *FDM* berechnet werden. *Abschnitt 4.1* stellt die verwendeten Beispielszenario-Kenngrößen vor. In *Abschnitt 4.2* wird die Bedienung des *FDM-Tools* in *Matlab* aus Anwendersicht beschrieben. Abschließend findet in *Abschnitt 4.3* eine Zusammenfassung und Validierung der Simulationsergebnisse statt.

4.1 Szenario-Kenngrößen

Das jährliche Wachstum der globalen Passagiernachfrage von 4,7% und das jährliche globale Frachtnachfragewachstum von 4,5% sind dem *Global Market Forecast 2014* (AIRBUS 2014) entnommen. Der *Global Market Forecast 2014* betrachtet eigentlich einen Zeitraum von dem Jahr 2014 bis 2033. Für das hier betrachtete *FDM* Szenario werden die genannten Wachstumsfaktoren für den Zeitraum 2008 bis 2033 als konstant und auf allen 21 Routen angenommen.

Betrachtet wird ein Szenario, in welchem neben den Clustern 1-9 ab dem Jahr 2025 ein neuer Flugzeugtyp zur Verfügung steht. Dieser Flugzeugtyp wird der Repräsentant eines neuen Clusters (Cluster 10). Dabei handelt es sich um das am Lehrstuhl für Luftfahrtsysteme entwickelte Flugzeugkonzept P420, ein *twin-aisle* Kurzstreckenflugzeug (IWANIZKI/RANDT/SARTORIUS 2014).

4.2 Modelldurchlauf

Vor dem Start der Simulation müssen die Wachstumsfaktoren in die Variablen „*rpks_gf.mat*“, beziehungsweise „*rtps_gf.mat*“ gespeichert werden. Für die repräsentativen Flugzeugtypen der Cluster 1-10, müssen die cluster- und routenspezifischen Parameter für *Distanz*, *Sitz- und Frachtkonfiguration* sowie die *Initial Cruise Altitude* und die routenspezifischen *load factors* in der Excel-Tabelle „*InputDataFleetModelNew.xlsx*“ hinterlegt werden. Zu beachten ist, dass aus programmtechnischen Gründen, auch für die in diesem Szenario nicht benutzten Cluster 11 und 12, Werte hinterlegt sein sollten. Ähnliches gilt auch für die noch folgenden Parameter und Einstellungen, die vom Anwender, durch das *FDM-Tool*, eingelesen werden. Auch dabei sollten für die nicht genutzten Cluster beliebige Werte eingegeben werden.

Mittels des *Matlab* Skripts „*Main.m*“ wird der Programmablauf des *FDM* gestartet. Zu Beginn kann ein Name für das aktuelle Berechnungsprojekt vergeben werden, welcher zum Abspeichern der Ergebnisse verwendet wird.

Im nächsten Schritt wird das Zieljahr der Simulation festgelegt (*hier: 2033*). Anschließend werden einige clusterspezifische Parameter abgefragt. Dazu gehören die Typenzuordnungen der Cluster 10-12, die zur der Beachtung der *Produktionskapazitäten* benötigt werden (*hier: twin-aisle für Cluster 10*)(vgl. *Abschnitt 2.3.4.*). Auch muss der Einsatztyp der neuen Cluster festgelegt, was Einfluss auf die Wahl der α -Faktoren hat (*hier: Kurzstrecke für Cluster 10*)(vgl. *Abschnitt 3.3.1.*). Im nächsten Schritt kann die zeitliche Verfügbarkeit der Cluster eingeschränkt werden. In diesem Beispielszenario soll das Cluster 10 erst ab dem Jahr 2025 zur Verfügung stehen. Die Cluster 11 und 12 sollen bei der Flottenberechnung gar nicht vom *FDM* beachtet werden. Ihre Verfügbarkeit muss deshalb auf einen zahlenmäßig größeren Wert als das Zielsimulationsjahr gesetzt werden. Damit hat die Wahl der eben festgelegten, spezifischen Parameter für Cluster 11 und 12 auch keinen Einfluss auf den Simulationsablauf.

Von der Möglichkeit, ein Cluster zu einem bestimmten Zeitpunkt nicht mehr bei der Auswahl neuer Flugzeuge verfügbar zu haben, wird für dieses Beispiel kein Gebrauch gemacht. Möglich ist, die Verfügbarkeit der Cluster 1-12 weiter einzuschränken.

Im letzten Schritt zur Beschreibung der Cluster 10-12, muss das altersbedingte, clusterspezifische Ausflottverhalten beschrieben werden (vgl. *Abschnitt 2.3.3.*). Dafür können entweder die β -Parameter manuell eingeben oder von einem bestehenden Cluster (1-9) kopiert werden, falls ein gleiches Verhalten angenommen werden soll. Für dieses Beispiel werden für das Cluster 10 die β -Parameter des Clusters 9 übernommen.

Bevor mit der Simulation der Flottenentwicklung gestartet werden kann, müssen wichtige Modellierungseinstellungen gesetzt werden. Es besteht die Möglichkeit die *Produktionskapazitäten* zu beachten und gegebenenfalls das *RPKS*-Wachstum zu beschränken (vgl. *Abschnitt 3.3.4.*). In diesem Beispiel werden die *Produktionskapazitäten* nicht beachtet. Des Weiteren müssen Einstellungen für das *FCCT-Tool* getätigt werden. Eine Erläuterung der Einstellungen findet sich bei ITTEL (2014). Für das Beispiel werden die Einstellungen „*BADA 3*“, „*Step Climb*“-aktiviert und „*Flight distance inefficiency factor*“-aktiviert verwendet.

Im letzten Schritt benötigt das *FCCT-Tool* die Zuordnung der repräsentativen Flugzeuge der Cluster zu hinterlegten Flugleistungsdaten. Dafür wird mit Hilfe einer Dropdown Auswahl für jedes Cluster der repräsentative Flugzeugtyp ausgewählt. Für dieses Beispiel werden für die Cluster 1-9 die in *Tabelle 2* genannten Typen verwendet. Für das Cluster 10 wird der P420 Flugzeugtyp ausgewählt.

Damit sind alle Parameter und Modellierungseinstellungen festgelegt und die Simulation des *FDM* startet. Alle *Matlab*-Variablen, zu denen auch gewünschten Ausgabewerte (vgl. *Abschnitt 3.4*) gehören, werden im *FDM* Programmordner unter „*Projektname_fleet_calc_Datum_Uhrzeit.mat*“ gespeichert.

4.3 Simulationsergebnisse und Auswertung

Bei der Auswertung der Simulationsergebnisse des Beispielszenarios beschränkt sich dieser Teil der Ausarbeitung auf die Betrachtung der Gesamtflotte, die Entwicklungen auf den einzelnen Routen werden nicht getrennt betrachtet.

Abbildung 16 zeigt die vom FDM simulierte Entwicklung der Gesamtflotte. Bis zum Jahr 2025 ist das Cluster 9 das am stärksten wachsende. Ab dem Zeitpunkt, wo der neue Flugzeugtyp P420 verfügbar wird, nimmt der Anteil des Clusters 9 an der Flotte wieder ab. Stattdessen beginnt die Anzahl der Flugzeuge des Clusters 10 stark zu wachsen. Betrachtet man nur die Anzahl der Flugzeuge, spielen die anderen Flugzeugcluster, im Vergleich zu Cluster 9 und 10, nur eine untergeordnete Rolle.

Für den Zeitraum 2008 bis 2033 verdreifacht sich fast die Anzahl der Flugzeuge in der Flotte, während die *RPKS*-Leistung um ca. 315% und die *RTKS*-Leistung um ca. 300% wächst.

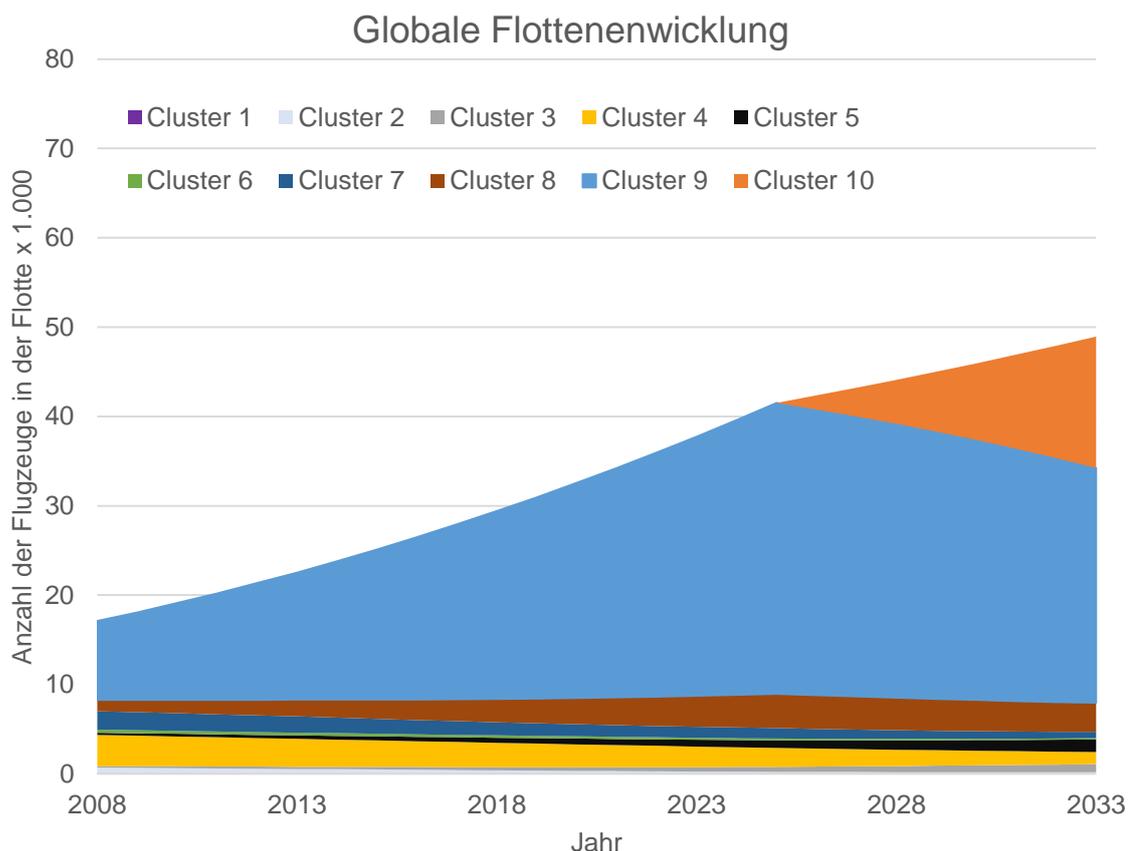


Abbildung 16: Entwicklung der Gesamtflotte

Abbildung 17 zeigt die vom FDM bestimmte Anzahl der hinzugefügten Flugzeuge zur Gesamtflotte. Die Darstellung zeigt alleine die Cluster 9 und 10, da sie die am stärksten

wachsenden Cluster sind. Es wird sichtbar, dass mit dem Verfügbarwerden von Cluster 10 keine weiteren Cluster 9 Flugzeuge zur Flotte hinzugefügt werden.

Der repräsentative Flugzeugtyp des Clusters 10 besitzt eine deutlich größere Sitzplatzkapazität, als der des Clusters 9, wodurch der Sprung im Jahr 2025 in *Abbildung 17* begründet ist.

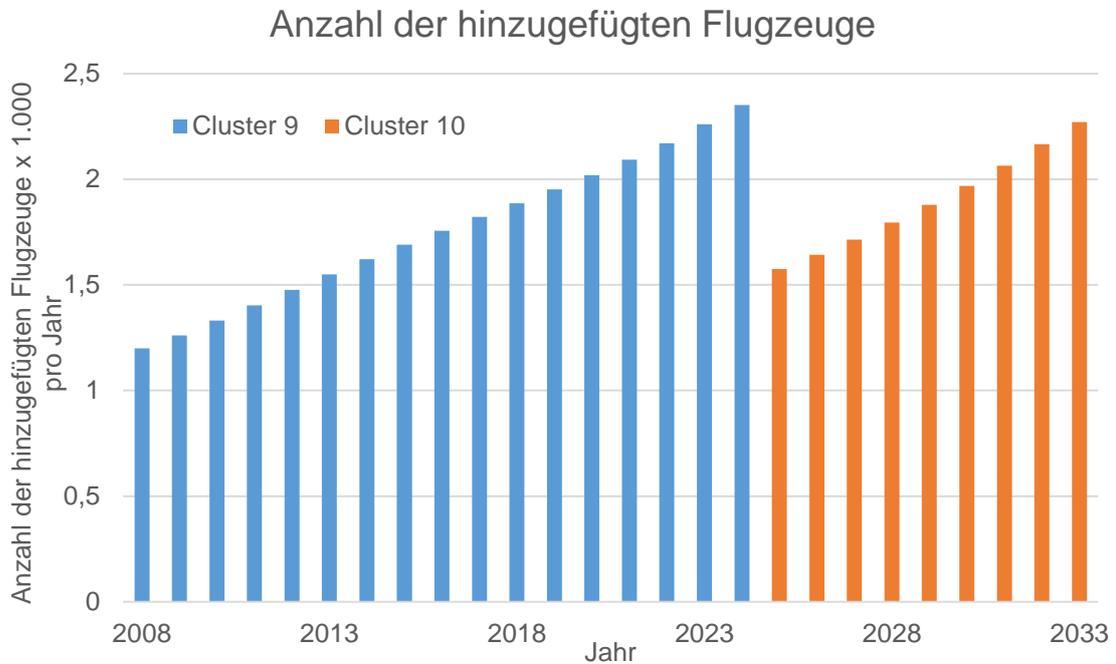


Abbildung 17: Hinzugefügte Flugzeuge zur Gesamtflotte

Für einen Vergleich der Simulationsergebnisse mit der Flottenentwicklungsprognose des Airbus *Global Market Forecast 2014*, muss in einem ersten Schritt die vom *FDM* verwendete globale Nachfrageentwicklung mit der von Airbus verwendeten verglichen werden (siehe *Abbildung 18*). Die Auswertung beschränkt sich an dieser Stelle auf einen Vergleich der Passagiernachfragen. Bedingt durch die Berechnung ausgehend vom Jahr 2008, weicht die vom *FDM* verwendete Szenario-Nachfrageentwicklung leicht von der Airbus Prognose ab. Die *RPKS*-Nachfrage liegt im *FDM* Szenario für jedes betrachtete Jahr rund 3,7% höher. Da diese Differenz kleiner als die Wachstumsrate eines Jahres (4,7%) ist, kann sie bei den folgenden Langzeitbetrachtungen vernachlässigt werden.

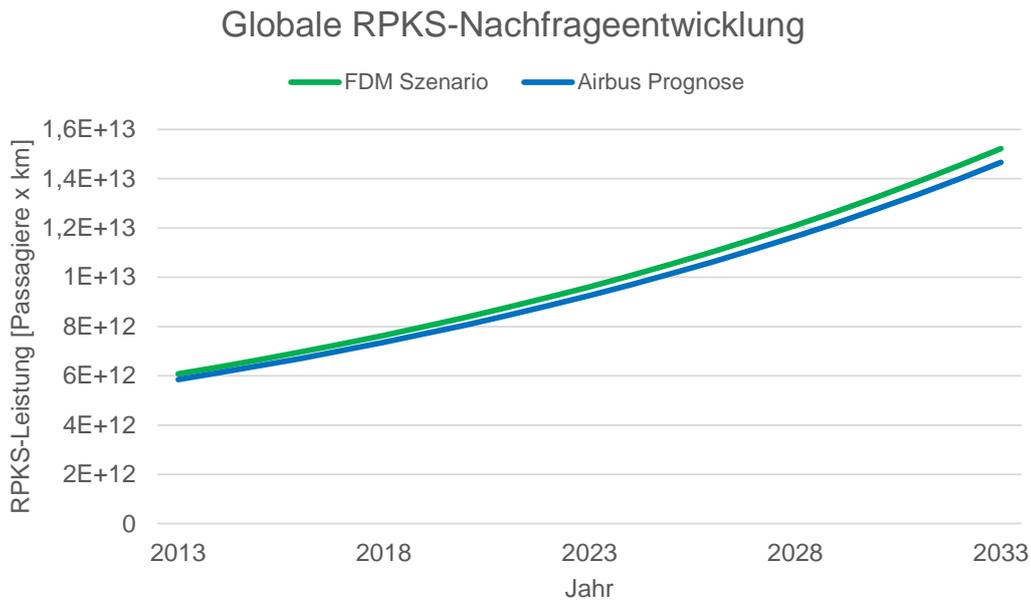


Abbildung 18: Globale RPKS-Nachfrageentwicklung

Tabelle 6 und Tabelle 7 stellen die mit dem *FDM* berechnete Flottenentwicklung der Vorhersage des *Global Market Forecast 2014* (AIRBUS 2014) gegenüber. Für den Zeitraum 2014 bis 2033 werden Airbus zufolge 31358 neue Flugzeuge ausgeliefert. Das *FDM* berechnet eine deutlich größere Anzahl von 43819 Flugzeugen. Auffällig ist, dass in der *FDM* Simulation besonders viele *twin-aisle* Flugzeuge der Flotte hinzugefügt werden. Die größere Anzahl an hinzugefügten Flugzeuge wird auch im Vergleich der Flottengrößen im Jahr 2033 deutlich. Das *FDM* berechnet eine deutlich größere Flotte. Begründet ist diese Entwicklung durch die vom *FDM* durchgeführte Auswahl der Flugzeugtypen, welche der Flotte hinzugefügt werden sowie den im Beispielszenario vorgegebenen Clusterverfügbarkeiten. Der treibstoffverbrauchsoptimierten Flottenentwicklung des *FDM* steht die Prognose von Airbus gegenüber, welche versucht die real erwartete Entwicklung vorherzusagen, welche durch die Bedürfnisse von Fluggesellschaften vorangetrieben wird (AIRBUS 2014).

Tabelle 6: Vergleich neu ausgelieferte Flugzeuge 2014-2033 (AIRBUS 2014)

Flugzeugtyp	Airbus Global Market Forecast	<i>FDM</i> Simulation
single-aisle	22071	21621
twin-aisle	9287	22199
Summe	31358	43819

Tabelle 7: Vergleich Anzahl der Flugzeuge in der Flotte (AIRBUS 2014)

Jahr	Airbus Global Market Forecast	FDM Simulation
2014	18460	23800
2033	37463	48928

Abbildung 19 zeigt den vom FDM berechneten Kraftstoffverbrauch der Gesamtflotte. Es ist ein stetiger Anstieg des Kraftstoffbedarfs zu erkennen. In dem Jahr 2025, in dem der neue Flugzeugtyp P420 verfügbar wird, flacht der Anstieg leicht ab. Da das Szenario von einem konstanten Wachstum der Nachfragen ausgeht und keine Produktionskapazitäten beachtet werden, ist dieses Abflachen dem Einsatz des neuen Flugzeugtyps P420 zuzurechnen. Für den Gesamtzeitraum ist außerdem ersichtlich, dass bei einer Verkehrszunahme von über 300%, der Gesamtkraftstoffverbrauch geringer steigt (ca. 273%).

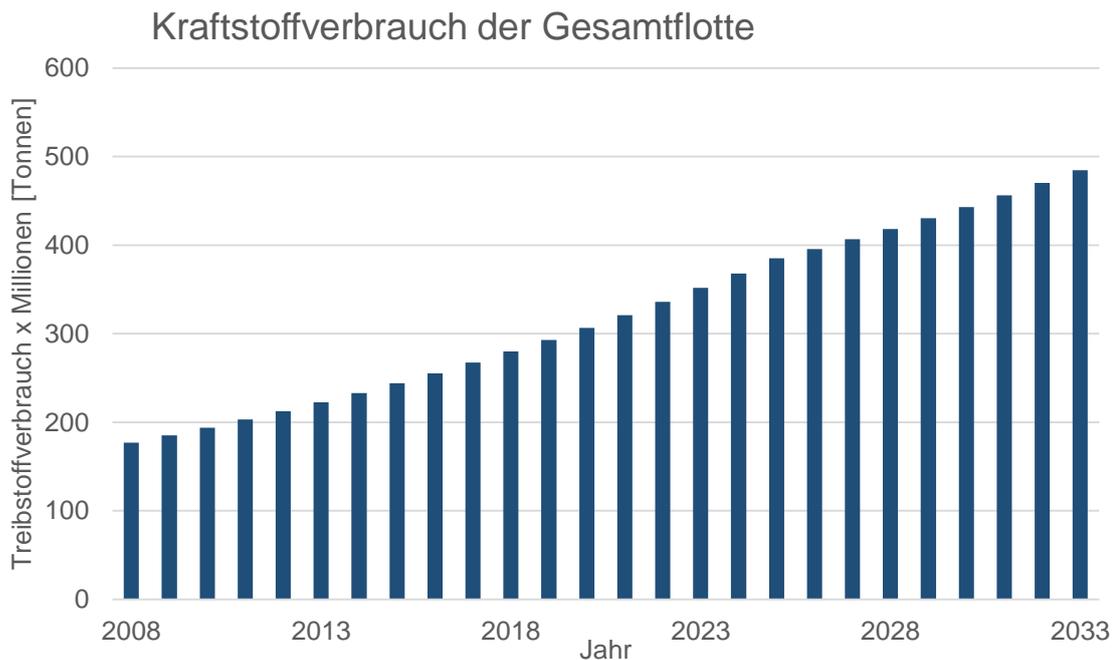


Abbildung 19: Kraftstoffverbrauch der Gesamtflotte

Tabelle 8 zeigt einen Vergleich der FDM Simulationsergebnisse mit den realen Flugtreibstoffverbräuchen für die Jahre 2008 bis 2010. Die letzte Spalte in der Tabelle gibt die prozentuale Abweichung der im Beispielszenario berechneten Treibstoffverbrauchsentwicklung im Vergleich an. Die geringen Abweichungen zeigen, dass die mit dem FDM berechneten Treibstoffverbräuche in der richtigen Größenordnung liegen. Das berechnete Beispielszenario geht für den gesamten Zeitraum 2008 bis 2033 von einem konstanten

Wachstum aus (vgl. *Abschnitt 4.1*). Die reale Nachfrageentwicklung des Jahres 2009 sinkt jedoch leicht (AIRBUS 2014). Die im Beispielszenario angenommene Wachstumsrate weicht im Jahr 2009 deutlich von der realen ab, wodurch der Sprung in der prozentualen Abweichung von -4% auf +6% begründet werden kann.

Tabelle 8: Flugzeug Treibstoffverbrauch (U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION 2014)

Jahr	realer Flugtreibstoffverbrauch pro Jahr Millionen [Tonnen]	Abweichung der <i>FDM</i> Simulationsergebnisse
2008	183	-4 %
2009	173	+6 %
2010	182	+6 %

5 Zusammenfassung und Ausblick

Aufgabe dieser Arbeit ist es, basierend auf dem *Evolutionären Flottenmodell (EFM)* des Lehrstuhls für Luftfahrtsysteme ein erweitertes Flottenmodell in *Matlab/Simulink* aufzubauen. Die prinzipiellen Strukturen des *EFM* sollten dabei beibehalten werden. Dazu gehören insbesondere die Betrachtung der Flottenentwicklung in Abhängigkeit der Nachfrageentwicklung sowie die Definition der abstrahierten Routen-Gruppen und Cluster. Die *FDM* Umsetzung in *Matlab* folgt einer *System Dynamics* Modellierungsidee und bietet auf jährlicher Basis eine Berechnung der Typen-, Alters- und Einsatzverteilung sowie des Treibstoffverbrauch der Flugzeugflotte. Die Flottenentwicklung wird ausgehend vom Jahr 2008 bis maximal zum Jahr 2050 schrittweise simuliert.

Das neue *Fleet Development Model (FDM)* bietet insbesondere die Möglichkeit, den Einfluss neuer Flugzeugtechnologien auf den Treibstoffverbrauch der globalen, zivilen Flotte zu identifizieren. Dafür wurden im Modell drei neue Flugzeugcluster geschaffen, über welche neuartige Flugzeugtypen mit in die Flottenentwicklung einfließen können. Im vorhergehenden *EFM* war die Auswahl der Flugzeugtypen, die in einem Simulationsjahr der Flotte hinzugefügt oder aus ihr entfernt werden, für den gesamten Simulationszeitraum fest über die Zusammensetzung der Flotte des Jahres 2008 vordefiniert. Das neue *FDM* verfolgt bei der Auswahl der Flugzeugtypen einen dynamischen, treibstoffverbrauchsoptimierten Ansatz. Die szenarioabhängige Entwicklung der globalen Flotte kann damit das Potential der verfügbaren Flugzeugtypen und -technologien aufzeigen. Neben dieser Weiterentwicklung wurden in dem *FDM* neue Erkenntnisse des Lehrstuhls für Luftfahrtsysteme zum *Flottenzuweisungsproblem*, zu *Überlebenskurven* und *Produktionskapazitäten* sowie zur *Flugleistungsberechnung* integriert, die zu einer verbesserten Modellierung führen.

Auch das *FDM* bietet Potential für weitere Entwicklungen. An dieser Stelle werden Anregungen für mögliche Modellierungserweiterungen vorgestellt.

Derzeit ist es optional möglich, die *Produktionskapazitäten* der Flugzeughersteller bei der Erstellung der Flotte für ein Simulationsjahr zu beachten. In einer Erweiterung könnte es möglich werden, weitere Faktoren wie zum Beispiel die Flughafenkapazitäten oder die luftseitige Infrastruktur als weitere Beschränkung des jährlichen Flottenwachstums zu betrachten. Alternativ können die erwähnten Kapazitäten auch Einfluss auf die Auswahl der Flugzeugtypen nehmen. Im Falle der Flughafenkapazität könnte es beispielsweise notwendig werden, größere Flugzeuge einzusetzen, um die exponentiell wachsende Nachfrage bedienen und am Flughafen abwickeln zu können.

In seinem derzeitigen Aufbau zeigt das *FDM* keine Vorhersage der realen Luftverkehrsentwicklung, sondern eine rein treibstoffverbrauchsoptimierte Flottenentwicklung. Auf Grund der stark abstrahierten Routenmodellierung kann das Modell derzeit nicht abbil-

den, dass Flugzeuge auf bestimmten, realen Flugrouten ausgewählt werden, weil sie benötigte, spezielle Fähigkeiten wie zum Beispiel Kurzstartfähigkeit besitzen. In einer Modellerweiterung könnte die Auswahl der neuen Flugzeugtypen nicht mehr allein über die Treibstoffquotienten bestimmt werden, um dieses Auswahlverhalten zu beachten. Dafür wäre es beispielsweise möglich, eine routenspezifische Grundverteilung auf bestimmte Flugzeugcluster vorzugeben.

Fluggesellschaften verfolgen bei der Flottenplanung das Ziel, ihren Gewinn zu maximieren. Soll mit dem *FDM* eine zukünftige Flottenentwicklung unter diesem Gesichtspunkt abgebildet werden, erfordert dies die Betrachtung und Modellierung der direkten Betriebskosten (DOC) beim Flottenwachstum und -einsatz. Die direkten Betriebskosten sind dabei die Kosten, welche bei Flugoperationen in Abhängigkeit zum verwendeten Flugzeugtyp stehen und darüber den möglichen Gewinn einer Fluggesellschaft beeinflussen (CLARK 2007, S. 171 ff.).

Wie beim *EFM* geschieht beim *FDM* das Ein- und Ausflotten sehr dynamisch, wenn die Wachstumsfaktoren dies vorgeben. Für Szenarios, welche große negative Wachstumsraten beinhalten, führt das dazu, dass viele Flugzeuge aus der aktuellen Flotte des Jahres unverzüglich ausgeflottet werden und nicht mehr zur Verfügung stehen. Wird in einem Folgejahr, bedingt durch eine positive Wachstumsrate, eine größere Verkehrsleistung gefordert, werden „neu produzierte“ Flugzeuge der Flotte hinzugefügt. Für die Flottenentwicklung gibt es damit derzeit keine langfristige, vorausschauende Planung. Die Einführung eines Flugzeug-Puffers für kapazitätsbedingt ausgeflottete Flugzeuge, die dann in einem Folgejahr zurück in den Dienst kommen können, könnte dem beschriebenen, unrealistischen Aus- und Einflottungsverhalten entgegenwirken.

Literaturverzeichnis

AIRBUS: Global Market Forecast 2014-2033. <http://www.airbus.com/company/market/forecast/>. 12.11.2014.

ANGERMANN, Anne: MATLAB - Simulink - Stateflow. Grundlagen, Toolboxen, Beispiele. 7. aktualisierte Auflage. München 2011.

ASSENHEIMER, Christoph: Entwicklung eines Evolutionsmodelles zur Beschreibung zukünftiger Flugzeugbetriebsarten und Entwicklungsmöglichkeiten von Flotten. Diplomarbeit. Lehrstuhl für Luftfahrtsysteme, Technische Universität München. Garching bei München 2012.

BOEING (Hrsg.): Enhancing Airplane Availability. airline's most valuable asset. http://events.aviationweek.com/html/mro13/April%2016_B212_1100am_Ali.pdf. 18.09.2014.

CLARK, Paul: Buying the big jets. Fleet planning for airlines. 2nd editon. Aldershot, Hampshire, England, Burlington, VT 2007.

ENGELKE, Christoph: Flottenplanung und -einsatz: Untersuchungen zur Weiterentwicklung eines dynamischen Flottenmodells für Leistungsanalysen der Weltflotte. Bachelorarbeit. Lehrstuhl für Luftfahrtsysteme, Technische Universität München. Garching bei München 2014.

EUROPÄISCHE UNION: Europe's vision for aviation. Maintaining global leadership and serving society's needs. Luxembourg 2011.

FLIGHTGLOBAL: ACAS. Delivering critical business information to your business 2014. <http://www.flightglobal.com/products/acas/>. 24.11.2014.

IATA: Air Freight Market Analysis January 2014. <http://www.iata.org/whatwedo/Documents/economics/freight-analysis-jan-2014.pdf>. 28.11.2014.

IATA: Air Passenger Market Analysis January 2014. <http://www.iata.org/whatwedo/Documents/economics/passenger-analysis-jan-2014.pdf>. 28.11.2014.

ITTEL, Jonas: Developing a software tool for comprehensive flight performance and mission analyses in the context of the assessment of a novel turboprop transport aircraft concept. Masterarbeit. Lehrstuhl für Luftfahrtsysteme, Technische Universität München. Garching bei München 2014.

IWANIZKI, Michael/RANDT, Niclas P./SARTORIUS, Sky: Preliminary Design of a Heavy Short- and Medium-Haul Turboprop-Powered Passenger Aircraft. In: 52nd Aerospace Sciences Meeting 2014.

MENSEN, Heinrich: Handbuch der Luftfahrt. (VDI). Berlin 2003.

OAG: OAG-Datenbank 2008.

OAG AVIATION WORLDWIDE LIMITED: OAG-data 2014. <http://www.oag.com/>. 24.11.2014.

PALM, William J.: System dynamics. 3rd editon. New York 2014.

PFAENDER, Holger/JIMENEZ, Hernando/MAVRIS, Dimitri: A System Dynamics Analysis of Fleet Technology and Policy Options for Environmental Impact Mitigation. In: 27th International Congress of the Aeronautical Sciences 2010.

RANDT, Niclas P.: Foundations of a Technology Assessment Technique Using a Scenario-Based Fleet System Dynamics Model. In: 2013 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference 2013.

SCHAEFER, Martin/JUNG, Martin/PABST, Holger: The Regional Distribution of Air Traffic Emissions in the Past, Present and Future. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2013, Stuttgart 2013. <http://elib.dlr.de/83903/>. 19.09.2014.

STERMAN, John: Business dynamics. Systems thinking and modeling for a complex world. Boston 2000.

TETZLOFF, Isaac/CROSSLEY, William: An Allocation Approach to Investigate New Aircraft Concepts and Technologies on Fleet-Level Metrics. In: 9th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO) 2009.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION: International Energy Statistics. <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm?tid=5&pid=5&aid=2>. 27.11.2014.

ZHAO, Jia u.a.: Assessing New Aircraft and Technology Impacts on Fleet-Wide Environmental Metrics including Future Scenarios. In: 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition 2010.

ZWENZNER, Sebastian: Potentialanalyse von Lösungsverfahren des Flottenzuweisungsproblems für die Anwendung in einem dynamischen Flottenmodell. Semesterarbeit. Lehrstuhl für Luftfahrtsysteme, Technische Universität München. Garching bei München 2014.

Eidesstattliche Versicherung

„Ich versichere, dass ich diese Masterarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.“

Garching, 17.12.2014

Unterschrift