



Universität Hamburg

DER FORSCHUNG | DER LEHRE | DER BILDUNG

Bachelor-Thesis

**Diskrete Event-basierende Modellierung und Optimierung der
Flughafen-Landseite des Flughafen Hamburgs mit MATLAB Simulink
SimEvents**

vorgelegt von

Christoph H. Garms

eingereicht am 17. August 2012

Fachbereich Informatik

Studiengang Wirtschaftsinformatik

Matr.-Nr. 6118155

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Dietmar P. F. Möller

Zweitgutachter: Dr. Werner Hansmann

Universität Hamburg
MIN-Fakultät
Fachbereich Informatik
Arbeitsbereich TIS

Bachelor-Thesis

**Diskrete Event-basierende Modellierung und Optimierung der
Flughafen-Landseite des Flughafen Hamburgs mit MATLAB Simulink
SimEvents**

eingereicht am 17. August 2012

Christoph H. Garms
geboren am 9. August 1988 in Darmstadt, Hessen

christoph.garms@informatik.uni-hamburg.de

Studiengang Wirtschaftsinformatik

Matr.-Nr. 6118155

Fachsemester 6

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Dietmar P. F. Möller

Zweitgutachter: Dr. Werner Hansmann

All models are wrong,
but some are useful.

– *George E.P. Box*

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen meines Studiums der Wirtschaftsinformatik B. Sc. am Institut für Wirtschaftsinformatik der Universität Hamburg entstanden.

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Herrn Prof. Dr.-Ing. Dietmar Möller danke ich herzlichst für die Möglichkeit dieser Arbeit im Rahmen der Schwerpunktforschung am Arbeitsbereich Technische Informatik Systeme. Herrn Dr. Werner Hansmann danke ich herzlich für die Übernahme des Zweitgutachtens. Mein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Inf. Yousef Farschtschi. Seine fachliche Expertise, die zahlreichen Gespräche mit wichtigen Hinweisen und seine konstruktive Kritik lieferten mir wertvolle Impulse für die Arbeit.

Meinen Freunden und Kommilitonen des Studiengangs Wirtschaftsinformatik danke ich für die tolle Arbeitsatmosphäre und die wertvolle gegenseitige Unterstützung. Mein spezieller Dank gilt Johannes Bumüller und Michael Weber.

Von ganzem Herzen danke ich meiner Freundin Corinna und meiner Familie für die liebevolle Unterstützung, das Verständnis, die Motivation und den Rückhalt über den gesamten Zeitraum meines Studiums.

Hamburg, August 2012

Christoph H. Garms

Aufgabenstellung

Das Ziel der Bachelorarbeit ist die Entwicklung eines Simulationsmodells der Flughafen-Landseite des Flughafen Hamburgs. Im Mittelpunkt des Modells stehen dabei die Passagiere und ihre Gepäckstücke, welche in Abhängigkeit von den zur Verfügung stehenden Input-Daten dynamisch erzeugt werden. Die Passagier- und Gepäckströme im Flughafen-Terminal werden simuliert und somit die Evaluation auf Basis eines 24 Stunden umfassenden Simulationstages ermöglicht. In zwei unabhängigen Modellen betrachtet die Simulation sowohl Abflug als auch Ankunft der Passagiere und deren Gepäckstücke. Im Verlaufe der Arbeit wird das Simulationsmodell um die Komponente RFID Technologie erweitert. Es wird ein Prüfverfahren implementiert, welches Rückmeldung darüber gibt, ob ein Gepäckstück dem selben Gate zugeordnet worden ist wie der korrespondierende Passagier. Aufgrund der Simulationsergebnisse werden dann Annahmen und eine Bewertung des zukünftigen RFID Einsatzes für die Gepäck-Identifikation an Flughäfen getroffen.

Die Erarbeitung der Bachelor-Thesis wird in zwei Arbeitsschritten erfolgen. Zuerst wird mit der kommerziellen Software MATLAB Simulink SimEvents das Simulationsmodell erstellt. Als Vorlage für die Clusterung nach Terminals und Gates dient hierbei der Flughafen Hamburg. Auch Wegezeiten und vorhandene Abfertigungskapazitäten werden in der Grundaufführung den Gegebenheiten am Flughafen Hamburg entsprechen.

Schritt zwei umfasst die schriftliche Ausarbeitung der Bachelor-Thesis. Grundlage hierfür ist die detaillierte Auseinandersetzung mit der Erarbeitung und Erstellung des Flughafen-Simulationsmodells. Ausgehend von den Workflows der betrachteten Entitäten, in Form von UML-Aktivitätsdiagrammen, werden die grundlegenden Modellierungsbausteine und -techniken des Simulationsmodells in MATLAB Simulink SimEvents erläutert. Darüber hinaus werden anhand der Simulationsergebnisse Rückschlüsse bezüglich der möglichen Schwachpunkte der Passagier- und Gepäckabfertigung am Flughafen Hamburg gezogen. Im Fokus steht dabei der zukünftige Einsatz der RFID-Technologie im Bereich der Gepäckabfertigung. Ergebnis der Bachelor-Thesis sollen somit neben dem Simulationsmodell Optimierungsvorschläge zur Verbesserung des Passagier bzw. Gepäck Workflows am Flughafen Hamburg sein.

Zusammenfassung

Das Thema dieser Bachelor-Thesis ist die Modellierung einer Flughafen Simulation mit der Software MATLAB Simulink SimEvents. Dabei wird ein diskret Event-basierendes Modell der Flughafen-Landseite des Flughafen Hamburgs erstellt. In den folgenden Kapiteln wird die Modell-Erstellung erläutert und Optimierungsvorschläge bezüglich der Passagier und Gepäck Workflows an Flughäfen formuliert. Im Fokus der Optimierung liegt dabei der Einsatz von RFID-Technologie und ihrem Nutzen bei der automatischen Allokation von Passagier und Gepäck des Passagiers im selben Flugzeug.

Im Rahmen dieser Arbeit wird anhand ausgewählter Komponenten die Implementation eines Level-1 Simulationsmodells in MATLAB Simulink SimEvents gezeigt. Neben der Simulationsevaluierung werden des Weiteren Optimierungsansätze für die Terminal Workflows im Kontext des zukünftigen Einsatzes der RFID-Technologie erläutert. Abschließend wird ein Fazit, in Bezug auf den Einsatz von Simulation und RFID zur Steigerung der Workflow Effizienz an Flughäfen, gezogen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Ziele der Thesis	2
2	Modellierungsgrundlagen	5
2.1	Die Flughafen-Landseite	5
2.1.1	Passagierabfertigung - Abflug	6
2.1.2	Gepäckabfertigung - Abflug	7
2.1.3	Passagierabfertigung - Ankunft	9
2.1.4	Gepäckabfertigung - Ankunft	10
2.2	Diskret-ereignisorientierte Simulation	10
2.3	Radio Frequency Identification	12
2.4	Fazit	14
3	Konzeptioneller Entwurf	15
3.1	Abflug Workflows	16
3.1.1	Passagierabfertigung	17
3.1.2	Gepäckabfertigung	17
3.2	Ankunft Workflows	18
3.2.1	Passagierabfertigung	18
3.2.2	Gepäckabfertigung	18
3.3	Konzept	23
3.4	Fazit	26
4	Implementation des Modells	27
4.1	Die Entwicklungsplattform	27
4.1.1	MATLAB Simulink	27
4.1.2	SimEvents	28
4.2	Die Datenbasis	31
4.2.1	Attribute	31
4.3	Implementationsdetails - Übersicht	33
4.4	Implementationsdetails - Terminal	34
4.4.1	Initialisierung der Entitäten	35

4.4.2	Architektur	37
4.4.3	Wegezeiten	41
4.5	Implementationsdetails - Passagier	43
4.5.1	Passagier - Check-In	43
4.5.2	Passagier - Sicherheitsbereich	45
4.5.3	Passagier - Duty-Free Shopping	47
4.6	Implementationsdetails - Gepäck	48
4.6.1	Initialisierung der Gepäck-Entitäten	48
4.6.2	Die Gepäckförderanlage	49
4.6.3	Erweiterung um RFID Gepäckabgleich	50
4.7	Fazit	52
5	Ergebnisse	53
5.1	Datenanalyse	53
5.1.1	Modell-Durchsatz	53
5.1.2	RFID Gepäckabgleich	54
5.2	Bewertung der Realisierung	55
5.3	Optimierungsansätze	57
5.3.1	RFID	58
5.3.2	Der „Gläserne Passagier“	59
5.3.3	Wegezeiten-Optimierung mit DigiBA	60
5.4	Fazit	62
6	Zusammenfassung & Ausblick	63
6.1	Zusammenfassung	63
6.2	Ausblick	64
	Abbildungsverzeichnis	I
	Tabellen & Listings	II
	Literaturverzeichnis	III
	Anhang	VII

1 Einleitung

1.1 Motivation

Flughafengesellschaften und Airlines rund um den Globus haben mit denselben Chancen zu kämpfen.

Das *Luftfahrtcluster Metropolregion Hamburg* erwartet eine Verdreifachung des internationalen Luftverkehrs innerhalb der nächsten 20 Jahre. Aus diesem Grund werden Forschungsprojekte wie *Airport2030* konsequent durchgeführt, mit den Zielen der „Verminderung von Beförderungskosten, Lärm- und Schadstoffemissionen bei gleichzeitiger Erhöhung der Pünktlichkeit in Verbindung mit verkürzten Abfertigungszeiten.“ [Luf12b]

Praktisch parallel zu den kontinuierlich steigenden Passagierzahlen, steigen auch die Vorschriften im Sicherheitsbereich stetig an. Das gründlichere Scannen von Passagieren und Gepäckstücken hat neue Engpässe an den Terminals geschaffen. Eine hundertprozentige Kontrolle aller Gepäckstücke ist heutzutage der Standard. Die internationale Verankerung des *Baggage Reconciliation Concepts* in ICAO¹ Annex 13 und LuftSiG §9 fördert weitere unplanmäßige Verspätungen für Passagiere, Airlines und Flughäfen. Das Konzept besagt, dass ein Gepäckstück nicht an Bord eines Flugzeuges bleiben darf, sollte der entsprechende Passagier nicht an Bord gehen. Dies führt zu Rückholaktionen von Gepäckstücken aus Flugzeugen unter enormem Zeitdruck.

Effizienz steigern bedeutet vor allem auch Kosten senken. Ein Kostenfaktor, den sowohl Flughäfen als auch Airlines unbedingt minimieren wollen, ist der Bereich des Gepäckverlustes während der Gepäckverarbeitung bei Abflug, Umstieg und Ankunft. Dabei sind die Gründe für den Verlust von einzelnen Gepäckstücken genau so vielfältig wie komplex. Die Gepäckförderanlagen an modernen Flughäfen erstrecken sich über kilometerlange Gepäckbänder und sind komplett IT-gesteuert. Das Scannen, Sortieren und rechtzeitige Verladen erfordert enormen logistischen Aufwand. Gleichzeitig können triviale Umstände wie ein abgerissenes Gepäck-Label oder das Herunterfallen vom Gepäckband zu Unmut beim betroffenen Passagier und Kosten bei Flughafen und Airline führen. Laut Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie [Bun10] sind im Jahre 2007 weltweit 42 Millionen Gepäckstücke im zivilen Luftverkehr falsch verladen worden. Die zusätzlichen Kosten beliefen sich auf 3,8 Mrd. US-Dollar.

¹Die ICAO ist die Internationale Zivilluftfahrtorganisation. Die ICAO Annexe regeln verschiedenste praktische Aspekte der Luftfahrt auf einheitliche Weise. Sie gelten auch als Mindeststandards der zivilen Luftfahrt [Int12c].

Die Einführung neuer Technologien ist komplex und langwierig. Im laufenden Betrieb eines Flughafens dürfen Baumaßnahmen und IT-Rollouts nur sehr bedingt zu Einschränkungen der normalen Terminalprozesse führen. Des Weiteren dürfen neue Technologien keine langen Einführungsphasen mit sich bringen, sondern müssen sich möglichst schnell in die laufenden Prozesse integrieren lassen.

Dies sind nur einige der Problemfelder und somit auch Chancen für die internationalen Flughäfen.

Um im Wettbewerb zu bestehen ist es an den Flughäfen, Investitionen intelligent zu tätigen, um die eigene Effizienz der Terminals zu steigern und gleichzeitig die Kosten zu minimieren. In diesem Zusammenhang ist das Interesse eines Flughafens groß, seine vorhandenen Möglichkeiten und Ressourcen optimal einzusetzen, sowie gezielte Investitionen in Projekte zu tätigen, welche die vorhandenen und potenziellen Engpässe in der Zukunft auflösen. Doch wie erreicht ein Flughafen das Optimum? Wie werden Informationen generiert, um die frühzeitige Identifikation von Engpässen sicherzustellen? Welche Entscheidungsunterstützung ist sinnvoll, damit die richtigen Technologien eingeführt werden?

Da Versuche am realen Objekt in der Regel nicht durchführbar sind, ist eine Computersimulation meist die sinnvollste Alternative. Simulationen ermöglichen die numerische Lösung komplexer Aufgabenstellungen. Daher gewinnen simulative Untersuchungen in Wissenschaft, Technik und Praxis immer größere Bedeutung.

1.2 Ziele der Thesis

Die oberste Leitfrage dieser Bachelor-Thesis lautet „Wie modelliert man ein Level-1 Modell mit der MATLAB Software SimEvents?“ Diese Fragestellung wird kombiniert mit dem Forschungsschwerpunkt Flughafenoptimierung. Aufbauend auf Forschungsarbeiten des Arbeitsbereiches TIS der Universität Hamburg [For10], [Fra09] wird dabei der Flughafen Hamburg als Modell-Referenz verwendet.

Grundlagen in Bezug auf die Sinnhaftigkeit von Terminal-Modellierung unter Verwendung der MATLAB Simulink Erweiterung SimEvents wurden im TIS Seminar „Multimodaler Transport und Logistik“ erarbeitet [Gar12]. Auf Basis der gewonnenen Kenntnisse soll im Rahmen dieser Bachelor-Thesis ein valides Simulationsmodell der Landseite des Flughafen Hamburgs erarbeitet werden. Mit dem Begriff *Level-1* bezeichnet man ein Modell, welches hinsichtlich seines Modellierungszwecks in der Lage ist, alle nötigen Parameter zu verarbeiten. Des Weiteren werden

Erkenntnisse bezüglich der abzubildenden Workflows eines Flughafen-Terminals aus aktuellen Forschungsarbeiten [Far11a], [Far11b], [Fra09], [For10] des Arbeitsbereichs TIS der Universität Hamburg verwendet.

Das entstandene Simulationsmodell wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit verwendet, um den Optimierungsansatz der automatischen Gepäck-Identifikation durch RFID-Technologie zu evaluieren. Es werden technische Annahmen bezüglich RFID in das Simulationsmodell integriert und Ergebnisse aus den resultierenden Simulationsergebnissen abgeleitet. Somit entsteht im Rahmen dieser Arbeit eine implementierte Testumgebung für die Optimierung von Flughafen Workflows, mit einer konkreten Bewertung der Optimierung durch RFID Technologie.

In Kapitel zwei werden ausgewählte Grundlagen des Themenkomplexes erläutert. Die Flughafen-Landseite, diskret-ereignisorientierte Simulation und RFID bilden die Themenschwerpunkte des Kapitels. In Kapitel drei werden die Workflows formalisiert und ein Konzept zur Modellerstellung erarbeitet. Das vierte Kapitel behandelt die konkrete Implementation der Simulation. Dabei wird detailliert auf das Abflug-Simulationsmodell *Departure* eingegangen. Des Weiteren werden sowohl die Entwicklungsplattform MATLAB Simulink SimEvents, als auch die Datenbasis der Simulation behandelt. Kapitel fünf stellt die erzielten Ergebnisse dar, bewertet die Simulation und liefert Optimierungsansätze für die Flughafenprozesse.

2 Modellierungsgrundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen des Modells erläutert. Dabei werden die zugrunde liegenden Terminal-Prozesse auf Basis von Farschtschi et. al. [Far11c], Frahm [Fra09] sowie Recherchen des Autors natürlichsprachlich dargelegt. Des Weiteren werden die Grundlagen der diskret-ereignisorientierten Simulation behandelt sowie ein Überblick über die RFID-Technologie vermittelt.

2.1 Die Flughafen-Landseite

Das Terminal ist der Bereich oder Gebäudekomplex des Flughafens, in dem der Passagierverkehr abgewickelt wird. Nach Schulz [Sch10b, S.111 ff.] bilden die Terminals die Schnittstelle zwischen Land- und Luftseite des Flughafens. Die Landseite stellt dabei die Verbindung an die bodengebundene Verkehrsstruktur dar, inklusive Anfahrts- und Parkmöglichkeiten für den Individualverkehr. Die Luftseite umfasst die komplette Flugbetriebsfläche inklusive allen Steuerungs- und Wartungseinrichtungen.

Ordnet man den Terminalbereich der Land- bzw. Luftseite konkret zu, so umfasst der Bereich der *Landseite* den öffentlich zugänglichen Bereich (die Haupthalle) eines Terminals, inklusive Zufahrtswege, Ticketschalter und Check-In. Der luftseitige Bereich beginnt mit der Sicherheitskontrolle der Passagiere und endet mit Betreten des Flugzeuges.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Begriffsdefinition für die *Landseite* erweitert. Im Folgenden umfasst die Flughafen-Landseite den Bereich vom Betreten des Passagier-Terminals, bis zu der Ankunft des Passagiers am entsprechenden Abflug-Gate. Innerhalb der Landseite wird grob untergliedert in *Passagierabfertigung mit Check-In* und der *Passagierabfertigung im Sicherheitsbereich*. Von den verschiedenen Zufahrtswegen der Passagiere wird hingegen abstrahiert. Das Eintreten von Passagieren in den Flughafenterminal markiert somit den Anfang des Simulationsmodells. Innerhalb des Terminals befindet sich außerdem der Bereich der Gepäckabfertigung. Als eigenständiger Teil der Passagierabfertigung kommt der Gepäckabfertigung eine tragende Rolle innerhalb des zu entwickelnden Simulationsmodells zu. Daher wird der gesamte Prozess der Gepäckverarbeitung im weiteren Verlauf dieser Arbeit als Teil der Flughafen-Landseite definiert. Auch hier gilt es zu beachten, dass die Landseite, gemäß der Definition dieser Arbeit, an den Abflug-Gates endet.

Auch befolgen Flughafenterminals ein Terminalkonzept. Je nach Anforderungen an den Flughafen sind in der Literatur verschiedene Terminalkonzepte für Passagier-Terminals zu finden. Menzen [Men07, S.271] beschreibt jedoch, dass aufgrund des historischen Wachstums der meisten Flughäfen, Terminalkonzepte in Reinkultur die Ausnahme darstellen. Klassischerweise lässt sich eine Konzept-Kombination erkennen. Für die Modellierungszwecke dieser Bachelorarbeit ist die Berücksichtigung von Terminalkonzepten jedoch nachrangig. Dieser Aspekt wird in Kapitel 4.4 in Bezug auf die explizite Verortung von bestimmten Prozessstationen und deren Wegezeiten am Flughafen Hamburg aufgegriffen.

Vielmehr ist die Beschreibung und Abbildung der Primärprozesse eines Passagier-Terminals die Grundlage der zu erarbeitenden Simulation. Dabei handelt es sich um die direkten Abfertigungsprozesse [Men07, S.273ff.] eines Terminals. Die Workflows der verkehrlichen Passagierabfertigung (Abflug & Ankunft) sowie der verkehrlichen Gepäckabfertigung (Abflug & Ankunft) werden im Rahmen dieser Arbeit im Detail analysiert. Von den weiteren elementaren Funktionen wie der Fracht- und Postabfertigung, der An- und Abfahrt zum Flughafen, der Transitbeförderung, der Wirtschafts- und Versorgungsverkehre sowie der Flugzeugrollverkehre auf den Flugbetriebsflächen wird in der weiteren Terminal-Betrachtung abstrahiert. Die Transferprozesse der Umsteigerpassagiere und des Umsteigergepäcks werden weiterhin nicht berücksichtigt.

2.1.1 Passagierabfertigung - Abflug

Hat ein Passagier das entsprechende Terminal betreten, so begibt er sich zum Check-In Bereich. Dort wählt er einen Schalter seiner Airline. Am Check-In Schalter erhält ein Passagier gegen Vorlage seines Ausweises die entsprechende Bordkarte. Üblich ist auch die Auswahl des Sitzplatzes für den Flug. Außerdem wird das Reisegepäck, falls vorhanden, aufgegeben. Alle Gepäckstücke, welche nicht als Handgepäck mitgeführt werden sollen oder dürfen, werden am Check-In gewogen, mit einem Destination-Label bestückt und über ein Laufband in den Bereich der Gepäckabfertigung transportiert. Neben dem klassischen Schalter werden heutzutage weitere Möglichkeiten des Check-In unterstützt.

Im Allgemeinen wird auf internationalen Flughäfen der Check-In an speziellen Automaten im Terminalbereich angeboten. Die dortige Abfertigung via Touch-Screen-Display erfolgt in der Regel ohne Unterstützung des Flughafenpersonals. Der Fluggast identifiziert sich dabei mit den entsprechenden Dokumenten, so dass der Automat Bordkarte und Gepäcklabel sogleich ausdruckt. Führt der Fluggast Reisegepäck mit sich, begibt dieser sich zu einem der im Terminal bereitgestellten Gepäckaufgabe-Schaltern, an dem er sein Gepäck (i.d.R. selbst) wiegt und auf-

gibt.

Zunehmender Beliebtheit erfreut sich die Möglichkeit des Online-Check-In. Diese meist direkt von den einzelnen Fluggesellschaften angebotene Art des Einbuchens, ermöglicht den Passagieren bis zu 24 Stunden vor Abflug über das Internet einzuchecken. Dabei kann die Bordkarte entweder ausgedruckt oder auf mobilen Endgeräten mitgeführt werden. Wie beim Check-In Automaten wird die Aufgabe des Reisegepäcks an speziellen Gepäckaufgabe-Schaltern durchgeführt.

Beim Vorabend Check-In wird der gesamte Check-In Prozess auf den Vorabend der Reise verlegt. Dies hat zur Folge, dass der Fluggast, am eigentlichen Tag der Reise, den Abfertigungsprozess direkt bei der Sicherheitskontrollstelle am Eingang zum geschlossenen Bereich der Abfluggates beginnt.

Im Bereich der Check-In Infrastruktur gibt es weitere Einrichtungen und Kreuzungen der vorgestellten Alternativen. Die Abfertigung durch Flughafenpersonal mit portablen Geräten oder der Remote-Check-In im Hotel werden für das Simulationsmodell jedoch nicht berücksichtigt [Bit10, S.122].

Nach erfolgreichem Check-In begibt sich der Passagier zum Eingang des Sicherheitsbereiches. Dort angekommen wird jeder Passagier sowie das Handgepäck im Zuge der Sicherheitskontrolle auf verbotene Gegenstände kontrolliert. Verlässt man mit dem Flug den Raum der Schengen-Staaten², so muss im Anschluss an die Sicherheitskontrolle außerdem die Passkontrollstelle der Bundespolizei passiert werden. Nach bestandener Kontrolle befindet man sich im Sicherheitsbereich des Terminals. Dieser darf nur mit gültiger Bordkarte betreten werden und umfasst die zahlreichen Gates, über die man in das entsprechende Flugzeug gelangt. Der Sicherheitsbereich besteht somit, neben den beschriebenen Kontrollstellen, aus Wartezonen vor jedem Gate, gastronomischen Einrichtungen, Waschräumen sowie diversen zollfreien Einkaufsmöglichkeiten.

2.1.2 Gepäckabfertigung - Abflug

Alle Gepäckstücke welche nicht als Handgepäck mitgeführt werden, kann ein Passagier am Check-In Schalter oder am Gepäckannahmeschalter abgeben. Die Gepäckstücke werden dort einzeln auf dem Waageband gewogen (zur Bestimmung des Flugzeug-Startgewichtes) sowie auf dem Labelband mit einem Gepäckanhänger (Label) versehen. Dieses Identifikations-Label

²„Mit der vollständigen Abschaffung der Binnengrenzkontrollen kann sich der Inhaber eines gemeinsamen Visums während des Gültigkeitszeitraums, längstens jedoch bis zu 90 Tage pro Halbjahr in den [...] Staaten aufhalten, die das Schengener Durchführungsübereinkommen anwenden.“ [Aus12]

enthält alle wichtigen Informationen wie die Flugnummer und den IATA-Code³ des Zielflughafens. Mit einem speziellen Baggage-Tag-Drucker werden diese Informationen als Barcode in horizontaler und vertikaler Ausführung auf den Gepäckanhänger aufgedruckt. Mit Hilfe dieses maschinenleserlichen Strichcode-Verfahrens wird die automatische Verteilung der Gepäckstücke über die oftmals kilometerlange Gepäckförderanlage des Terminals ermöglicht. Ist der Check-In Prozess abgeschlossen, bewegt sich das Gepäckstück auf ein Warteband. Sobald ein Platz auf dem angeschlossenen Abzugsband frei ist, wechselt das Gepäckstück auf eben dieses und gelangt in den Ablauf der Gepäckförderanlage.

Bei Gepäckstücken wird zwischen Standardgepäck und Sperrgepäck unterschieden. Unter Sperrgepäck sind nach Mensen [Men07] Gepäckstücke zu verstehen, die nicht über Standardmaße von Koffern verfügen oder aufgrund ihrer Form nicht von einer Gepäckförderanlage transportiert werden können, wie z.B. Kinderwagen oder Skier. Im Allgemeinen dürfen Standardgepäckstücken die maximalen Abmessungen von 85cm x 65cm x 42cm sowie das maximale Gewicht von 45 kg nicht überschreiten [Men07, S.286], [Fra09, S.7]. Die spezifischen Anforderungen an Standardgepäck legen Flughäfen individuell fest. Die Kriterien des Flughafen Hamburgs [Flu12b] legen ein Maximalgewicht von 25 kg fest, Maximalmaße von 100cm x 70cm x 40cm, keine Rucksäcke mit Riemen, sowie keine lebenden Tiere. Sperrgepäck wird auf gesondertem Wege abgefertigt und entzieht sich im Allgemeinen der automatisierten Gepäckabfertigung. Da die verwendete Datenbasis der TUHH (vgl. Kapitel 4.2) Sperrgepäck nicht berücksichtigt, wird im weiteren Verlauf davon abgesehen.

Der weitere Prozess der Gepäckabfertigung umfasst den Transport, die Sortierung, Zusammenfassung zu Transporteinheiten, sowie den Transport und Verladung in das Flugzeug [Fra09, S.8]. Wie bei der Passagierabfertigung wird auch die Gepäckabfertigung hinsichtlich des zu entwickelnden Simulationsmodells nur bis zum Erreichen des entsprechenden Abfluggates betrachtet. Somit endet der landseitige Gepäck-Prozess in dieser Arbeit nach erfolgreicher Sortierung der Gepäckstücke durch die Gepäckförderungsanlage.

In der Gepäckförderanlage scannen Sensoren zunächst den Barcode des Gepäcklabels und erfassen so den Koffer im System. Danach werden die Gepäckstücke in der automatischen Gepäckkontrolle mittels Röntgenstrahlung durchleuchtet. Dadurch soll ausgeschlossen werden, dass gefährliche Substanzen wie Sprengstoffe oder andere potenziell gefährliche Gegenstände in das Flugzeug gelangen. Nach dem gesetzlich vorgeschriebenen „Hold Baggage Screening“ Konzept

³„IATA-Codes sind von der International Air Transport Association (IATA) vergebene Codes, mit denen vor allem Flughäfen, Fluggesellschaften und Flugzeugtypen eindeutig abgekürzt werden.“ [Fra09]

wird jedes Gepäckstück auf dem Weg zum Zielpunkt (Gepäcksammlung oder Flugzeugposition) aus Sicherheitsgründen durchleuchtet [Men07, S.284 ff.]. Verdächtige Gepäckstücke werden dabei über ein mehrstufiges Durchleuchtungskonzept⁴ aussortiert und von der Polizei oder dem Zoll untersucht.

Um eine möglichst effiziente Gepäcksortierung zu gewährleisten, werden heutzutage mehrheitlich Systeme mit Behältern verwendet. Dabei werden die Gepäckstücke zunächst mit einer Plastikwanne „verheiratet“. Durch die Wannen ist das System weniger stör anfällig und der Transport effektiver. Moderne Fördersysteme transportieren so die Wannen mit bis zu 5 Metern pro Sekunde [Fra11, S.30]. Die Gepäcklabels werden an bestimmten Punkten ausgelesen und mittels Weichen die Richtungsentscheidung umgesetzt. Diese automatische Sortierung wird nach Frahm [Fra09] durch sogenannte Pushersysteme ermöglicht. Sollte für einen betreffenden Flug noch keine Entnahmestelle vorgesehen sein, wird das Gepäckstück zu Frühgepäckspeichern geleitet. Nähert sich eine Wanne den Entnahmestellen, übergibt sie das Gepäck an die langsameren Kippschalen. Diese passieren nacheinander die Gepäckentnahmestellen der anliegenden Gates. Erneut werden die Barcodes der Gepäcklabels ausgelesen. Befindet sich eine Kippschale an der richtigen Entnahmestelle, so wird das Gepäckstück dort abgeworfen. Alternativ werden auch sogenannte Entnahmestaubahnen verwendet, um auf Kippschalen zu verzichten. Bei einem System ohne Behälter werden hingegen sogenannte „Pusher“ aktiviert, die den Koffer entsprechend vom Abzugsband schieben [Men07], [Fra09].

Im Allgemeinen wird das Gepäck an der Entnahmestelle von Hand in einen Alu-Container oder auf einen Wagen umgeladen und über das Vorfeld zum Flugzeug gebracht.

2.1.3 Passagierabfertigung - Ankunft

Der Prozess der ankommenden Passagiere beginnt landseitig mit Betreten des Terminals. Dies geschieht entweder über eine Fluggastbrücke oder per Vorfeld-Bus. Im Terminal begeben sich die Fluggäste direkt zur Gepäckausgabe. Handelt es sich um einen Flug von außerhalb des Schengen-Raums, passieren die Passagiere auf ihrem Weg die Passkontrollstelle der Bundespolizei. Je nach Terminalkonzept, -größe und Gate-Position nimmt der Fußweg zur Gepäckausgabe einige Zeit in Anspruch [Fra09]. Bei der Gepäckausgabe handelt es sich in der Regel um zirkulierende Laufbänder, auf denen das Gepäck ausgegeben wird. Je nach Durchführung des parallelen

⁴Mehrstufigenkonzepte zur automatischen Gepäckkontrolle sortieren verdächtige Gepäckstücke über mehrere Kontrollstufen aus. Dadurch wird ein hoher Durchsatz bei hoher Kosteneffizienz gewährleistet. Gelten in Stufe 2 durchschnittlich 20% der Gepäckstücke als verdächtig, gelangen in Stufe 3 nur noch 0,1-1% der Gepäckstücke [Air96].

Gepäckabfertigungsprozesses, kommt es an der Gepäckaushabe zu entsprechenden Wartezeiten. Nach Erhalt der Gepäckstücke müssen Fluggäste eventuell eingeführte Waren bei der Zollkontrollstelle anmelden. Mit Verlassen des Terminals endet der Prozess der Passagierankunft.

2.1.4 Gepäckabfertigung - Ankunft

Sowohl lose Gepäckstücke als auch Luftfrachtcontainer werden bei der Flugzeugentladung zu Sammelstellen am Terminal transportiert. Die Sammelstellen sind Gruppenweise (vgl. *Gate-Cluster* in Kap. 4.4.2) für bestimmte Terminal-Gates zuständig. Dort wird das Gepäck nach Ankunftsgepäck, Umsteigergepäck und Sperrgepäck sortiert. Umsteiger- und Sperrgepäck sind von der weiteren Betrachtung in dieser Arbeit ausgeschlossen. Das Ankunftsgepäck wird auf das entsprechende Laufband gelegt und per Rundlauf in den Gepäckaushabebereich geleitet. Mit der Entnahme der Gepäckstücke vom Gepäckband durch den Fluggast ist der Gepäckankunftsprozess abgeschlossen.

2.2 Diskret-ereignisorientierte Simulation

Im Rahmen der Spitzencluster-Forschung des Luftfahrtstandortes Hamburg sind am Arbeitsbereich TIS (Universität Hamburg) bereits Forschungsarbeiten mit Workflow- und Simulationsansätzen bezüglich Flughäfen entstanden. Formella [For10] entwickelt in seiner Bachelorarbeit ein Simulationsmodell zur Abbildung und Optimierung von Fracht- und Gepäckströmen. Das in MATLAB Simulink entwickelte Modell basiert auf der Theorie von Stoffstromnetzen, welche vor allem mit Petri-Netz-Methoden dargestellt werden. So werden Fracht- und Gepäckstücke nicht einzeln pro Stück, sondern als Fluss zwischen verschiedenen Stationen betrachtet. „Ein anschauliches Beispiel für ein Stoffstromnetz wäre die Simulation von Wasser. Möchte man einen Fluss, welcher in einem See mündet, simulieren, wird in der Regel nicht jeder Tropfen einzeln betrachtet, sondern man simuliert das Wasser als Ganzes.“ [For10, S.18] Zur Simulation der Fracht- und Gepäckflüsse wurden die Vorteile des kontinuierlichen Simulationskerns von Simulink genutzt. Die Ströme wurden als kontinuierliche Signale implementiert, so dass der Zustand des Stroms zu jedem Zeitpunkt der Simulation ausgegeben werden kann.

Ein Nachteil der Stoffstrom-Simulation ist die fehlende Abbildung einzelner Entitäten. So ist es beispielsweise nicht möglich, einzelne Frachteinheiten in Formellas Simulationsmodell zu identifizieren, ihnen bestimmte Merkmale (Attribute) zuzuordnen, oder ihren Verbleib innerhalb der Simulation nachzuverfolgen.

Entitäten sind nach Hansen und Neumann [Han09] die individuell unterscheidbaren Objekte der Realwelt. Am Flughafen lassen sich so beispielsweise die tausenden einzelnen Fluggäste zu einem *Entitätstypen* Passagier zusammenfassen. Ein Entitätstyp besitzt eine Menge von beschreibenden Merkmalen, sogenannten *Attributen*. Jede konkrete Ausprägung ist eine Passagier-Entität, welche sich durch die individuelle Belegung der Attribute, z.B. einen konkreten Namen, auszeichnet [Han09, S.288].

Während ein kontinuierliches Simulationsmodell die Zustandsveränderungen des Signalflusses stetig abbildet⁵ [Ste94, S.7], basiert ein diskret-ereignisorientiertes Modell darauf, dass die Modellvariablen ihre Werte nur in (diskreten) Zustandsprüngen verändern können. Sogenannte *Zustandsübergänge* sind typischerweise das Erreichen einer Station durch ein Objekt oder die Verfügbarkeit einer zuvor belegten Ressource. Ein diskretes Ereignis löst üblicherweise eine Reihe nachfolgender Ereignisse aus [Voß01, S.177].

In dieser Arbeit werden bestimmte Flughafen-Prozesse betrachtet. Der Vorteil für deren Simulation besteht daher in der Definition des gesamten Simulationsmodells über die diskreten Zustandsübergänge (Ereignisse) der zu betrachtenden beweglichen Entitäten *Passagier* und *Gepäckstück*. In diesem Zusammenhang ist die Wichtigkeit der *Warteschlangensysteme* hervorzuheben. Nach Voss [Voß01, S.178] werden in der diskret-ereignisgesteuerten Simulation *bewegliche Objekte* in *Quellen* erzeugt und danach zu *Stationen* des Modells geleitet. Eine Station bearbeitet ein bewegliches Objekt über einen definierten Zeitraum. Die Bearbeitung ist dabei i.d.R. eine Black-Box, in der nur Anfangszeitpunkt und Endzeitpunkt (Verlassen der Station) betrachtet werden. Zu jeder Station gehört eine *Warteschlange*, in die sich ankommende Objekte bis zu ihrer Bearbeitung einreihen. Sowohl die Auswahl des nächsten Objektes innerhalb einer Warteschlange, als auch das Ansteuern der nächsten Station innerhalb des Simulationsmodells kann über verschiedenste programmierte oder vordefinierte Strategien erfolgen. Aufgrund der beschriebenen Modellierungsoptionen ist die Nutzung der diskret-ereignisorientierten Simulation für die Prozesse der Passagier- und Gepäckabfertigung die logische Folgerung.

Die Software SimEvents ist ein Beispiel für ein Werkzeug der diskret-ereignisorientierten Simulation. SimEvents fungiert als Ergänzung zur kontinuierlichen, zeitkonsumierenden Simulation in Simulink und erfüllt alle Anforderungen, um das diskret-ereignisorientierte Level-1 Simulationsmodell der Flughafenprozesse zu entwickeln.

Zu beachten ist im Weiteren auch die Betrachtungsweise von Simulationsergebnissen. Speziell

⁵Kontinuierliche Simulation ist die Abbildung zeitkonsumierender Zustandsveränderungen in Prozessen. Nach Steinhausen [Ste94] nutzt diese Form der Simulation Differentialgleichungen, um in überwiegend naturwissenschaftlichen Simulationsmodellen entsprechende Prozesse abzubilden.

grafische Darstellungen müssen entsprechend der diskreten Zustandsveränderung der Entitäten ausgerichtet und bewertet werden: „Ereignisorientiert bedeutet, dass das Modell nur zu den Zeitpunkten betrachtet wird, in denen eine Zustandsveränderung eintritt.“ [Voß01, S.177]

2.3 Radio Frequency Identification

RFID ist das Akronym für Radiofrequenz-Identifikation (engl. *Radio Frequency Identification*). Die Technologie ermöglicht nach Informationsforum RFID e.V. [Inf07] die Übertragung von Daten mittels Radiowellen, ohne jeglichen Berührungs- oder Sichtkontakt. Somit eignet sich die RFID-Technik in besonderem Maße zur Authentikation von Objekten, beispielsweise Containern, Personen oder Tieren.

Ein RFID-System besteht aus zwei zentralen Komponenten, dem *Lesegerät* (auch *Sendempfangs-Gerät*) und einem *Transponder*. Die zu hinterlegenden Daten werden auf dem Transponder gespeichert. Beide Komponenten enthalten ein Koppellement (Spule, Antenne) und eine integrierte Schaltung (Mikrochip), über die sie via Radiowellen miteinander kommunizieren. Dabei erzeugt das Lesegerät ein elektromagnetisches Feld mit einer begrenzten Reichweite. Gelangt ein Transponder in die Reichweite des Lesegerätes, verlässt dieser seinen passiven Zustand und sendet seine Daten an das Lesegerät. Auch die in der Regel notwendige Energie zum Betrieb des Transponders wird so kontaktlos übertragen. Je nach technischer Umsetzung des Systems gibt es Unterschiede bezüglich Größe, Reichweite, detaillierter Funktionsweise und Einsatzkontext verschiedener RFID-Systeme. Zur Komplettierung einer RFID-Systeminfrastruktur gehört zusätzlich immer ein im Hintergrund operierendes IT-System. Dieses ist über das Lesegerät mit dem RFID-System verbunden und wertet die übertragenen Daten entsprechend aus [Ker06], [Inf07], [Fin12], [Wal12].

Schönemann [Sch10a] bezeichnet RFID als eine der reifsten Technologien des *Ubiquitous Computing* (ubiquitär = allgegenwärtig). So umfasse der von Mark Weiser (1991) geprägte Begriff „die physische und kognitive Einbettung von Technologien in alltägliche Gegenstände und unsere Umgebung, um die virtuelle mit der realen Welt zu verschmelzen und Informationen überall, jederzeit verfügbar zu machen.“ [Sch10a, S.2] Somit ergeben sich durch diese moderne Form der Informationserfassung neuartige Möglichkeiten des präzisen Monitorings von Objekten der Realwelt. Dabei beschränken sich die Überwachungsmöglichkeiten nicht auf den Zustand und die Gegebenheiten der Objekte, sondern greifen auch im Hinblick auf Veränderungen derer Objekteigenschaften.

RFID-Systeme sind Teil der *Auto-ID-System* Familie. Das bekannteste Mitglied der Auto-ID-Systeme ist der herkömmliche Barcode. Die Systeme definieren sich vordergründig über ihre Funktion der automatischen Objektidentifikation. Demnach bietet RFID erhebliche Optimierungspotenziale im Vergleich zu bisher eingesetzten Auto-ID-Verfahren durch eine enorme Reduzierung der menschlichen Intervention [Ker06, S.1].

Im Allgemeinen verringert die Technologie den vorhandenen Medienbruch⁶ zwischen IT-Systemen und Objekten der Realwelt auf ein neues Minimum. Kern [Ker06, S.2 ff.] vermutet, dass sich der vermehrte Einsatz von RFID in den nächsten Jahren ähnlich stark auf die Wirtschaft auswirken wird, wie seinerzeit die Einführung des Computers auf die Informationsverarbeitung. Kern argumentiert mit den zukünftigen Kommunikationsmöglichkeiten von (durch RFID) intelligenten Gegenständen untereinander. Diese These stützt die exponierte Stellung von RFID im Bezug auf die Entwicklung des Ubiquitous Computing. Allerdings schränkt Kern auch ein, dass RFID bisher häufig nur die Funktion des Barcodes übernimmt und somit zur reinen Identifikation eingesetzt wird.

Die RFID-Technologie bietet, aufgrund der von Kern beschriebenen Minimierung des Medienbruches, außerdem die Grundlage für den industriellen Trend des *Internets der Dinge*. Nach Ashton [Ash09] beschreibt der Begriff die zukünftige Form der weltweiten Vernetzung, in der neben den menschlichen Teilnehmern auch andere Dinge der Realwelt faktisch Mitglieder sind. Durch RFID könnten zukünftig Gepäckstücke Teil des Internets der Dinge sein. So wie heutzutage jeder Computer mit Internetanschluss lokalisiert wird, könnten morgen die Objekte der Realwelt über RFID-Chips und -Transponder weltweit identifiziert und lokalisiert werden.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird der Einsatz von RFID Technologie hinsichtlich der Ablösung bisheriger Auto-Identifikations-Systeme im sicherheitskritischen Umfeld des Flughafen-Terminals betrachtet. Nach Waldmann [Wal12] sind die sogenannten *Smart-Labels* die geeignetste Form von RFID-Tags im Kontext der Gepäck-Abfertigung. Obwohl das Barcode-System noch Kostenvorteile gegenüber RFID besitzt, werden sich die entsprechenden Investitionen über die erheblichen technischen Vorteile in Bezug auf Schnelligkeit, Korrektheit und Sicherheit in vertretbarer Zeit amortisieren.

⁶Der Begriff Medienbruch wird in Kapitel 5.3 erneut aufgegriffen. Kern [Ker06] verweist für die Definition auf Fleisch [Fle04].

2.4 Fazit

In Kapitel zwei sind ausgewählte Grundlagen des Themenkomplexes erläutert worden. Die Flughafen-Landseite, diskret-ereignisorientierte Simulation und RFID bilden die Themenschwerpunkte des Kapitels.

Die Definition der Flughafen-Landseite wurde für den weiteren Verlauf der Arbeit angepasst. Die Begriffsdefinition umfasst den Bereich vom Betreten des Passagier-Terminals, bis zu der Ankunft des Passagiers am entsprechenden Abfluggate. Die Gepäck-Entitäten werden von der Aufgabe am Check-In bis zu den Abfluggates betrachtet. Die diskret-ereignisorientierte Simulation wird im weiteren Vorgehen verwendet, da sich mit ihr (im Zusammenhang mit SimEvents) die Flughafenprozesse vorteilhaft modellieren lassen. RFID ist eine neue Technologie, mit der die Übertragung von Daten ohne direkten Kontakt zweier Objekte möglich ist.

3 Konzeptioneller Entwurf

In diesem Kapitel werden die zu modellierenden Workflows konkret als UML-Aktivitätsdiagramme abgebildet. Auf Basis der formalisierten Prozesse wird die Entwicklung einer spezifischen Vorgehensweise zu einem Simulationskonzept dargelegt. Das Konzept bildet ein Gerüst für die konkrete Implementation der Modellkomponenten.

Das Simulationsmodell bildet die Geschäftsprozesse der Passagiere und Gepäckstücke als Aneinanderkettung von Stationen innerhalb des Terminals ab. Ziel der Simulation ist die Gewinnung von validen Daten über Kapazitäten, Prozesszeiten und Engpässe der Abfertigungsprozesse. Ausgehend von den erzielten Ergebnissen sollen so Optimierungspotenziale aufgezeigt und Technologie-Empfehlungen ausgesprochen werden. Dieses Ziel kann eine Level-1 Simulation nur unter der Voraussetzung von korrekten Input-Daten sowie einem korrekten Prozessmodell erfüllen. Aufgrund dessen ist eine Formalisierung der Flughafen-Abläufe im Vorfeld der Modelerstellung zwingend erforderlich. Zur formalen Abbildung der Geschäftsprozesse eignen sich *UML-Aktivitätsdiagramme*⁷. Frahm [Fra09] modelliert dazu die natürlichsprachigen Prozesse zuerst semi-formal als *Ereignisgesteuerte Prozessketten (EPK)*⁸. Die EPKs werden anschließend als formale UML-Aktivitätsdiagramme visualisiert. Auf Basis dieser Prozessdiagramme ist eine korrekte Umsetzung der Geschäftsprozesse im Simulationsmodell gewährleistet.



Abbildung 1: UML-Notationselemente (vgl. [Far11b])

Charakteristisch für die formale Prozessdarstellung mit Aktivitätsdiagrammen in UML-Notation ist die Abbildung von Wechselwirkungen zwischen mehreren Prozessen. Der Prozessfluss in Aktivitätsdiagrammen besteht aus der Abarbeitung in Reihe geschalteter Stationen. Um Abhängigkeiten zwischen mehreren Prozessen formal darzustellen, wurden die Notationselemente *Signalsender*, *Signalempfänger* und *Zeitsignal* eingeführt (Abb. 1). Gelangt der Prozess zu einem Signalsender, wird ein Signal an den korrespondierenden Signalempfänger eines anderen Prozesses gesendet. Dieses Signal startet den Prozessfluss an der entsprechenden Stelle des Signalempfängers im Prozess. Solange ein solches Signal ausbleibt, wird die Abarbeitung des Pro-

⁷Für ausführliche Informationen zu UML-Aktivitätsdiagrammen seien [Hah05] und [Pag05] empfohlen.

⁸Ausführliche Informationen zu EPKs sind in [Rod97] zu finden.

zesses beim Signalempfänger unterbrochen. Farschtschi et al. [Far11b, S.7] beschreiben weiter, dass die Unterbrechung von Prozessen und deren Fortsetzung durch ein externes Ereignis typische Elemente von Warteschlangensystemen sind. Das Zeitsignal-Element dient ebenfalls der Unterbrechung von Prozessen. Allerdings wird die Fortsetzung nicht durch ein externes Signal, sondern nach einem festgelegten Zeitverzug fortgesetzt.

In den folgenden Abschnitten werden die grundlegenden Prozesse des Simulationsmodells in Form von UML-Aktivitätsdiagrammen abgebildet. Diese eignen sich im Besonderen zur Demonstration der Ressourcenzuteilung sowie der Transport- und Wegezeiten. Dabei verdeutlicht die Ressourcenzuteilung, wann eine Ressource einem bestimmten Prozess zugeordnet wurde [Far11b, S.7]. Grundlage der Diagramme ist die Arbeit von Frahm [Fra09]. Basierend auf seiner Definition der Flughafen Workflows wurden bereits Arbeiten im Arbeitsbereich TIS der Universität Hamburg veröffentlicht. Unter anderem entwickelten Farschtschi et al. [Far11a] ein MATLAB Simulink Modell zur Simulation von Passagierstrom-Prozessen. Auch Formella [For10] über die Simulation von Passagier- und Gepäckströmen (vgl. Kap. 2.2) basiert auf besagten Workflows. Die Abbildungen wurden hinsichtlich der engen Definition der Flughafen-Landseite (vgl. Kap. 2.1) entsprechend adaptiert⁹.

3.1 Abflug Workflows

Mittelpunkt des konzeptionellen Entwurfs sind die visualisierten Passagier- und Gepäck Workflows. Definitionen des Workflow-Begriffes sind in der Literatur vielfältig belegt.

Workflow Definition nach Hansen und Neumann:

„Mit dem englischen, auch im deutschen Sprachraum gebräuchlichen Wort „Workflow“ bezeichnet man den Ablauf eines Geschäftsprozesses. Ein Geschäftsprozess besteht aus einer Menge von Tätigkeiten, die meist von verschiedenen Personen in einer definierten Reihenfolge ausgeführt werden.“ [Han09, S.573]

Workflow Definition nach Fichter:

„Workflow sind alle Tätigkeiten, die zur Erledigung eines oder mehrerer miteinander verknüpfter Vorfälle ausgeführt werden müssen. Der Workflow wird bestimmt durch die Reihenfolge der einzelnen Bearbeitungsschritte und die jeweilige Zuständigkeit. Er steuert die eindeutige Beauftragung der zuständigen Stelle und die Bereitstellung aller benötigten Informationen. Workflow ist damit mehr als ein in sich abgeschlossener Vorgang, der oftmals auch als Geschäftsprozess

⁹Die Erstellung der UML-Aktivitätsdiagramme wurde mit der Open-Source-Software *Dia* [Mac12] umgesetzt.

oder Geschäftsvorfall bezeichnet wird. Er ist die Gesamtheit der Bearbeitungsschritte aller miteinander verbundenen Vorgänge.“ [Fic00, S.28]

Im Verlauf dieser Arbeit werden die Begriffe *Workflow* und *Geschäftsprozess* synonym verwendet.

Kapitel 3.1 veranschaulicht die Workflows im Abflugbereich des Flughafen-Terminals.

3.1.1 Passagierabfertigung

Das Prozessmodell Passagier-Abflug setzt sich aus zwei substantiellen Komponenten zusammen, dem *Check-In* und dem *Sicherheitsbereich*. Entsprechend der zugrunde liegenden Datenbasis (vgl. Kap. 4.2) gibt es vier verschiedene Varianten des Check-In Prozesses. Zur Veranschaulichung sind die Varianten *Check-In Schalter* (Abb. 2) und *Check-In Automat* (Abb. 3) im Kapitelverlauf abgebildet. Die Varianten *andere Medien u. Gepäckschalter* (Abb. 28) und *Check-In am Vorabend* (Abb. 29) sind im Anhang zu finden. Auffällig ist die Ähnlichkeit der Check-In Alternativen in Abbildung 2 und 3. Abweichungen bei der Implementierung sind somit eher im Bereich der Bearbeitungszeiten der einzelnen Prozessaktivitäten zu erwarten.

Der Workflow Sicherheitsbereich in Abb. 4 ist hingegen umfangreicher. Er bildet den gesamten Bereich des Terminals ab, zu dem nur Passagiere mit gültigem Ticket Zutritt haben (Voraussetzung ist hier natürlich das erfolgreiche Passieren der Sicherheitskontrollstelle). Das Prozessmodell beinhaltet mehrere optionale Abzweigungen. Zu beachten ist hier unter anderem, wie im Simulationsmodell eine optionale manuelle Kontrolle der Fluggäste sinnvoll zu implementieren ist (hinsichtlich stochastischer Gesichtspunkte).

3.1.2 Gepäckabfertigung

Das Prozessmodell Gepäckabfertigung-Abflug in Abb. 5 ist das größte, zusammenhängende UML-Aktivitätsdiagramm. Im Kontext der vollautomatischen Gepäckförderanlage an Flughäfen wird der gesamte Workflow als eine Einheit betrachtet. Auch die Abzweigung für Sperrgepäck wird hier im Sinne der Vollständigkeit modelliert, jedoch in der weiteren Betrachtung nicht berücksichtigt (vgl. Kap. 2.1.2). Des Weiteren werden auch mögliche *Interrupts*, in diesem Fall das Aussortieren von verbotenen Gegenständen und die versehentliche Fehlleitung von Gepäckstücken, dargestellt. Ähnlich wie in Abb. 4 ist auch hier die Frage nach der Implementierung solcher Interrupts (hinsichtlich stochastischer Gesichtspunkte) zu beachten.

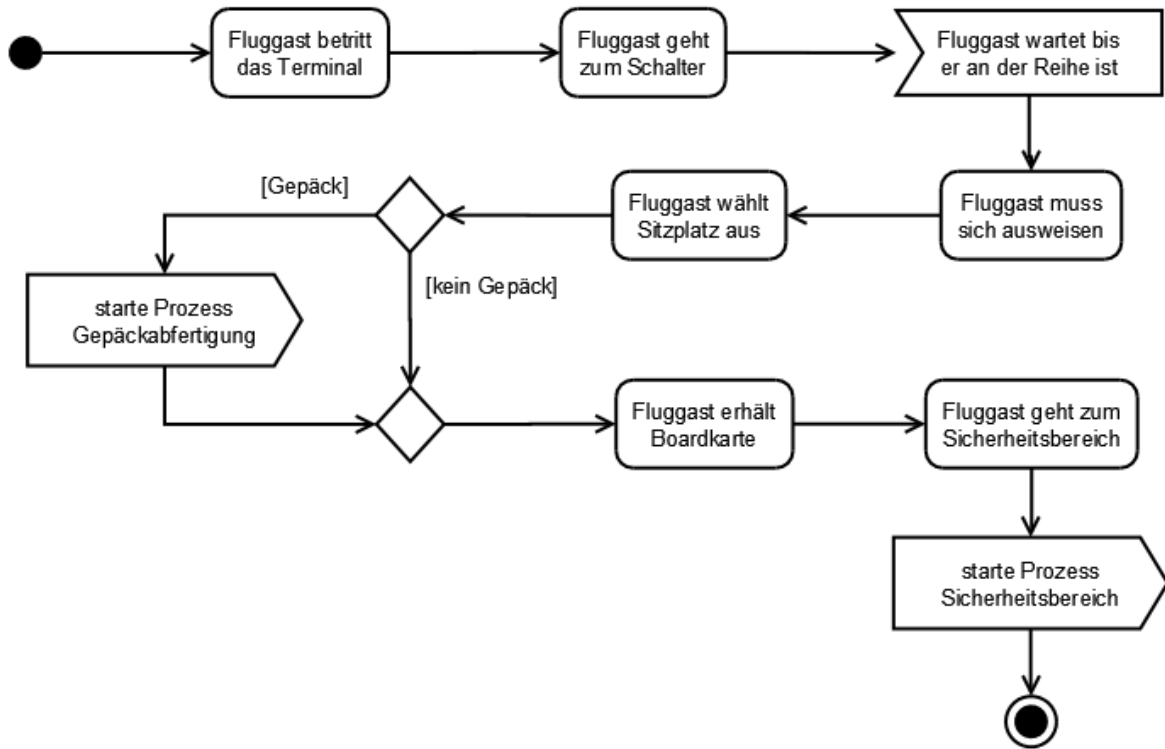


Abbildung 2: Passagierabfertigung am Check-In Schalter (vgl. [Fra09])

3.2 Ankunft Workflows

Kapitel 3.2 veranschaulicht die Workflows im Ankunftsbereich des Flughafen-Terminals.

3.2.1 Passagierabfertigung

Das Prozessmodell Passagierabfertigung-Ankunft (Abb. 6) ist eine, zusammenhängende Komponente. Charakteristisch ist die dreifache Verzweigung des Workflows. Ein Passagier durchläuft die jeweils optionalen Stationen Passkontrolle, Gepäckausgabe und Zollstation vor Verlassen des Flughafenterminals.

3.2.2 Gepäckabfertigung

Das Prozessmodell Gepäckabfertigung-Ankunft in Abb. 7 weist die größte Abweichung zum ursprünglichen Workflow von Frahm [Fra09] auf. Die Adaption profitiert dabei von der Nicht-

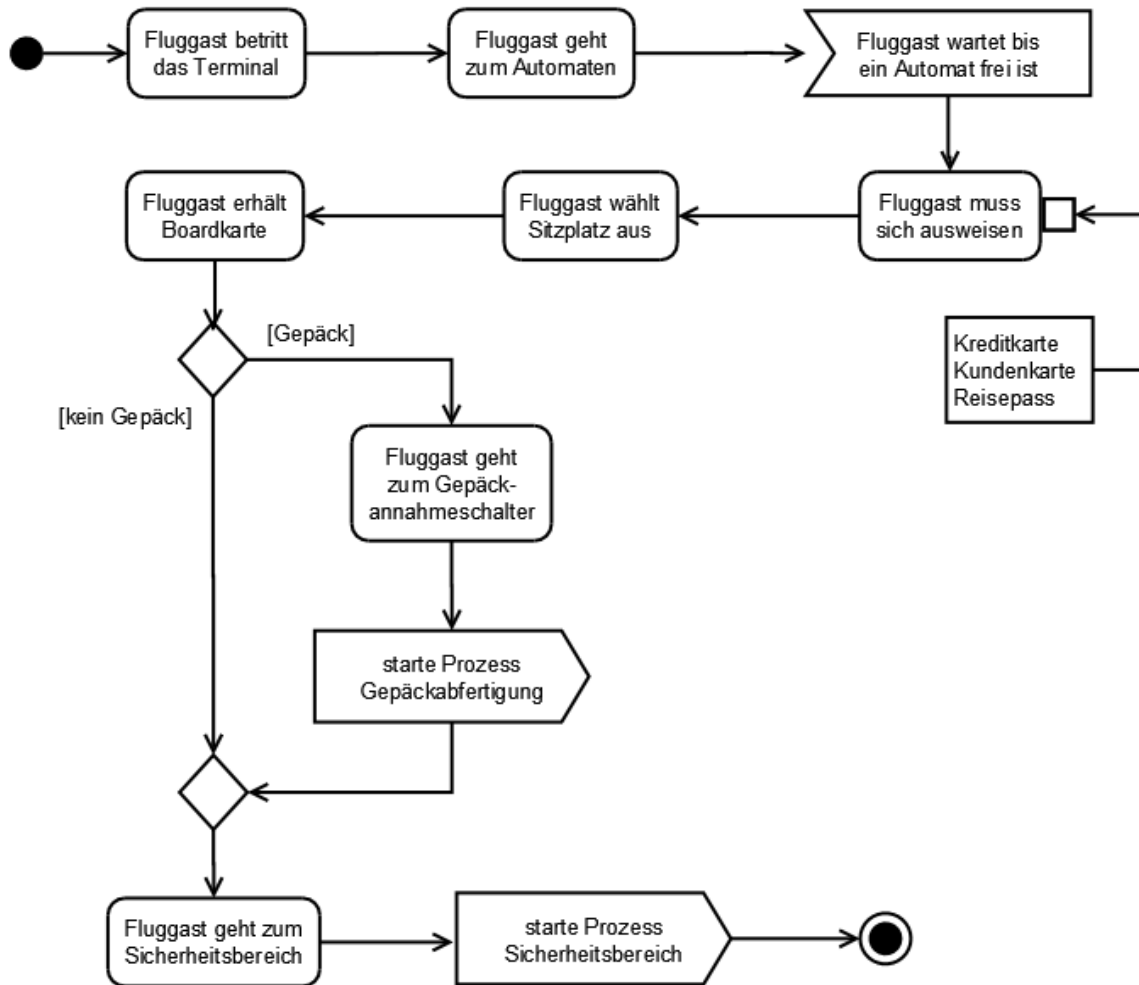


Abbildung 3: Passagierabfertigung am Check-In Automaten (vgl. [Fra09])

berücksichtigung des Sperrgepäcks sowie des Umsteigergepäcks. Aus diesem Grund wird nur die Aktivität des auf den Rundlauf gelegten Gepäckstückes abgebildet.

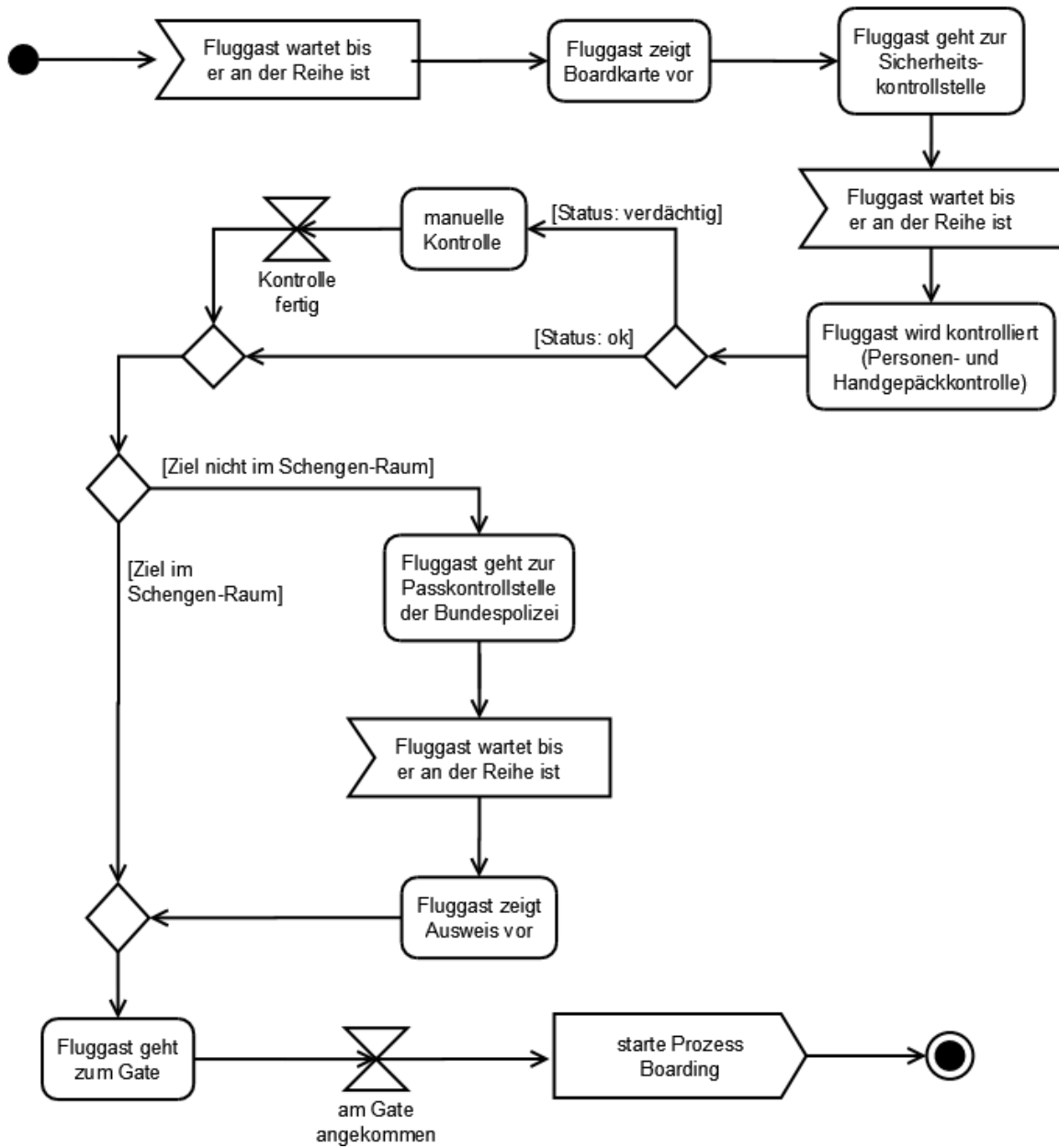


Abbildung 4: Passagierabfertigung im Sicherheitsbereich (vgl. [Fra09])

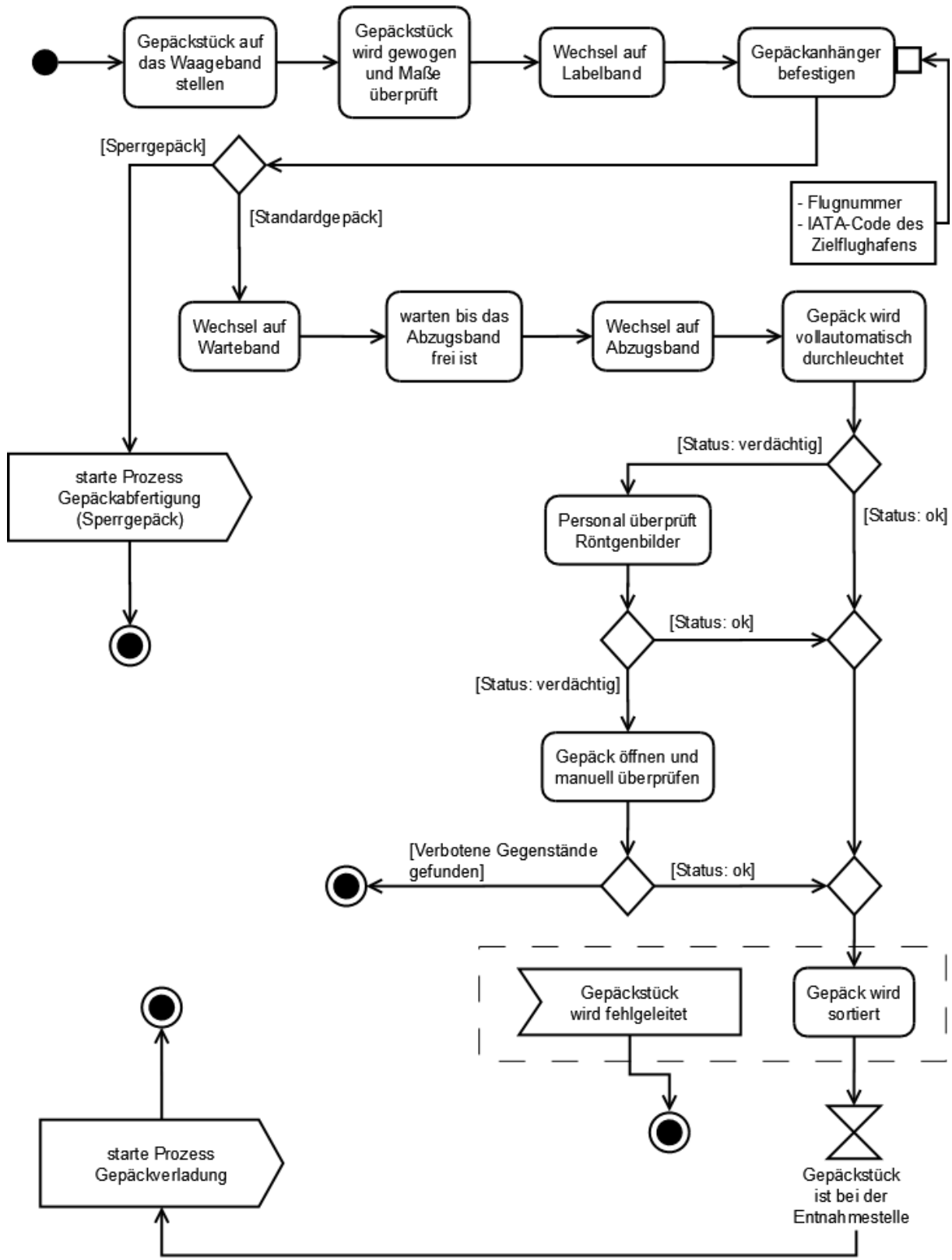


Abbildung 5: Gepäckabfertigung Abflug (vgl. [Fra09])

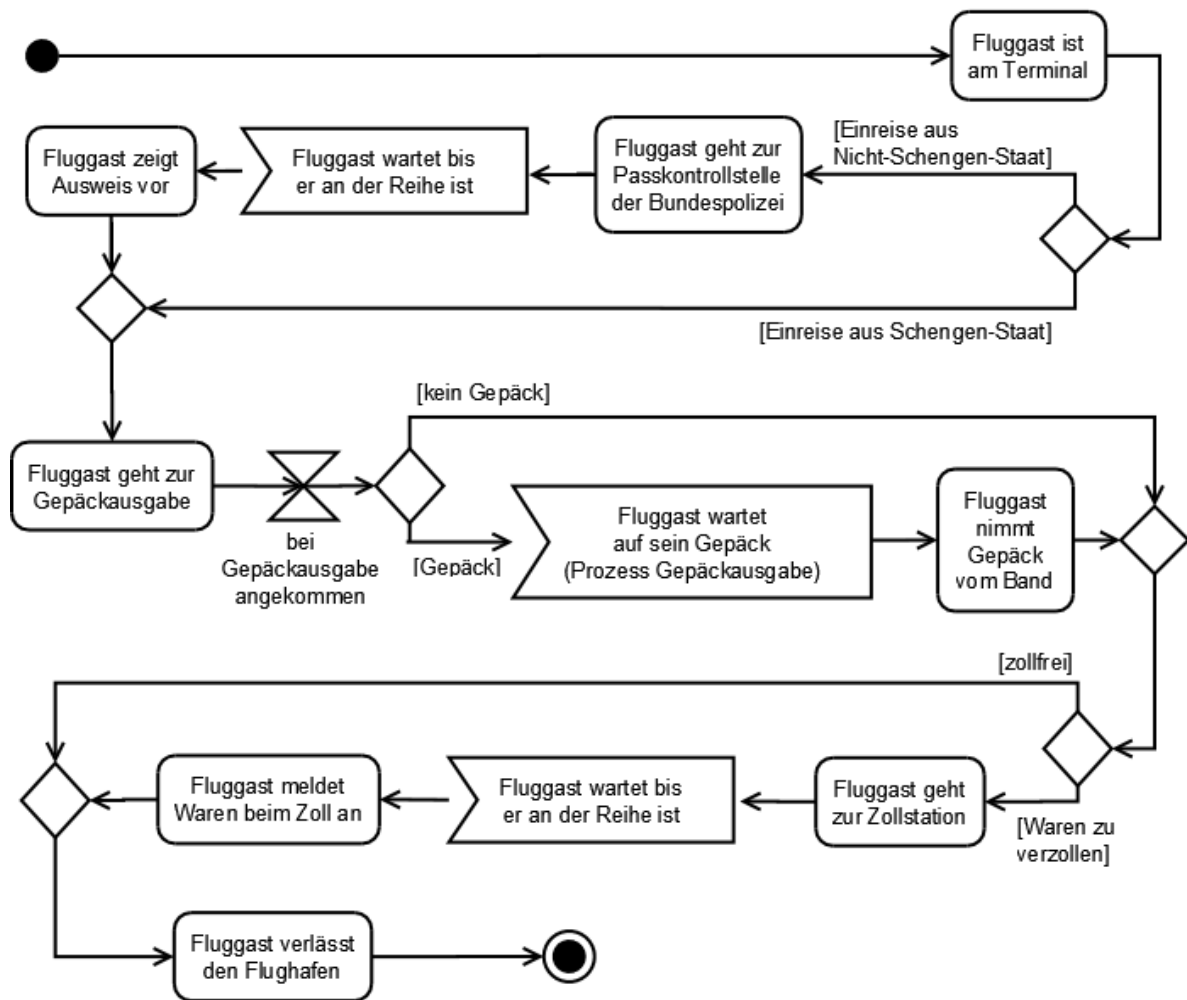


Abbildung 6: Passagierabfertigung Ankunft (vgl. [Fra09])

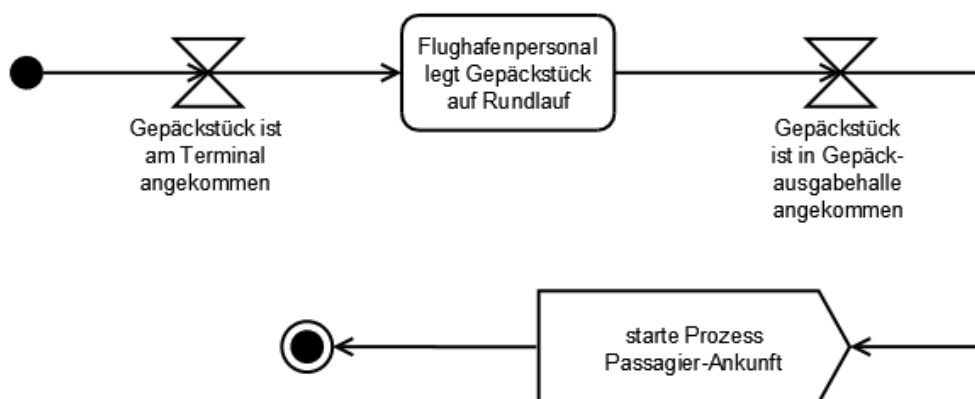


Abbildung 7: Gepäckabfertigung Ankunft (vgl. [Fra09])

3.3 Konzept

Das Simulationsmodell soll anhand der erzielten Ergebnisse Aufschluss über mögliche Engpässe im Workflow-Netz der Passagier- und Gepäckabfertigung eines Flughafens ermöglichen. Anhand der in diesem Kapitel beschriebenen Workflows lassen sich bereits Optimierungsmöglichkeiten ableiten, welche unter der Zuhilfenahme eines den Anforderungen entsprechenden Simulationsmodells stichhaltiger evaluiert werden können.

Die Problematik der Terminal-Workflows ist vielschichtig. Grundsätzlich sind jegliche Schalter-Stationen potenzielle Engpässe, was die Entstehung von Warteschlangen bedeutet. Nach Mensen [Men07] ist die Gepäckabfertigung im zeitlichen Verlauf der Abfertigungsprozesse das größte Nadelöhr. Des Weiteren entstehen Wartezeiten durch verlorene oder fehlgeleitete Gepäckstücke im Bereich der Gepäckförderanlagen. Auch kurzfristig nicht zum Boarding erscheinende Passagiere führen zu Wartezeiten, da gemäß *Baggage Reconciliation Concept* kein Gepäckstück ohne Passagier an Bord einer Maschine sein darf. Die beschriebenen Sachverhalte sind dabei nur die Hauptpunkte, an denen Optimierungsversuche anknüpfen müssen. Jeder Engpass kostet nicht nur Zeit und Passagierkomfort, sondern ist in erster Linie ein enormer finanzieller Schaden für Airlines und Flughafenbetreiber.

Der nächste Arbeitsschritt umfasst daher die Entwicklung eines konzeptionellen Plans, zur Umsetzung der formalen Workflows in ein Simulationsmodell. Folgende Punkte der Vorgehensweise werden konzeptionell berücksichtigt:

- die Prinzipien des Modellierungsprozesses:

Dieser Abschnitt dient der Bestimmung einer Art *Anleitung* für die Modellierung. Nach Voss [Voß01, S.153 ff.] werden bei der Entwicklung des Simulationsmodells einige grundlegende Prinzipien beachtet.

Modelliere einfach - denke kompliziert ist eine wichtige Voraussetzung für das Verständnis der Simulation durch den späteren Nutzer. Die Prozessmodellierung soll Prozesse erläutern, wodurch eine einfache Modellierung(ssprache) unbedingte Notwendigkeit darstellt.

Beginne klein und erweitere ist ein Prinzip, welches im direkten Zusammenhang mit dem verwendeten Simulationswerkzeug SimEvents (vgl. Kap. 4.1.2) steht. Da die Implementation einem Lernprozess entspricht und im Laufe der Zeit erweitert wird, ist es sinnvoll einzelne (kleine) Komponenten zu modellieren und im weiteren Gesamtsystem als Untersystem zu integrieren. Auch die Verwendung von vorgefertigten Komponenten als *Black Box* ist für die nötige Abstraktheit des Modells erforderlich. Beispielsweise lassen sich

bestimmte Stationen anhand der Angabe einer Verweildauer der beweglichen Objekte abbilden, anstatt die Station detailliert zu implementieren.

Als drittes Prinzip ist *Teile und herrsche - vermeide Megamodelle* zu nennen. Es besagt, dass ein Modell stets interpretierbar bleiben muss, um seinen eigentlichen Zweck zu erfüllen. Ein Simulationsmodell sollte somit eine bestimmte Größe oder Komplexität nicht überschreiten. Wird eine solche Grenze überschritten, ist die Aufteilung des Modells in mehrere kleinere Modelle erforderlich. Durch die *Dekomposition* wird das menschliche Gesamtverständnis für die gezeigten Abläufe sichergestellt.

- die Aufteilung der Workflows in kleinere Teilabschnitte:

Das Aufteilen der formalen Prozessmodelle in logische (Unter-)Systeme ist die Konsequenz aus den vorgestellten Prinzipien nach Voss [Voß01]. Da die Flughafen-Prozesse zu großen Teilen aus Abarbeitungsstationen mit Warteschlangen bestehen, sollten diese die kleinsten Komponenten des Modells ausmachen¹⁰. Die Passagierabfertigung im Sicherheitsbereich (Abb. 4) lässt sich in drei Teilsysteme kategorisieren. Ein Passagier durchläuft die Personen- und Handgepäckkontrolle, danach wird die optionale Passkontrolle passiert. Im letzten Abschnitt bewegt sich ein Passagier im Bereich der Abflug-Gates, wobei Passagiere sich in Duty-Free-Shops und Gastronomieeinrichtungen aufhalten können, bevor sie ihr Gate erreichen. Die Passagierabfertigung bei Ankunft lässt sich nach dem selben Muster in drei Teilkomponenten aufteilen.

Die zentrale Komponente der Gepäckabfertigung Abflug ist die Gepäcksortierung. Je nach Detaillierungsgrad an dieser Stelle, kann die Simulation der Gepäckförderanlage aus nur einem abstrakten Teilsystem bestehen.

- die Berücksichtigung und Umsetzung von zufälligen Ereignissen:

Im Kontext der Flughafen Workflows werden an einigen Stellen Ereignisse beschrieben, die in der Realwelt teilweise vom Zufall abhängen. Zum einen sind hier die möglichen manuellen Kontrollen von Fluggästen und deren Handgepäck (Abb. 4) sowie von Gepäckstücken in der Gepäckförderanlage (Abb. 5) zu nennen. Diese Ereignisse können nur über implementierte Wahrscheinlichkeitsverteilungen umgesetzt werden, da die verwendete Datenbasis der TUHH (vgl. Kap. 4.2) keine Informationen über mögliche „verdächtige“ Passagiere oder Gepäckstücke enthält. Des Weiteren wird das mögliche Aussortieren von Gepäckstücken aufgrund enthaltener verbotener Gegenstände im Simulationsmodell nicht berücksichtigt. Zum anderen ist die Möglichkeit der Fehlleitung von Gepäckstücken zu betrachten (Abb. 5). Auch dieses Ereignis kann über die Verwendung

¹⁰Die genaue Implementation der Komponenten wird in Kap. 4 behandelt.

einer statistischen Wahrscheinlichkeitsverteilung für Fehler der Gepäckförderanlage implementiert werden. Es gilt zu beachten, dass eine solche Verteilungsfunktion bezüglich der Korrektheit im Minimalfall auf begründeten Annahmen basieren sollte. Im weiteren Prozessverlauf der Simulation muss außerdem eine statistische Berücksichtigung der „vermissten“ Gepäckstücke gewährleistet werden.

- die Definition der wichtigsten zu implementierenden statistischen Outputs:
Je nach spezifischer Interessenlage am Gesamtmodell oder an einzelnen Komponenten-Engpässen können diverse Simulationsdaten von Belang sein. Zur Standardausgabe am Simulationsende zählen folgende Werte:
 - Grafischer Verlauf der erzeugten Passagier- und Gepäck-Entitäten
 - Gesamtanzahl der verarbeiteten Passagier-Objekte am Simulationsende (inkl. grafischem Verlauf über die Simulationszeit)
 - Gesamtanzahl der verarbeiteten Gepäckstück-Objekte am Simulationsende (inkl. grafischem Verlauf über die Simulationszeit)
 - Ergebnisausgabe über *Passagier-Gepäck-Matching* an entsprechenden Gate-Clustern
 - Engpassanalysen an allen Warteschlangensystemen (Check-In Stationen, Sicherheitskontrollen für Gepäck und Passagiere, Passkontrollen und Abfluggates)

Die beschriebenen Daten sollten am Ende der Simulation in sinnvoller Tabellenform vorliegen, um einen intuitiven Excel-Export zu gewährleisten.

- die Entwicklung der Gepäck-Prozesse aus dem laufenden Passagier-Prozess:
Gibt ein Fluggast sein Gepäck am Flughafen aus, so wird ein Prozess der Gepäckabfertigung initialisiert. Das Gepäckstück wird nun als eigenständiges bewegliches Objekt des Gepäck-Prozesses betrachtet. Innerhalb der Simulation muss an besagter Station eine neue (Gepäck-)Entität erzeugt werden, welche die notwendigen Eigenschaften des entsprechenden Besitzers übernimmt. Neben den für die Gepäckabfertigung notwendigen Parametern bezüglich des Fluges, muss außerdem die Identifikation des Objektes für den Abgleich mit den Passagier-Objekten berücksichtigt werden. Die Implementation einer eindeutigen Identifikationsnummer (ID) für Passagier und entsprechendes Gepäckstück ist somit vonnöten.
- die Modellierung des technischen Fortschritts:
Die Nutzung der RFID Technologie kann zukünftig dazu führen, dass intelligente Objekte in der Realwelt teilautonom agieren. Vor allem aber ermöglicht die Technologie neuartige

Möglichkeiten der Überwachung solcher Objekte. Die Verschmelzung von IT-Systemen und Objekten der Realwelt durch RFID wird als Basis für die Umsetzung des *Internets der Dinge* angesehen. Der von Ashton [Ash09] geprägte Begriff sieht vor, die heutzutage noch immer in großem Umfang vorhandene Informationslücke zwischen realer und virtueller Welt zu minimieren (vgl. Kap. 2.3).

Gemäß diesem Ansatz wird im Simulationsmodell *Departure* das RFID-Konzept implementiert, um die enormen Vorteile von intelligenten Objekten zu skizzieren. Dabei sollen Möglichkeiten aufgezeigt werden, wie die Nutzung von RFID-Chips durch Fluggäste und in Gepäck-Labels zu deutlich effizienteren Prozess Workflows an Flughäfen beitragen kann.

3.4 Fazit

In Kapitel drei sind die Passagier und Gepäck Workflows als UML-Aktivitätsdiagramme formalisiert worden. Ein Konzept zur Vorgehensweise der Modellerstellung wurde erarbeitet. Folgende Punkte der Vorgehensweise werden konzeptionell berücksichtigt:

- die Prinzipien des Modellierungsprozesses
- die Aufteilung der Workflows in kleinere Teilabschnitte
- die Berücksichtigung und Umsetzung von zufälligen Ereignissen
- die Definition der wichtigsten zu implementierenden statistischen Outputs
- die Entwicklung der Gepäck-Prozesse aus dem laufenden Passagier-Prozess
- die Modellierung des technischen Fortschritts

4 Implementation des Modells

Im folgenden Kapitel wird die konkrete Implementation des Simulationsmodells *Departure* in MATLAB Simulink SimEvents detailliert beschrieben. Die deutlich weniger komplexe Simulation *Arrival* ist analog implementiert, wird jedoch nicht im Detail erläutert.

4.1 Die Entwicklungsplattform

4.1.1 MATLAB Simulink

Die Software MATLAB ist eine interaktive Programm-Umgebung zur Lösung von mathematischen Problemstellungen inklusive grafischer Darstellung der Ergebnisse. Ihr grundsätzliches Einsatzgebiet hat MATLAB in der Ausführung numerischer Berechnungen mithilfe von Matrizen [Mat12a].

Die kommerzielle Software steht an der Spitze einer umfassenden Produktfamilie der Firma MathWorks. Neben zahlreichen Toolboxen für verschiedenste Anwendungsgebiete beinhaltet die Software umfangreiche Standardfunktionen. Unter anderem bietet MATLAB die Möglichkeit Variablen zu definieren. Einzelne Variablen lassen sich zu multidimensionale Variablenstrukturen in Tabellenform, sogenannten *structs*, zusammenfügen. Diese stehen dann im *Workspace* und somit auch während der gesamten Laufzeit der Software zur Verfügung. Des Weiteren lassen sich in MATLAB eigene Funktionsskripte programmieren. Dazu legt man eine Datei *funktion.m* an, welche beliebig umfangreiche MATLAB-Befehle enthalten kann. Diese Skripte können die Ausführung der Simulation zur Laufzeit unterstützen oder auch ergänzende Programmlogik liefern [Wec11]. Im weiteren Verlauf werden ausgewählte technische Komponenten von MATLAB im Kontext der Modellimplementation (vgl. Kap. 4.4 ff.) näher betrachtet.

MATLAB bildet als Entwicklungsumgebung die Basis für das Simulationsprogramm Simulink. Bei Simulink handelt es sich um ein weiteres Produkt der Firma MathWorks, welches zum Zwecke der kontinuierlichen Simulation entworfen wurde. Simulink ist ein stark integriertes Zusatzprodukt zu MATLAB. Durch seinen zeit-basierten, kontinuierlichen Simulations-Kern erweitert es MATLAB um die Fähigkeit komplexe Systeme zu modellieren und als Simulationen auszuführen. Als interaktive, grafische Entwicklungsumgebung dient Simulink der Entwicklung, Simulation und dem Testen von zeitvarianten Modellsystemen. Im Entwurf und der Implementation von komplexen Regelungs-, Signalverarbeitungs- und Kommunikationssystemen oder Video-

und Bildverarbeitungssystemen liegen die Stärken der Software. So lassen sich beispielsweise die zahlreich enthaltenen grafischen Blockbibliotheken individuell anpassen und erweitern [For10], [Mat12c].

Simulink lässt sich durch verschiedene Produkte sowohl anwendungs- als auch simulations-spezifisch erweitern. Ein Add-on dieser Art ist das ereignisorientierte Software-Tool SimEvents, dessen Funktionalität die Grundlage dieser Bachelorarbeit darstellt.

4.1.2 SimEvents

SimEvents erweitert Simulink um einen diskret-ereignisgesteuerten Simulationskern sowie eine grafische Komponenten-Bibliothek. Die Software wird zusammen mit MATLAB Simulink von der Firma MathWorks entwickelt und vertrieben. Der offiziellen MathWorks Webseite [Mat12b] nach, ist SimEvents zur Simulation von ereignisgesteuerter Kommunikation zwischen Systemkomponenten entwickelt worden. Die Analyse und Optimierung von Latenzzeit zwischen Komponenten, Datendurchsatz, Paketverlust und anderen Leistungsindikatoren steht dabei im Mittelpunkt von SimEvents. Systeme können durch Nutzung der Komponenten-Bibliothek korrekt und verständlich modelliert werden. Zur Verfügung stehen vordefinierte Blöcke wie Warteschlangen, Server und Weichen, welche per *Drag-and-Drop* Funktionalität in einer Modelldatei zu einem Simulationsmodell zusammengesetzt werden können. Die Blöcke verfügen über umfangreiche Einstellungsoptionen, so dass Ablauf, Prozessunterbrechungen, Priorisierung und andere Operationen des Systems beliebig konfigurierbar sind. SimEvents eignet sich somit insbesondere für die Simulation von ereignisgesteuerten Prozessen mit beweglichen und stationären Objekten, um Ressourcenanforderungen, Engpässe und Optimierungspotenziale zu identifizieren.

Die SimEvents *Block-Library* [Gar12, S.8], [Mat12b] bietet ein quantitativ überschaubares, jedoch funktional umfangreiches Angebot fertiger Blöcke. Als Ausgangspunkt eines Simulationsmodells dient grundsätzlich ein Generator-Block. Dieser erzeugt wahlweise Entitäten, Ereignisse oder auch Signale. Charakteristisch für SimEvents ist die Verarbeitung von Entitäten. Ereignisse und Signale sind „vererbte“ Simulink Funktionen und ermöglichen die (fast) uneingeschränkte Kombination von Komponenten der verschiedenen Bibliotheken.

Im Kontext der Passagier- und Gepäckmodellierung liegt der weitere Fokus auf der Simulationsmodellierung mit Entitäten. Ein erstes Beispiel eines solchen Simulationssystems umfasst daher, neben dem Generator-Block zur Erzeugung von Modell-Entitäten, eine finale Entitäten-Senke. In dieser werden die Entitäten am Modell-Ende aufgefangen, nachdem sie erzeugt und

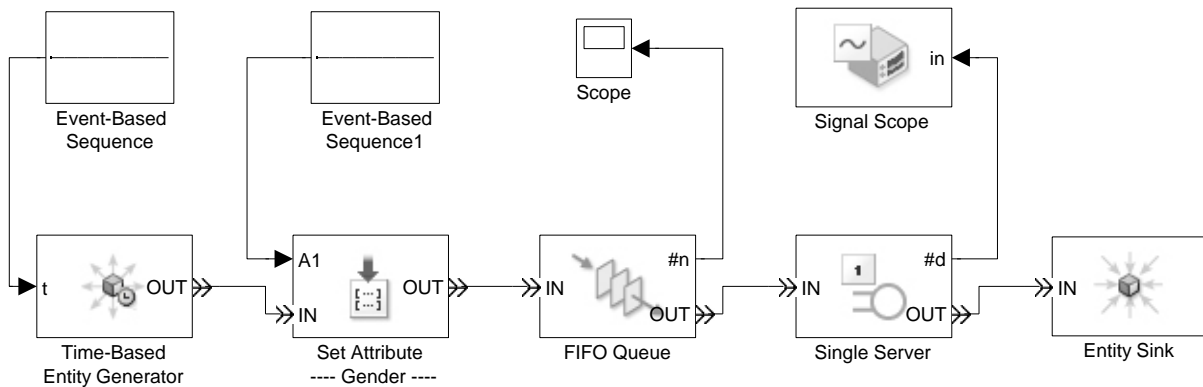


Abbildung 8: SimEvents - Ein erstes Beispiel

durch das Modellsystem geschickt wurden (Abb. 8). Zwischen Generator und Senke können beliebige SimEvents-Blöcke platziert werden, um die Entitäten zu verarbeiten, aufzuhalten, zu speichern oder anderweitig zu manipulieren. Verbunden werden die einzelnen Blöcke durch das Einfügen von grafischen Verbindungspfeilen. SimEvents verweigert dabei automatisch die angestrebte Verbindung, sollte beispielsweise ein Block eine Entität ausgeben, während der empfangende Block ein Signal erwartet. Durch die Verbindungen entsteht der Simulationsfluss.

Eine weitere wichtige Funktion ist die Vergabe von individuellen Attributen an eine Entität. Jede Entität kann dabei über eine beliebige Anzahl von Attributen verfügen. Ein Attribut kann mit positiven ganzzahligen Werten belegt werden. Diese können durch bestimmte Blöcke überschrieben oder ausgelesen werden, um z.B. die Richtungsentscheidung an einer Weiche im Simulationsmodell herbeizuführen.

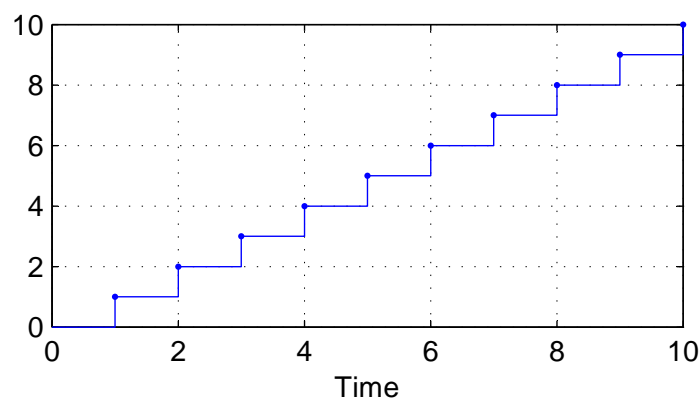


Abbildung 9: Ein erstes Beispiel - Signal Scope

Abbildung 8 zeigt ein einfaches Generator-Senke-Modell ohne Verzweigungen. Die erzeugten

Entitäten fließen dabei durch drei aufeinanderfolgende Blöcke. Der erste Block vergibt ein individuelles Attribut (hier: *Gender*) an jede Entität. Der *Event-Based-Sequence1* Block liefert dabei entsprechende Input-Daten aus einer festgelegten, externen Variable. Die Attributvergabe verbraucht grundsätzlich keine Verarbeitungszeit. Danach gelangen die Entitäten in den Warteschlangen-Block. Hier reihen sie sich nach dem FIFO-Prinzip¹¹ ein und warten, bis der folgende Server-Block frei wird. Über einen *Scope* Block wird hier die Anzahl an Entitäten in der Warteschlange ausgelesen. Gelangt eine Entität in den Server-Block, wird sie dort die festgelegte Bearbeitungszeit über aufgehoben, bevor die Entität den Block über den Ausgang wieder verlässt. Der *Signal Scope* Block liefert eine Ergebnis-Grafik anhand der vom Server übertragenen Signale. Die Ergebnis-Grafik (Abb. 9) zeigt an, wie viele Entitäten die Senke innerhalb von 10 Simulationsschritten (Startzeit: 0, Stoppzeit: 10) erreichen, unter den Einstellungen, dass pro diskretem Simulationsschritt eine Entität erzeugt wird und jede Entität genau eine Zeiteinheit im Server verweilt [Gar12, S.6 ff.].

Im Hinblick auf die Modellierung umfangreicher Systeme (wie der Passagier und Gepäck Workflows an Flughäfen) ist die Subsystem-Funktion zu erläutern. Hier bietet SimEvents (ähnlich wie Simulink) die Option, Teilsysteme in Form von logisch ausgewählten und zusammenhängenden Block-Komponenten in sogenannten *Subsystemen* zusammenzufassen. Dabei entstehen detaillierte Untersystemen, welche über eine beliebige Anzahl von Ebenen die Übersichtlichkeit fördern. Die strukturierte Verwendung von Subsystemen ermöglicht die hierarchische Gliederung [Wec11, S.4] der Simulation und schafft Abstraktionsebenen, die das allgemeine Verständnis des Modells unter Umständen deutlich verbessern.

Neben den grafischen Modell-Komponenten ist die Simulationsdauer für die Korrektheit einer Simulation von entscheidender Bedeutung. Wie in obigem Beispiel bereits erwähnt, lässt sich in den Konfigurationsparametern unter anderem die Start- bzw. Stoppzeit der Simulation einstellen. Während die Startzeit standardmäßig auf null voreingestellt ist, lässt sich die Stoppzeit direkt in der Toolbar des Simulationsmodells einstellen. In unserem Beispiel ist die Stoppzeit auf zehn eingestellt, wodurch sich eine Simulationsdauer von zehn Simulationsschritten ergibt. Im Allgemeinen muss die Simulationszeit auf die Input-Daten, speziell das zeitliche Erzeugen von Entitäten, Signalen und Ereignissen, sowie auf das Gesamtsystem der Simulation abgestimmt sein.

¹¹FIFO steht für „First in - first out“ und bezeichnet jegliche Speicher-Algorithmen, bei denen Elemente gemäß der Abspeicherungsreihenfolge aus dem Speicher entnommen werden.

4.2 Die Datenbasis

„Simulation funktioniert nach dem GIGO-Prinzip: „Garbage In - Garbage Out“. Wenn z.B. die Zeiten für einzelne Bearbeitungsschritte nicht der Realität entsprechen, so kann die Simulation nur schwerlich zu guten Prognosen führen.“ [Voß01, S.180]

Das erarbeitete Simulationsmodell basiert auf beweglichen Objekten, den Passagier-Entitäten, welche sich zur Simulationslaufzeit durch das Modell bewegen, um bestimmte Aktionen durchzuführen. Bei der Erzeugung der Passagier-Entitäten werden Kennzahlen der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH) verwendet. Die verwendeten Kennzahlen basieren auf Daten aus Passagierbefragungen der Jahre 2006, 2008 und 2009. Im Auftrag der Flughafen Hamburg GmbH führte die AMM GmbH die Befragungen in sechstägigen Abständen am Flughafen Hamburg durch.

Die statistische Auswertung der Ergebnisse durch die TUHH [Löw] ergab u.a. einen 18.986 Einträge umfassenden Passagier-Datensatz, welcher die durchschnittliche Anzahl und Ausprägung abfliegender Fluggäste des Flughafen Hamburgs pro Tag abbildet. Die 31 Spalten umfassende Tabelle listet Eigenschaften wie beispielsweise Ankunftszeit am Flughafen, Verweildauer, Flugzeugtyp, Airline, Gepäck, Zielregion, Gesamtreisedauer, u.ä. auf.

Aufgrund der Datenbasis ist das Simulationsmodell auf die Simulation von 24 Stunden ausgelegt. Beginnend bei Simulationszeitpunkt Null (24 Uhr) führt die Simulationsuhr genau 24 Simulationsschritte (1 Schritt \equiv 1 Stunde) aus. Die Initialisierung der Passagier-Entitäten nutzt entsprechend die Daten *Ankunftszeit am Flughafen*, um das minutengenaue Eintreffen von abfliegenden Passagieren am Terminal abzubilden¹². Der Passagier-Datensatz der TUHH wird neben der Initialisierung der Entitäten im Abflug-Simulationsmodell auch für die analoge Ankunft-Simulation verwendet.

4.2.1 Attribute

Der Passagier-Datensatz der TUHH wird des Weiteren zur Individualisierung der Passagier-Entitäten verwendet. Jeder Entität wird nach der Erzeugung ein Attribut-Satz auf Basis des Passagier-Datensatzes vergeben. Dabei werden Attribute nicht zufällig aus der Tabelle übergeben, sondern die genauen Werte zeilenweise pro Passagier auf die Entitäten übertragen. Alle Attributwerte müssen dabei zwingend ganze positive Zahlen sein, da MATLAB Simulink SimE-

¹²Auf die technischen Details der Initialisierung wird in Kap. 4.4 näher eingegangen.

vents Attribute nur numerisch abbildet. Insgesamt werden fünf Eigenschaften aus dem TUHH Datensatz auf sechs Attribute der Simulations-Entitäten abgebildet:

Reise mit Gepäck

Das im Flughafenkontext wichtigste Attribut *Luggage*. Es besagt, ob ein Passagier mit Gepäck reist, welches nicht den Anforderungen an Handgepäck entspricht. Dementsprechend muss dieser Passagier sein Gepäckstück am Check-In aufgeben und das Flugzeug darf nur starten, wenn sich der Passagier zu einem geladenen Gepäckstück an Board befindet (*Baggage Reconciliation*).

Flugart

Die Flugart wird im Simulationsmodell für das Attribut *Flight Type* verwendet. Es wird zwischen drei Flugarten (Attributwerte 1-3) unterschieden. Ein Passagier begibt sich entweder auf einen Touristik-Flug (1), einen Low-Cost-Flug (2) oder einen Linien-Flug (3). Die Flugart hat für eine Entität Auswirkungen im Sicherheitsbereich. Je nach Attributwert verändern sich die Verweildauern im Bereich des Duty-Free-Shoppings (vgl. Kap. 4.5.3).

Eincheckarten

Der TUHH Datensatz unterscheidet zwischen vier Eincheckarten. Das Attribut *Check-In Type* wird mit den möglichen Werten Automat (1), Schalter (2), andere Medien und Schalter (3) oder Vorabend (4) belegt. Entitäten gelangen je nach Attributwert zu den jeweiligen Stationen mit entsprechenden Verweildauern.

Luftverkehrsgesellschaft (LVG)

Die LVG wird im Simulationsmodell für zwei Attribute verwendet. So werden die Daten sowohl für die Zuweisung zu den *Terminals* als auch für die Belegung der *Gate-Cluster* verwendet. Basierend auf dem Flughafen Hamburg, wird zwischen zwei Terminals unterschieden. Der Abflugbereich ist in vier Gate-Cluster unterteilt. Detaillierte Angaben zur Abbildung des Flughafens im Simulationsmodell findet man in Kap. 4.4.2.

Zielregion

Die Zielregion wird im Simulationsmodell für das Attribut *SchengenArea* verwendet. Der Datensatz der TUHH unterscheidet neun weltweite Zielregionen. Hinsichtlich der optionalen Zollabfertigung im Sicherheitsbereich ist für das Simulationsmodell die Unterscheidung zwischen Zielregionen innerhalb oder außerhalb des Schengen-Raums [Aus12] von Bedeutung. Daher werden die Regionen Deutschland (1) und Europa (2) zum Attributwert SchengenArea (1) zusammengefasst¹³, alle übrigen Regionen (3-9) hingegen zum Attributwert Non-SchengenArea (2).

¹³Dabei handelt es sich um eine vereinfachte Modellierung des Schengen-Raums. Eine genaue Auflistung aller Schengen-Mitgliedsstaaten findet man in [Aus12].

4.3 Implementationsdetails - Übersicht

Die Implementation des Simulationsmodells umfasst eine Reihe von Dateien, welche in diesem Kapitel vorgestellt werden.

Data_Passenger_Input.mat

Die siebenspaltige Variablen-Matrix bildet den relevanten Ausschnitt der TUHH Datenbasis (vgl. Kap. 4.2) im MATLAB Workspace ab. Spalte eins und zwei beinhalten die Ankunftszeit der Fluggäste am Flughafen in Stunden und Minuten (z.B. 18:49 Uhr → Spalte 1 = 18; Spalte 2 = 49). Die weiteren fünf Spalten sind Basis für die Attributwerte der Entitäten (vgl. Kap. 4.2.1). Die 7 x 18.987 Werte umfassende Matrix wird mit der Funktion *readXLS.m* aus einer entsprechenden Excel-Datei eingelesen.

Parameter.mat

Hierbei handelt es sich um eine MATLAB Struktur-Variable (sog. *struct*), welche Daten hierarchisch speichert. Strukturvariablen gehören in MATLAB zu den *Containervariablen*. Strukturen sind benannte Containervariablen, da sie einzelne Elemente nicht durch Ziffern, sondern durch Feldnamen voneinander unterscheiden. Dies hat zur Folge, dass die hierarchische Speicherung von Wegezeit-Werten in der Struktur entsprechend der hierarchischen Subsystem-Gliederung der Simulation erfolgen kann [Sch09, S.478]. Einem Server-Block kann so ein entsprechender Wert der *Parameter.mat* Variablen über die verwendete Feldnamenstruktur zugewiesen werden.

createNumericalAttributes.m

Das Skript erfüllt (dem Namen entsprechend) die Funktion der Umwandlung von Attributwerten aus der Variablen-Matrix *Data_Passenger_Input.mat*. Die Daten *Luftverkehrsgesellschaft* und *Zielregion* der TUHH liegen in Form von Zeichenketten (*Strings*) bzw. Zahlenwerten zwischen „1“ und „9“ vor. Aus diesen Daten erzeugt *createNumericalAttributes.m* die drei Attributvariablen *Terminal*, *GateCluster* und *SchengeArea* mit den Attributwerten 1-2, 1-4 und 1-2.

Zu diesem Zweck sind in dem Skript die Annahmen über Terminalverteilung und Gate-Clustering aus Kapitel 4.4.2 implementiert. Bezüglich des SchengenArea-Attributs werden die Regionen Deutschland (1) und Europa (2) zum Wert „1“ zusammengefasst, alle übrigen Regionen (3-9) hingegen zum Wert „2“. Die Zuordnungslogik bei der Neubelegung der Attributwerte basiert stark auf der MATLAB Funktion *ismember(X, M)*, welche Auskunft darüber gibt, ob eine Variable X in der Matrix M enthalten ist [Sch09, S.76]. Der entsprechende Skript-Quelltext ist in Listing 3 im Anhang dargestellt.

readXLS.m

Die Funktion liest komplette Microsoft Excel Sheets aus und erzeugt die entsprechende

Variablen-Matrix im MATLAB Workspace. Während der Simulation wird das Skript nicht eingesetzt. Es hat somit nur eine unterstützende Funktion beim Erzeugen von neuen Input-Daten.

resultHandler.m

Das Skript verarbeitet erzeugte Ergebnismatrizen der Simulation. Es fügt beispielsweise mehrere Ausgabevektoren zu einer sinnvollen Ergebnistabelle zusammen. Besonderen Stellenwert hat *resultHandler.m* in Bezug auf die Auswertung der RFID-Komponenten des Simulationsmodells *departure.mdl*. Die detaillierte Funktionsweise wird in Kapitel 4.6.3 behandelt.

modell.mdl

Es gibt zwei voneinander unabhängige Simulationsmodelle. Die Datei *departure.mdl* enthält das Modell der Abflugprozesse von Gepäck und Passagieren. Dabei handelt es sich um das Hauptmodell dieser Bachelorarbeit. Die vorgestellten Implementationsdetails beziehen sich im Allgemeinen auf das Simulationsmodell der Abflugworkflows. Die Datei *arrival.mdl* umfasst hingegen die Ankunftsprozesse des Flughafens. Wie in Kapitel 3.2 gezeigt, gestalten sich die Prozessworkflows für Passagiere und Gepäck bei der Ankunft deutlich übersichtlicher. Das Simulationsmodell der Ankunft modelliert sich entsprechend analog der Abflug-Simulation.

startskript.m

Zu den beiden Simulationsmodellen gehören die entsprechenden Initialisierungsskripte *departure_start.m* und *arrival_start.m*. Die Funktionsweise der Skripte ist dabei analog. Zuerst führt das Skript die Funktion *createNumericalAttributes.m* aus. Dann wird die Flughafenparameter-Datei *Parameter.mat* in den Workspace geladen. Danach wird die Variablen-Matrix *IntergenTimes* für die Erzeugung der Entitäten erstellt (ausf. Beschreibung in Kap. 4.4.1), bevor anschließend einzelne Variablen-Matrizen pro Attribut aus der Variablen-Matrix *Data_Attributes* erzeugt werden. Sind diese vorbereitenden Schritte fehlerfrei durchgeführt worden, startet das Skript das eigentliche Simulationsmodell. Um als Anwender eine Simulation zu starten, muss das entsprechende Startskript in einer MATLAB Simulink SimEvents Umgebung ausgeführt werden. Während der gesamten Prozedur gibt das Startskript auf dem MATLAB *Command Window* Statusmeldungen aus.

4.4 Implementationsdetails - Terminal

Der Prozessfluss von Passagier- und Gepäck-Entitäten ist abhängig von den Gegebenheiten des Simulationsmodells. Diese Gegebenheiten werden über das Abbilden der realen Prozessumgebung, in diesem Fall des Flughafenterminals, modelliert. Die vorgestellten generischen Abfertigungsworkflows (vgl. Kap. 3.1 u. 3.2) werden zu diesem Zweck mit den notwendigen Parametern

eines Flughafens kombiniert, um ein korrektes Simulationsmodell zu gewährleisten. Als Flughafenschema dient dabei der internationale Flughafen Hamburg. Eine abstrakte Darstellung der obersten Ebene des zu erstellenden Simulationsmodells *Departure* und seiner Subsysteme bietet Abbildung 10.

In den folgenden Unterkapiteln werden die Modelleigenschaften *Initialisierung der Entitäten*, *Terminal-Architektur* und *Wegezeiten* erläutert.

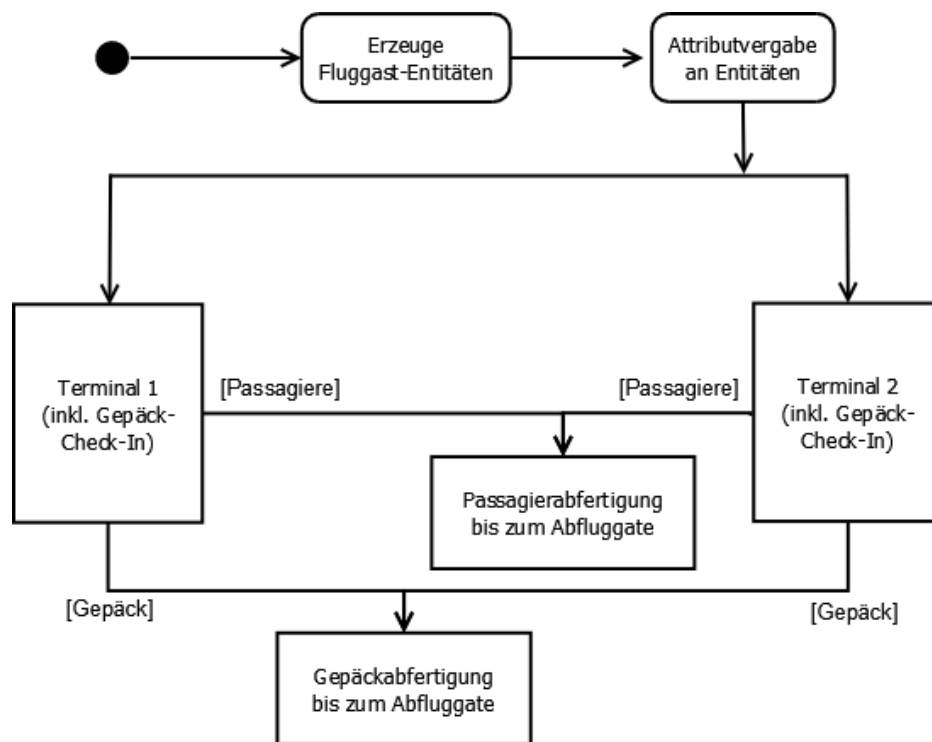


Abbildung 10: Abstrakte Darstellung Simulationsmodell Departure

4.4.1 Initialisierung der Entitäten

Das zu implementierende Simulationsmodell basiert funktional auf beweglichen Objektentitäten (den Fluggästen), welche sich durch eine Reihe von festen Stationen der Simulation bewegen. Die verwendete Software SimEvents unterstützt dank des diskret-ereignisgesteuerten Kerns und der Erzeugung von unabhängigen Entitäten genau diese Simulationseigenschaften (vgl. Kap. 4.1). Folgerichtig ist die Erzeugung der Passagier-Entitäten unweigerlich der Einstiegspunkt des Modells. Ist die Simulation gestartet, müssen Passagiere im zeitlichen Verlauf das Flughafenterminal betreten.

In Abbildung 11 ist die Initialisierungsphase der Passagier-Entitäten abgebildet. Dieser Teil des Modells besteht aus den zwei Subsystemen *Create Entities* und *Set Attributes* sowie einem Scope-Block.

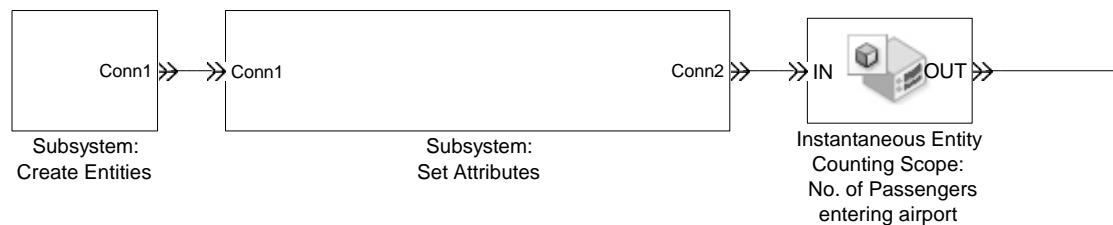


Abbildung 11: Initialisierungsphase Passagier-Entitäten

Das Subsystem *Create Entities* (Abb. 12) besteht aus einem zeitbasierten Entitäten-Generator-Block. Der Generator-Block empfängt Signale eines *Event-Based Sequence* Blocks. Dieser Block sendet genau in den Zeitpunkten ein Signal an den Entitäten-Generator, zu denen eine Passagier-Entität den Flughafen betreten soll. Dabei greift der *Event-Based Sequence* Block auf eine Matrix mit entsprechenden Input-Daten zu. Diese einspaltige Matrix *IntergerTimes* umfasst einen Eintrag pro zu erzeugender Entität. Bei dem enthaltenen Wert handelt es sich um den zeitlichen Abstand der Entitäts-Ankunft zu seinem Vorgänger. Betritt beispielsweise der erste Fluggast den Flughafen um 2 Uhr Nachts, so lautet entsprechend der Wert der ersten *IntergerTimes*-Zeile „2“. Folgt der zweite Fluggast um 2:15 Uhr, steht in Zeile zwei der Wert „0.25“.

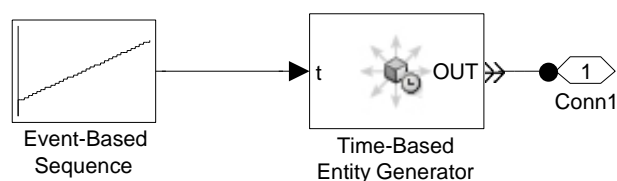


Abbildung 12: Subsystem *Create Entities*

Die Datenbasis der TUHH (vgl. Kap. 4.2) liefert minutengenaue Ankunftszeiten der Fluggäste. Diese werden (u.a.) in dem Startskript *departure_start.m* zu der Variablen-Matrix *IntergerTimes* verarbeitet. Der entsprechende Quelltext-Abschnitt ist in Listing 1 dargestellt.

Das Subsystem *Set Attributes* (Abb. 13) besteht aus acht in Reihe geschalteten Blöcken, die jeder Entität jeweils ein Attribut zuweisen. Die Attribute *Luggage*, *Flight Type*, *Check-In Type*, *Terminal*, *GateCluster* und *SchengenArea* werden aus den Attribut-Variablen der TUHH Datenbasis


```

1 %DEPARTURE_02_START
2     [...]
3
4 %--Read/Convert Flightplan
5     timeHour = Data_Attributes(:,1);
6     timeMinute = Data_Attributes(:,2);
7     newTimeMinute=(timeMinute/0.6)/100;
8
9     TimeDecimalTemp = timeHour+newTimeMinute;
10    TimeDecimal = [0;TimeDecimalTemp];
11    IntergenTimes = diff(TimeDecimal);
12
13    [...]

```

Listing 1: Erzeugung der Matrix *IntergenTimes*

(vgl. Kap. 4.3) per *Event-Based-Sequence* Block eingelesen. Das Attribut *IsLuggage* wird für die spätere Erzeugung von Gepäck-Entitäten benötigt und erhält hier standardmäßig den Wert „1“. Außerdem erhält jede Passagier-Entität eine Identifikationsnummer (*ID*). Die ID-Vergabe wird mit dem *Entity Departure Counter* Block modelliert, welcher die Entitäten fortlaufend nummeriert. Sowohl Passagier- als auch Gepäck-Entitäten benötigen die Attribute sowohl für die Ergebnisauswertung (*ID*, *IsLuggage*) als auch für Routing-Entscheidungen innerhalb der Simulationsprozesse (*Luggage*, *Flight Type*, *Check-In Type*, *Terminal*, *GateCluster*, *SchengenArea*). Je nach Attributwert wird eine Entität an einer Weiche (sog. *Switch*) entsprechend zu Stationen mit unterschiedlicher Frequentierung, Verweildauer o. ä. geleitet.

4.4.2 Architektur

Die Flughafenarchitektur des Simulationsmodells ist geprägt von dem Flughafenschema des Flughafen Hamburgs. Aufgrund der strikten Prozessmodellierung hat die Berücksichtigung der Architektur eine vergleichsweise geringe Implikation auf das Gesamtmodell. Da die Betrachtung der Flughafenarchitektur jedoch die Grundlage für die konkrete Festlegung der Wegezeiten zwischen einzelnen Stationen darstellt, werden die Themen *Anzahl Terminals*, *Gate-Clustering* und *Sicherheitskontrolle* in diesem Kapitel behandelt.

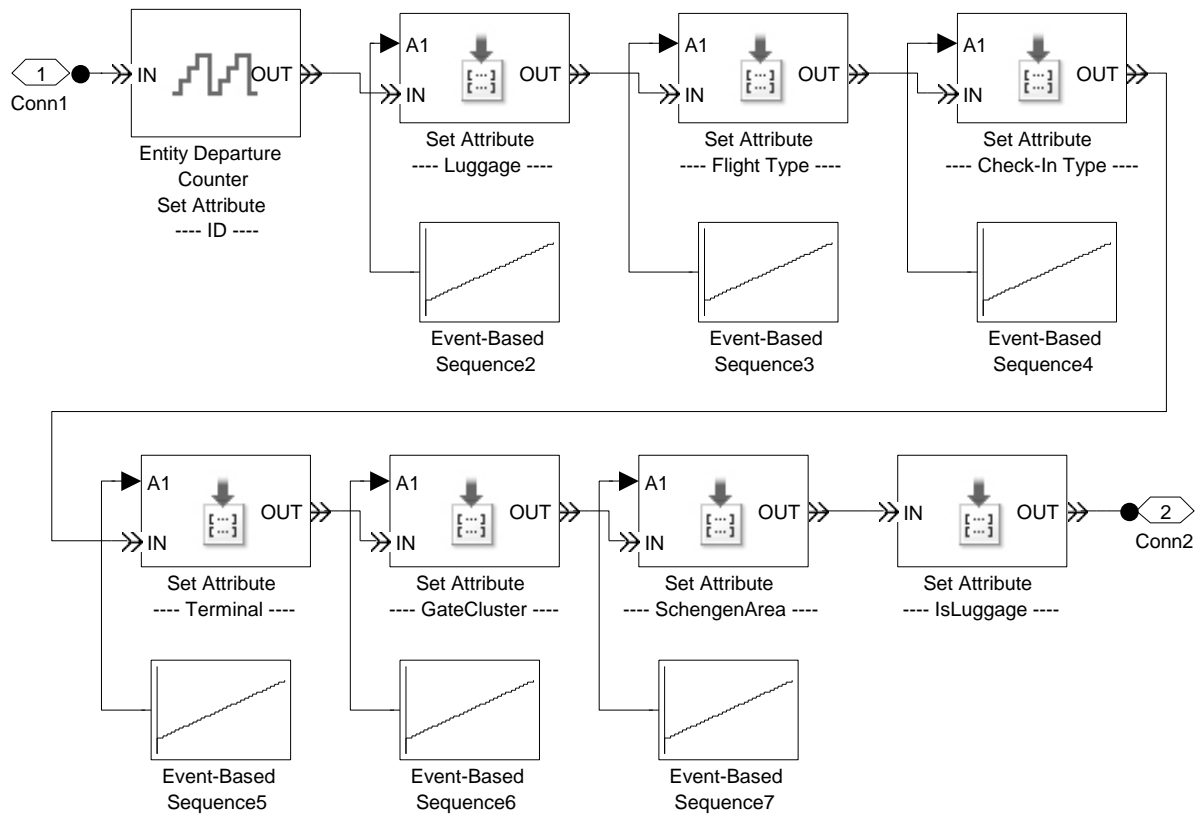


Abbildung 13: Subsystem Set Attributes

Der Flughafen Hamburg besteht aus zwei Terminals für den gewerblichen Flugverkehr. Terminal 1 besitzt 58 Check-In Schalter und ist zuständig für 45 Airlines, während Terminal 2 über 50 Check-In Schalter verfügt und 15 Airlines beherbergt [Flu12a]. Aus diesem Grund wird im Simulationsmodell zwischen zwei unabhängigen Terminal-Subsystemen unterschieden. Beide Subsysteme enthalten die gleiche Prozessstruktur, unterscheiden sich jedoch in der Anzahl der Check-In Möglichkeiten. Die Funktion *createNumericalAttributes.m* (vgl. Listing 3 im Anhang) vergibt die Werte „1“ oder „2“ an das Attribut *Terminal* gemäß der Zuteilung in der Realwelt. Nach airport.de [Flu12d] befinden sich in Terminal 2 überwiegend die Deutsche Lufthansa, Germanwings und ihre Partner der Star Alliance. Andere Fluggesellschaften wie beispielsweise Air Berlin, British Airways, Emirates oder Air France befinden sich in Terminal 1. Die Aufteilung der Passagiere wird über einen *Output-Switch* Block modelliert (Abb. 14). Der Switch-Block liest das Attribut *Terminal* einer Passagier-Entität aus und leitet diese zum entsprechenden Terminal-Subsystem.

Nachdem Fluggäste im entsprechenden Terminal eingchecked haben, begeben sie sich zum Si-

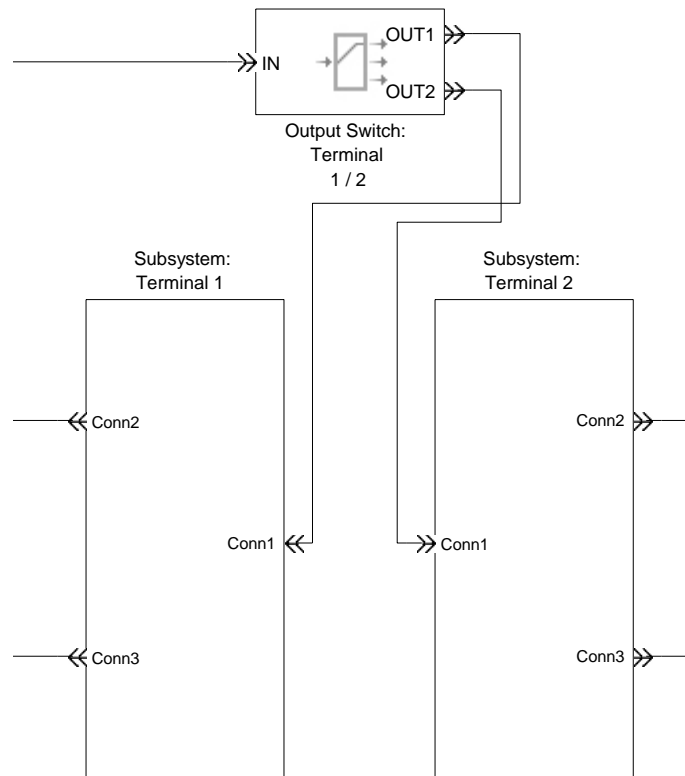


Abbildung 14: Subsystem Terminal-Routing

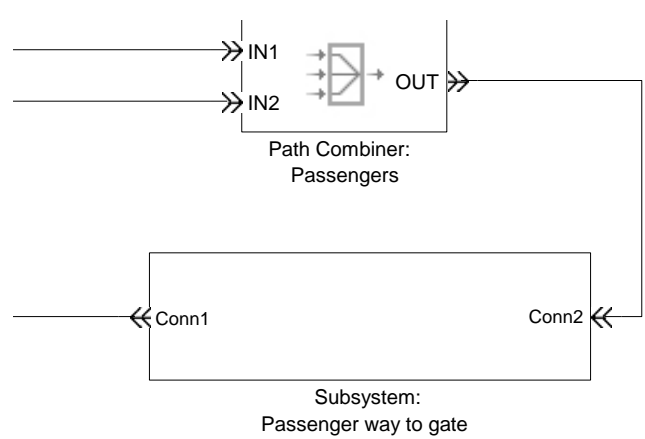


Abbildung 15: Routing zum Sicherheits-Check Subsystem

cherheitskontrollbereich. Die Sicherheitskontrolle muss erfolgreich passiert werden, um in den geschlossenen Abflugbereich zu gelangen, in dem die zahlreichen Abfluggates liegen. Der Sicherheitskontrollbereich befindet sich am Airport Hamburg im sogenannten *Airport-Plaza*. Dabei handelt es sich um einen Gebäudekomplex zwischen Terminal 1 und 2. Fluggäste beider Terminals (sprich alle gewerblichen Fluggäste) absolvieren die Sicherheitskontrolle im Plaza-Komplex. Dementsprechend werden alle Passagier-Entitäten im Simulationsmodell vor dem Subsystem *Passenger Security Area* über einen *Path Combiner* Block wieder zusammengeführt (Abb. 15).

Der Plaza-Komplex beherbergt 25 Sicherheitskontrollleinheiten [Flu09], [Flu08]. Wie bei allen anderen Engpass-Stationen wird im Simulationsmodell die Besetzung aller verfügbaren Stationen angenommen. Angeschlossen an die Sicherheitskontrollen sind entsprechende Passkontroll-Schalter für nicht-Schengen-Flüge.

Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4
DT. LUFTHANSA	AIR BERLIN TUI Fly CONDOR GERMANWINGS AIR FRANCE BRITISH AIRW. KLM SAS SWISS EASYJET EASYJET CH	BRUSSELS AIRL. CIRRUS AIRL. TURKISH AIRL. TAP-AIR POR. AER LINGUS CONTINENTAL FINNAIR AIRBALTIC EMIRATES TUNISAIR AEROFLOT ROSSIYA AUSTRIAN LOT POLSKIE	CSA CZECH AIRL. OSTFR.LUFTTRASP. MALEV AEROSVIT UKR. AIRL. AIR MALTA ESTONIAN AIR NORWEGIAN AIR SHUT. LUXAIR VLM VLAAMSE L. BLUE 1 INTERSKY LUFTF. KD AVIA FLYBE SKYTAXI

Tabelle 1: Gate-Cluster Zuordnung der Airlines

Als letzten Schritt im Passagier Workflow begeben sich die Fluggäste innerhalb des Abflugbereiches zum entsprechenden Gate ihres Fluges. Im Simulationsmodell wird der Abflugbereich gemäß der Flughafen Hamburg GmbH in vier Gate-Bereiche (sog. *Cluster*) unterteilt (Abb. 32 im Anhang). Sowohl Passagier- als auch Gepäck-Entitäten werden ihrer Airline entsprechend

einem der vier Gate-Cluster zugeordnet. Die Funktion *createNumericalAttributes.m* (vgl. Listing 3 im Anhang) vergibt die Werte 1-4 an das Attribut *GateCluster* gemäß den getroffenen Annahmen in Tabelle 1¹⁴. Ein entsprechender *Output-Switch* Block liest das Attribut *GateCluster* einer Entität aus und leitet diese zum entsprechenden Gate-Cluster-Subsystem.

4.4.3 Wegezeiten

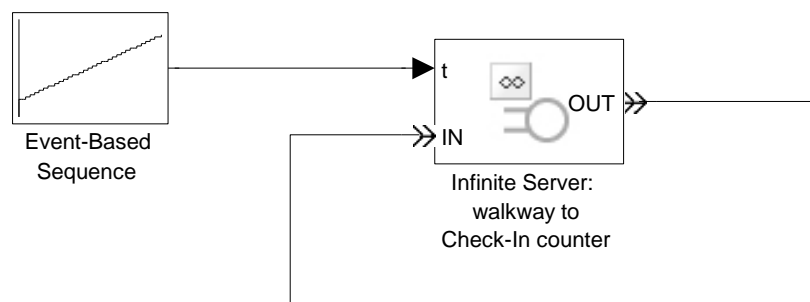


Abbildung 16: Modellierung von Wegezeit mit Inf-Server Block

Um die Passagier und Gepäck Workflows am Flughafen Hamburg vollständig abzubilden, müssen neben den Bearbeitungs- und Wartezeiten der einzelnen Prozessstationen auch die Wegezeiten zwischen zwei Stationen modelliert werden. Die Problematik besteht bei der Wegezeitenmodellierung zum einen in der technischen Verarbeitung der Entitäten während eines Weges, zum anderen in der Recherche von korrekten Durchschnittswerten für einzelne Wege innerhalb des Flughafens.

Die Modellierung eines Weges hat die gleiche Charakteristik wie die Modellierung einer Station. In beiden Fällen wird die Entität auf ihrem Workflow für eine festgelegte Dauer festgehalten, bevor sie ihren Weg durch das Prozessmodell fortsetzen kann (*Black Box*). Der Unterschied zwischen Weg und Station besteht in den Kapazitäten. Während eine Station nur eine bestimmte Anzahl an Entitäten gleichzeitig bearbeiten kann, wird im Weiteren angenommen, dass ein Weg am Flughafen beliebig viele Entitäten gleichzeitig aufnehmen kann.

SimEvents verfügt zur Modellierung von Stationen mit unbegrenzter Kapazität über den *Inf-Server* Block (Abb. 16). Dieser verarbeitet beliebige Entitäten gleichzeitig und nimmt, wie alle

¹⁴Tabelle 1 umfasst alle Airlines, die in der TUHH Datenbasis (vgl. Kap. 4.2) vorkommen. Die Aufteilung auf die Gate-Cluster beruht dabei vollständig auf getroffenen Annahmen des Autors.

anderen SimEvents Server-Blöcke, die Bearbeitungszeit als Parameter entgegen. Die Modellierung der Wegezeiten wird daher im gesamten Simulationsmodell mit Inf-Server Blöcken umgesetzt.

Station	Wegezeit	Bearbeitungszeit
Check-In Schalter ohne Gepäck	3 Min.	3 Min.
Check-In Automat ohne Gepäck	3 Min.	3 Min.
Check-In Schalter mit Gepäck	3 Min.	5 Min.
Check-In Automat mit Gepäck	3 Min.	3 Min.
Check-In andere Medien	–	0
Check-In am Vorabend	–	0
Gepäckschalter	1 Min.	2 Min.
Passagier Kontrollstelle	6 Min.	1 Min.
Passagier manuelle Kontrolle	–	1 Min.
Passkontrollstelle	1 Min.	1 Min.
Duty-Free-Shopping Low-Cost	6 Min.	10 Min.
Duty-Free-Shopping Touristisch	6 Min.	20 Min.
Duty-Free-Shopping Linienflug	6 Min.	30 Min.
Gate-Cluster 1	6 Min.	–
Gate-Cluster 2	3 Min.	–
Gate-Cluster 3	6 Min.	–
Gate-Cluster 4	10 Min.	–
Gepäck-Kontrolle	–	2 Sek.
Gepäck-Kontrolle 2	–	15 Sek.
Gepäck-Sortierung	10 Min.	2 Sek.

Tabelle 2: Wege- & Bearbeitungszeiten der Stationen des Simulationsmodells

Über die Durchschnittswerte der Wegezeiten am Flughafen Hamburg liegen keine öffentlichen Daten vor. Daher handelt es sich um die im Simulationsmodell eingesetzten Werte für Wegezeiten um Annahmen des Autors. Diese beruhen zu großen Teilen auf öffentlichen Flughafenplänen des Flughafen Hamburgs [Flu12c] und Schätzungen. Die zukünftigen Anwender des Simulationsmodells können die angenommenen Werte jederzeit anpassen. Dies ist einer der deutlichen Vorteile des Blackbox-Charakters der einzelnen Stationen im Simulationssystem.

Im Allgemeinen lässt sich festlegen, dass die Wegezeiten aufgrund des verwendeten *Linearkon-*

zeptes am Flughafen Hamburg besonders im geschlossenen Abflugbereich stark schwanken. Die Abluggates sind an der luftseitigen Flughafen-Front in Reihe verbaut. Da der Sicherheitskontrollbereich, als zentraler Zutrittspunkt, mittig des Abflugkomplexes angesiedelt ist, verlängert sich der Weg linear, je weiter das entsprechende Gate an den Enden des Abflugbereiches liegt. Im Check-In Bereich der Passagierabfertigung (in zwei Terminals am Flughafen Hamburg) hat das Linearkonzept, die Wegezeiten betreffend, hingegen Vorteile gegenüber anderen Terminalkonzepten [Sch10b, S.131 ff.], [Men07, S.267 ff.].

Die einzelnen Bearbeitungszeiten der entsprechenden Inf-Server Blöcke sind in der Variablen *Parameter.mat* hinterlegt. Dabei handelt es sich um eine Matlab *struct* Variable, welche Daten hierarchisch speichert. Erläuterungen zu konkreten Werten werden in den vertiefenden Kapiteln 4.5 und 4.6 behandelt.

4.5 Implementationsdetails - Passagier

Im folgenden Kapitel werden Details bezüglich der Implementierung der Passagier Workflows erläutert. Es wird auf die kritischen Abschnitte *Check-In*, *Sicherheitsbereich* und *Duty-Free-Shopping* eingegangen.

4.5.1 Passagier - Check-In

Das Simulationsmodell umfasst zwei prozessgleiche Terminals. Jedes der zwei Terminal Subsysteme enthält u. a. ein Subsystem *Check-In Passengers without Luggage* und ein Subsystem *Check-In Passengers with Luggage*. Ein vorgeschalteter *Output Switch* Block leitet ankommende Passagier-Entitäten gemäß ihres Attributes *Luggage* in eines der zwei Subsysteme.

Innerhalb der *with/without Luggage* Subsysteme unterteilt eine weitere Weiche den Prozess in die vier möglichen Prozesspfade *Check-In counter*, *Check-In automat*, *Check-In other media* und *Check-In the night before*. Dieses Routing basiert auf dem Entitätsattribut *Check-In Type*. In Abbildung 17 ist das Subsystem *Check-In Passengers with Luggage* dargestellt. Eine Besonderheit des Check-In mit Gepäck ist die vorzeitige Zusammenführung der Pfade *Check-In automat* und *Check-In other media*. Beide Workflows beinhalten den zusätzlichen Schritt, dass das Reisegepäck an einem Gepäckannahmeschalter aufgegeben wird.

Jeder einzelne der vier möglichen Check-In Pfade besteht aus einem *Inf-Server* Block für den Weg zum Check-In Schalter, sowie einem weiteren Subsystem mit der eigentlichen Prozessstation (Abb. 18). Die Station besteht aus den klassischen Komponenten eines Warteschlangens-

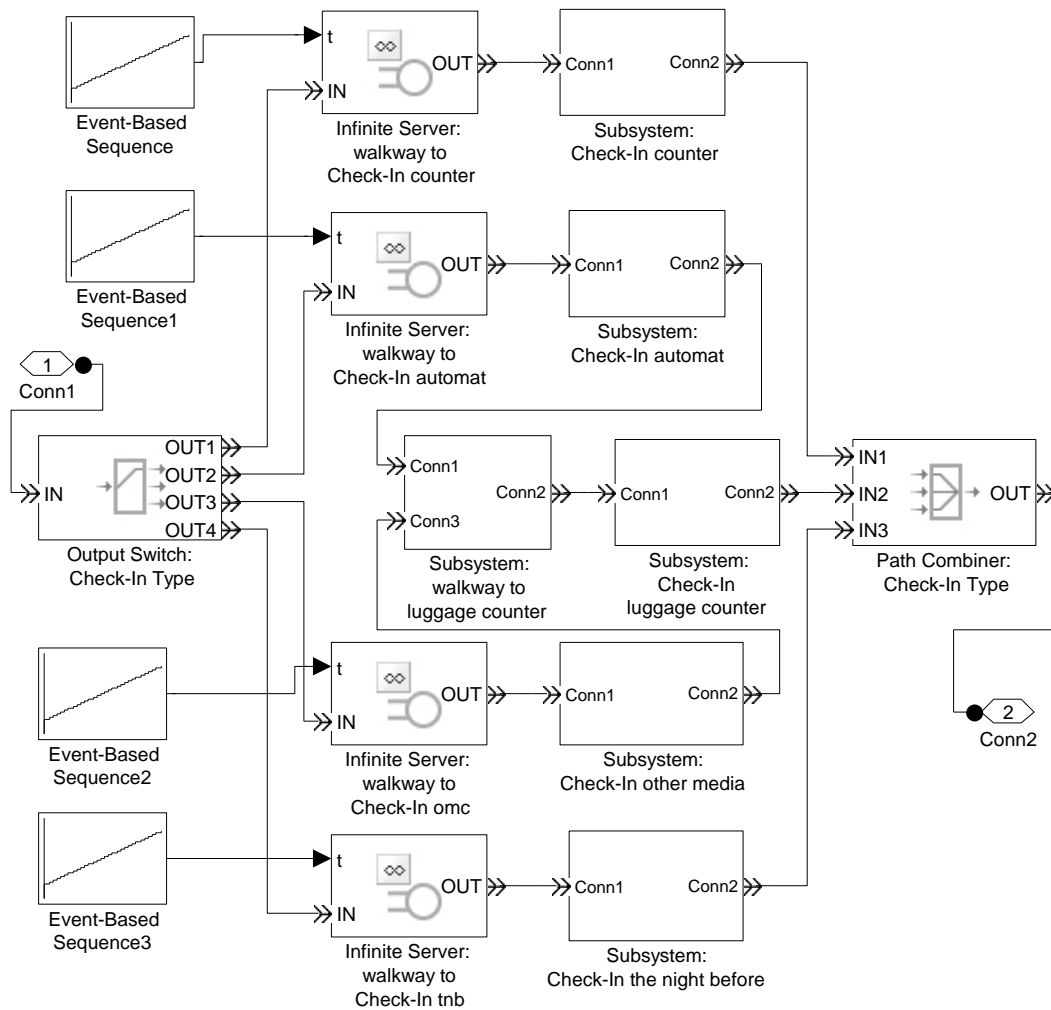


Abbildung 17: Subsystem Check-In Passengers with Luggage

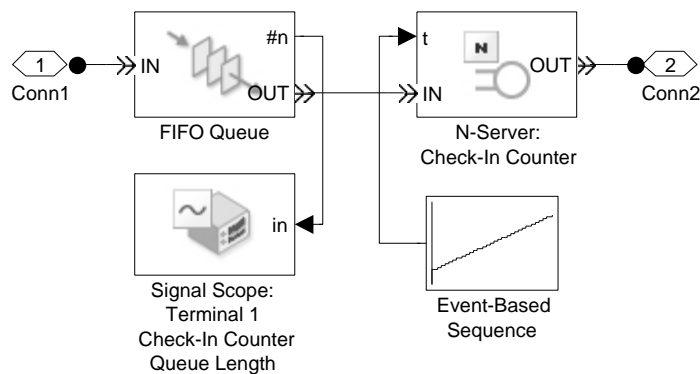


Abbildung 18: Subsystem Check-In Counter

systems: einem *FIFO Queue* Block und dem *N-Server* Block mit externem Bearbeitungszeit Input-Signal. Im gesamten Modell werden grundsätzlich FIFO-Warteschlangen-Blöcke verwendet (vgl. Kap. 4.1.2). Der *Signal Scope* Block der Warteschlange stellt die Länge der Warteschlange über die Zeit dar. Eine solche Komponente liefert somit Auskunft über die Auslastung des Warteschlangensystems. Zu beachten ist außerdem, dass die Server-Bearbeitungszeit über ein Input-Signal aus einer externen MATLAB Variable (mit *Event-Based Sequence* Block) bezogen werden kann. Die Anzahl an Servern eines *N-Server* Blocks muss jedoch fest in den Einstellungen des jeweiligen Server-Blocks des Simulationsmodells hinterlegt werden.

4.5.2 Passagier - Sicherheitsbereich

Über einen *Path Combiner* Block werden alle Passagier-Entitäten nach Durchlaufen der Terminal Subsysteme vereint und in das Subsystem *Passenger way to gate* (Abb. 15) geleitet. Innerhalb dieses Systems befinden sich das in diesem Abschnitt relevante Subsystem *Passenger Security Area* sowie das Subsystem *Duty-Free-Shopping*. Wie in Abbildung 19 dargestellt, besteht auch der Sicherheitsbereich erneut aus zwei Untersystemen. Wir betrachten das Subsystem *Screening Line for Passengers & Hand Luggage* (Abb. 20).

Die Besonderheit des Systems in Abbildung 20 ist der Bereich der manuellen Kontrolle von Fluggästen. In der Realwelt findet diese zusätzliche Kontrolle aufgrund von Verdachtsmomenten statt. Im Simulationsmodell wird hingegen eine numerische Auswahlkomponente implementiert. Ziel der Modellierung ist hier, dass 40 Prozent¹⁵ der Entitäten durch das Subsystem *Manual Con-*

¹⁵Die Festlegung, dass vier von zehn Passagieren zusätzlich manuell überprüft werden, basiert vollständig auf

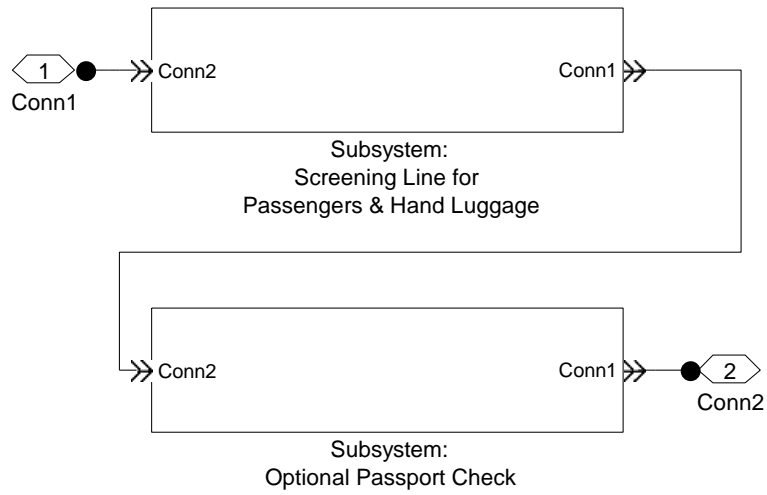


Abbildung 19: Subsystem Passenger Security Area

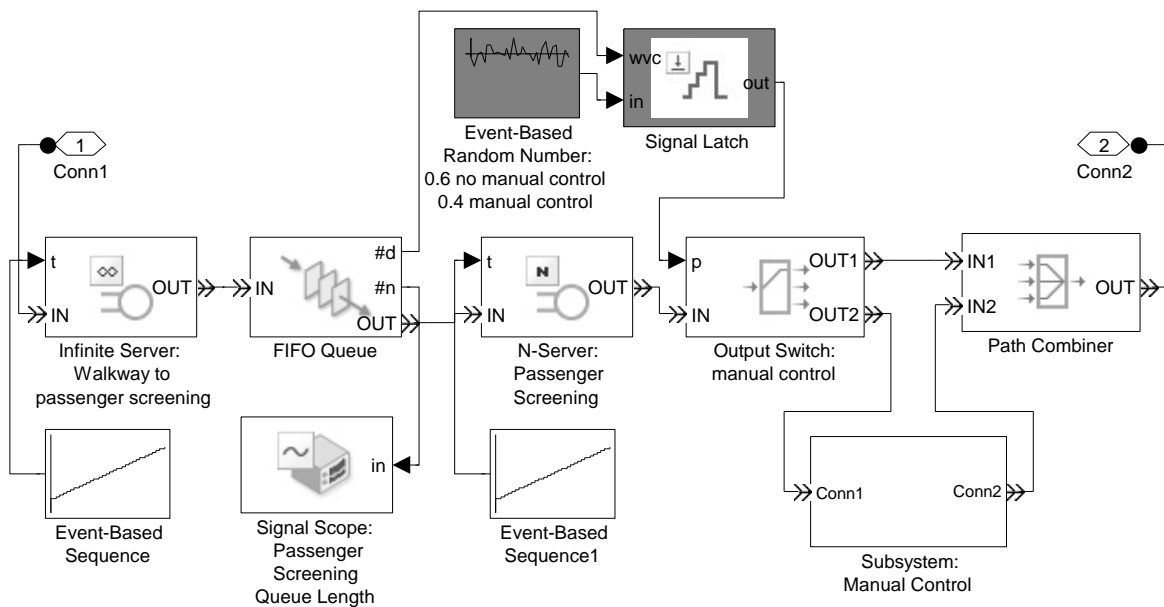


Abbildung 20: Subsystem Screening Line for Passengers & Hand Luggage

trol geleitet werden. Implementiert wird die Funktion über die zusätzliche Nutzung der Blöcke *Event-Based-Random-Number (EBRN)* und *Signal Latch* (vgl. graue Blöcke in Abb. 20). Dem EBRN Block wird dabei das Verhältnis (hier: [0.6 0.4]) übergeben, zu dem er zwei unterschiedliche Signale an den Signal Latch Block sendet. Der Signal Latch Block bekommt neben dem besagten Signal die Anzahl an Entitäten übermittelt, welche die Warteschlange vor der automatischen Kontrollstelle passiert haben. Aufgrund dieser Inputs sendet der Signal Latch Block ein Signal an den *Output Switch* Block. Dieser leitet in Abhängigkeit des erhaltenen Signals 40 Prozent der Entitäten in die manuelle Kontrolle.

4.5.3 Passagier - Duty-Free Shopping

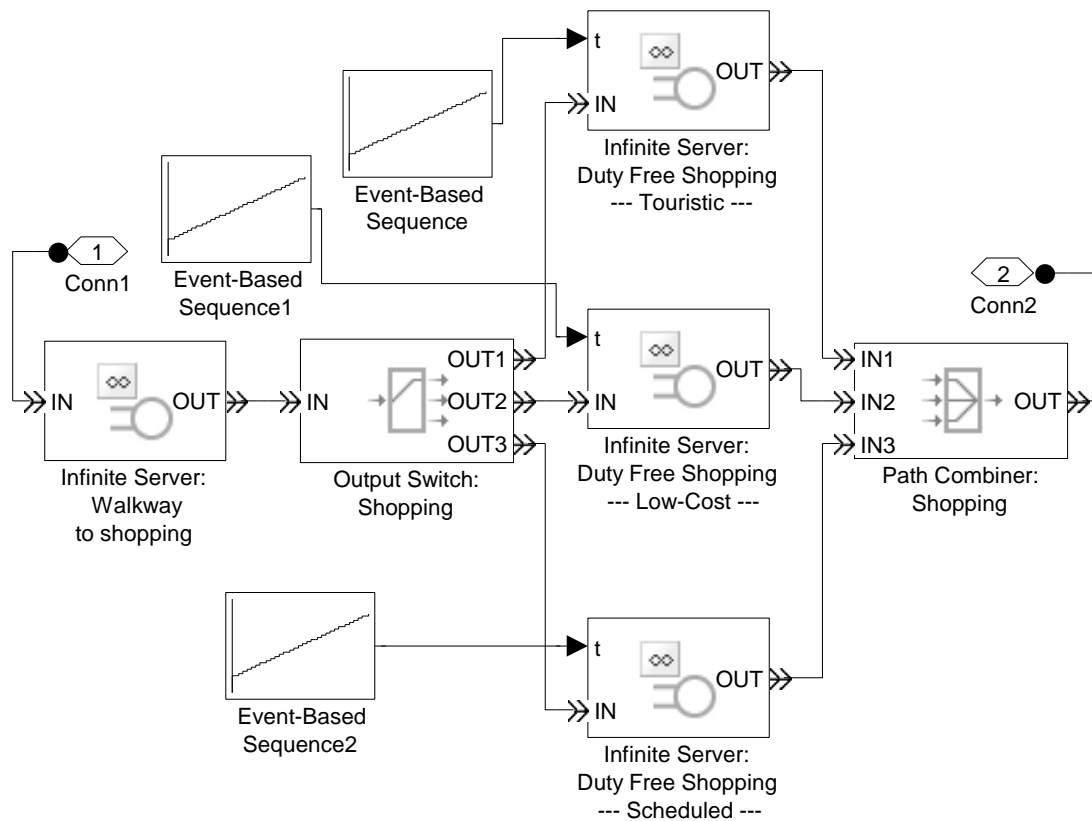


Abbildung 21: Subsystem Passenger Duty Free Shopping

Das Subsystem *Duty-Free-Shopping* im System *Passenger way to gate* steht stellvertretend für die zeitliche Dauer des Konsumierens innerhalb des geschlossenen Abflugbereiches, bevor ein

Annahmen des Autors.

Fluggast sich endgültig zu seinem Abfluggate begibt.

Das System besteht, wie in Abbildung 21 dargestellt, aus klassischen Komponenten des Simulationsmodells. Herauszuheben ist der Abschnitt aufgrund der Annahmen bezüglich der Verweildauer von verschiedenen Passagier-Entitäten in der Shopping-Station. Basierend auf dem Attribut *Flight Type* verteilt eine Weiche die Passagier-Entitäten auf drei *Inf-Server* Blöcke mit unterschiedlichen Bearbeitungszeiten. Bei den Verweildauern der Entitäten handelt es sich um Annahmen des Autors. Diese beruhen auf der Ableitung der Flugart eines Passagiers auf sein Budget. Dementsprechend wird angenommen, dass dem Passagier eines Linienfluges ein größeres Budget zur Verfügung steht, als dem Passagier eines Touristik-Fluges. Dessen Budget wiederum ist größer als das eines Low-Cost-Flug Passagiers. Ausgehend von dieser Annahme des Autors ist die Bearbeitungszeit der Station Duty-Free-Shopping für eine Passagier-Entität mit dem Attributwert *Low-Cost* auf „0.1666“ Simulationsschritte (1 Simulationsschritt \equiv 1 Std.) festgelegt. Passagier-Entitäten mit dem Attributwert *Touristik* verbleiben hingegen „0.3333“ Simulationsschritte, während Passagier-Entitäten mit dem Attributwert *Scheduled* genau „0.5“ Simulationsschritte im Duty-Free-Shopping Bereich verbringen (vgl. Tabelle 2).

4.6 Implementationsdetails - Gepäck

Im folgenden Kapitel werden Details bezüglich der Implementierung der Gepäck Workflows erläutert. Es wird auf die kritischen Abschnitte *Sicherheits-Check*, *Verteilung an Gates* und *Erweiterung um RFID Gepäckabgleich* eingegangen.

4.6.1 Initialisierung der Gepäck-Entitäten

Das Erzeugen von Gepäck-Entitäten wird technisch umgesetzt, indem alle Passagier-Entitäten mit Gepäck an einer bestimmten Stelle im Simulationsmodell repliziert werden.

Innerhalb der prozessgleichen Terminal-Systeme werden Entitäten (mit Attributwert *Luggage* = 1) nach Verlassen des Subsystems *Check-In Passengers with Luggage* in einen *Replicate* Block geleitet. Der *Replicate* Block kopiert jede durchgeleitete Passagier-Entität inklusive aller Attribute. Die Kopie, welche vor allem dasselbe ID-Attribut wie das Original aufweist, wird im Simulationsmodell fortan als Gepäck-Entität behandelt. Das Attribut *IsLuggage* wird mit dem Wert „2“ beschrieben und die Gepäck-Entitäten folgen einem unabhängigen Gepäck-Prozess Workflow (vgl. graue Blöcke in Abb. 22).

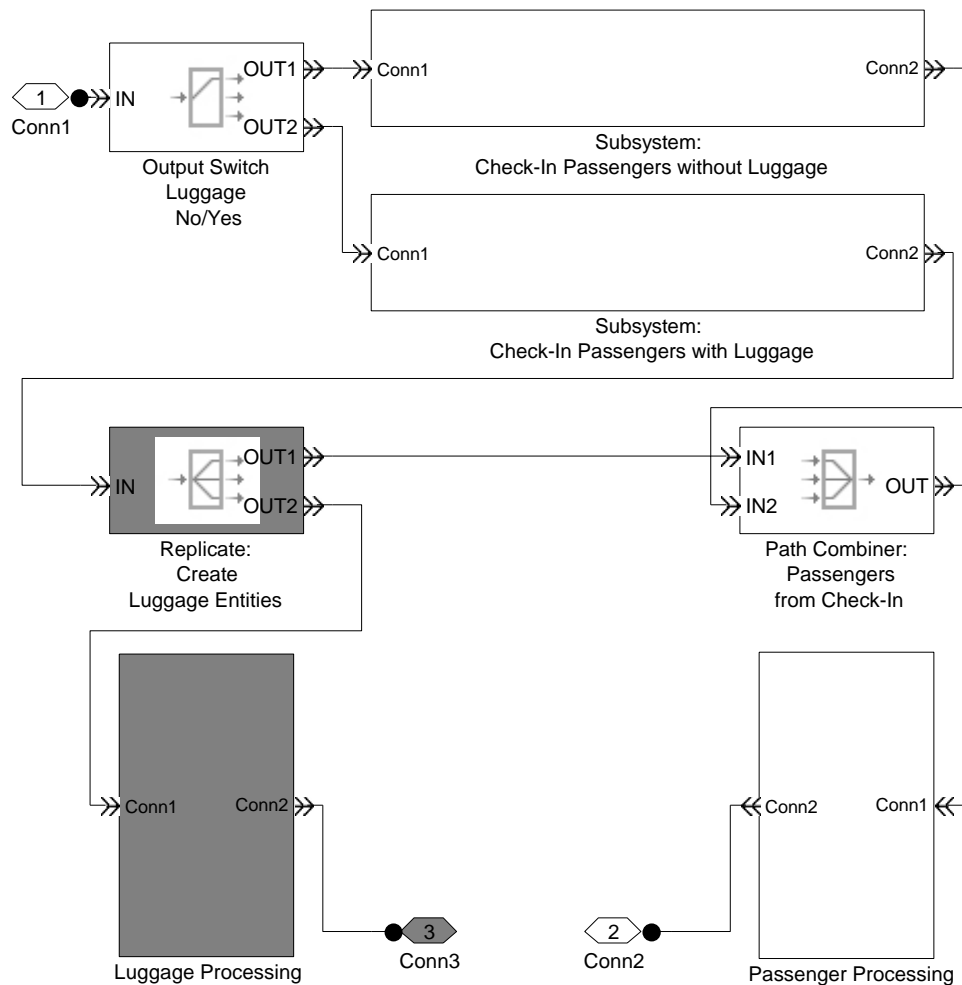


Abbildung 22: Initialisierung der Gepäck-Entitäten

4.6.2 Die Gepäckförderanlage

Die Gepäckförderanlage ist Hauptbestandteil des Gepäck Workflows und besteht aus mehreren Subsystemen. Nachdem die Gepäck-Entitäten in den zwei prozessgleichen Terminal-Systemen initialisiert werden, führt ein *Path Combiner* Block alle Gepäck-Entitäten auf einem gemeinsamen Prozesspfad. Das erste Subsystem dieses Pfades ist das *Luggage way to gate* System. In ihm wird die Sicherheitskontrolle der Gepäckstücke abgebildet. Deren Implementation ist analog zur Sicherheitskontrolle im Passagier-Sicherheitsbereich (vgl. Kap. 4.5.2). Im weiteren Verlauf des Gepäck Workflows passieren die Gepäck-Entitäten das Subsystem *Luggage sorting*, welches die Sortierung der Gepäckstücke nach Abfluggates modelliert. Zu beachten ist in diesem System die Modellierung eines möglichen Gepäckverlustes innerhalb der Gepäckförderanlage. Unter Ver-

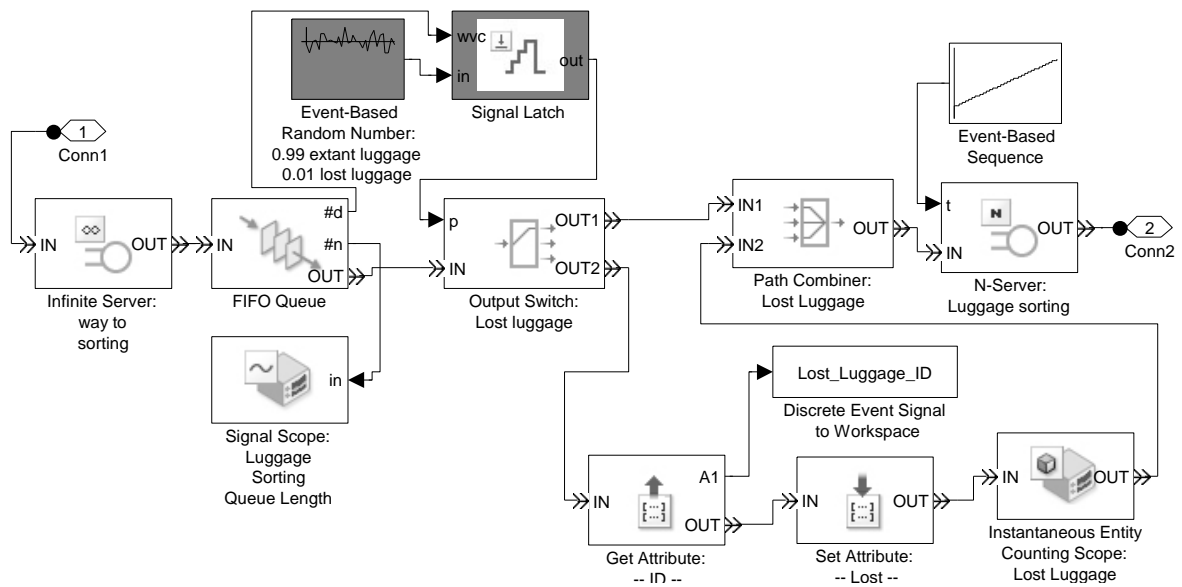


Abbildung 23: Subsystem Luggage Sorting inkl. Gepäckverlust

wendung einer numerischen Auswahlkomponente, baugleich der Komponente zur manuellen Kontrolle von Fluggästen (Abb. 20), geht jede hundertste Gepäck-Entität „verloren“. Technisch vergibt das Simulationsmodell ein weiteres Attribut *Lost* an jede betroffene Gepäck-Entität. Somit gehen die Entitäten nicht tatsächlich innerhalb der Simulation verloren, sondern erscheinen in den Ergebnislisten mit dem besonderen Merkmal *Lost*. In Abbildung 23 wird im Rahmen der Gepäcksortierung die Implementation des Gepäckverlustes dargestellt (vgl. graue Blöcke).

4.6.3 Erweiterung um RFID Gepäckabgleich

Die generische Implementierung der *Radio Frequency Identification* Technologie besteht aus zwei Komponenten. Die erste Komponente und Voraussetzung für jegliches *Entitäten-Matching* ist die Einführung einer gemeinsamen Identifikationsnummer (*ID*), wie bereits in Kapitel 3.3 festgestellt. Durch das Replizieren der Entitäten (vgl. Kap. 4.6.1) samt vollständiger Attributliste, ist eine Übereinstimmung der *ID* zwischen Passagier-Entität und entsprechender Gepäck-Entität gegeben. Zu beachten ist die Modelleinschränkung, dass jeder Passagier höchstens ein Gepäckstück aufgeben kann.

Die zweite Implementationskomponente ist das Funktionsskript *resultHandler.m*. In der Realwelt wird nach dem Boarding überprüft, ob sich sowohl der Passagier als auch sein Gepäckstück an Bord des entsprechenden Flugzeugs befinden. Sollte eine der zwei Parteien fehlen, startet das Flugzeug nicht (*Baggage Reconciliation*) oder es entstehen Kosten durch den Gepäckverlust. Das

Skript modelliert diesen technischen Abgleich, indem es die Ergebnismatrizen der Gate-Cluster überprüft. Jedes Gate-Cluster des Simulationsmodells erstellt jeweils Matrizen für eingetroffene Gepäck- und Passagier-Entitäten im MATLAB Workspace. Das Skript *resultHandler.m* gleicht die Matrizen der einzelnen Gate-Cluster ab (Abb. 2) und gibt entsprechende Ergebnistabellen aus. Es wird sowohl geprüft, ob ein Passagier zu jedem Gepäckstück vorhanden ist, als auch ob das Gepäckstück in der Gepäckabfertigung verloren gegangen ist. In der Ergebnistabelle eines Gate-Clusters *X result_ReconCheck_GateX* sind die IDs aller erwarteten Gepäckstücke aufgelistet. Jedem Gepäckstück wird in Spalte 2 (der Tabelle) der Wert „1“ für *Abgleich positiv* oder „0“ für *Abgleich negativ* zugeordnet.

```

1  %--ConsoleLog--%
2  disp('-_resultHandler_has_been_started')
3
4  %--Check Gate-Cluster 1--%
5  [...]
6  for z=1:length(Luggage_Gate1_ID)
7      elm = Luggage_Gate1_ID(z,1);
8      if((ismember(elm, Passenger_Gate1_ID)) && (
9          Luggage_Gate1_Lost(z,1)==0)
10         reconCheck_Gate1(z,1) = 1;
11     else
12         reconCheck_Gate1(z,1) = 0;
13     end
14 end
15 result_ReconCheck_Gate1 = zeros(length(Luggage_Gate1_ID), 2);
16 result_ReconCheck_Gate1(:,1) = Luggage_Gate1_ID(:,1);
17 result_ReconCheck_Gate1(:,2) = reconCheck_Gate1(:,1);
18 [...]
19 %--ConsoleLog--%
20 disp('-_Baggage_Reconciliation_Check_of_Gate-Cluster_1_has_been
    _finished')
```

Listing 2: Auszug aus Funktion *resultHandler.m*

4.7 Fazit

Das vierte Kapitel behandelt die konkrete Implementation der Simulation. Dabei wird detailliert auf das Abflug-Simulationsmodell *Departure* eingegangen. Des Weiteren werden sowohl die Entwicklungsplattform MATLAB Simulink SimEvents, als auch die Datenbasis der Simulation behandelt.

Einen Überblick über das Gesamtergebnis Simulationsmodell *Departure* finden man in Abbildung 30 im Anhang der Bachelorarbeit. Das nicht im Detail betrachtete Simulationsmodell *Arrival* ist außerdem in Abbildung 31 im Anhang enthalten. Die Implementationsdetails beziehen sich vor allem auf die drei Schwerpunkte Terminal, Passagier und Gepäck. Die Datenbasis der Simulation basiert auf Erhebungen der technischen Universität Hamburg-Harburg [Löw] und umfasst 18.986 Einträge. Der Passagier-Datensatz bildet die durchschnittliche Anzahl und Ausprägung abfliegender Fluggäste des Flughafens Hamburgs pro Tag ab. Die 31 Spalten umfassende Tabelle ist eine Auflistung von Eigenschaften der Passagiere. Auf Basis dieser Daten werden die Passagier-Entitäten mit Attributen belegt.

5 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die erzielten Ergebnisse des Simulationsmodells erläutert und bewertet. Des Weiteren werden Optimierungsansätze in Bezug auf neue Technologien abgeleitet und diskutiert.

5.1 Datenanalyse

Durch die Implementation diverser Daten-Output Komponenten im Simulationsmodell (vgl. Kap. 3.3), ist die Möglichkeit der gezielten Auswertung von einzelnen Stationen gewährleistet. Sollte ein bestimmter Wert standardmäßig (*Standard* im Sinne des Simulationsmodells in seiner derzeitigen Form) nicht ausgegeben werden, können die Einstellungen einzelner Blöcke bezüglich ihrer statistischen Ausgabewerte mit geringem Aufwand angepasst werden. Auf die Ausführung oder Ergebnisse des Simulationsmodells hätten die Anpassungen im Allgemeinen keine Auswirkungen.

In diesem Unterkapitel wird eine allgemeine Datenanalyse der Simulation durchgeführt. Im Besonderen wird der *Modell-Durchsatz* und der *RFID Gepäckabgleich* analysiert.

5.1.1 Modell-Durchsatz

Das Simulationsmodell verarbeitet die auf Basis der TUHH-Daten (vgl. Kap. 4.2) erzeugten Passagier- und Gepäck-Entitäten den Erwartungen entsprechend. Da die Datenbasis eine durchschnittliche Tagesfrequenz der Flughafen Hamburg Terminals darstellt, war bei korrekter Modellierung auf Level-1 Niveau zu erwarten, dass das Modell in der Lage ist, alle Entitäten entsprechend ihrer Bestimmung zu verarbeiten. Sowohl Passagier- als auch Gepäck-Entitäten erreichen räumlich und zeitlich korrekt ihre jeweilige Zielsenke. Somit liefern die erzielten Ergebnisse konkrete Anhaltspunkte dafür, dass das Modell in Bezug auf den Flughafen Hamburg ein korrektes Prozessmodell darstellt. Das Simulationsmodell ist hinsichtlich seines Modellierungszwecks in der Lage, alle nötigen Parameter zu verarbeiten.

Die bekannten Engpässe im Check-In Bereich und an den Sicherheitskontrollstellen haben sich vor allem zu den Hauptverkehrszeiten (vormittags & früher Abend) bestätigt. Die Abbildung 24 zeigt die Anzahl erzeugter Passagier-Entitäten im Tagesverlauf, Abbildung 25 stellt die Anzahl eingetroffener Gepäck-Entitäten des Gate-Clusters 1 (Deutsche Lufthansa) dar. Abbildung 26

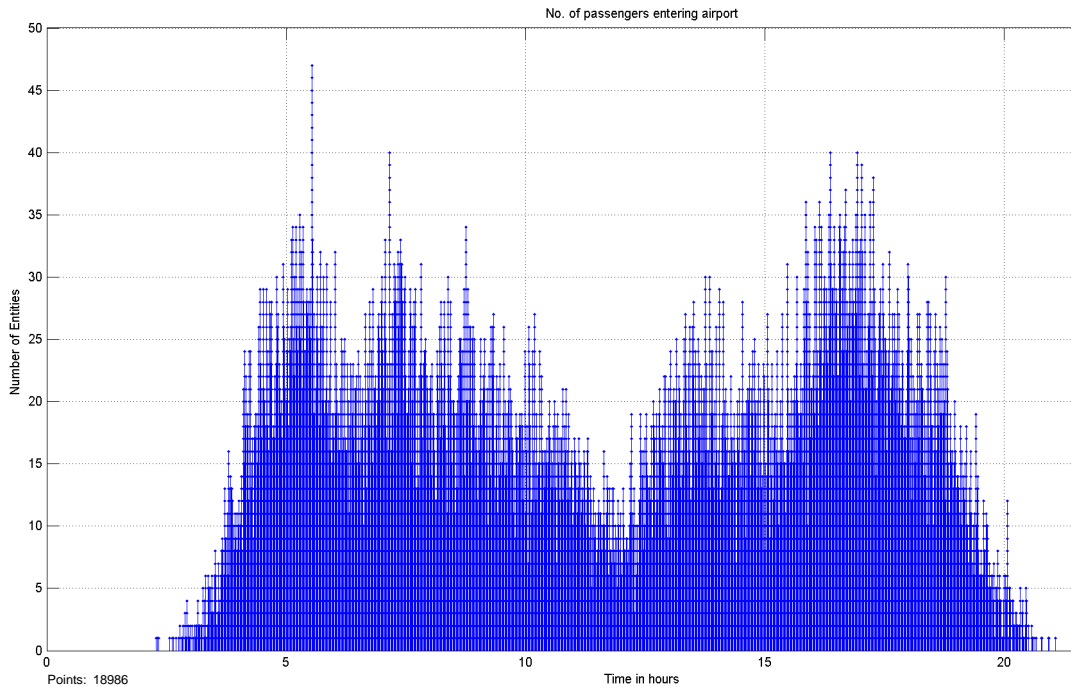


Abbildung 24: Anzahl erzeugter Passagier-Entitäten im Tagesverlauf

zeigt die Länge der kumulierten Warteschlangen vor der Station *Passagier Sicherheitskontrolle* im Tagesverlauf.

Es wird darauf hingewiesen, dass die gezeigten Abbildungen 24, 25 und 26 Ergebnisse der Simulation unter den bekannten Eingabewerten (vgl. Kap. 4.2 und 4.4.3) darstellen. Anwender des Simulationsmodells können jegliche Modellwerte anpassen und somit entsprechend veränderte Ergebnisse erzielen.

5.1.2 RFID Gepäckabgleich

Die generische Modellierung des Gepäckabgleichs anhand der RFID-Technologie bietet (wie erwartet) keinen Aufschluss über die genaue Leistungsfähigkeit in der Praxis. Allerdings verdeutlichen die erzielten Ergebnisse besonders die Schnelligkeitsvorteile von RFID-Tags im Vergleich zu den herkömmlichen Auto-ID-Labels (vgl. Kap. 2.3). Das ID-Attribut im Simulationsmodell entspricht dem über Sensoren ausgelesene RFID-Tag in der Praxis. Barcode-Labels müssen nicht länger aufwändig eingescannt werden und passagierlose Gepäckstücke können im Frachtraum

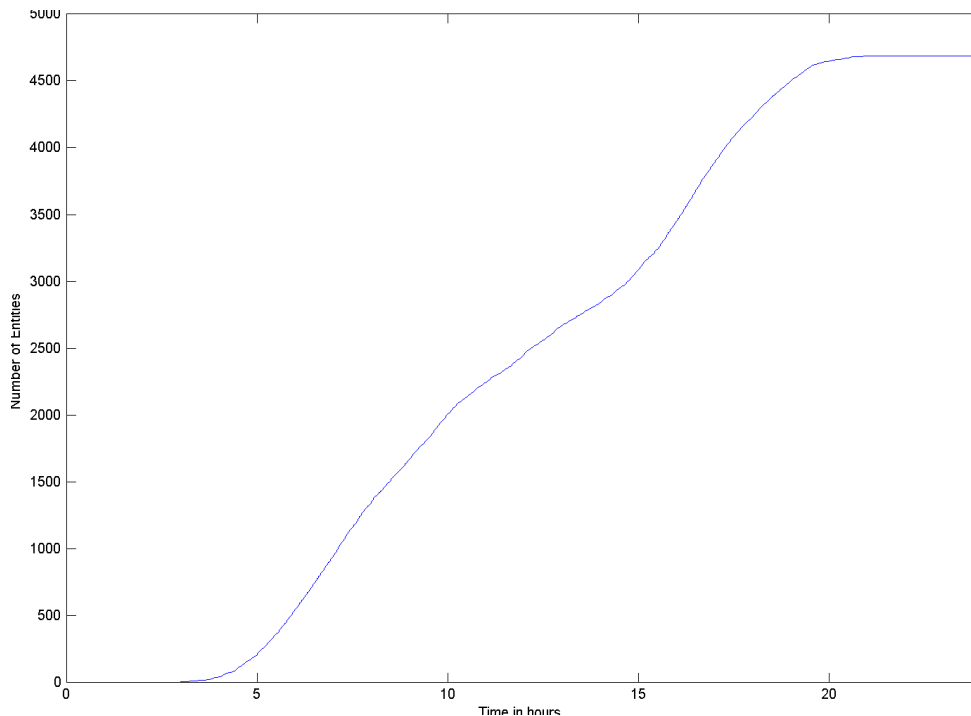


Abbildung 25: Anzahl eingetroffener Gepäck-Entitäten am Gate-Cluster 1 im Tagesverlauf

des Flugzeuges punktgenau lokalisiert werden. Die gesetzlich vorgeschriebene Umsetzung des *Baggage Reconciliation* Konzeptes wird daher, nach Einführung von RFID-Labels und entsprechenden Lesegeräten, ohne die bisher entstandenen empfindlichen Zeitverzögerungen möglich sein.

Des Weiteren wird an der Simulationskomponente *Gepäckverlust* (vgl. Kap. 4.6.2) die drastische Effizienzsteigerung durch die fortschrittliche Technologie deutlich. Aufgrund der Kombination von RFID-Chips und entsprechenden Sensoren, wird das zukünftige Auffinden von vermissten Gepäckstücken oder anderen Objekten innerhalb der Flughafenanlage deutlich an Komplexität einbüßen.

5.2 Bewertung der Realisierung

Der Modell-Durchsatz in Kapitel 5.1.1 hat gezeigt, dass das Simulationsmodell die Anforderungen an ein Level-1 Modell erfüllt. Die formalen Abfertigungsworkflows konnten eins zu eins als Simulation implementiert werden, was auf die Eignung des verwendeten Software-Tools SimEvents schließen lässt. Speziell die Modellierung der einzelnen Stationen (*Block Box* Charakter) als klassische Warteschlangensysteme hat zu einem intuitiven Verständnis des Simulationsmo-

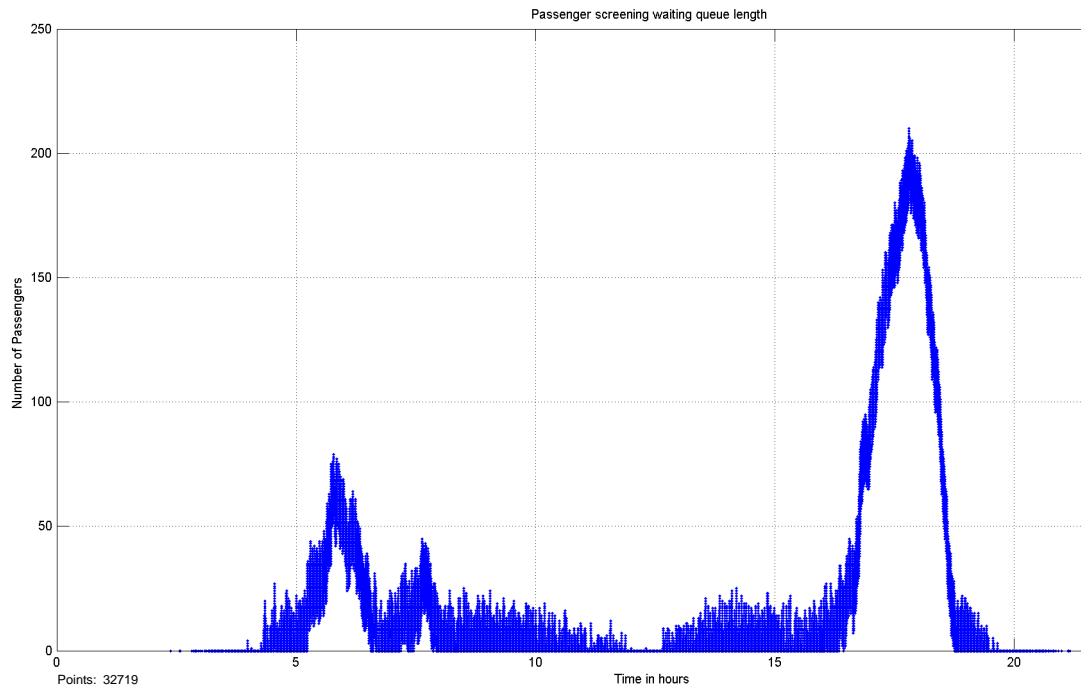


Abbildung 26: Länge der kumulierten Warteschlangen an der Passagier Sicherheitskontrolle im Tagesverlauf

dells beigetragen. Die Verwendung von Subsystemen zur Förderung der übersichtlichen Gliederung und Erweiterung des Modells hat sich des Weiteren als äußerst effizient herausgestellt.

Als Stärken der Simulation sind neben der klassischen Block-Modellierung außerdem die Einbindung von Funktionen als MATLAB Quellcode zu nennen. Die daraus resultierenden Skripte ermöglichen eine abstrakte Einbindung von IT-Systemverhalten, wie dem Passagier-Gepäck-Abgleich am Abfluggate auf Basis von RFID-Technik. Die gewonnenen Ergebnis-Matrizen bilden die Basis für eine vielschichtige Evaluation von Simulationsergebnissen. Weiterhin als Stärke zu erwähnen, ist die Vergabe von Attributen zur Individualisierung der Entitäten. Diese SimEvents Funktionalität hat den zweckmäßigen Einsatz der umfangreichen TUHH Datenbasis (vgl. Kap. 4.2) technisch ermöglicht. Somit ist durch die Vergabe von Attributen die Betrachtung individueller Entitäten, anstelle von einfachen Signalen, eine klare Verbesserung bei der Simulation von Prozess Workflows.

Zu den Schwächen des Simulationsmodells zählt die unvollständige Schnittstelle zu externen Eingabewerten. Wie bereits in Kapitel 4.5 thematisiert, ist es nicht möglich, die Quantität von

N-Servern über eine variable Schnittstelle anzupassen. Soll beispielsweise eine Station aus zehn Servern bestehen, kann man entweder zehn *Single-Server* fest modellieren oder in den Einstellungen eines *N-Server Blocks* $N = 10$ setzen. Im Gegensatz zu der Bearbeitungszeit der Server, gibt es keine andere Möglichkeit die Anzahl der Server einer Station zu steuern.

Eine weitere Schwäche ist die grafische Darstellung von Simulationsergebnissen. Sowohl die *Scope* Blöcke der Simulink, als auch der SimEvents Bibliothek bieten einen äußerst geringen Funktionsumfang. Funktionale Einschränkungen betreffen Skalierung, farbliche Gestaltung, Flexibilität sowie Möglichkeiten der Weiterverarbeitung der Ergebnisse.

Abschließend lässt sich feststellen, dass das Simulationsmodell valide Daten gemäß der Grundlagen und Annahmen liefert. Es ist möglich die Simulation einzusetzen, um beispielsweise Auswirkungen von technischen oder strukturellen Veränderungen auf die Prozesseffizienz der Passagier und Gepäck Workflows zu simulieren (vgl. Kap. 5.3.1, 5.3.2 und 5.3.3).

5.3 Optimierungsansätze

Wie bereits in Kapitel 2.3 erläutert, sind die Engpässe der Passagier- und Gepäckabfertigung an Flughäfen zu einem erheblichen Anteil auf den vorhandenen Medienbruch zwischen den IT-Systemen und Objekten der Realwelt zurückzuführen. Mit den derzeitig eingesetzten Auto-ID-Verfahren sind die IT-Systeme abhängig vom Verhalten der zu identifizierenden Objekte. Das bedeutet, dass z.B. ein Gepäckstück sich nur in bestimmten Lagen befinden darf, um das automatische Scannen des Barcode-Labels zu gewährleisten. Ein weiteres Beispiel bietet das Boarding der Fluggäste am Abfluggate. Auch hier ist das IT-System darauf angewiesen, dass die Passagiere ihr Ticket korrekt vor das Infrarot-Lesegerät halten, so dass der entsprechende Barcode eingescannt werden kann. Jegliches „Fehlverhalten“ der betrachteten Objekte führt zu Fehlermeldungen und Prozessunterbrechungen, wodurch die Abfertigungsworkflows erheblich an Effizienz einbüßen. Es entstehen Engpässe.

Dieses Unterkapitel erläutert mögliche Optimierungsszenarien durch den Einsatz neuer Technologien im Bereich der Auto-ID-Systeme. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Einführung der *RFID-Technologie*, aber auch Szenarien der *Wegezeiten-Optimierung durch DigiBA* sowie das Konzept des *Gläsernen Passagiers* werden behandelt.

5.3.1 RFID

Das implementierte Simulationsmodell bestätigt die Vorteile der RFID-Technologie gegenüber herkömmlichen Barcode-Verfahren. Seit rund einem Jahrzehnt werden an Flughäfen weltweit Testverfahren mit RFID-Transpondern durchgeführt. Einige wenige internationale Flughäfen setzen die Technologie bereits umfangreich ein. Die Frage ist heutzutage nicht mehr ob RFID-Technologie an Flughäfen zum Einsatz kommen wird, sondern wie die Vorteile des neuen Verfahrens am effizientesten eingesetzt werden können.

Der erste Entwicklungsschritt des generellen Einsatzes von RFID-Tags an Flughäfen besteht aus der Ersetzung des Barcode-Gepäcklabels. Alle größeren Testeinsätze wurden mit RFID-Chips, integriert in weiterhin aus Papier bestehende Gepäcklabels, durchgeführt. Dieses Vorgehen führt zu entsprechenden Effizienzsteigerungen der Prozess Workflows aufgrund der erläuterten Vorteile: das Gepäcklabel benötigt keine optische Verbindung zu einem Scanner, hochwertige RFID-Lesegeräte können Gepäckstücke schneller bzw. simultan erfassen, RFID-Tags können erneut beschrieben werden falls sich Daten ändern, und die Fehlerrate innerhalb der Gepäckförderanlagen sinkt dramatisch. Somit werden die Kosten der Airlines und Flughäfen durch Prozessineffizienz sowie durch verlorenes Gepäck deutlich gesenkt. Mit der Zunahme der Akzeptanz der RFID-Technologie an Flughäfen weltweit, dürfte auch das Argument der hohen Investitionskosten in den nächsten Jahren an Bedeutung verlieren. Besonders der Stückpreis von entsprechenden RFID-Transpondern wird durch die exponentiell wachsende Nachfrage weiter sinken. Zu beachten ist hinsichtlich der internationalen Verbreitung von RFID, dass die *International Air Transport Association (IATA)*¹⁶ ihr RFID Projekt beendet hat. Der internationalen IATA Webseite [Int12b] zufolge, sieht die IATA keine Notwendigkeit einer „universellen Adaption“ der RFID-Technologie innerhalb der IATA, da der Nutzen von RFID abhängig von jedem einzelnen Anwendungsfall im Flugwesen ist.

Aufgrund des enormen Potenzials der RFID-Technologie in Bezug auf das Schließen des bekannten Medienbruchs (vgl. Kap. 2.3) zwischen den IT-Systemen und den Objekten der Realwelt, ist eine flächendeckende Einführung von RFID an Flughafenterminals zu erwarten. Testversuche und Innovationsprogramme, beispielsweise des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie [Bun10], belegen diese Entwicklung. Dabei wird davon ausgegangen, dass der RFID-Einsatz als Barcode-Ersatz nur den Einstieg in die Flughafenbranche darstellt. Das System der RFID-Chips ist in jeder Hinsicht auf den aktuellen industriellen Trend des *Internets der Dinge*

¹⁶Die IATA ist der internationale Dachverband aller Luftverkehrsgesellschaften. Für weitere Informationen, [Int12a]

adaptierbar (vgl. Kap. 2.3, 3.3). Der Einsatz von RFID ist in verschiedenste Formen von Check-In Schaltern, Abfluggates, Sicherheitskontrollstellen, Terminalüberwachung und Gepäckförderungsanlagen integrierbar. In jedem Bereich von Identifikation kann die Technologie ihre Vorteile in Schnelligkeit und Sicherheit ausspielen, um Warteschlangen und andere Stauungen zu beheben [Bit10].

Flughäfen könnten zukünftig am meisten von RFID gestützten Systemen profitieren, wenn diese sowohl auf das Gepäck als auch auf die Fluggäste angewendet werden würde. Durch Integration eines RFID-Transponders in das Flugticket o. ä. könnte das Szenario vom *Gläsernen Passagier* Realität werden.

5.3.2 Der „Gläserne Passagier“

Mit der zusätzlichen Vergabe eines RFID-Chips an jeden Fluggast könnten Konzepte der Gepäckabfertigung auf die Fluggastbetreuung übertragen werden. Ein in das Flugticket integrierter Chip würde den Passagier innerhalb des Terminals jederzeit auffindbar machen. Mit der gezielten Verteilung von RFID-Antennen im Terminalkomplex könnten so ganze Bewegungsprofile jedes einzelnen Passagiers erstellt werden. Vorteile hätte dies z.B. beim Fehlen eines Fluggastes beim Boarding. Anstatt den heutzutage üblichen allgemeinen Lautsprecherdurchsagen könnte der Passagier in kürzester Zeit lokalisiert und somit gezielt auf das Schließen des Abfluggates aufmerksam gemacht werden. Ein weiteres Positivbeispiel wäre die Boarding-Prozedur selbst. Diese könnte aufgrund des RFID-Chips praktisch ohne manuelles Eingreifen von Flughafenpersonal durchgeführt werden. Der Fluggast würde sein *RFID-Ticket* einfach gegen das Identifikationsgerät halten. Handelt es sich um das korrekte Abfluggate, öffnet sich die das Gate-Tor automatisch. Andernfalls könnte auf einem Display direkt die Warnmeldung erscheinen, dass sich der Fluggast am falschen Gate befindet. Auch weitere Informationen, die richtige Gate-Nummer und eine Wegbeschreibung könnten direkt angezeigt werden.

Die Bestückung von Gepäck und Passagier mit einem RFID-Chip hätte auch positive Implikationen für die Ankunft am Zielflughafen. Durch die Installation von Sicherheitstoren und entsprechenden Lesegeräten an den Terminal-Ausgängen, würde das Risiko der Gepäckverwechslung an der Gepäckausgabe praktisch eliminiert. Auch der Gepäckdiebstahl wäre in der heutigen Form nicht mehr möglich. Das Sicherheitstor würde einfach nicht mehr öffnen, sollte das Lesegerät keine übereinstimmenden Daten auf den RFID-Chips der Gepäckstücke und dem Flugticket eines Passagiers auslesen. Durch die Schnelligkeit der RFID-Lesegeräte wären trotz RFID-Abgleich keine erhebliche Einschränkungen der Fluggäste in Form von Warteschlangen zu erwarten.

Eine Weiterentwicklung der Passagier-RFID-Systeme wäre die Verwendung von wiederverwendbaren Uhren, Armbändern oder anderen handlichen Displays mit integriertem RFID-Chip. Diese könnten Passagiere nicht nur lokalisieren und identifizieren, sondern außerdem aktive Hilfestellung bei der Navigation zum Abfluggate bzw. der nächsten Station im Abfertigungsprozess leisten (vgl. Kap. 5.3.3). Des Weiteren wären die Anzeige von aktuellen Angeboten der Einkaufs- und Gastronomieeinrichtungen auf Basis der gespeicherten Bewegungsprofile der Passagiere im Abflugbereich des Terminals denkbar. Durch das permanente Auslesen des RFID-Chips innerhalb des Terminals sind die anwendungstechnischen Möglichkeiten praktisch unbegrenzt [Bit10, S.130 ff.].

Bei allen zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten muss jedoch zwingend beachtet werden, dass die Datensicherheit der Passagiere die oberste Priorität genießt. Andernfalls wird riskiert, dass sich die negative Belegung des Begriffes *Gläserner Passagier* auch im Terminalkontext durchsetzt.

5.3.3 Wegezeiten-Optimierung mit DigiBA

Die *DigiBA* Technologie ist einer von mehreren Forschungsansätzen des Leuchtturmprojektes *Effizienter Flughafen 2030*¹⁷ im Bereich digitaler Unterstützungsinstrumente für Fluggäste an Flughäfen. Die beteiligten Projektpartner untersuchen dabei die Prozess Workflows des Flughafens Hamburg auf Optimierungsmöglichkeiten mit Hilfe von Informationstechnologien. Das Teilprojekt *HAP2* ist dabei speziell auf die effiziente Passagierflusssteuerung fokussiert [Ins12].

Durch die umfassende Einführung von IT-Systemen an Flughafen ist eine komplexe informationstechnische Automatisierungskette entstanden, dessen größter Schwachpunkt heutzutage der Passagier darstellt [Luf12a]. Aus diesem Grund wird die Entwicklung eines Gerätes zur digitalen Boarding-Unterstützung am Institut für Telematik der TUHH entwickelt. Das DigiBA-System soll die Kommunikation mit vorhandenen Terminal-Systemen ermöglichen, um beispielsweise die Wegezeiten von Passagieren zu optimieren. Das Gerät in Scheckkartengröße basiert auf RFID-Technologie und kann somit zur drahtlosen Interaktion mit entsprechenden Empfängern verwendet werden [Luf12c].

¹⁷Bei dem Leuchtturmprojekt *Effizienter Flughafen 2030* handelt es sich um ein Projekt des *Luftfahrtclusters Metropolregion Hamburg*. „Das Leuchtturmprojekt [...] verfolgt das Ziel, am Beispiel des Flughafens Hamburg Prozess- und Technologieansätze für verbesserte Bodenprozesse aufzuzeigen, die einen messbaren Beitrag zur Qualitäts- und Gesamtleistungssteigerung sowie zur Umweltverträglichkeit des Lufttransportsystems leisten.“ [Luf12b]

„In Gesprächen mit Experten vom Flughafen Hamburg wurden vielversprechende Anwendungen für die DigiBA identifiziert, die in nachfolgenden Schritten entwickelt werden. Das Gerät erlaubt es dem Passagier, Nachrichten zu verschicken, um Informationen zu erhalten. Weiter empfängt das Gerät Nachrichten, die dem Passagier wichtige Informationen wie zum Beispiel Flugplanänderungen oder die Zeit bis zum Abflug bieten. Der Passagier kann den Empfang wichtiger Nachrichten per Knopfdruck bestätigen, so dass der Flughafen direkt mit dem Passagier kommunizieren kann.“ [Ins12]

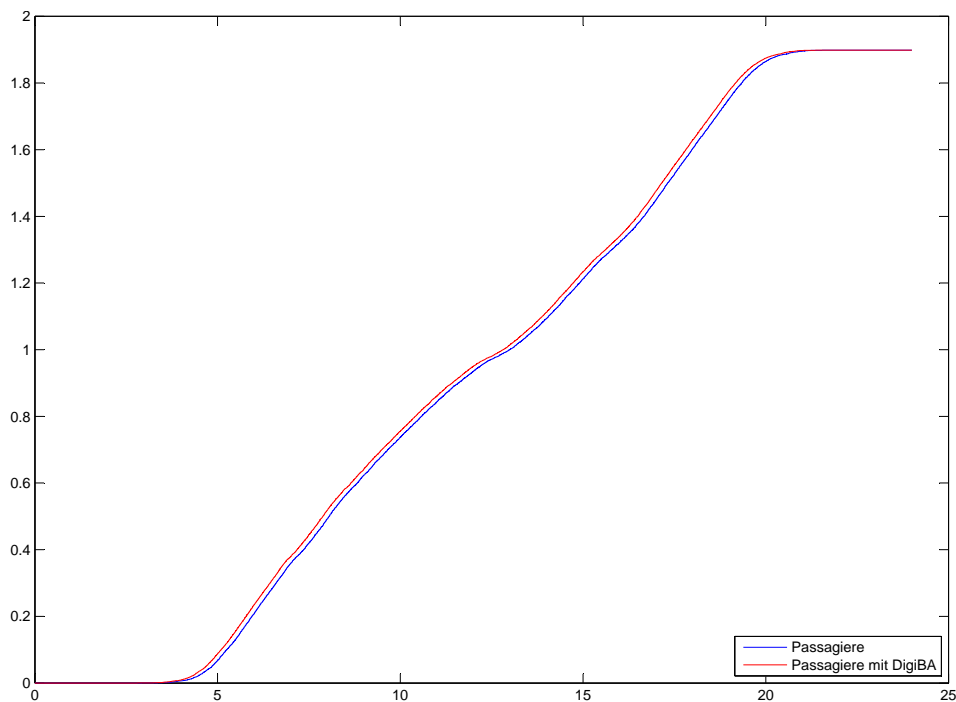


Abbildung 27: Simulationsergebnisse für die DigiBA-Technologie

Das DigiBA-System zur terminalweiten Navigation von Passagieren dient in erster Linie der Wegezeitenoptimierung. Zur Anwendung verkürzter Wegezeiten auf das Simulationsmodell *Departure* wurden Annahmen über das Optimierungspotenzial durch DigiBA getroffen. Bei Verringerung der durchschnittlichen Wegezeiten um 30% der Standardwerte (Tabelle 2), konnte eine nur äußerst geringe Verbesserung der Passagierabfertigung festgestellt werden. Erst ab einer Verringerung der Wegezeiten um über 50% sind die Abweichungen nicht mehr vernachlässigbar. Abbildung 27 zeigt die zeitliche Veränderung der Gate-Ankunft von Passagieren über den Tagesverlauf bei siebzigprozentiger Wegezeitenverkürzung.

Anhand der Simulationsergebnisse ist festzustellen, dass die DigiBA-Technologie den Passagierabfertigungsprozess nur im geringen Umfang beeinflusst, wenn DigiBA zur reinen Terminal-

Navigation eingesetzt werden würde. Da die Wegezeiten im Verhältnis zu Engpässen wie Check-In Schaltern und Sicherheitskontrollen nur einen geringen Anteil der Flughafenprozess-Problematik verursachen, ermöglicht die Technologie nach den Simulationserkenntnissen dieser Arbeit nur eine geringe Effizienzsteigerung, bei unbekanntem Kostenfaktor.

5.4 Fazit

Kapitel fünf stellt die erzielten Ergebnisse dar, bewertet die Simulation und liefert Optimierungsansätze für die Flughafenprozesse. Die Datenanalyse des Simulationsmodells kommt zu einem positiven Ergebnis. Die Simulation verarbeitet die Input-Daten auf Level-1 Niveau. Auch die Bewertung der Realisierung ist grundsätzlich positiv, besonders SimEvents beinhaltet jedoch auch Schwächen, welche sich negativ auf das Simulationsmodell auswirken. Im letzten Abschnitt wurden mögliche Optimierungsszenarien durch den Einsatz neuer Technologien im Bereich der Auto-ID-Systeme diskutiert. Die RFID-Technologie ist besonders im Hinblick auf das *Internet der Dinge* eine wichtige Zukunftstechnologie. Der DigiBA Ansatz zur Wegezeitenoptimierung im Flughafenkontext wird aufgrund der erzielten Simulationsergebnisse kritisch betrachtet.

6 Zusammenfassung & Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Das Ziel der Entwicklung eines Simulationsmodells der Flughafen-Landseite des Flughafen Hamburgs wurde erreicht. Die Passagier- und Gepäckströme werden dynamisch als Entitäten erzeugt und über die Dauer eines Simulationstages innerhalb des Level-1 Modells verarbeitet. Durch die Nutzung der kommerziellen Software MATLAB Simulink SimEvents ist die Umsetzung der formalen Flughafen Workflows im vollen Umfang gelungen. Auch die von der TUHH zur Verfügung gestellte Datenbasis konnte dank Attributvergabe-Funktion den Anforderungen entsprechend eingesetzt werden.

Im weiteren Verlauf der Bachelor-Thesis sind die grundlegenden Modellierungsbausteine und -techniken anhand von ausgesuchten Implementationsdetails strukturiert erläutert worden. Dabei wurden die Implementationsschwerpunkte in den Bereichen Terminal-, Gepäck- und Passagier-Implementation gesetzt. Besondere Aufmerksamkeit wurde den Modellabschnitten erteilt, welche über die Komponenten der klassischen Warteschlangenmodellierung hinausgehen.

Das Simulationsmodell ist mit einer abstrakten Komponente der RFID-Technologie ausgestattet. Mit Hilfe einer programmierten Funktion lassen sich die Passagier- und Gepäcken-titäten eines Gate-Clusters abgleichen. Anhand dieses Prüfverfahrens, wird der mögliche Einsatz von RFID-Tags im Kontext des *Baggage Reconciliation* Konzeptes sowie des Gepäckverlustes in der Gepäckförderanlage modelliert. Aufgrund der generischen Implementation der RFID-Technologie lassen sich selbstverständlich keine Annahmen über die Effizienz der Technologie im Prozessalltag ableiten. Das implementierte Simulationsmodell bestätigt jedoch die Vorteile der RFID-Technologie gegenüber herkömmlichen Barcode-Verfahren im Gesamtkontext der Terminal Workflows. Entsprechend lassen sich die gewonnen Kenntnisse bezüglich RFID nicht in konkreten Zahlen ablesen. Aus der RFID-Komponente des Simulationsmodells kann man jedoch die Gewissheit ziehen, dass die Technologie mehr als zukunftsfähig ist. Somit liefert das Simulationsmodell Anhaltspunkte für weitere Simulationen mit RFID-Schwerpunkt. Anhand dieser könnte erforscht werden, wie die Vorteile der neuen Systeme am effizientesten eingesetzt werden können.

Neben den Simulationsmodellen sind als Ergebnis der Bachelor-Thesis Optimierungsansätze zur Verbesserung der Passagier und Gepäck Workflows im Kontext der RFID-Technologie erläutert worden. Der klassischen Einsatz von RFID-Labels als Barcode-Ersatz wird durch die erzeug-

ten Simulationen und entsprechenden Ergebnisse sehr positiv bewertet. Darüber hinaus werden RFID-Systeme zukünftig bei der funktionalen Unterstützung von Passagier-Navigation und auch Gepäck-Lokalisation zum Einsatz kommen. Vom „Gläsernen Passagier“ sind die heutigen Flughäfen jedoch noch weit entfernt. Die Wegezeitenoptimierung mit dem DigiBA Ansatz wird in seiner jetzigen Form kritisch beurteilt. Das Simulationsmodell erbrachte keine signifikante Effizienzsteigerung durch Reduzierung der Wegezeiten am Flughafen hervor.

6.2 Ausblick

Die Engpass-Problematik im Bereich von Check-In, Sicherheitskontrollen, u.ä., die Optimierung der Prozesseffizienz von Gepäck und Passagier Workflows sowie die Minimierung der Kosten durch den Verlust von Gepäckstücken während der Flugreise sind klassische Themen, welche Flughafengesellschaften mit großer Wahrscheinlichkeit nie endgültig lösen werden. Simulationen sind daher die geeigneten Unterstützungssysteme, um Terminals zukünftig den gesteigerten Passagierzahlen und -anforderungen entsprechend anzupassen.

Im Verlauf dieser Bachelorarbeit wurden Simulationsmodelle implementiert, welche die beschriebene Problemstellung umfassend adressieren. Aufgrund der Modellierung von Prozessstationen mit *Black Box* Charakter, werden die Simulationen durch ihre Einstellungs- und Anpassungsfähigkeit über Jahre ein hilfreiches Tool im Kontext der Prozessflusssteuerung an Flughäfen darstellen.

Im Hinblick auf die Einführung neuer Technologien zur Steigerung der Terminaleffizienz, unterstreicht diese Arbeit die verbreitete Meinung, dass RFID zukünftig flächendeckend die bekannten Barcode-Labels für Gepäckstücke ersetzen wird. Mit der zunehmenden Umsetzung des *Ubiquitous Computing* und der daraus folgenden Entwicklung des *Internets der Dinge* ist zu erwarten, dass RFID im Bereich der intelligenten Objekte eine der maßgeblichen Technologien sein wird (vgl. Kap. 2.3).

Die Umsetzung von RFID-Chips über das Gepäck-Label hinaus, beispielsweise im Flugticket, wird daher die Schnittstelle zwischen den IT-Systemen und der Passagiere bilden. Der Ansatz des *Gläsernen Passagiers*, welcher im gesamten Komplex ständig geortet wird um IT-basierte Unterstützung zu erhalten, ist jedoch kein realistischer Ansatz der nahen Zukunft. Wahrscheinlicher ist die Einführung von RFID-Leseschranken im Terminal und der Gepäckförderung. An solchen strategischen Scann-Stationen würden die RFID-Tags der Objekte ausgelesen und entsprechende Ereignisse ausgelöst werden. Ein Passagier, der sich in die falsche Richtung am Terminal

bewegt, könnte über Signaltöne, Bildschirmausgaben, sein Airport-Gerät oder sein Smartphone (vgl. Kap. 5.3) Informationen über die korrekte Richtung zu seinem Abfluggate erhalten. Verlorene oder fehlgeleitete Gepäckstücke könnten sehr viel effektiver geortet werden, wenn ihr letzter Standort entsprechend der letzten RFID-Schranke zugeordnet werden kann.

Die beschriebene zusätzliche Funktionalität durch RFID-Technologie ließe sich problemlos in die erstellten Simulationsmodelle integrieren. Über die Funktion der Attributvergabe in Sim-Events würden sich die Scann-Stationen modellieren lassen. Jede Station würde dabei eine eindeutige Nummer in das entsprechende Attribut schreiben, welche im weiteren Simulationsverlauf über Funktionen ausgelesen und interpretiert werden könnte.

Die Erweiterbarkeit der im Rahmen dieser Arbeit implementierten Simulation ist somit sowohl daten- als auch funktionstechnisch gewährleistet.

Abbildungsverzeichnis

1	UML-Notationselemente	15
2	Passagierabfertigung am Check-In Schalter	18
3	Passagierabfertigung am Check-In Automaten	19
4	Passagierabfertigung im Sicherheitsbereich	20
5	Gepäckabfertigung Abflug	21
6	Passagierabfertigung Ankunft	22
7	Gepäckabfertigung Ankunft	22
8	SimEvents - Ein erstes Beispiel	29
9	Ein erstes Beispiel - Signal Scope	29
10	Abstrakte Darstellung Simulationsmodell Departure	35
11	Initialisierungsphase Passagier-Entitäten	36
12	Subsystem Create Entities	36
13	Subsystem Set Attributes	38
14	Subsystem Terminal-Routing	39
15	Routing zum Sicherheits-Check Subsystem	39
16	Modellierung von Wegezeit mit Inf-Server Block	41
17	Subsystem Check-In Passengers with Luggage	44
18	Subsystem Check-In Counter	45
19	Subsystem Passenger Security Area	46
20	Subsystem Screening Line for Passengers & Hand Luggage	46
21	Subsystem Passenger Duty Free Shopping	47
22	Initialisierung der Gepäck-Entitäten	49
23	Subsystem Luggage Sorting inkl. Gepäckverlust	50
24	Anzahl erzeugter Passagier-Entitäten im Tagesverlauf	54
25	Anzahl eingetroffener Gepäck-Entitäten am Gate-Cluster 1 im Tagesverlauf	55
26	Länge der kumulierten Warteschlangen an der Passagier Sicherheitskontrolle im Tagesverlauf	56
27	Simulationsergebnisse für die DigiBA-Technologie	61
28	Passagierabfertigung andere Medien und Gepäckschalter	VII
29	Passagierabfertigung Check-In am Vorabend	VII
30	SimEvents Simulationsmodell Departure	VIII
31	SimEvents Simulationsmodell Arrival	IX

32	Gate-Cluster am Flughafen Hamburg	IX
----	---------------------------------------------	----

Tabellenverzeichnis

1	Gate-Cluster Zuordnung der Airlines	40
2	Wege- & Bearbeitungszeiten der Stationen des Simulationsmodells	42

Listings

1	Erzeugung der Matrix <i>IntergenTimes</i>	37
2	Auszug aus Funktion <i>resultHandler.m</i>	51
3	Funktion <i>createNumericalAttributes.m</i> Teil 1	X
4	Funktion <i>createNumericalAttributes.m</i> Teil 2	XI
5	Funktion <i>createNumericalAttributes.m</i> Teil 3	XII
6	Funktion <i>createNumericalAttributes.m</i> Teil 4	XIII

Literatur

- [Air96] AIRPORT LOGISTICS. Gepäckbeförderung, catering, Fracht: Tagung Eindhoven, 10.-11.Sept. 1996. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1. Auflage. 1996.
- [Ash09] K. ASHTON. That 'Internet of Things' Thing. Website. 2009. Online unter <http://www.rfidjournal.com/article/view/4986>; besucht am 16. August, 2012.
- [Aus12] AUSWÄRTIGES AMT DEUTSCHLAND. Schengener Übereinkommen. Website. 2012. Online unter http://www.auswaertiges-amt.de/DE/EinreiseUndAufenthalt/Schengen_node.html; besucht am 22. Juli, 2012.
- [Bit10] K. E. BITE. Sustainable Radio Frequency Identification Solutions, Chapter 8: Improving on Passenger and Baggage Processes at Airports with RFID. InTech, Budapest, 1. Auflage. 2010.
- [Bun10] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE. ZIM-KOOP. Broschüre. 2010. Stand: November 2010.
- [Far11a] Y. FARSCHTSCHI; D. FORMELLA; K. HIMSTEDT; J. WITTMANN und D. MÖLLER. Macroscopic modelling of passenger streams on the airport and its adaptation in MATLAB Simulink. 2011.
- [Far11b] Y. FARSCHTSCHI und M. WIDEMANN. Prozessmodelle für Passagiere, Gepäck und Fracht. 2011.
- [Far11c] Y. FARSCHTSCHI und M. WIDEMANN. Systemanalyse. 2011.
- [Fic00] M. FICHTER. Workflow-Management-Systeme, Eine Studie für Anwender und Hersteller, Band 1: Einführung in die Workflow-Thematik. Project Consult GmbH, Hamburg, 1. Auflage. 2000.
- [Fin12] K. FINKENZELLER. RFID-Handbuch - Grundlagen und praktische Anwendungen von Transpondern, kontaktlosen Chipkarten und NFC. Hanser Verlag, München, 6., aktualisierte und erweiterte Auflage. 2012.
- [Fle04] E. FLEISCH; C. TELLKAMP und F. THIESSE. Intelligente Waren beschleunigen die Prozesse. IO New Management, 12/2004:S. 28–31. 2004.
- [Flu08] FLUGHAFEN HAMBURG GMBH. Pressemitteilung: Bau von Airport Plaza und Flughafen-S-Bahn voll im Plan. Website. 2008. Online unter http://airport.de/de/pressearchiv_2008_380.html; besucht am 16. August, 2012.

- [Flu09] FLUGHAFEN HAMBURG GMBH. Pressemitteilung: Zentrale Sicherheitskontrolle am Hamburg Airport erhält neue Kontrolllinien. Website. 2009. Online unter http://www.airport.de/de/pressearchiv_2009_3777.html; besucht am 16. August, 2012.
- [Flu12a] FLUGHAFEN HAMBURG GMBH. Daten Flughafengelände. Website. 2012. Online unter http://airport.de/de/u_daten_flughafengelaende.html; besucht am 04. August, 2012.
- [Flu12b] FLUGHAFEN HAMBURG GMBH. Sperrgepäck. Website. 2012. Online unter <http://airport.de/de/sperrgepaeck.html>; besucht am 22. Juli, 2012.
- [Flu12c] FLUGHAFEN HAMBURG GMBH. Terminal Wegweiser. Website. 2012. Online unter http://airport.de/resources/downloads/110803_Terminal-Wegweiser_A4pdf.pdf; besucht am 05. August, 2012.
- [Flu12d] FLUGHAFEN HAMBURG GMBH. Wo finde ich meinen Terminal? Website. 2012. Online unter http://airport.de/de/wo_finde_ich_meinen_terminal.html; besucht am 04. August, 2012.
- [For10] D. FORMELLA. Entwicklung eines Simulationsmodells zur Abbildung und Optimierung der Fracht- und Gepäckströme des Flughafen Hamburgs mit MATLAB-Simulink. Bachelor-Thesis, Universität Hamburg, Deutschland. Nov. 2010.
- [Fra09] F. FRAHM. Spezifikation und Optimierung des Workflows zur Passagier- und Gepäckabfertigung im Flughafen-Terminal. Bachelor-Thesis, Universität Hamburg, Deutschland. Jun. 2009.
- [Fra11] FRAPORT AG. Porträt eines Airport-Konzerns. Broschüre. 2011. Stand: November 2011.
- [Gar12] C. GARMS. Implementierung des Passagier- und Gepäckmodells mit MATLAB Simulink SimEvents. Seminararbeit, Universität Hamburg, Deutschland. 2012.
- [Hah05] J. HAHN; S. QUEINS; M. JECKLE; B. ZENGLER und C. RUPP. UML 2 glasklar - Praxiswissen für die UML-Modellierung und -Zertifizierung. Hanser, München, 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. 2005.
- [Han09] H. R. HANSEN und G. NEUMANN. Wirtschaftsinformatik 1 - Grundlagen und Anwendungen. Lucius and Lucius, Stuttgart, 10., völlig Neubearb. und erw. Auflage. 2009.
- [Inf07] INFORMATIONSFORUM RFID E.V. Basiswissen RFID. Broschüre. 2007. Stand: August 2007.

- [Ins12] INSTITUT DER TELEMATIK TUHH. Airport2030 - Effizienter Flughafen 2030. Website. 2012. Online unter <http://www.ti5.tu-harburg.de/research/projects/airport2030/>; besucht am 15. Aug., 2012.
- [Int12a] INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION. I.A.T.A. Home. Website. 2012. Online unter <http://www.iata.org/Pages/default.aspx>; besucht am 06. Aug., 2012.
- [Int12b] INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION. Radio Frequency ID (RFID) for aviation. Website. 2012. Online unter <http://www.iata.org/whatwedo/stb/Pages/rfid.aspx>; besucht am 06. Aug., 2012.
- [Int12c] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). ICAO in Brief. Website. 2012. Online unter <http://www.icao.int/Pages/icao-in-brief.aspx>; besucht am 16. Aug., 2012.
- [Ker06] C. KERN. Anwendung Von RFID-Systemen. Springer DE, Berlin, 1. Auflage. 2006.
- [Löw] S. LÖWA; C. BLANK und M. BOHNET. Evaluation von Einflussfaktoren auf die Verweildauer von Flugreisenden ab dem Hamburger Flughafen. Effizienter Flughafen 2030.
- [Luf12a] LUFTFAHRTCLUSTER METROPOLREGION HAMBURG. Airport2030 - HAP2. Website. 2012. Online unter http://www.airport2030.de/Airport2030_HAP2.de.html; besucht am 16. Aug., 2012.
- [Luf12b] LUFTFAHRTCLUSTER METROPOLREGION HAMBURG. Effizienter Flughafen 2030. Website. 2012. Online unter <http://www.airport2030.de/>; besucht am 16. Aug., 2012.
- [Luf12c] LUFTFAHRTCLUSTER METROPOLREGION HAMBURG. Internes Dokument zum Verbundprojekt Airport 2030. 2012. Arbeitsbereich TIS der Universität Hamburg.
- [Mac12] S. MACKE. Dia - Diagram editor. Website. 2012. Online unter <http://dia-installer.de/>; besucht am 01. Aug., 2012.
- [Mat12a] MATHWORKS DEUTSCHLAND. MATLAB. Website. 2012. Online unter <http://www.mathworks.de/products/matlab>; besucht am 29. Juni, 2012.
- [Mat12b] MATHWORKS DEUTSCHLAND. SimEvents. Website. 2012. Online unter <http://www.mathworks.de/products/simevents>; besucht am 02. August, 2012.
- [Mat12c] MATHWORKS DEUTSCHLAND. Simulink. Website. 2012. Online unter <http://www.mathworks.de/products/simulink>; besucht am 15. Juli, 2012.

- [Men07] H. MENSEN. Planung, Anlage und Betrieb von Flugplätzen. Springer, Berlin, Heidelberg, 1. Auflage. 2007.
- [Pag05] B. PAGE und W. KREUTZER. The Java Simulation Handbook - Simulating Discrete Event Systems with UML and Java. Shaker, Aachen, 1. Auflage. 2005.
- [Rod97] J. RODENHAGEN. Darstellung ereignisgesteuerter Prozeßketten(EPK) mit Hilfe von Petrinetzen. Diplomarbeit, Universität Hamburg, Deutschland. 1997.
- [Sch09] W. SCHWEIZER. MATLAB kompakt. Oldenbourg Verlag, München, 4., aktualisierte und ergänzte Auflage. 2009.
- [Sch10a] N. SCHÖNEMANN. RFID-basierte interorganisatorische Informationssysteme. Dissertation, Universität zu Köln, Deutschland. Dez. 2010.
- [Sch10b] A. SCHULZ; S. BAUMANN und S. WIEDENMANN. Flughafen Management. Oldenbourg Verlag, München, 1. Auflage. 2010.
- [Ste94] D. STEINHAUSEN. Simulationstechniken. Oldenbourg, Deutschland, 1. Auflage. 1994.
- [Voß01] S. VOSS und K. GUTENSWAGER. Informationsmanagement. Springer, Berlin, Heidelberg, 1. Auflage. 2001.
- [Wal12] L. WALDMANN. RFID zur sicheren und eindeutigen Identifikation von Fracht und Passagieren. Seminararbeit, Universität Hamburg, Deutschland. 2012.
- [Wec11] R. WECKER. Turnaround Simulation. Seminararbeit, Universität Hamburg, Deutschland. 2011.

Anhang

Ergänzende UML-Diagramme

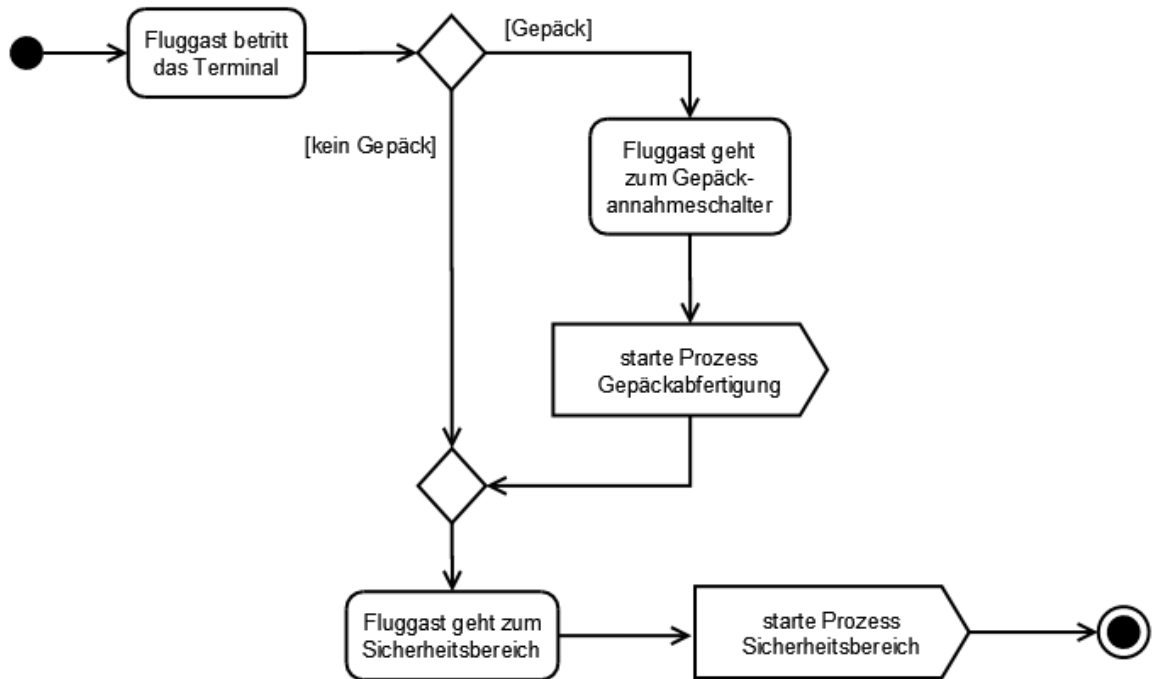


Abbildung 28: Passagierabfertigung andere Medien und Gepäckschalter (vgl. [Fra09])

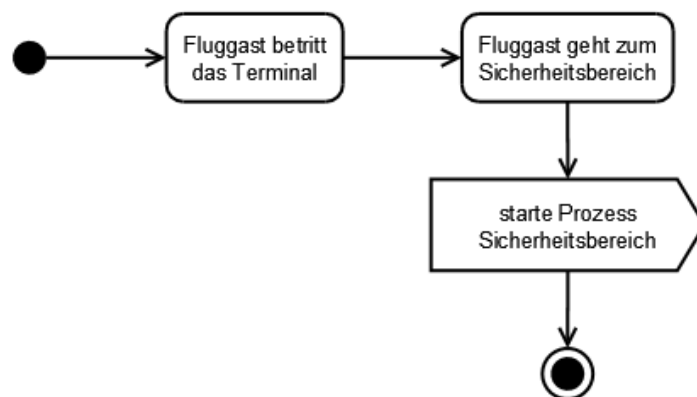


Abbildung 29: Passagierabfertigung Check-In am Vorabend (vgl. [Fra09])

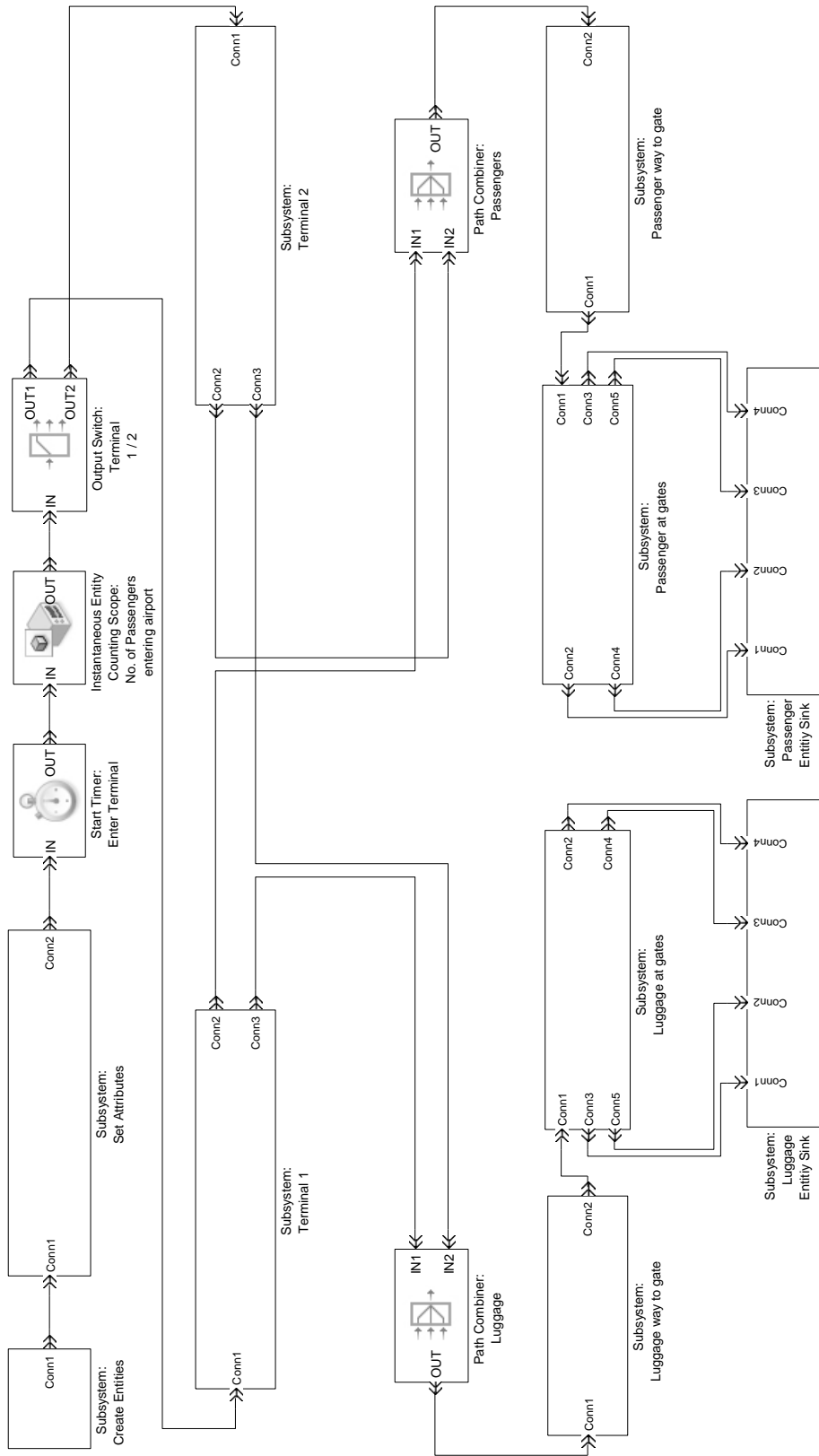


Abbildung 30: SimEvents Simulationsmodell Departure

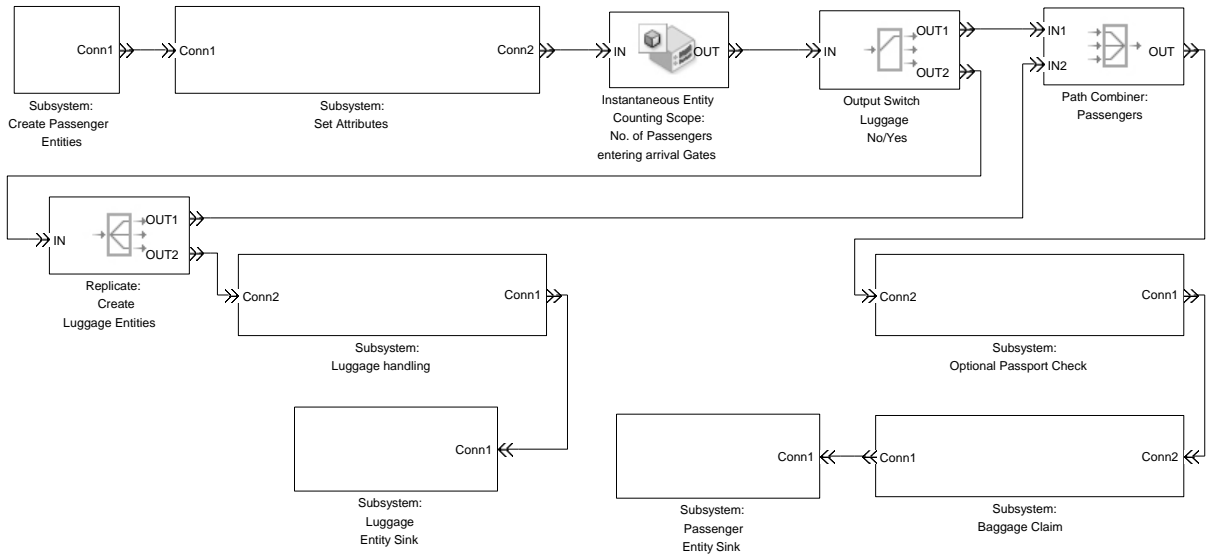


Abbildung 31: SimEvents Simulationsmodell Arrival

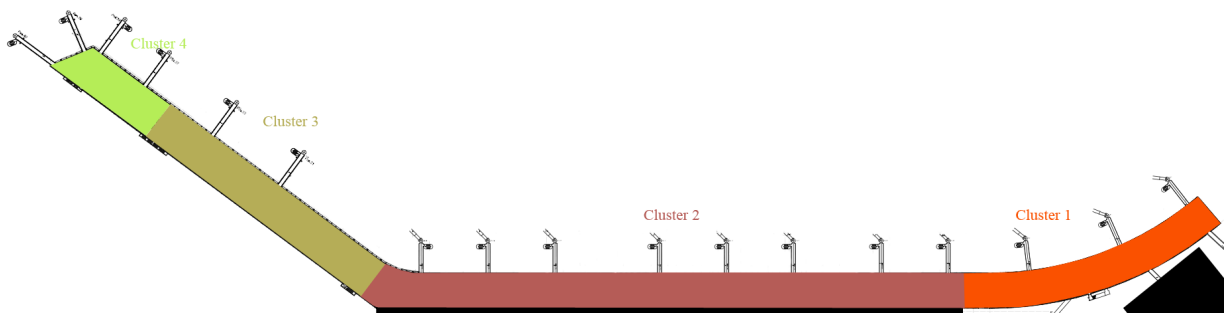


Abbildung 32: Gate-Cluster am Flughafen Hamburg

Quellcodeauszüge

```
1 %--CREATE NUMERICAL ATTRIBUTES--%
2
3 %--Load Input-Data to workspace--%
4     load('Data_Passenger_Input.mat');
5 %--ConsoleLog--%
6     disp('-_Input_data_"Data_Passenger_Input.mat"_has_been_
7         uploaded_to_workspace')
8
9 %--ASSIGN TERMINAL--%
10 %--Read airline of every passenger--%
11     airline = Data_Passenger_Input(:,7);
12
13 %--Build Variable that contains all Airlines using Terminal
14     1--%
15     airlinesT2 = char('AEGEAN_AIRLINES','AIR_CANADA','AIR_
16         CHINA',[...],'US_AIRWAYS');
17
18 %--Decide which Terminal--%
19     resultTerminal = zeros(length(airline), 1);
20     for i=1:length(airline)
21         elm = airline(i,1);
22         if(ismember(elm, airlinesT2))
23             resultTerminal(i,1) = 2;
24         else
25             resultTerminal(i,1) = 1;
26         end
27     end
28 %--ConsoleLog--%
29     disp('-_Terminal_values_have_been_assigned')
```

Listing 3: Funktion *createNumericalAttributes.m* Teil 1


```

1  %--ASSIGN GATE-CLUSTER--%
2  %--Build Variables which contain all Airlines using that
   specific Gate-Cluster(1-4)--%
3  gateCluster1 = char('DEUTSCHE_LUFTHANSA');
4  gateCluster2 = char('AIR_BERLIN','TUI_FLY',[...],'EASYJET
   _SWITZERLAND');
5  gateCluster3 = char('BRUSSELS_AIRLINES_(EHEMALS_SN_
   BRUSSELS_bzw_SABENA)',[..],'LOT_POLSKIE_LINIE');
6  gateCluster4 = char('CSA_CZECH_AIRLINES','OSTFR.LUFTTRASP
   .',[...],'SKYTAXI');
7
8  %--Decide which Gate-Cluster--%
9  resultGateCluster = zeros(length(airline), 1);
10 for iii=1:length(airline)
11     elm2 = airline(iii,1);
12     if(ismember(elm2, gateCluster1))
13         resultGateCluster(iii,1) = 1;
14     elseif(ismember(elm2, gateCluster2))
15         resultGateCluster(iii,1) = 2;
16     elseif(ismember(elm2, gateCluster3))
17         resultGateCluster(iii,1) = 3;
18     elseif(ismember(elm2, gateCluster4))
19         resultGateCluster(iii,1) = 4;
20     else
21         resultGateCluster(iii,1) = 2;
22     end
23 end
24 %--ConsoleLog--%
25 disp(' -_Gate-Cluster_values_have_been_assigned')

```

Listing 4: Funktion *createNumericalAttributes.m* Teil 2

```

1  %--ASSIGN IF DESTINATION IS IN SCHENGEN-AREA--%
2  %--Read destination area of every passenger--%
3      destArea = Data_Passenger_Input(:,9);
4
5  %--Build variable that contains all non Schengen-Areas (on
6      bases of Input-File Data_Passenger)--%
7      nonSchengenArea = [3 4 5 6 7 8 9];
8
9  %--Decide if destination area is inside Schengen-Area(1) or
10     not(2)--%
11     resultSchengenArea = zeros(length(destArea), 1);
12     for ii=1:length(destArea)
13         elm1 = cell2mat(destArea(ii));
14         if(ismember(elm1, nonSchengenArea))
15             resultSchengenArea(ii,1) = 2;
16         else
17             resultSchengenArea(ii,1) = 1;
18         end
19     end
20
21 %--ConsoleLog--%
22     disp(' _Schengen-Area_values_have_been_assigned' )

```

Listing 5: Funktion *createNumericalAttributes.m* Teil 3

```

1  %--PUT EVERYTHING TOGETHER IN ATTRIBUTES-MATRIX--%
2  %--Create Matrix that contains all attributes as chars--%
3  Data_Attributes = zeros(length(airline), 9);
4  for j=1:6
5      Data_Attributes(:,j) = cell2mat(Data_Passenger_Input(:,j)
6          );
7  end
8  Data_Attributes(:,7) = resultTerminal(:,1);
9  Data_Attributes(:,8) = resultGateCluster(:,1);
10 Data_Attributes(:,9) = resultSchengenArea(:,1);
11 %--ConsoleLog--%
12 disp('_Final_attribute_matrix_"Data_Attributes"_has_been_
13     created')
14
15 %--CLEAR UNNECESSARY VARIABLES FROM WORKSPACE--%
16 clear i;
17 clear ii;
18
19 [...]
20
21 %--ConsoleLog--%
22 disp('_Unnecessary_variables_have_been_cleared')
23
24 %--ConsoleLog--%
25 disp('_Numerical_attributes_have_been_successfully_created
26     _from_input_data!')
```

Listing 6: Funktion *createNumericalAttributes.m* Teil 4

Digitale Abgabe auf CD-ROM

Inhalte der CR-ROM:

- Bachelorarbeit in digitaler Form (PDF-Datei).
- Dateien der Simulationsmodelle (ZIP-Datei).

CD-ROM zur Bachelorarbeit



Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorstehende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel – insbesondere keine im Quellenverzeichnis nicht benannten Internetquellen – benutzt habe, die Arbeit vorher nicht in einem anderen Prüfungsverfahren eingereicht habe und die eingereichte schriftliche Fassung der auf dem elektronischen Speichermedium entspricht.

Ich bin mit der Einstellung der Arbeit in den Bestand der Bibliothek des Departments Informatik einverstanden.

Hamburg, den 17. August 2012

Christoph H. Garms