

# SYSTEMDYNAMISCHE ABBILDUNG VON LANGFRISTSZENARIEN DES FLUGHAFENS HAMBURG

P. Bießlich<sup>1</sup>, M. Schröder<sup>1</sup>, K. Lütjens<sup>2</sup>, V. Gollnick<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH), Institut für Lufttransportsysteme, Hamburg, Deutschland

<sup>2</sup>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Lufttransportsysteme, Hamburg, Deutschland

## Kurzfassung

Flughäfen sind Unternehmen, deren operationeller Fokus in einem kurzfristigen Zeithorizont liegt. Nichtsdestotrotz muss deren Blick in Bezug auf Planung und Entwicklung der Infrastruktur ebenso langfristig ausgerichtet sein. Aktuelle Flughafenmodelle fokussieren sich häufig nur auf einzelne Elemente des Flughafens. Zweck dieser Arbeit ist es, ein generisches Flughafenmodell zu entwickeln, das sowohl auf operationelle Aspekte wie das Passagier- und Flugbewegungsaufkommen eingeht, als auch auf resultierende ökonomische Veränderungen. Solch nachhaltige Prognosen und Analysen über 10 Jahre hinaus sollen die Planung und das Handeln von Flughäfen unterstützen. Das Modell ist aktuell in einer System Dynamics Umgebung implementiert. Im Laufe der Arbeit ist festgestellt worden, dass nicht alle flughafenspezifischen Elemente unter Nutzung einer System Dynamics Umgebung intuitiv modellierbar sind, so dass neue Modellierungsansätze ebenfalls angesprochen werden.

## 1. EINLEITUNG

Flughäfen haben sich in den letzten Jahren vom reinen Verkehrsknotenpunkt und Infrastrukturanbieter des Lufttransportsystems zu einem komplexen, kommerziell-denkenenden Dienstleistungsunternehmen gewandelt. Mittelfristig sehen sich Flughäfen dabei divergierenden Herausforderungen konfrontiert. Aufgrund eines weiter steigenden Passagieraufkommens, aktuelle Prognosen beziffern das Wachstum auf knapp 5 % p.a. [1],[2] innerhalb der nächsten 20 Jahre, müssen deren Kapazitäten ständig angepasst werden. Dabei diktiert bereits heute der Flughafen häufig das Kapazitätslimit des Gesamtsystems. Weiterhin geben die Europäische Kommission und die IATA anspruchsvolle Ziele zur Reduzierung von Lärm und Treibhausgasen<sup>1</sup> bis 2050 („Greener Flying“) vor. Gleichzeitig muss ein Flughafen aber auch unter Einbindung von verschiedenen Kundengruppen, die wiederum eigene Ziele verfolgen, wirtschaftlich erfolgreich agieren.

Bei näherer Betrachtung sind die operationellen und ökonomischen Charakteristiken von Flughäfen eng ineinander verwoben. In Abhängigkeit vom Typ des Flughafens und den lokalen behördlichen Regularien ist das Tempo der Anpassung an Trends im Luftverkehr unterschiedlich. Folglich kann es zu Zeitverzögerungen bei strukturellen und regulatorischen Anpassungen kommen. Dadurch sind die operationellen und ökonomischen Auswirkungen zu ermitteln um einen Verlust an potentiellen Passagieren und Erlösen, aber auch regulatorischen Zwangsmaßnahmen vorzubeugen.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein generisches Flughafenmodell zu entwickeln, wobei die Betrachtung des Flughafens als Ganzes erfolgt. Es wird sowohl auf Parameter der Infrastruktur und der operationellen Passagier- und Flugzeugabfertigung (land- und luftseitig) als auch des Geschäftsmodells, also ökonomische Faktoren, eingegangen. Dabei soll der Detailgrad so grob wie möglich gehalten werden um Komplexität und Rechenaufwand zu begrenzen, aber so genau wie nötig um wesentliche Zusammenhänge abzubilden.

Der Fokus der Arbeit liegt darauf, inwieweit sich potenzielle Szenarien auf die operationelle und betriebswirtschaftliche Entwicklung eines Flughafens auswirken. Dies kann auf der einen Seite eine Start- und Landebahnsanierung sein, die notwendig ist um den Flugbetrieb aufrechtzuerhalten. Aufgrund der vorübergehenden Kapazitätseinschränkung können Verluste bei den Gebühreneinnahmen auftreten, wobei im Gegenzug kein finanzieller Nutzen entsteht. Auf der anderen Seite ist die Implementierung neuer Technologien zu betrachten, z.B. um o.g. Zielvorstellungen seitens regulatorischer Behörden zu erreichen und im Endeffekt ebenso das finanzielle Ergebnis positiv beeinflussen zu können (Kosten-Nutzen-Analyse).

Das vorliegende Modell ist in einer System Dynamics Umgebung entwickelt worden, welches die Beziehungen zwischen wesentlichen Flughafenparametern und -prozessen dynamisch abbildet. Als Beispiel werden hierfür die Infrastrukturen und Parameter des Flughafens Hamburg herangezogen. Der Zielhorizont liegt bei 20 Jahren, wobei aktuelle Wachstumsprognosen in die Kalkulation einbezogen werden.

<sup>1</sup> Siehe hierzu

<http://www.cleansky.eu/sites/default/files/news/flightpath2050.pdf>  
<http://www.iata.org/whatwedo/environment/Documents/technology-roadmap-2013.pdf>

## 2. HINTERGRUND

### 2.1. Die Methode System Dynamics

System Dynamics (SD) ist eine Modellierungstechnik für komplexe Systeme, die in den 1950er Jahren von Jay W. Forrester entwickelt wurde. Forrester prüfte in diesem Zusammenhang die Simulier- und Modellierbarkeit von komplexen, nicht-linearen und dynamischen Systemen im Industriesektor [3]. Zunächst unter dem Begriff „Industrial Dynamics“ geführt, gewann sie durch die Anwendung in weiteren Forschungsbereichen allgemeinere Gültigkeit und ist mittlerweile als SD bekannt [4]. In der Literatur finden sich viele Definitionen von SD. Richardson geht dabei auf die wichtigsten Eigenschaften ein:

“System Dynamics is a computer-aided approach to policy analysis and design. It applies to dynamic problems – problems that involve change over time – arising in complex social, managerial, economic, or ecologic systems – literally any dynamic systems characterized by independence, mutual function, information feedback, and circular causality.” [4]

Die Analyse mit SD lässt sich in 3 Schritte unterteilen. Zunächst wird ein Wirkungsdiagramm (casual-loop-diagram) erstellt<sup>2</sup>, das in einem zweiten Schritt in ein Flussdiagramm (stock-and-flow-diagram) überführt wird und schließlich als mathematisches Gleichungssystem formuliert wird. Um ein Wirkungsdiagramm in ein simulierfähiges Flussdiagramm zu überführen, müssen die einzelnen Systemelemente anhand ihrer Eigenschaften voneinander abgegrenzt werden. Folgende Elemente gilt es zu unterscheiden:

- 1) *Vorgabegrößen (Quelle)*: Konstante Systemparameter, exogene Systemumwelteinwirkungen und Anfangswerte der Zustandsgrößen, die keine Systemgröße als Eingang haben.
- 2) *Zustandsgrößen*: Bilden den aktuellen Systemzustand vollständig ab und lassen sich durch keine anderen Systemelemente beschreiben bzw. ableiten. Ihre Entwicklung über die Zeit wird über die Veränderungsraten bestimmt.
- 3) *Veränderungsraten*: Elemente, die durch Differentialgleichungen beschrieben werden und die Zustandsgrößen in einer positiven oder negativen Weise beeinflussen.
- 4) *Hilfsvariablen*: Berechenbar aus den Vorgabe- oder Zustandsgrößen auf Basis von algebraischen, logischen oder teilweise Tabellenfunktionen.
- 5) *Senke*: Diese spiegelt den Systemausgang wieder. [5]

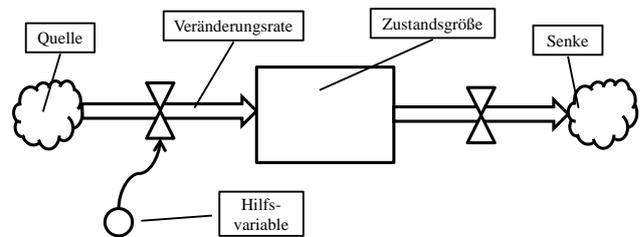


FIG 1. Allgemeine Struktur eines Flussdiagramms [5]

### 2.2. System Dynamics im Feld der Flughafenmodellierung

Die Nutzung von System Dynamics im Kontext der Flughafenmodellierung ist kein gänzlich neuer Ansatz. SD wird häufig für Passagierflussmodellierungen innerhalb der Terminals genutzt, z.B. für die Analyse von Wartezeiten der verschiedenen Terminalprozessoren. Manataki [6] bewertet mit Hilfe eines SD Modells die Leistungsfähigkeit von Terminals um Entscheidungen des high-level Managements in Bezug auf operationelle und strukturelle Änderungen zu unterstützen. Aber nicht nur Passagierströme innerhalb des Terminals sind Gegenstand der Untersuchung in der Literatur. Mühlhausen [7] bewertete auch die Passagierflüsse zwischen kooperierenden Flughäfen mittels eines makroskopischen SD Modells. Aufgrund von limitierten Ausbaufächen, vor allem in Ballungsgebieten, sind kapazitätsbeschränkte Flughäfen beschränkt in der Erweiterung durch den Neubau von Start- und Landebahnen. Mühlhausen schlägt eine Kooperation von nah beieinander liegenden Flughäfen vor und bewertet deren Verbindung mittels S-Bahn bzw. Hochgeschwindigkeitszügen. Weitere Anwendungen im Bereich des Passagierflusses sind agentenbasierte SD Simulationen<sup>3</sup>, z.B. Evakuierungsszenarien für Notfälle oder Boarding-Simulationen.

Ähnlich zu der vorliegenden Arbeit, legt Stamatopoulos [8] den Schwerpunkt auf die langfristige Entwicklung eines Flughafens mit Zeithorizonten von 15-20 Jahren. Die Modelle, welche aber nicht systemdynamisch sind, prognostizieren die Kapazität der luftseitigen Elemente (Start- und Landebahn, Rollweg, Vorfeld) und Verspätungen.

Die o.g. Arbeiten fokussieren jedoch immer nur auf einen bestimmten Teil des Flughafens. Ziel dieser Arbeit ist es einerseits ein generisches Simulationsmodell zu entwickeln, dass das Flugzeug- und Passagieraufkommen simuliert, wobei die entsprechenden Kapazitäten beachtet werden. Andererseits ist eine direkte Beziehung zum Geldfluss des Flughafens vorgesehen, wobei ebenfalls Investitionsplanungen auf Basis von Passagiernachfrageprognosen einfließen. Das Modell soll dabei unterstützen, zukünftige Kapazitätsengpässe zu identifizieren, den geeignetsten Zeitpunkt für Investitionen zu ermitteln und die Effekte auf den Geldfluss eines Flughafens zu beschreiben.

<sup>2</sup> Für detaillierte Informationen siehe Bossel [5], Seite 70-74

<sup>3</sup> z.B. <http://www.anylogic.com/case-studies/simulation-of-the-frankfurt-airport>

### 3. MODELLASPEKTE EINES FLUGHAFENS

Innerhalb der vorliegenden Arbeit wird nicht im Detail auf die Funktionsweise und den detaillierten Modellaufbau eingegangen. Diese sind in [9] ausführlich beschrieben.

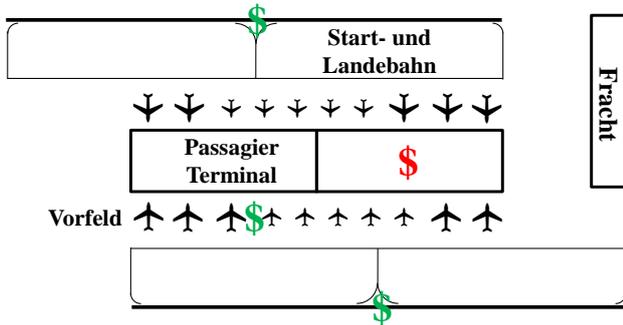


FIG 2. Modellierte Infrastrukturelemente sowie Einnahmequellen eines Flughafens

FIG 2 zeigt die im Modell implementierten Flughafenelemente. Luftseitig werden die Flugbewegungen auf den Start- und Landebahnen sowie dem Vorfeld simuliert. Die Flugbewegungen werden in die vier Kategorien L, M, H und J eingeteilt, die sich an der Wirbelschleppenstaffelung der Luftfahrzeuge orientieren. Die Kapazität dieser Elemente ist über den Koordinationseckwert einerseits und die zu Verfügung stehenden Abstellpositionen des Vorfelds andererseits modellierbar.

Das Passagierterminal wird nicht im Detail betrachtet, d.h. einzelne Prozessoren wie Check-In, Sicherheitskontrolle etc. sind nicht modelliert, sondern nur dessen Gesamtkapazität. Weiterhin ist ein Frachtterminalmodell vorhanden, wobei dieses derzeit eine untergeordnete Rolle einnimmt und nicht weiter betrachtet wird.

Zusätzlich zu den operationellen Elementen werden ökonomische Aspekte im Modell abgebildet. Die Kunden des Flughafens, in aller erster Linie die Airlines, entrichten Entgelte an den Flughafen für die Bereitstellung der Infrastruktur und zur Abwicklung des Flugbetriebs. Im Gegensatz dazu werden Flughafengebühren nicht vom Flughafen selbst erhoben, sondern stellen Abfuhr an Bundesbehörden da (u.a. Luftsicherheitsgebühr). Die Flughafenerlöse können in zwei Kategorien unterteilt werden. Dies sind einerseits die Verkehrseinnahmen (Aviation Revenues), welche sich direkt auf den Abfertigungsprozess von Luftfahrzeugen, Passagieren und Fracht beziehen. Innerhalb des Modells wird in Start- und Landebahntarifen, Passagiertarifen, Einnahmen der Bodenverkehrsdienste und sonstige Verkehrseinnahmen unterschieden. FIG 3 zeigt beispielhaft am Modellabschnitt Verkehrseinnahmen den Aufbau des Modells.

Auf der anderen Seite stehen die kommerziellen Einnahmen, die so genannten Non-aviation Revenues. Hierzu zählen Einnahmen aus dem Parkraummanagement (landseitig), dem Immobilienmanagement, dem Retail und sonstige kommerzielle Einnahmen. Diese können heutzutage bei bestimmten Flughäfen mehr als 50 % der Gesamterlöse ausmachen [10]. Die Abgrenzung zwischen den genannten Kategorien ist dabei nicht immer eindeutig und wird von jedem Flughafen auf unterschiedliche Weise gehandhabt.

Neben den Erlösen fließen auch die Kosten in die Betrachtung ein, die es zur Aufrechterhaltung der Geschäftstätigkeit abzudecken gilt. Hierbei lassen sich aber keine übergeordneten Kostenkategorien festlegen, da die Kostenstruktur u.a. von der Rechtsform und dem Standort eines Flughafens abhängig ist.

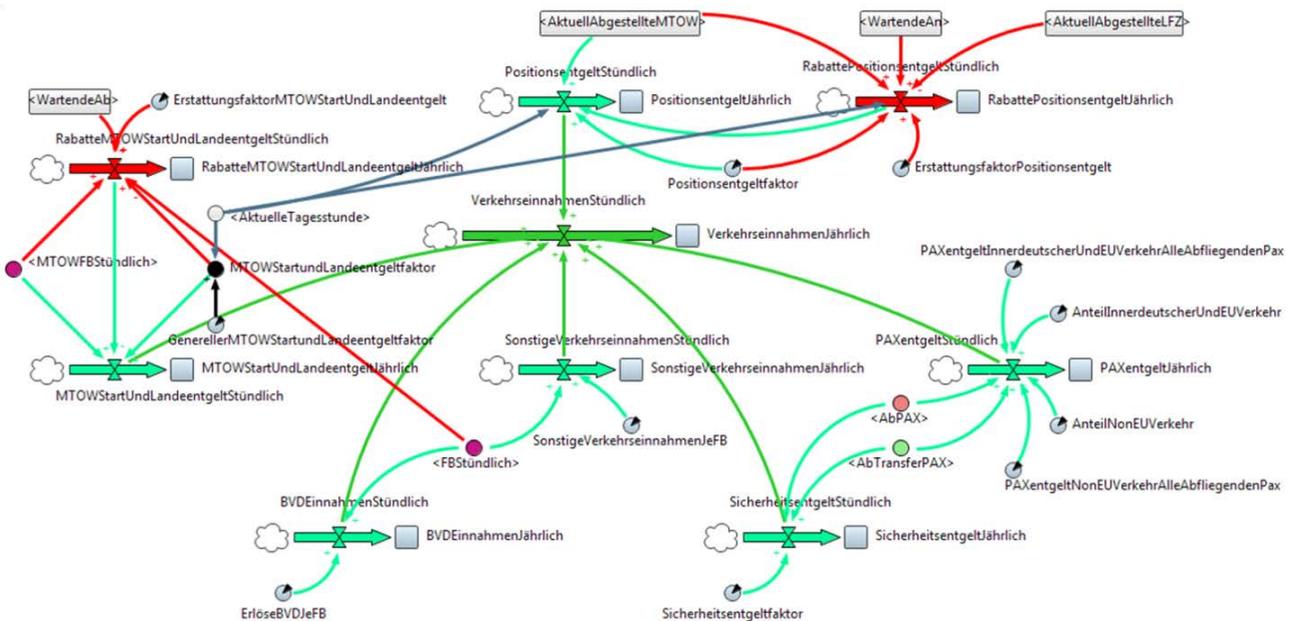


FIG 3. Modellabschnitt Verkehrseinnahmen

## 4. SZENARIEN UND ERGEBNISSE

In den folgenden Abschnitten werden zwei Entwicklungsszenarien eines Flughafens aufgezeigt. Als Beispielflughafen dient der Flughafen Hamburg. Alle Maßnahmen, die innerhalb der Szenarien aufgeführt werden, sind fiktiv und spiegeln keinesfalls die realen Entwicklungen des Flughafens wieder. Insbesondere Angaben zur Höhe und Verteilung der kommerziellen Einnahmen sind Annahmen des Autors. Der Simulationshorizont beträgt jeweils 20 Jahre, wobei dieser frei gewählt werden kann.

### 4.1. Parameterwerte

Vor jeder Simulation müssen die Startwerte einzelner Parameter, sowohl auf den zu untersuchenden Flughafen als auch auf das Simulationsszenario, eingestellt werden. Folgende Parameter nehmen dabei entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis der Simulation:

- *Jährliches Passagierwachstum [% p.a.]*

Dieses wird anhand von empirischen Daten prognostiziert oder aus gängigen Quellen ([1], [2]) herangezogen.

- *Jährliches Flugbewegungswachstum [% p.a.]*

Hierbei kann für die vier im Modell implementierten Flugzeugkategorien L, M, H und J (angelehnt an die Wirbelschleppenkategorie der jeweiligen Luftfahrzeuge) eine unterschiedliche Wachstumsrate gewählt werden.

- *Flugplan*

Das Modell benötigt einen Flugplan (Ankünfte, Abflüge, Maximum Take-off Mass (MTOM), Anzahl der Passagiere) als Input.

- *Anfänglich abgestellte Luftfahrzeuge auf dem Vorfeld und Anzahl der Vorfeldpositionen*
- *Start- und Landebahnkapazität*
- *Angaben zur Höhe und Verteilung der verkehrstechnischen und kommerziellen Einnahmen*

Diese Werte sind Flughafen-spezifisch. Jeder Flughafen hat eine individuelle Entgeltordnung, so dass diese Eingangsparameter bei jeder Simulation angepasst werden müssen. Weiterhin sind Szenario-spezifische Vorgänge zu definieren. Dies kann z.B. der Neubau von Infrastrukturelementen eines Flughafens innerhalb des Simulationshorizontes sein.

### 4.2. Szenario 1: Referenzszenario

Das erste Szenario soll die Entwicklung bei unveränderten Infrastrukturbedingungen aufzeigen, d.h. es werden keine Erweiterungen der aktuell vorhandenen Infrastruktur vorgenommen. Gleichzeitig steigt das Flugbewegungs- und Passagieraufkommen aber an. Das durchschnittliche Wachstum des Passagieraufkommens am Flughafen Hamburg betrug 2,7 %<sup>4</sup> p.a. in den Jahren 2000 bis 2010. Aufgrund dieser Entwicklung wird ein Wachstum von 3 %

p.a. für die kommenden 20 Jahre angenommen. Eine moderate Steigerung der Passagierzahlen ist dabei durch die Ansiedelung neuer Airlines bzw. Ausweitung des Streckennetzes etablierter Airlines anzunehmen, wie derzeit am Beispiel von easyJet und Ryanair zu erkennen ist. Airlines können einem Wachstum des Passagieraufkommens entweder mit einer Erhöhung der Frequenzen oder aber dem Einsatz größerer Luftfahrzeuge begegnen. Dieser Trade-off wird dahingehend berücksichtigt, indem mit Hilfe des sogenannten FoAM Modells [11] auf Basis des Passagierwachstums das zukünftige Frequenzwachstum berechnet wird. Daraus folgt ein durchschnittliches Wachstum der Flugbewegungen von 1,44 % p.a. FIG 4 zeigt die prognostizierte Entwicklung der Flugbewegungen am Flughafen Hamburg bis ins Jahr 2029. Dabei wird ein größeres Wachstum der Luftfahrzeugkategorien H (8,7 % p.a.) und L (2,9 % p.a.) angenommen im Vergleich zur Kategorie M (1,2 % p.a.). Nichtsdestotrotz bleibt eine typische Verkehrsverteilung für einen internationalen Flughafen, mit einem Anteil der Kategorie M von über 90 %, zu erkennen.

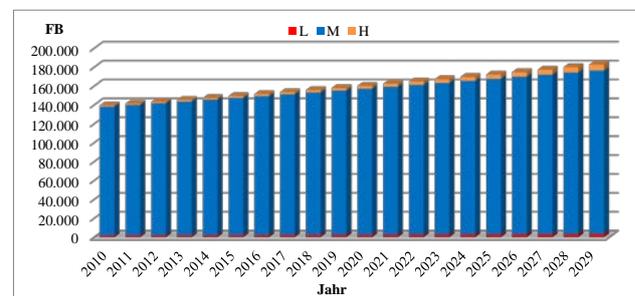


FIG 4. Szenario 1 - Flugbewegungswachstum und -verteilung

Mit dem aktuell vorhandenen Kreuzbahnsystem des Hamburger Flughafens kann diese Steigerung der Flugbewegungen zunächst abgearbeitet werden. Erst zum Ende des Simulationszeitraumes (ab 2025) verspäten sich vereinzelt Flugbewegungen. Im Gegensatz dazu entsteht zu einem früheren Zeitpunkt terminalseitig ein Engpass, dargestellt in FIG 5. Ab 2018 übersteigt das Passagieraufkommen die aktuelle Terminalkapazität von 16 Mio. Passagieren pro Jahr. Es ist anzunehmen, dass dieser Wert auf Basis eines guten Level of Service (LOS B) berechnet wurde und einzelne Prozessoren zunächst den Kapazitätsengpass verursachen (typischerweise die Sicherheitskontrolle). Nichtsdestotrotz sind spätestens ab 2020 Maßnahmen zu ergreifen, die dem Engpass entgegenwirken.

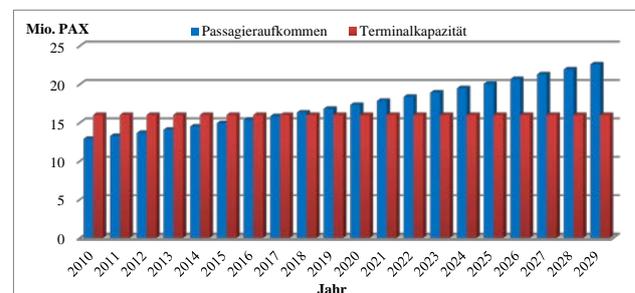


FIG 5. Szenario 1 - Wachstum des Passagieraufkommens

Anzumerken ist, dass keine exakte Kapazitätsberechnung der einzelnen Systemelemente stattfindet. Einzig auf

<sup>4</sup> <http://www.adv.aero/verkehrsahlen/archiv/>

Basis des Koordinationseckwertes (im Falle des Start- und Landebahnsystems), der Vorfeldkapazität und der jährlichen Terminalkapazität werden plausible Überschlagsberechnungen durchgeführt, um zu überprüfen, wann mit Verzögerungen zu rechnen ist. Somit werden unrealistische Entwicklungen ausgeschlossen. Dieser Modellteil kann bei zukünftigen Weiterentwicklungen des Modells in Abhängigkeit der Detailtiefe angepasst werden.

Der terminalseitige Engpass hat ebenfalls Auswirkungen auf die kommerziellen Einnahmen. FIG 6 zeigt diese für Szenario 1 über den Simulationszeitraum. Insgesamt betrachtet, ist eine Steigerung der kommerziellen Einnahmen von ca. 67 Mio. € auf knapp 100 Mio. € zu erkennen. Der Anteil der Einnahmen aus dem Retail hat, nach anfänglich leichtem Anstieg, eine negative Entwicklung zum Ende des Simulationszeitraums. Innerhalb des Modells wird angenommen, dass ab einer Terminalauslastung von 65 % die Konsumbereitschaft je Passagier zurückgeht. Einerseits bedingt durch längere Prozesszeiten bei der Abfertigung (Check-in, Sicherheitskontrolle etc.), andererseits durch Überfüllung einzelner Terminalbereiche. Die Konsumbereitschaft nimmt mit steigender Terminalauslastung weiter ab und bei 200 %-iger Auslastung des Terminals würden keine Retail-Einnahmen mehr erzielt werden.

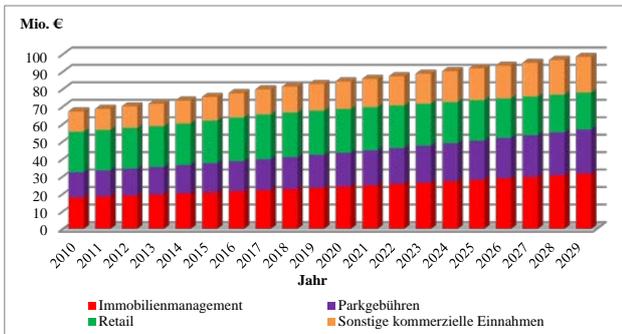


FIG 6. Szenario 1 – Entwicklung der kommerziellen Einnahmen

Im Vergleich zu den kommerziellen Einnahmen, berechnet das Modell ebenfalls die Verteilung der Verkehrseinnahmen am Flughafen, dargestellt in FIG 7. Diese Berechnung basiert auf den Flughafenentgelten und den Startgewichten (Maximum Take-off Mass - MTOM) der Luftfahrzeuge.

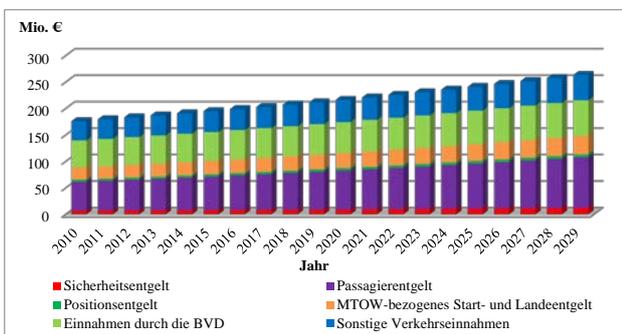


FIG 7. Szenario 1 - Entwicklung der Verkehrseinnahmen

### 4.3. Szenario 2: Terminalausbau

Das Referenzszenario zeigt, dass aufgrund des prognostizierten Passagierwachstums die Kapazitäten des Terminals spätestens im Jahr 2020 ausgeschöpft sind. Somit simuliert Szenario 2 den Neubau eines Passagierterminals um den Kapazitätsüberschreitungen entgegen zu wirken und gleichzeitig den Verlust an Erlösen zu verhindern. Der Neubau erhöht die jährliche Terminalkapazität um 50 % auf 24 Mio. Passagiere p.a.

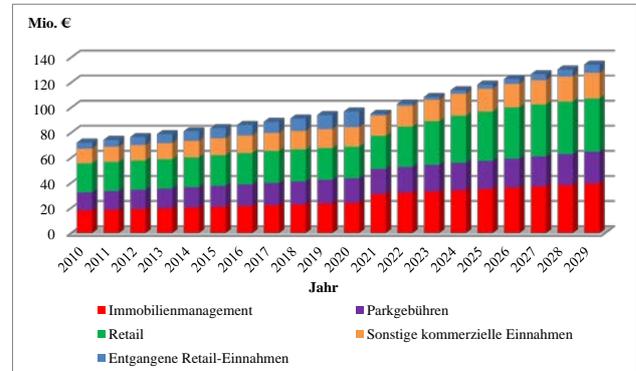


FIG 8. Szenario 2 - Entwicklung der kommerziellen Einnahmen

FIG 8 zeigt die veränderte Entwicklung der kommerziellen Einnahmen. Nach der Eröffnung des neuen Terminals Ende 2020 steigen vor allem die Einnahmen des Immobilienmanagements sprunghaft an. Weiterhin ist eine positive, progressive Entwicklung der Retail-Einnahmen erkennbar, da keine Überlastsituationen mehr auftreten und mehr Retail-Flächen zur Verfügung stehen. Zusätzlich zu den Einnahmen der einzelnen Bereiche ist in FIG 8 auch der angenommene Verlust an Retail-Einnahmen abgetragen, der infolge der reduzierten Konsumbereitschaft der Passagiere im Zuge einer zu hohen Auslastung des Terminals entsteht. Dieser fällt im Jahr 2029 mit 6,5 Mio. € im Vergleich zum Szenario 1 mit 27 Mio. € (bildlich nicht dargestellt) erheblich geringer aus.

Im Zuge eines Terminalneubaus und durch eine erwartet höhere Anzahl an Passagieren, kann über weitere Maßnahmen nachgedacht werden. Beispielsweise könnte ein Parkhausneubau die steigende Anforderung an terminalnahe Abstellmöglichkeiten befriedigen, welcher wiederum zu Einnahmesteigerungen im kommerziellen Bereich führt.

### 4.4. Ergebnisse

Am Beispiel verschiedener Szenarien kann die zukünftige Entwicklung eines Flughafens mit Hilfe des Modells abgebildet werden. Aufbauend auf einem Referenzszenario können sowohl positive als auch negative Entwicklungen in der Verkehrsnachfrage, sowie Auswirkungen von Infrastrukturprojekten auf die Verteilung der Einnahmen eines Flughafens modelliert und simuliert werden. Dabei kann der Simulationshorizont frei gewählt werden. Weiterhin kann das Modell durch die Veränderungen der Eingangswerte auf andere Flughäfen und deren Infrastrukturen und Gebührenmodelle angepasst werden. Die Auswahl der Parameter ist vorläufig. Eine Erweiterung ist möglich um neue

Themenfelder zu adressieren. Genauso kann das Modell um Teilbereiche reduziert werden.

Im Gegensatz zu den Umsatzerlösen wurden die Kosten im Modell nicht implementiert. Die Umsatzerlöse können den agierenden Objekten am Flughafen (Passagieren, Luftfahrzeugen) direkt zugeordnet werden, die dazu noch stündlichen Veränderungen ausgesetzt sind. Die meisten Kosten eines Flughafens lassen sich zwar in der Höhe bestimmen, können aber keinem Kostenträger direkt zugeordnet werden bzw. liegen nur in einer aggregierten Form vor. Tiefgreifende Informationen aus dem Rechnungs- und Kalkulationswesen sind nicht bekannt. Einzig die im Jahresabschluss veröffentlichten Werte eines Flughafens sind verfügbar. Ferner ist eine stündliche Modellierung konstanter Kosten (z.B. einige Bilanzposten, Abschreibungen, Zinsaufwendungen etc.), die auf einer jährlichen Basis anfallen, nicht zielführend.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die vorliegende Arbeit zeigt einen Ansatz zur holistischen und gleichzeitig generischen Modellierung eines Flughafens. Im Laufe der Arbeit hat sich aber gezeigt, dass der Ansatz der systemdynamischen Modellierung (respektive die Modellierung mit AnyLogic<sup>5</sup>) als kontrovers anzusehen ist.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich wesentliche Beziehungen eines Flughafens mit der Methode SD implementieren und zum Teil mit betriebswirtschaftlichen Aspekten verbinden lassen. Da sich Umsatzerlöse in Abhängigkeit von Passagier- und Flugbewegungsaufkommen ständig ändern, stellt SD hier eine geeignete Methode dar. Eine Modellierung der Kostenseite ist hier nicht möglich, da einerseits grundlegende Informationen fehlen und sich deshalb viele Kosten in Höhe und Art nicht direkt ihren Kostenträgern zuordnen lassen. Andererseits ändern sich einige Kostenarten nur in größeren Zeitabständen als der hier benutzten Zeiteinheit (Stunde). Um den Nutzen von Investitionen zu bewerten ist die Kostenseite aber von grundlegender Bedeutung, wofür eine adäquate Lösung in weiterführenden Modellen gefunden werden muss. Die Detailtiefe der Kostenstruktur eines Flughafenmodells ist hierbei im Vergleich zur Granularität der anderen Parameterwerte und deren Veränderungen innerhalb des Simulationszeitraums zu sehen.

Weiterhin lassen sich typische Zusammenhänge und betriebliche Abläufe eines Flughafens nicht bzw. nur mit erheblichen programmiertechnischen Aufwand mittels SD abbilden, was zu einer komplexen Variablenstruktur führt.

Beispielsweise können zeitraumbezogene Zu- und Abflüsse nicht in Abhängigkeit von zeitpunktbezogenen Bestandsvariablen ermittelt werden, was für die exakte Einhaltung der Vorfeldkapazität nötig wäre. Zur Problemlösung musste die Methode mithilfe einiger Vorgänge und Parameter umgangen werden. Ein weiterer Punkt ist, dass manche Problemstellungen aufgrund der eingeschränkten Nutzbarkeit von JAVA-Befehlen (z.B. if-then-else) unzureichend oder gar nicht gelöst werden können, u.a. die Implementierung von Transferpassagieren, die über Nacht am Flughafen verweilen respektive am nächsten Tag erst weiterfliegen.

Nicht zuletzt ist die Modellierung von ganzzahligen Objekten eine Herausforderung. Das Modell ist zeitdiskreter Natur, d.h. die Zeiteinheit des Modells, hier Stunde, wird in mehrere Zeitschritte unterteilt, zu denen jeder Rechenschritt ausgeführt wird. SD benutzt dabei unendlich viele Zeitschritte, so dass der Eindruck eines kontinuierlichen „Flusses“ entsteht. Eine zeitdiskrete Modellierung pro Stunde wäre hier wünschenswert.

Die Komplexität des Flughafensystems bringt also einige Herausforderungen mit sich, denen die Methode System Dynamics nur beschränkt gewachsen ist. Möglicherweise gibt es besser geeignete Modellierungsmethoden, um den Flughafen in Bezug auf die hier geforderten Aspekte zu modellieren. Auf Basis der vorliegenden Arbeit wird weiterhin an einem generischen Flughafenmodell gearbeitet. Aufgrund der vorliegenden Erkenntnisse und programmtechnischen Hürden wird der Ansatz mit einer systemdynamischen Simulation nicht weiter verfolgt werden. Verschiedene andere Modellierungstechniken sind jedoch vielversprechend. Eine objektorientierte Programmierung (z.B. mit JAVA) verspricht dabei die größten Erfolgsaussichten. Einerseits können weitere Modelle (wie z.B. das oben schon genannte FoAM Modell) leichter angebunden werden bzw. schon vorhandene Teilmodelle leichter abgespalten werden. Der Vorteil der Programmierung mit einer grafischen Benutzeroberfläche bei AnyLogic entpuppt sich in diesem Zusammenhang als Nachteil.

Des Weiteren sollen aufgrund von speziellen Zielstellungen und Anwendungsfeldern generische Flughafentypen als Grundlage für ein Flughafenmodell genutzt werden. Hierzu sind bereits Studien in Bezug auf das Clustern von Flughäfen [12] unternommen worden, die in den nächsten Schritten in die Modellierung von Flughäfen einfließen werden. Hierbei gilt es zu evaluieren, ob diese Cluster anwendbar sind und wie groß eventuelle Abweichungen zu detaillierten Simulationen einzelner Flughäfen sind.

<sup>5</sup> <http://www.anylogic.com>

## Literatur

- [1] Airbus S.A.S.: Future Journeys. Global Market Forecast 2013 - 2032. Blagnac Cedex, France 2013.
- [2] Boeing Commercial Airplanes: Current Market Outlook 2013-2032. Seattle, WA 2013.
- [3] Forrester, J. W.: Industrial Dynamics. Cambridge, Mass. 1972, c1961.
- [4] Richardson, G. P.: System Dynamics: Simulation for Policy Analysis from a Feedback Perspective.
- [5] Bossel, H.: Systeme, Dynamik, Simulation. Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme. Norderstedt 2004.
- [6] Manataki, I. E.; Zografos, K. G.: Assessing airport terminal performance using a system dynamics model. In: Journal of Air Transport Management 16 (2010) 2, S. 86–93.
- [7] Mühlhausen, T.: Ein Beitrag zur makroskopischen Simulation von Passagierströmen zwischen kooperierenden Flughäfen unter Nutzung des SYSTEM DYNAMICS Zugangs nach Forrester 2000.
- [8] Stamatopoulos, M. A.; Zografos, K. G.; Odoni, A. R.: A decision support system for airport strategic planning. In: Transportation Research Part C: Emerging Technologies 12 (2004) 2, S. 91–117.
- [9] Bießlich, P.; Schröder, M.; Gollnick, V.; Lütjens, K.: A System Dynamics Approach to Airport Modelling. Atlanta, GA 2014.
- [10] Air Transport Research Society (ATRS): Airport Benchmarking Report - 2012. Global Standards for Airport Excellence, Part III Airport Profiles, Methodologies and Data Description. Vancouver, B.C., Canada 2012.
- [11] Kölker, K.; Bießlich, P.; Lütjens, K.: FoAM - From Passenger Growth to Aircraft Movements. Bordeaux, France 2014.
- [12] Bießlich, P.; Liebhardt, B.: Parametric Reference Airports. Bergamo, Italy 2013.