



# Airport 2030

## Effizienter Flughafen 2030



### Schlussbericht

Zuwendungsempfänger:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) e.V.

Förderkennzeichen:

03CL01F

Beteiligte Einrichtungen und Institute:

Lufttransportsysteme (DLR-LY)

Flugführung (DLR-FL)

Flughafenwesen und Luftverkehr (DLR-FW)

Ansprechpartner DLR-LY

Klaus Lütjens

Tel. 040/42878-4510

klaus.luetjens@dlr.de

Ansprechpartner DLR-FL

Steffen Loth

Tel. 0531/295-2811

steffen.loth@dlr.de

Ansprechpartner DLR-FW

Martin Schiele

Tel. 0531/295-2497

martin.schiele@dlr.de

Vorhabenbezeichnung:

Verbundprojekt Effizienter Flughafen 2030, TP 6

im Leuchtturm 3 „Airport 2030“

des Spitzencluster Luftfahrt – Metropolregion Hamburg

Laufzeit des Vorhabens: 01.12.2008 – 31.01.2014

## Dokumentenkontrolle

Autoren	Partner	Kontaktperson
Verantwortlicher Autor/en	DLR-LY	Klaus Lütjens Peter Bießlich
	DLR-FL	Steffen Loth
	DLR-FW	Martin Schiele Amir Ayazkhani
Weitere Autoren	DLR-LY	Niclas Dzikus Alexander Lau Till Pfeiffer Dr. Marco Weiss Dr. Xiaoqian Sun Prof. Dr. Volker Gollnick
	DLR-FL	Yves Günther Anne Papenfuß Hejar Gürlük Karsten Straube Jörn Jakobi Meilin Schaper
	DLR-FW	Dr. Andreas Deutschmann
Speicherdatum:	2014-09-25	
Datei Name	Effizienter Flughafen 2030_DLR_Abschlussbericht.docx	
Status Geheimhaltung	Öffentlich	

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03CL01F gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Die Inhalte, Abbildungen und Tabellen in diesem Schlußbericht wurden im Rahmen des Projektes „Effizienter Flughafen 2030“ federführend durch das DLR erarbeitet und sind den jeweiligen Liefergegenständen (Deliverables) entnommen, soweit nicht anders angegeben.

## Abkürzungsverzeichnis

Airport2030	Gewählte Kurzbezeichnung des Projektes „Effizienter Flughafen 2030“. Seit der Erweiterung des Leuchtturm 3 um die Projekte „Green Airport“, „Validierung von Luftverkehrsszenarien“ und „DIBUS“ wird Airport2030 auch als Bezeichnung für den Verbund aus den genannten 4 Projekten benutzt.
ACARE	Advisory Council for Aeronautics Research in Europe
A-CDM	Airport Collaborative Decision Making
ARIF	Airport Research and Innovation Facility Hamburg
A-SMGCS	Advanced Surface Movement Guidance and Control System
BWB	Blended Wing Body
CBA	Cost Benefit Analysis
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DLR-FL	Institut für Flugführung, Braunschweig
DLR-FW	Institut für Flughafenwesen, Braunschweig
DLR-LY	Institut für Lufttransportsysteme, Hamburg
DigiBa	Digitale Bording-Assistenz
DFS	Deutsche Flugsicherung GmbH
eDEP	early Demonstration and Evaluation Platform der Eurocontrol
EFS	Elektronische Flugstreifensysteme
EIS	Entry into Service
FHG	Flughafen Hamburg GmbH
GroLaS	Ground-based Landing Gear System
HAP	Hauptarbeitspaket
HMI	Human Machine Interface
iVLD	Interaktive Verkehrslagedarstellung
LOS	Level of Service
NPV	Net Present Value
SESAR	Single European Sky ATM Research
ICAO	International Civil Aviation Organization
IATA	International Air Transport Association
TAM	Total Airport Management
TOMICS	Traffic Oriented Microscopic Simulator
VI	Visibility Index
WLU	Work Load Unit

## Inhaltsverzeichnis (Überblick)

I	Kurzdarstellung.....	10
I - 1	Aufgabenstellung.....	10
I - 2	Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens.....	12
I - 3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	14
I - 4	Wissenschaftlich/technischer Stand - Anknüpfungspunkt.....	16
I - 5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	17
II	Eingehende Darstellung.....	19
II - 1	Erzielte Ergebnisse.....	19
II - 1.1	Analyse, Integration und Bewertung – Problemfeldmatrix, Szenarien und Anforderungen.....	19
II - 1.2	Effiziente Passagierflussteuerung – Beschreibung des Flughafen Hamburg und Prozessmodell 2015.....	35
II - 1.3	Effiziente Passagierflussteuerung – Digitale Boarding-Assistenz (DigiBA) ..	64
II - 1.4	Hochautomatisierte Prozesssteuerung – Leitstand.....	77
II - 1.5	Hochautomatisierte Prozesssteuerung – Groundhandling.....	90
II - 1.6	Hochautomatisierte Prozesssteuerung – Vorfeld.....	104
II - 1.7	Flugzeugkonfigurationen für effiziente Bodenoperationen – Flugzeugkonfiguration 2030.....	113
II - 1.8	Analyse, Integration und Bewertung – Gesamtsystembewertung.....	132
II - 2	Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	187
II - 3	Fortschritte anderer Stellen während des Vorhabens.....	191
II - 4	Erfolgte/geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	193
III	Literaturverzeichnis.....	194

## Inhaltsverzeichnis (detailliert)

I	Kurzdarstellung.....	10
I - 1	Aufgabenstellung.....	10
I - 2	Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens.....	12
I - 3	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	14
I - 4	Wissenschaftlich/technischer Stand - Anknüpfungspunkt .....	16
I - 5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	17
II	Eingehende Darstellung .....	19
II - 1	Erzielte Ergebnisse.....	19
II - 1.1	Analyse, Integration und Bewertung – Problemfeldmatrix, Szenarien und Anforderungen .....	19
II - 1.1.1	Problemfeldmatrix.....	19
II - 1.1.1.1	Prozessbegriff.....	19
II - 1.1.1.2	Übersicht der ermittelten Prozesszusammenhänge .....	20
II - 1.1.1.3	Zusammenfassung Problemfeldmatrix .....	28
II - 1.1.2	Szenarien 2015/2030.....	29
II - 1.1.2.1	Szenario A: „Gehemmttes Wachstum“ .....	30
II - 1.1.2.2	Szenario B: „Effiziente Technologien“ (starkes Wachstum).....	30
II - 1.1.2.3	Szenario C: „Hochsicherheitszone“ (Stagnation).....	30
II - 1.1.3	Anforderungsanalyse .....	31
II - 1.2	Effiziente Passagierflussteuerung – Beschreibung des Flughafen Hamburg und Prozessmodell 2015.....	35
II - 1.2.1	Beschreibung und des Flughafen Hamburg .....	35
II - 1.2.1.1	Terminal 1.....	36
II - 1.2.1.2	Terminal 2.....	36
II - 1.2.1.3	Airport-Plaza .....	36
II - 1.2.1.4	Pier .....	37

II - 1.2.2	Übersichtlichkeit von Terminalgebäuden und deren Level of Service	38
II - 1.2.2.1	„Wayfinding“ im Terminalgebäude	38
II - 1.2.2.2	Modell von Raubal & Egenhofer	40
II - 1.2.2.3	Visibility Index	42
II - 1.2.2.4	Level-of-Service für die Orientierung an einem Flughafen	46
II - 1.2.2.5	Übersichtlichkeit des Flughafens Hamburg	50
II - 1.2.3	Optimierte Prozessketten für 2015	55
II - 1.2.3.1	Variante „Zentrale Sicherheitskontrolle“	56
II - 1.2.3.2	Variante „Eingangssicherheitskontrolle“	57
II - 1.2.3.3	Variante „Dezentrale Sicherheitskontrolle“	58
II - 1.2.3.4	Vergleich der Prozesskettenvarianten	59
II - 1.2.3.5	Maßnahmenübersicht	60
II - 1.3	Effiziente Passagierflusssteuerung – Digitale Boarding-Assistenz (DigiBA)	64
II - 1.3.1	Technisches Konzept der DigiBA	64
II - 1.3.2	Modellierung des Flughafen Hamburg mit TOMICS	66
II - 1.3.3	Modellierung der Passagiere und deren Orientierungsfähigkeit	66
II - 1.3.3.1	Die Übersichtlichkeit des Flughafens	68
II - 1.3.3.2	Der Informiertheitsgrad eines Passagiers	68
II - 1.3.3.3	Der Durchdringungsgrad von Indoor-Navigationsgeräten	69
II - 1.3.4	Simulationsergebnisse des Einsatzes von Indoor-Navigation	69
II - 1.3.5	CBA	71
II - 1.3.5.1	Monetäre Bewertung der Wegzeitreduktion für die Passagiere	71
II - 1.3.5.2	Monetäre Bewertung der Wegzeitreduktion für den Flughafen	73
II - 1.4	Hochautomatisierte Prozesssteuerung – Leitstand	77
II - 1.4.1	Konzept	77
II - 1.4.1.1	Arbeitsanalyse	77
II - 1.4.1.2	Operationelles Konzept	78
II - 1.4.2	Technische Umsetzung	80
II - 1.4.2.1	Datenanbindung / Datenbanken	82

II - 1.4.2.2	Performance Assessment und Total Operations Planer.....	82
II - 1.4.2.3	Powerwall .....	82
II - 1.4.2.4	Clientsysteme .....	84
II - 1.4.3	Versuche.....	85
II - 1.4.3.1	Datenanalysen.....	85
II - 1.4.3.2	Szenarienerstellung .....	86
II - 1.4.3.3	Versuchsreihen.....	86
II - 1.4.4	CBA.....	88
II - 1.5	Hochautomatisierte Prozesssteuerung – Groundhandling .....	90
II - 1.5.1	Konzept.....	90
II - 1.5.1.1	Arbeitsanalyse .....	90
II - 1.5.1.2	Operationelles Konzept .....	91
II - 1.5.2	Technische Umsetzung .....	94
II - 1.5.2.1	Datenanbindung / Datenbank .....	95
II - 1.5.2.2	Dispositionsarbeitsplatz .....	95
II - 1.5.2.3	Fahrzeugsystem .....	98
II - 1.5.2.4	Optimierung .....	100
II - 1.5.3	Versuche.....	100
II - 1.5.4	CBA.....	102
II - 1.6	Hochautomatisierte Prozesssteuerung – Vorfeld .....	104
II - 1.6.1	Konzept.....	104
II - 1.6.1.1	Arbeitsanalyse .....	104
II - 1.6.1.2	Operationelles Konzept .....	105
II - 1.6.2	Technische Umsetzung .....	108
II - 1.6.2.1	Datenanbindung .....	109
II - 1.6.2.2	Lotsenarbeitsplatz.....	109
II - 1.6.2.3	Unterstützungssysteme .....	111
II - 1.6.3	Versuche.....	111
II - 1.6.4	CBA.....	112

II - 1.7	Flugzeugkonfigurationen für effiziente Bodenoperationen – Flugzeugkonfiguration 2030 .....	113
II - 1.7.1	Flugzeugentwurf .....	113
II - 1.7.1.1	Auslegung neuer Flugzeugkonfigurationen .....	113
II - 1.7.1.2	Referenzkonfiguration für das Jahr 2030.....	115
II - 1.7.1.3	Entwurfs-Optimierung .....	117
II - 1.7.2	Integration am Flughafen .....	118
II - 1.7.2.1	Kompatibilität zur luftseitigen Infrastruktur .....	118
II - 1.7.2.2	Kompatibilität zu bestehenden Ressourcen.....	118
II - 1.7.3	Analyse des Turnaround Prozesses .....	122
II - 1.7.3.1	Kabinen- und Frachtraummodell.....	124
II - 1.7.3.2	Ermittlung von Teil-Prozesszeiten .....	125
II - 1.7.3.3	Gesamtbodenprozesszeit .....	128
II - 1.7.4	CBA.....	128
II - 1.8	Analyse, Integration und Bewertung – Gesamtsystembewertung .....	132
II - 1.8.1	Entwicklung des luftseitigen Modells der Gesamtsimulation .....	133
II - 1.8.1.1	Mikroskopisches Rollverkehrsmodell.....	134
II - 1.8.1.2	Meso/makroskopisches Rollverkehrsmodell.....	136
II - 1.8.1.3	Ein- und Ausgabeschnittstellen der Simulationskette .....	143
II - 1.8.2	Sensitivitätsanalyse mit der Gesamtsimulation.....	145
II - 1.8.2.1	Definition von Simulationsszenarien auf Basis .....	
der Zukunftsszenarien .....	145	
II - 1.8.2.2	Generierung von Flugplänen für die Simulationsszenarien .....	145
II - 1.8.2.3	Ergebnisse der Gesamtsimulation .....	148
II - 1.8.2.4	Leistungsfähigkeit des gekoppelten Land- und Luftseitenmodells....	151
II - 1.8.3	Entwicklung der CBAirport .....	154
II - 1.8.3.1	Grundlagen .....	154
II - 1.8.3.2	Initialisierung des Referenzflughafens.....	163
II - 1.8.3.3	Wirtschaftlichkeitskennwerte und Ergebnisstabilität .....	
des Referenzsystems .....	166	

---

II - 1.8.4	Monetäre Bewertung mit der CBAirport .....	170
II - 1.8.4.1	Konzept des Ground-based Landing Gear Systems (GroLaS).....	170
II - 1.8.4.2	Kosten für die Installation von GroLaS am Flughafen Hamburg.....	170
II - 1.8.4.3	Monetäre Bewertung von GroLaS für den Flughafen Hamburg .....	176
II - 1.8.4.4	Monetäre Bewertung des Innenraum-Navigationssystems DigiBA ..	181
II - 2	Verwertbarkeit der Ergebnisse .....	187
II - 3	Fortschritte anderer Stellen während des Vorhabens .....	191
II - 4	Erfolge/geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse .....	193
III	Literaturverzeichnis .....	194

## I Kurzdarstellung

### I - 1 Aufgabenstellung

Bereits heute limitiert der Flughafen als Subsystem in der Lufttransportkette häufig die Kapazität des Gesamtsystems. Aktuelle Verkehrsprognosen der Flugzeughersteller Airbus und Boeing, der Vereinigung der Fluggesellschaften IATA und der Europäischen Kommission gehen weltweit von einer Steigerung des Luftverkehrs um 5-6 % jährlich aus. Es besteht somit ein unmittelbarer Handlungsbedarf, neben der Reform der Flugroutenstruktur im Luftraum (z.B. in SESAR) und einer kontinuierlichen Verbesserung der Flugzeugkonfiguration für den Reiseflug, einen Forschungsschwerpunkt auf den Flughafen inklusive der Flughafenbindung zu legen.

Der Ablauf aus Sichtweise eines Passagiers beginnt mit der Anreise zum Flughafen. Danach folgen die verschiedenen Abfertigungsschritte – Check-in und Sicherheitschecks – und nach dem Aufenthalt im Terminal zuletzt das Einsteigen. Demgegenüber gliedert sich der Prozess aus Sichtweise einer Fluggesellschaft in Landung, Rollen zum Flughafengebäude, Aussteigen/Entladen, Kabinenreinigung, Betankung, Wartung/Inspektion, ggf. Rotation der Besatzung, Beladen/Einsteigen, Rollen und Start. Analog lassen sich die Prozessabläufe für die übrigen Beteiligten definieren: Flughafenbetreiber, Flugsicherung, Bodenverkehrsdienste, Bundespolizei, Einzelhändler, Servicedienstleister, etc.

Ein effizienter Flughafen 2030 hat demzufolge viele Anforderungen zeitgleich zu erfüllen. Zuerst muss die Kapazität die Nachfrage befriedigen können und darüber hinaus sollte nachhaltiges Wachstumspotenzial vorhanden sein. Im Vergleich zu heute soll sich der Betrieb zudem ökologischer, ökonomischer, komfortabler, sicherer und flexibler gestalten und dies unter ausgewogener Berücksichtigung der Interessen aller am System Flughafen Beteiligten.

Dies bedeutet, dass alle Aspekte des Flughafens und seine Einbindung in das Lufttransportsystem auf Verbesserungspotenziale hin analysiert werden müssen. Die Berücksichtigung der gesamten Lufttransportkette als Gesamtsystem ist zwingend notwendig, da der Lufttransport in seiner Ausprägung ein komplexes System ist und dementsprechend Emergenzeigenschaften aufweist: Beobachtungen, die sich auf der Gesamtsystemebene machen lassen, bilden sich nicht notwendigerweise auf der Subsystemebene ab. Dies ergibt sich aus den zahlreichen Verknüpfungen und Rückkopplungen, die in besonderer Weise für den Flughafen durch seine Einbindung in das Gesamtsystem gelten.

Das Leuchtturmprojekt „Effizienter Flughafen 2030“ 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.

Die Bodenprozesse des Luftverkehrs am Flughafen, das Be- und Entladen sowie die Versorgung des Flugzeugs am Gate, die Abläufe im Terminalgebäude und die Bewegungen auf dem Rollfeld lassen auf ein großes Verbesserungspotenzial schließen. Untersuchungen von

Airbus ergaben, dass bei verbesserten Bodenprozessen bis zu 25% höhere Einnahmen für eine Airline durch eine größere Anzahl an Flügen bei gleicher Flotte oder ein Einsparpotenzial im dreistelligen Millionenbereich pro Jahr für eine mittelgroße Airline bei konstanter Anzahl von Flügen mit verkleinerter Flotte erreicht werden können. Zu den wirtschaftlichen Aspekten kommt die Umweltkomponente, z. B. durch Triebwerke, die am Boden nur sehr ineffizient betrieben werden können und einem hohen Energieverbrauch an der Parkposition durch Vorfeldfahrzeuge, Hilfsgasturbine, etc. aufgrund von nicht optimierten Prozessabläufen.

Ansätze für eine Verbesserung der Bodenprozesse finden sich zum einen in der Prozessplanung und -steuerung. Voraussetzung dafür ist eine Kontrollmöglichkeit des Betriebsablaufs inklusive der vor- und nachgelagerten Prozesse. Zum anderen ergibt sich bei langfristigen Zeithorizont die Option, die Flughafeninfrastruktur und das Flugzeug selbst weiter zu optimieren. Wegen der engen Kopplung der Einzelprozesse im Lufttransportsystem kann eine Gesamtoptimierung und -bewertung nur im Kontext des gesamten Lufttransportsystems erfolgen.

Für das Leuchtturmprojekt „Effizienter Flughafen 2030“ wurden folgende übergreifende Ziele verfolgt:

#### *Global*

- Reduktion von Emissionen und Lärm am Flughafen
- Reduktion der Kosten für Fluglinien und Flughafenbetreiber
- Beschleunigung der Abläufe am Boden
- Erhöhung des Passagierkomforts am Boden
- Steigerung der Passagier- und Frachtstromkapazität
- Reduktion der Ein- und Aussteige-, Be- und Entladezeiten
- Steigerung der Pünktlichkeit des Luftverkehrs

#### *Für Hamburg*

- Aufbau einer Architektenrolle in der integrierten Flughafenprozessoptimierung
- Stärkung und Ausbau der Hamburger Wertschöpfungskette mit ausgeprägtem Flughafenbezug
- Stärkung der Beratungs- und Planungskompetenz im Luftfahrtleistungssektor unter Nutzung des einzigartigen Cluster-Know-hows in Hamburg
- Stärkung der Kompetenz und des Vermarktungspotenzials aufgrund der Vernetzung der Partner für Technologie- und Prozesslösungen

## I - 2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens

Die Arbeiten des DLR bauen teilweise auf den Ergebnissen und Methoden vergangener Projekte auf. Hierbei stehen vor allem Softwareapplikationen im Vordergrund, die um neue Funktionalitäten erweitert werden. Des Weiteren werden gänzlich neue Ansätze der Forschung verfolgt. Im Folgenden werden die bisherigen Projekte angesprochen, die für die verschiedenen Hauptarbeitspakete (HAP) die Grundlage bilden.

Die Arbeiten des DLR in den HAPs 1 und 4 bauen auf der Rolle des Instituts für Lufttransportsysteme (DLR-LY) als Gesamtsysteminstitut für den Luftfahrttransport auf. Dies beinhaltet die Bündelung der Forschungsbereiche Flugzeugvorentwurf, Flugzeugbetrieb und Infrastrukturen sowie Systemanalyse unter einem Dach mit besonderem Fokus auf den Wechselwirkungen zwischen den beteiligten Stakeholdern. Auf dieser Grundlage wurden die Tätigkeiten zu Projektkoordination, Systems Engineering Prozess, Flugzeugentwurf, Flughafenkompatibilität und Technologiebewertung durchgeführt.

Die Arbeiten des Instituts für Flughafenwesen und Luftverkehr (DLR-FW) im HAP 2 bauen auf Vorarbeiten zum Projekt ASSET auf. Das durch das Europäische Forschungsrahmenprogramm 6 (FP6) geförderte Projekt wurde gemeinsam mit Airbus durchgeführt (Laufzeit 2008 – 2010). Ziel ist es auch dort den Passagier- und Gepäckfluss am Flughafen, von der Ankunft im Flughafen -Terminal bis zum Flugzeug zu untersuchen. Dazu gibt es die folgenden Aktivitäten:

- Ermittlung von „bottlenecks“ und Anforderungen für den Flugzeugentwurf.
- Festsetzung von heutigen System Szenarien für mittelgroße und Hub-Airports als Referenzmodelle / Szenarien.
- Entwicklung und Simulation von einzelnen Lösungen zum Erreichen der Verbesserungen im Turnaround Prozess.
- Integration einzelner Lösungen zur Untersuchung vielversprechender kombinierter Lösungen.

Ziel von ASSET ist vorrangig die Bewertung von Konzepten zur Vereinfachung des Turnaround-Prozesses am Flughafen. Ein zusätzlicher Aspekt ist die Vermeidung von Störungen aus operativer und prozessualer Sicht. Das wesentliche Hilfsmittel für diese Bewertung ist die Simulation der Betriebsabläufe. Anders als im beantragten Leuchtturmprojekt wird in ASSET nicht versucht den Passagier mit in die informationstechnische Integrationskette im Terminal mit technischen Hilfsmitteln zu integrieren. Auf diesen Schwerpunkt des HAP 2 können die in ASSET entwickelten Simulationsansätze und -verfahren im Leuchtturmprojekt jedoch gut angewendet werden.

Für die Arbeiten des Instituts für Flugführung (DLR-FL) im Bereich der Hochautomatisierten Prozesssteuerung (HAP 3) wurden zum einen die Vorarbeiten aus den Projekten CARMA und WFF (Fahrzeugmanagement) als auch Erkenntnisse aus DLR-Projekten zum Themengebiet Total Airport Management genutzt. Da eines der Hauptziele des Projektes Airport2030 die Validierung und Demonstration der entwickelten Systeme am Flughafen Hamburg war, musste die dafür notwendige Infrastruktur geschaffen werden.

### *Airport Research and Innovation Facility Hamburg*

Zentrale Komponente für alle drei Teilbereiche des Hauptarbeitspaketes 3 ist die Airport Research and Innovation Facility Hamburg (ARIF). Die in Kooperation mit dem Flughafen Hamburg und der DFS betriebene Plattform stellt die Grundfunktionalitäten bereit, ohne die eine Validierung der entwickelten Systeme gar nicht hätte realisiert werden können. Neben der Bereitstellung der Räumlichkeiten und der entsprechenden Einrichtung (IT-Systeme, Netzwerksysteme, Mobiliar) geht es hier vor allem um die Anbindung an die operationellen Systeme und die Bereitstellung der Realdaten am Flughafen.

### *Fahrzeugmanagement*

Der Fokus der Arbeiten im Projekt Airport2030 lag auf der Entwicklung des Dispositionssystems für das Fahrzeugmanagement. Um die Funktionalitäten zu entwickeln, testen, und validieren zu können, wird aber das Gesamtsystem benötigt. Dies besteht neben der Disposition auch aus den Fahrzeugsystemen und der Übertragungstechnologie damit Fahrzeuge und Dispositionssystem miteinander kommunizieren können. Für die Fahrzeugsysteme wurde auf das Projekt WFF zurückgegriffen, bei dem bereits eine entsprechende Anzahl an Systemen beschafft worden war. Hier war lediglich eine Erneuerung einzelner Systemkomponenten notwendig.

Wie im Projekt WFF konnte das am Flughafen vorhandene WLAN für die Datenübertragung genutzt werden. Ein entsprechend abgesichertes Forschungssegment wurde vom Flughafen Hamburg bereitgestellt.

### *Flughafenleitstand*

Für die Arbeiten im Bereich Total Airport Management, war die Nutzung eines Leitstandes vorgesehen. In enger Zusammenarbeit mit den Partnern der Testplattform konnten entsprechende Voraussetzungen durch den Ausbau der ARIF und die Möglichkeit der gemeinsamen Nutzung des Contingency Raumes geschaffen werden.

### I - 3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Einteilung des Leuchtturmprojekts in die Hauptarbeitspakete 1-5 und deren Verknüpfung stellen sich wie folgt dar:

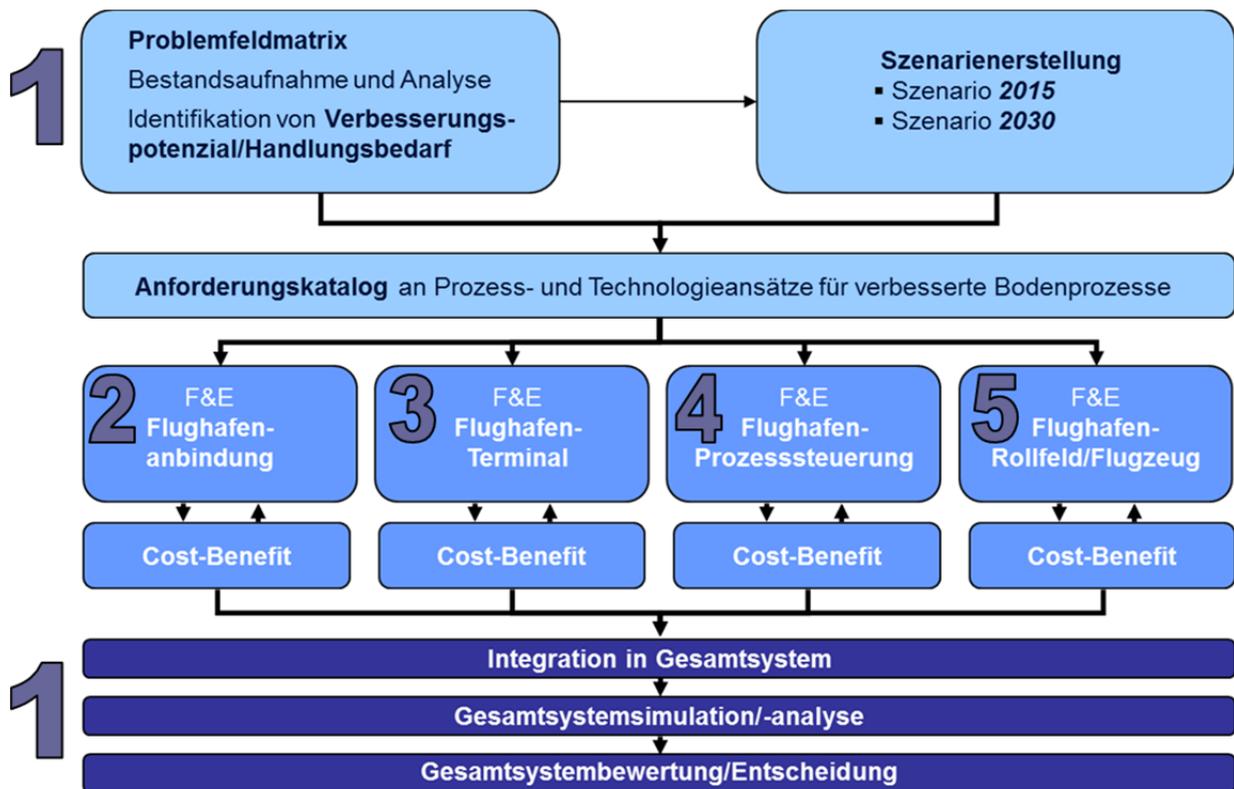


Abbildung 1: Organisations- und Ablaufplan des Projektes „Effizienter Flughafen 2030“

Die HAPs sind wie folgt untergliedert, wobei die Arbeitspakete mit Beiträgen seitens des DLR unterstrichen sind.

#### HAP 1 Analyse, Integration und Bewertung

HAP-Leitung: DLR-LY

- 1.1 Koordination/Synthese
- 1.2 Problemfeldmatrix
- 1.3 Szenarien 2015/2030
- 1.4 Bewertungskonzept
- 1.5 Simulations-Framework
- 1.6 Modellierung der Flughafen-anbindung
- 1.7 Modellierung der Flughafen-Landseite
- 1.8 Modellierung der Flughafen-Luftseite
- 1.9 Gesamtsystembewertung

## **HAP 2 Effiziente Passagierflusskontrolle**

HAP-Leitung: **TUHH-Telematik**

- 2.1 Anforderungen/Prozessmodell
- 2.2 Entwicklung einer digitalen Boarding-Unterstützung
- 2.3 Terminalpassagierfluss-Simulation
- 2.4 Einsatz der Boarding-Unterstützung in der Flugzeugkabine
- 2.5 Demonstration am Flughafen Hamburg
- 2.6 Technische Bewertung
- 2.7 Cost-Benefit-Analyse (Teilsystem)

## **HAP 3 Hochautomatisierte Prozesssteuerung**

HAP-Leitung: **DLR-FL**

- 3.1 Betriebskonzept/Entwicklung Flughafen-Leitstand
- 3.2 Simulation/Test Flughafen-Leitstand
- 3.3 Betriebskonzept/Entwicklung eines Groundhandling-Arbeitsplatzes
- 3.4 Simulation/Test eines Groundhandling-Arbeitsplatzes
- 3.5 Betriebskonzept/Entwicklung eines Vorfeldkontroll-Leitstands
- 3.6 Simulation/Test eines Vorfeldkontroll-Leitstands
- 3.7 Cost-Benefit-Analyse (Teilsystem)

## **HAP 4 Flugzeugkonfig. für eff. Bodenoperationen**

HAP-Leitung: **MB&P**

- 4.1 Flugzeugkonfiguration für Szenario 2015
- 4.2 Flugzeugkonfiguration für Szenario 2030
- 4.3 Bodeninfrastruktur für Szenario 2030

## **HAP 5 Optimierte Erreichbarkeit des Flughafens**

HAP-Leitung: **TUHH-Logistik**

- 5.1 Gesamtverkehrsmodell Passagiere/Fracht für die Flughafenanbindung
- 5.2 Prognoseszenarien einer optimierten Flughafenanbindung

#### I - 4 Wissenschaftlich/technischer Stand - Anknüpfungspunkt

Das starke Wachstum des Luftverkehrs führt dazu, dass an einer stetig zunehmenden Anzahl von Flughäfen zeitweilig das Kapazitätslimit überschritten wird (vor allem bei wetterbedingten Störungen) und es in der Folge zu Verspätungen und Unregelmäßigkeiten im Betrieb kommt.

Eine große Anzahl an Projekten adressierte bereits die Optimierung der Prozesse am Flughafen und der Entwicklung und Einführung neuer Technologien zur verbesserten Steuerung. Beispielhaft sollen hier die integrierten DLR-geführten Projekte ASSET ([www.asset-project.eu](http://www.asset-project.eu)), BETA ([www.dlr.de/beta](http://www.dlr.de/beta)) und EMMA ([www.dlr.de/emma](http://www.dlr.de/emma)) genannt werden. In BETA und EMMA ist es gelungen, die Rollführung auf dem Vorfeld durch die Entwicklung eines A-SMGCS sicherer und effizienter gestalten zu können. Weitere Ansätze zur Verbesserung der Prozesse auf der Luftseite des Flughafens umfassen die Kontrolle und den gezielten Ressourceneinsatz der Vorfeldfahrzeuge. Diese Arbeiten sind Bestandteil der Projekte CARMA (Car Management on Aprons) des Hamburger Luftfahrtforschungsprogrammes und WFF (Wettbewerbsfähiger Flughafen) des Bundesluftfahrtforschungsprogrammes (LUFO IV).

Bislang lag der Fokus der Forschungsarbeiten auf der Flughafen-Luftseite vorwiegend auf der Entwicklung der Technologiehard und -software und der Prozessausarbeitung. Als fehlendes Glied in der Kette hat sich die Darstellung der Informationen in einem Leitstand erwiesen. Die einfache Lösung, neue Informationen auf neu hinzugefügten Monitoren darzustellen, hat sich als suboptimal herausgestellt. Ziel der aktuellen Forschung ist daher eine intelligente Einbindung der zusätzlichen Informationen in vorhandene Leitstände, um letztlich integrierte Arbeitsplätze zu schaffen, die die Nutzung des vollständigen Potenzials an Effizienz- und Sicherheitsgewinn ermöglichen.

Auf dem Gebiet der Passagierflusssteuerung im Flughafen-Terminal existieren mikroskopische Agenten-basierte Software-Modelle zur Simulation von Passagierströmen. Diese wurden in diesem Projekt angepasst und angewandt, um die Auswirkungen von Indoor-Navigationssystemen auf den Passagierfluss zu untersuchen.

Die Erforschung neuer Luftfahrzeugkonfigurationen ist im Allgemeinen durch die Reduzierung von Kosten oder der Umweltwirkung bezogen auf die Transportmission motiviert. Schlüsselfaktoren sind hier die Effizienz des Antriebs, die Masse des Luftfahrzeugs, seine aerodynamische Effizienz sowie die Lärmcharakteristik. Im vorliegenden Projekt wurden insbesondere die unterschiedlichen Ziele der Effizienz im Reiseflug und die Kompatibilität mit den Bodenprozessen adressiert.

Zur Steigerung der aerodynamischen Effizienz sind seit längerer Zeit sog. „Drei Flächen Flugzeuge“ in der Diskussion. Diese entsprechen konventionellen Drachenkonfigurationen, die mittels eines Canard Flügels in der Lage sind, den Widerstand des getrimmten Flugzeugs zu reduzieren. Eine erheblich stärkere Verbesserung der aerodynamischen Effizienz kann durch sog. Joint Wing oder Box Wing Konfigurationen erreicht werden. Hierbei handelt es sich um Konfigurationen mit konventionellem Rumpf und zwei Paaren Tragflügel, die Pfeilungen unterschiedlichen Vorzeichens aufweisen und mittels einer vertikalen Fläche

an ihren Enden verbunden sind. In diesem Projekt werden Blended-Wing-Body (BWB) Konfigurationen, bei denen Rumpf und Flügel fließend ineinander integriert sind, im Hinblick auf ihre Effizienz im Reiseflug und ihre Flughafenkompatibilität untersucht. Wesentliche Erkenntnisse liegen hier aus dem EU-Projekt VELA vor.

Das Projekt folgt insgesamt einem Systems Engineering Ansatz (Status/Problem-Analyse, Szenario-Entwicklung, Anforderungen, konzeptionelle System-Entwicklung und Bewertung).

### **I - 5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Innerhalb des Projektes „Effizienter Flughafen 2030“ und darüber hinaus im Airport2030 Projekt-Verbund gab es eine enge Zusammenarbeit zwischen allen Projektpartnern. Dies sind im Einzelnen:

- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
  - Institut für Lufttransportsysteme
  - Institut für Flugführung
  - Institut für Flughafenwesen und Luftverkehr
- Flughafen Hamburg GmbH
- Airbus Operations GmbH
- Siemens AG
- mb + Partner
- Technische Universität Hamburg-Harburg
  - Institut für Telematik
  - Institut für Verkehrsplanung und Logistik
- Universität Hamburg
  - Institut für Technische Informatik Systeme
- Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
  - Aircraft Design and Systems Group (AERO)

Den Austausch zwischen den Partnern des Verbundprojektes und die Erreichung der Projektziele hat das DLR als Koordinator durch alle sechs Monate stattfindende Verbundsitzungen gefördert. Darüber hinaus wurde durch das DLR eine Sharepoint-Teamsite eingerichtet, um den effizienten Austausch von Dokumenten zu fördern. Für die Information des Projektträgers, des Hamburger Cluster-Managements und der Projektpartner untereinander wurden ergänzend zu den Zwischenberichten der Partner partnerübergreifende Verbundberichte erstellt.

Bei den Experteninterviews im Rahmen der Problemfeldmatrix und bei der Entwicklung der Szenarien im HAP 1 wurden jeweils Experten der Partner konsultiert und mit einbezogen.

Im HAP 2 fand ein reger Austausch mit den Hardware-Entwicklern der DigiBA im Institut für Telematik der Technischen Universität Hamburg-Harburg statt, um die Funktionalität der DigiBA im Bereich der Indoor-Navigation und des Informationsdienstes der DigiBA in der Schnellzeitsimulation des DLR realistisch nachzubilden. Hierbei war das Institut für

Flughafenwesen und Luftverkehr des DLR ebenfalls auf die Unterstützung der FHG angewiesen, um ein aktuelles Simulationsmodell des Flughafens Hamburg zu erstellen.

Für die Entwicklungen im HAP 3 spielte die Early Demonstration and Evaluation Plattform (eDEP) der Eurocontrol eine wesentliche Rolle. Aufbauend auf dem Basispaket der Eurocontrol wurden für die drei Themenbereiche Groundhandling, Vorfeld und Leitstand Anpassungen und Ergänzungen vorgenommen. Für die Nutzung der Basissoftware wurde mit der Eurocontrol ein entsprechendes Lizenzabkommen unterzeichnet, das die Nutzung und Weiterentwicklung der eDEP regelt.

Im HAP-4 erfolgte eine enge Zusammenarbeit im Hinblick auf Flugzeugentwurfsverfahren und die Flughafenkompatibilität von Flugzeugentwürfen mit der Aircraft Design and Systems Group (AERO) der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, dem Future Projects Office der Airbus Operations GmbH und dem KMU MB&P.

Der Test von prototypischen Entwicklungen erfolgte insbesondere im HAP 3 beim Flughafen Hamburg, wofür naturgemäß eine intensive Planung und Abstimmung erforderlich war.

Die Gesamtsystembewertungskette wurde gemeinsam mit dem Institut für Technische Informatik-Systeme der Universität Hamburg und dem Institut für Verkehrsplanung und Logistik der TUHH entwickelt. Bei Bewertungsfragen wurde insbesondere auch der Flughafen Hamburg eingebunden.

## II Eingehende Darstellung

### II - 1 Erzielte Ergebnisse

#### II - 1.1 Analyse, Integration und Bewertung – Problemfeldmatrix, Szenarien und Anforderungen

Der Ablauf des Projektes „Effizienter Flughafen 2030“ folgt einem Systems Engineering Ansatz unter Leitung des DLR Instituts für Lufttransportsysteme, wie er im Organisations- und Ablaufplan in Abbildung 1 dargestellt ist. Deshalb haben die Forschungsarbeiten mit der Erstellung einer Problemfeldmatrix und der Entwicklung von Zukunftsszenarien begonnen. Diese beiden Aktivitäten waren die Grundlage für die Erstellung eines Anforderungskataloges, der in die Technologieentwicklung der HAPs 2-5 eingeflossen ist, und die Technologiebewertung in der Schlussphase des Projektes.

##### II - 1.1.1 *Problemfeldmatrix*

Die Erstellung einer Problemfeldmatrix definiert sich in der Zuordnung von Problemstellungen zu Prozessen oder Prozessketten. Das Aufzeigen von Wechselwirkungen, Querverbindungen und Ursachen verschiedener projektrelevanter Prozesse und Problemstellungen vereinfacht die Erstellung operationeller und funktionaler Technologieanforderungen an die zu entwickelnden Technologien.

##### II - 1.1.1.1 *Prozessbegriff*

Ein Prozess kann definiert werden als eine Aktivität, für die bestimmte Ressourcen benötigt werden und die koordiniert wird, um aus Inputs gezielte Outputs zu generieren. Ein Prozess wird als ein koordinierter Ablauf zum Zweck der Funktionserfüllung eines Flughafens mit allen dazugehörigen Akteuren und Infrastruktureinrichtungen betrachtet. Dabei spielen insbesondere primäre Prozesse eine Rolle, die der direkten Abfertigung verkehrlicher und betrieblicher Art dienen und bei denen der Passagier und sein Gepäck oder das Fluggerät im Mittelpunkt stehen [35]. Dabei kommt es für den Flughafenbetreiber darauf an, die Dispositionshoheit der Ressourcen zu wahren, eine gleichmäßige Infrastrukturauslastung zu gewährleisten und ein festgelegtes Service- und Qualitätslevel vorzuhalten. Genauer geht es um das Einhalten eines bestimmten Komfortniveaus für den Fluggast sowie die Umsetzung von Individualwünschen der Fluggesellschaften, sofern umsetzbar. Hierfür sind Randbedingungen zu beachten, die Einfluss auf die Prozessoptimierung nehmen. Dies sind beispielsweise (Non-) Aviation Kosten und Erlöserwartungen, operationelle Anforderungen sowie Sicherheitsanforderungen und behördliche Auflagen. Vor dem Hintergrund des Tagesgeschäftes aber auch der Herausforderung der mittel- und längerfristigen Strategieplanung werden auch Prozesse abgebildet werden, die nur indirekt mit der Abfertigungsaufgabe gekoppelt sind und daher vielmehr der Managementebene entsprechen. Diese Prozesse werden als Sekundärprozesse klassifiziert. Die

Prozessbeschreibung erfolgte nach dem Schema in Abbildung 2. Die Aufführung jedes Einzelprozesses in dieser Form wäre in diesem Bericht jedoch zu umfangreich, so dass im nächsten Kapitel eine Zusammenfassung der identifizierten Prozesse und Problemstellungen erfolgt.

<p><b>PROZESSNAME</b></p> <p><b>Klassifizierung:</b> Primär- oder Sekundärprozess</p> <p><b>Fokus:</b> Im Fall eines Primärprozesses liegt der Fokus auf einem „abzufertigenden Gut“, z.B. Passagier oder Flugzeug.</p> <p><b>Beschreibung/Definition:</b> Beschreibung des Prozesses. Hier werden ggf. Teilprozesse benannt und beschrieben, die dem jeweiligen Hauptprozess per Definition zuzuordnen sind.</p> <p><b>Differenzierung:</b> Eine Differenzierung erfolgt anhand eines unterschiedlichen Fokus und/oder unterschiedlicher Angebotsstrukturen seitens der Flughafengesellschaft</p> <p><b>Prozessor/Technologie:</b> Erläuterung der für den Haupt- oder die Teilprozesse verwendeten Prozessoren bzw. Technologien am Flughafen.</p> <p><b>Organisationseinheit:</b> Gibt an, welcher Geschäftsbereich die Flughafen-bezogenen Aufgaben als Prozessteil verantwortlich zeichnet.</p> <p><b>Problemstellungen:</b> Es wird die Problemstellung erläutert, die anhand der Interviews erfragt werden konnten und in Zusammenhang mit diesem Prozess stehen.</p>
--

**Abbildung 2: Form der Prozessbeschreibung in der Problemfeldmatrix**

### II - 1.1.1.2 Übersicht der ermittelten Prozesszusammenhänge

Zur Erfassung der Betriebsabläufe des Flughafens sowie der für die Bodenprozesse erforderlichen Flugzeugkomponenten wurden im Zeitraum vom 13.07.2009 bis 28.08.2009 13 Experteninterviews von jeweils ca. 2,5 Stunden Dauer mit 16 Interviewpartnern durchgeführt. Im Folgenden wird eine Übersicht der Interview-Ergebnisse für die Bereiche Terminalmanagement, Flugbetrieb und Groundhandling gegeben.

#### Terminalmanagement

Die folgende tabellarische Darstellung zeigt alle aufgezählten Prozesse sowie die entsprechenden Problemstellungen im Bereich Terminalmanagement im Überblick.

**Tabelle 1: Prozesszusammenfassung Terminalmanagement**

Zusammenfassung der identifizierten Prozesse und Problemstellungen		
Org.-Einheit	Prozess	Problemstellung
Terminal Management	Passagier Check-In	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flight Check-In: hohe Flexibilität In der Personaldisposition gefordert</li> <li>• Fehlende Standards Bedienoberflächen Check-In Automaten</li> <li>• kurze Minimum Check-In time (Stand: 2009)</li> </ul>
	Gepäckabfertigung Outbound	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kurze Minimum Check-In time in Verbindung mit einer ggf. notwendigen Gepäckzusammenführung (Stand: 2009)</li> </ul>
	Gepäckabfertigung Outbound Transit	
	Gepäckabfertigung Inbound	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine Passagierinformationen über Gepäckstatus (insbesondere Gepäckmitnahme vom Startflughafen)</li> </ul>
	Zentrale Sicherheitskontrolle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kurze Kontrollspuren (Frankfurter Modell) erfordert schnelles Agieren der Passagiere</li> <li>• Automatisierte Überwachung und Optimierung der Prozessorqualität schwierig zu realisieren (BR)</li> </ul>
	Passkontrolle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ständige Disposition von Wechselgates erforderlich (kein separater Transitbereich)</li> <li>• Einschränkung Dispositionsfreiheit</li> <li>• Teils sehr kurzfristige Gatedisposition notwendig</li> <li>• Gefahr der Schliessung der kompletten Pier (Durchmischung Clean/Unclean PAX)</li> </ul>
	Zollkontrolle Inbound	
	(De-)Boarding	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ungleichmäßige Ausstattung Gates (Doppelspur, Bügel)</li> <li>• Individualgestaltung der Gates nicht möglich</li> <li>• Off-Block Verspätung meist bedingt durch vorhergegangene Delay On-Block Verspätung</li> </ul>
	Fluggastsonderbetreuung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine Voranmeldezeiten, ggf. keine Ressourcen vorhanden</li> </ul>
	Vermarktung/Vermietung von Flächen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Derzeit keine Preisabsatzfunktion als Grundlage eines Flächennutzungskonzeptes mit max. Wertschöpfung im Non-Aviation Bereich</li> </ul>
	Passagierlenkung/Fluggaststeuerung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Derzeit keine bidirektionale Schnittstelle zum Passagier vorhanden</li> <li>• Keine Erfassung von Passagierverhalten, keine Echtzeitinformationen über die Ausnutzung einzelner Prozessoren im Bereich Terminalmanagement</li> <li>• Effektive Passagierlenkung vor der Sicherheitskontrolle kaum durchführbar (entsprechend Stresskurve)</li> <li>• Hohe Passagiersensibilität in Bezug auf Werbebotschaften</li> </ul>

Einen hohen Einfluss auf den Passagierfluss nehmen die Prozesse, in deren Fokus der Passagier selbst steht. Zeitliche Abhängigkeiten weisen hier insbesondere Check-In, Sicherheitskontrolle und Boarding auf. Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Prozessketten im Terminalbetrieb auf. Grau hinterlegt sind Sekundärprozesse.

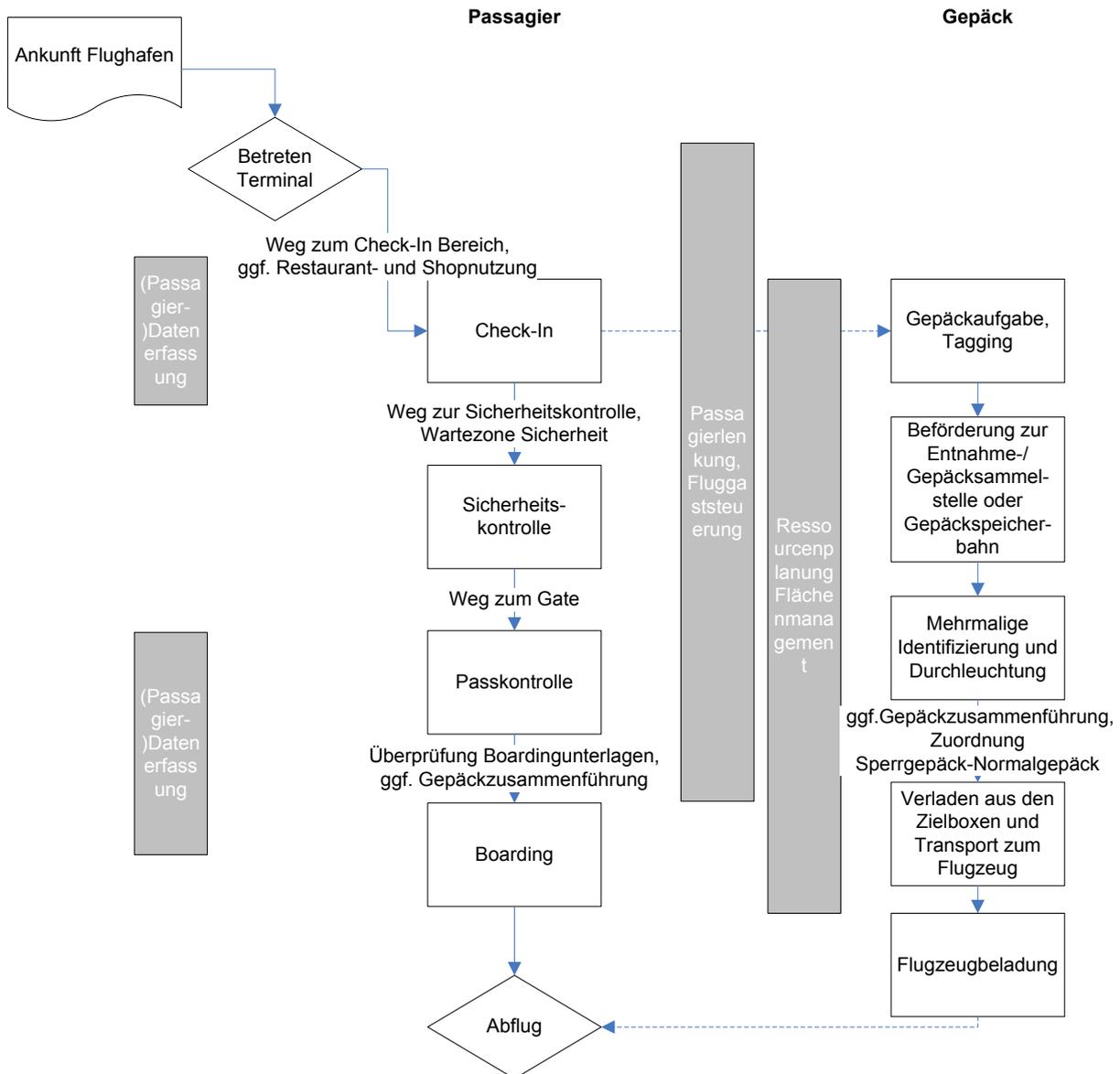


Abbildung 3: Prozesskette Passagier Outbound

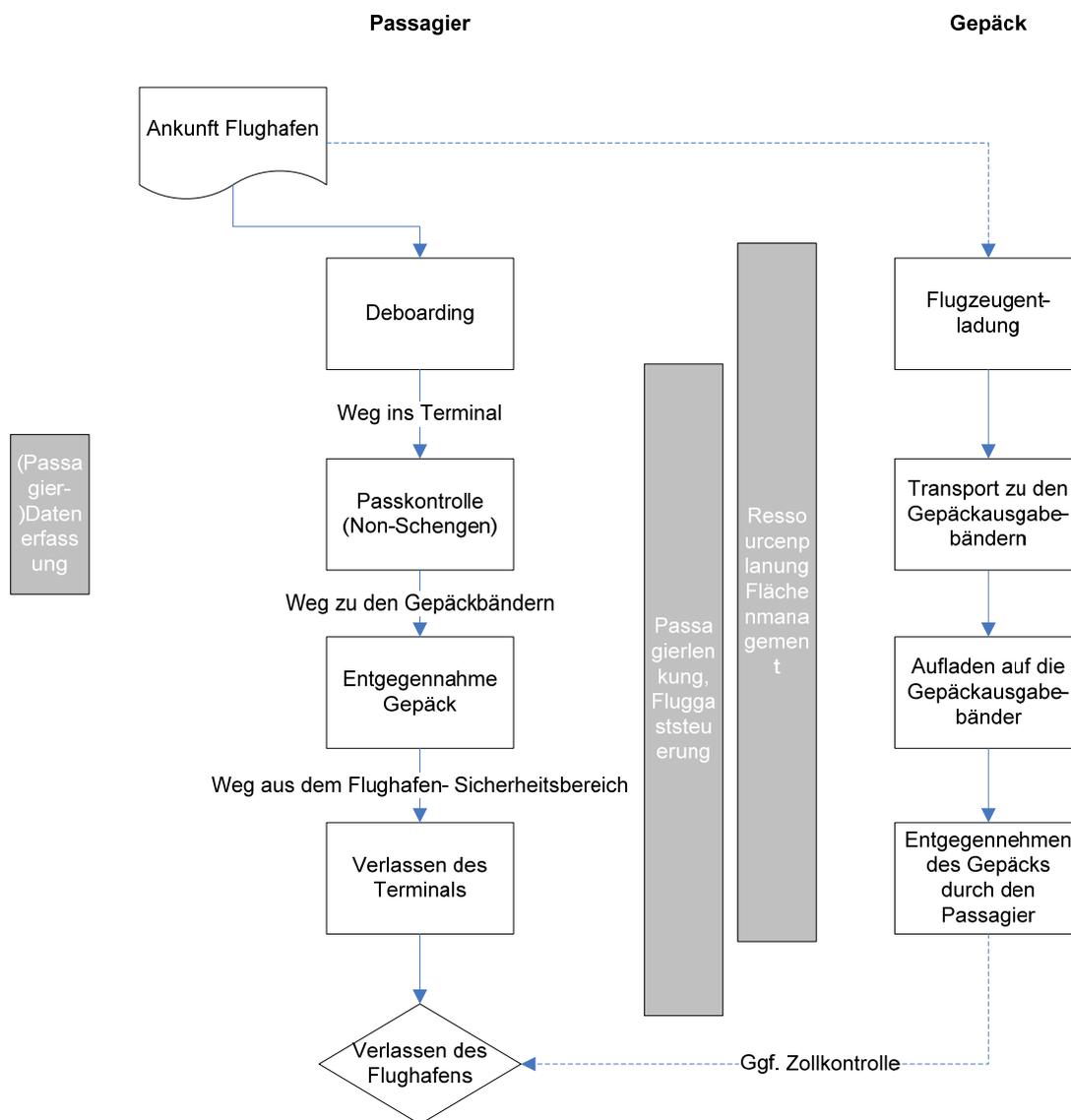


Abbildung 4: Prozesskette Passagier Inbound

Die Prozesse sind weniger von konkreten Abhängigkeiten als vielmehr von gegenseitiger Einflussnahme gekennzeichnet, d.h. sie verlaufen weitestgehend unabhängig voneinander, jedoch wird jeder Prozess in sich durch die Leistung der anderen Prozesse beeinflusst (Tabelle 2). Die Messbarkeit der Prozessleistungen der Primärprozesse orientiert sich an der Prozessqualität, insbesondere bei sicherheitsrelevanten Prozessen, sowie an der Kapazität (Passagierdurchsatz) und dementsprechend der zeitlichen Optimierung des Prozessablaufes. Insbesondere stellt sich der Boarding-Prozess als äußerst sensibel dar, da dieser am Ende der Outbound-Prozesskette im Terminal abhängig von sechs Vorläuferprozessen ist und zusätzlich mit den Prozessen der Bodenabfertigung koordiniert werden muss.

**Tabelle 2: Abhängigkeiten und Einflussnahme von Prozessen des Terminalmanagements**

	Check-In	Gepäck-abfertigung	Sicherheits-kontrolle	Passkontrolle	Zollkontrolle Inbound	Boarding	Deboarding	Fluggast-sonderbe-treuung	Vermarktung/Vermietung von Flächen	Passagier-lenkung
Check-In								X	X	X
Gepäck-abfertigung	X		X							
Sicherheits-kontrolle	X							X		X
Passkontrolle										
Zollkontrolle Inbound										
Boarding	X	X	X	X				X		X
Deboarding								X		
Fluggast-sonderbetreu-ung										
Vermarktung/Vermietung von Flächen										X
Passagier-lenkung									X	

Abhängigkeiten zu den Prozessen der landseitigen Anbindung sowie der Bodenabfertigung ergeben sich in erster Linie an den Randprozessen Check-In (Minimum Check-In) und (De)Boarding, wobei auch hierbei der Passagierfluss und die zeitliche Optimierung eine zentrale Rolle einnehmen. Die Abstimmung zwischen Dispatcher und Bodenabfertigung an der Position bestimmt in besonderem Maße die Schnittstelle zwischen Terminalbetrieb und Bodenabfertigung.

### Flugbetrieb

Die Prozesse im Bereich Flugbetrieb betreffen die verkehrliche Abfertigung sowie die Ressourcenplanung und Datenbearbeitung und nehmen daher großen Einfluss auf luftseitige Abläufe, insbesondere auf die der Bodenabfertigung. Grundlage ist der Flugplan, der für jede Flugplansaison erstellt wird. Darauf aufbauend werden Tagesverlaufs-Grundpläne erstellt. Diese Pläne unterliegen über den Tag ständigen Änderungen, bedingt durch zeitliche Engpässe, spezielle Kundenwünsche und unzureichendem Informationsfluss. Insbesondere verspätete Inbound Flüge erfordern eine zügige Umplanung. Hinzu kommt, dass bedingt durch Service Level Agreements, geringe Verspätungen vom Flughafen entgeltfrei aufgefangen werden müssen. Erhöhte Ressourcenansprüche auf Flughafenseite gehen dann i.d.R. auf Kosten anderer flugereignisgebundener Prozesse. Der Bereich Flugbetrieb unterliegt einem hohen Integrationsniveau und erfährt dadurch einen steuernden Charakter am Flughafen.

**Tabelle 3: Prozesszusammenfassung Flugbetrieb**

Zusammenfassung der identifizierten Prozesse und Problemstellungen		
Org.-Einheit	Prozess	Problemstellung
Flugbetrieb	Stammdatenerfassung und -pflege	<ul style="list-style-type: none"> <li>Keine zwingende Informationsweitergabe an Flughäfen bzgl. Änderungen von LFZ Stammdaten</li> </ul>
	Flugbetriebsabwicklung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sehr hohe Anforderungen an die Dispositionsflexibilität</li> <li>Einhaltung eines Tagesverlaufs-Grundplans i.d.R. nicht durchführbar</li> <li>Keine zwingende Informationsweitergabe im Falle eines kurzfristigen Flugzeugwechsels</li> </ul>
	Überwachung/Steuerung der Betriebsicherheit	
	Ressourcenplanung und -disposition/Flugplanerarbeitung und -analyse	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nichteinhaltung von Dispositionsempfehlungen (Check-In Schalter) seitens Handling Agenten</li> <li>Teils Schaffung von Überkapazitäten</li> <li>Keine Verlässlichkeit von Passagierzahlen internationaler Inbound Flüge</li> </ul>
	Datenspeicherung Flugereignisse/Verkehrsdatenauswertung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Veraltetes Datenspeicherungssystem</li> <li>Passagierdaten ausschliesslich anonymisiert an Flughafen weiter gegeben</li> </ul>

### Groundhandling

Dem Groundhandling lassen sich keine typischen Prozessketten zuordnen, da die Ablauffolge hochgradig dynamisch ist und Prozesse teilweise parallel ablaufen (Tabelle 4). Es werden zwar zeitliche Vorgaben gegeben, die jedoch aufgrund unterschiedlicher Randbedingungen (z.B. Flugzeugtyp, Position, benötigtes Equipment etc.) nicht immer eingehalten werden können. Abbildung 5 zeigt ein Referenzmodell der Bodenabfertigung (B737, CRJ, AR8/BAe, LH Regional) mit einer Minimum Ground Time von 25 Minuten [2]. Zu erkennen sind Pufferzeiten in Abhängigkeit des Flugzeugtyps und des jeweiligen Prozesses.

**Tabelle 4: Prozesszusammenfassung Groundhandling**

Zusammenfassung der identifizierten Prozesse und Problemstellungen		
Org.-Einheit	Prozess	Problemstellung
Ground Handling	Landung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ggf. starke Seitenwindkomponente, Wind Shear, Vertikalwinde</li> </ul>
	Rollen zur Position	
	Administrative Abfertigung am Boden	<ul style="list-style-type: none"> <li>Keine zentralisierte Steuerung der Bodenabfertigung</li> <li>Differierende Vertragswerke zwischen Fluggesellschaften und Dienstleistern</li> <li>Rentabilität im Bereich der Bodenabfertigung erfordert eine hohe Profitabilität der Personalplanung ("Kappen der Spitzen")</li> </ul>
	Flugzeugver- und Entsorgung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Unterschiedliche Service Level Agreements zwischen Fluggesellschaften und Dienstleistern</li> <li>Kein Einfluss seitens Ground Handling auf die Disposition von Pierpositionen</li> <li>Längere Boardingzeiten in den Wintermonaten</li> <li>Fehlende Frischwassertankanzeige bei den meisten Flugzeugmustern</li> </ul>
	Flugzeuginnenreinigung	
	Gepäck- und Frachabfertigung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Siehe Flugzeugbe- und Entladung</li> </ul>
	Flugzeugbe- und Entladung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hohe Dispositionsabhängigkeit vom Flugzeugtyp</li> <li>Teils kurzfristige Änderung des Flugzeugtyps</li> <li>Derzeit keine unabhängige Qualitätssicherung</li> <li>Hohe Anforderungen seitens der Airlines (SLA)</li> </ul>
	Payload-, Passagier- und Crewtransporte	
	Flugzeugschlepps und Push-Back	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erhöhte Verkehrsdichte und Dispositionsaufwand</li> <li>Bereitstellung auf Overnight Abstellpositionen</li> </ul>
	Flugzeugenteisung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wetter- und jahreszeitabhängige Schwankungen der Geräteauslastung</li> <li>Verzögerung des Turn-Around</li> </ul>
	Rollen zum Startbahnkopf	
	Startvorgang	
Sichern und Entsichern	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aufklärung (Manipulationsanalyse) bei Siegelbruch erfordert hohen Zeitaufwand und führt zu Verspätungen</li> </ul>	

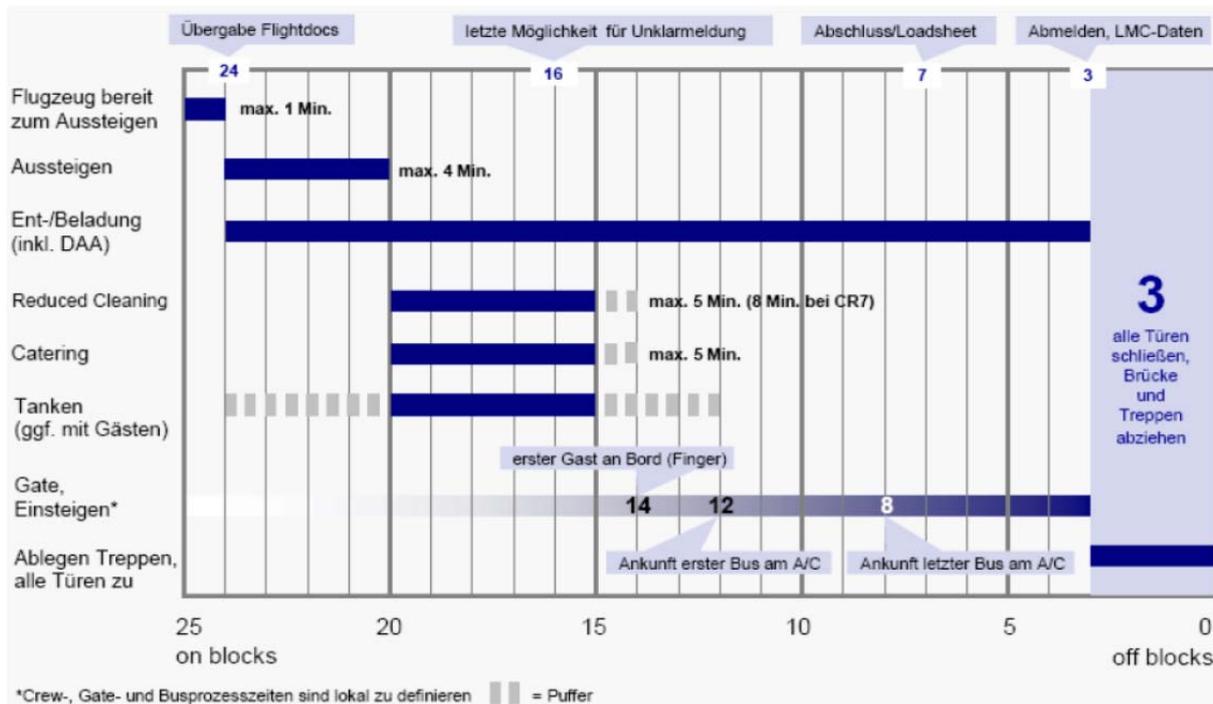


Abbildung 5: Referenzmodell Bodenabfertigung

Zeitlich kritisch und daher ausschlaggebend für die Gesamtleistung der Bodenabfertigung sind das Anfahren der Brücke/Treppen, De/Boarding, Betankung und Catering. Der zeitoptimale Prozessablauf bei effizienter Nutzung flughafenseitiger Ressourcen ist hierbei ausschlaggebend. Alle Prozesse parallel auszuführen ist aufgrund von Nutzung gleicher Ressourcen als auch Beachtung von Regularien nicht möglich. Dies setzt eine effiziente Nutzung von Ressourcen in Abhängigkeit der Position und der Verfügbarkeit voraus. Ein effektives Zusammenspiel der Bereiche Flugbetriebsabwicklung und Bodenabfertigung wird benötigt. An dieser Stelle sei auf das bereits am Flughafen Hamburg abgeschlossene Forschungsprojekt „Carma – Car Management on Aprons“ hingewiesen.

Durch die integrierte Steuerung der anfallenden flugzeugseitigen Prozesse können insbesondere im Bereich Ressourcenmanagement Freiräume geschaffen werden. Eine genaue Umsetzung wurde im weiteren Projektverlauf durch Arbeitsanalysen untersucht. Unterstützt werden kann dieser Ansatz durch die Schaffung technischer Standards in der Ver- und Entsorgung von Flugzeugen, da durch eine Vereinheitlichung von Servicestandards und –technologien ein höherer Grad der Unabhängigkeit von Flugzeugmustern geschaffen werden kann.

### II - 1.1.1.3 Zusammenfassung Problemfeldmatrix

Während der durchgeführten Interviews wurde wiederholt ausgeführt, dass eine Optimierung, insbesondere bei der Herausforderung einer effizienten Disposition von Vorfeldressourcen, in einer zentralisierten Steuerung sowie in der Teilautomatisierung von Vorfeldprozessen liegt. Der Aufwand der Ressourcenplanung in der Bodenabfertigung kann durch eine optimierte Flugzeugkonfiguration positiv beeinflusst werden.

Die Leistungsfähigkeit einer weiteren wichtigen Prozesskette des Terminalmanagement wird insbesondere von der Effizienz der Prozesse Check-In, Sicherheitskontrolle und (De)Boarding gekennzeichnet. Hierbei müssen Anforderungen im Bereich Non-Aviation Revenues mit den Anforderungen des Passagierkomforts abgeglichen werden.

Der Boardingprozess als Schnittstelle zwischen Terminalmanagement und Bodenabfertigung verbindet diese beiden Prozessketten, d.h. dass insbesondere die zeitliche Ablaufgenauigkeit dieses Prozesses Rückschlüsse auf den Gesamtablauf der einzelnen Flughafenkomponenten liefert. Zusammenhänge zwischen weiteren Bereichen werden in erster Linie durch die Leistung der jeweiligen Schnittstellenprozesse charakterisiert. Dies betrifft insbesondere den Check-In Prozess als auch Dispositions- und Kommunikationsprozesse.

## II - 1.1.2 Szenarien 2015/2030

Als Grundlage für die Definition von Anforderungen an die im Projekt zu erforschenden Technologien wurden in Zusammenarbeit mit der TU München basierend auf den ACARE-Szenarien drei Zukunftsszenarien speziell für die lokale Perspektive und den mittelgroßen Flughafen Hamburg entwickelt [1] (Abbildung 6): Gehemmtes Wachstum, Effiziente Technologien (starkes Wachstum), Hochsicherheitszone (Stagnation). Darüber hinaus dienen die Szenarien als Rahmen für die Technologiebewertung im Projekt. Die Erarbeitung der Szenarien erfolgte in Zusammenarbeit mit Experten der anderen Projektpartner in zwei Szenario-Workshops. In den folgenden Diagrammen werden die entwickelten Indikatorverläufe speziell für den Flughafen Hamburg von 2009-2030 dargestellt.

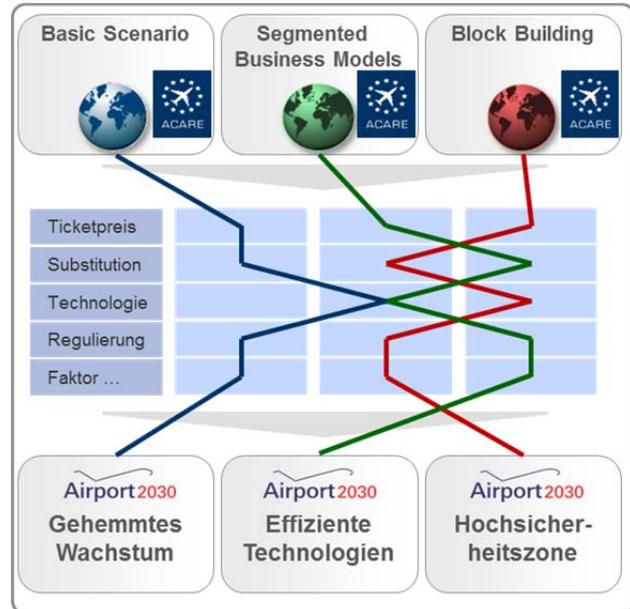


Abbildung 6: Ableitung der Airport2030-Szenarien aus den ACARE-Szenarien

Tabelle 5: Ø jährliche lokale Passagierwachstumsraten in den betrachteten Zeitperioden

Ø2009-2015	Ø2015-2020	Ø2020-2025	Ø2025-2030	Ø2009-2030
2,5%	3,0%	3,5%	3,0%	3,0%
3,5%	5,5%	6,0%	5,2%	5,0%
2,0%	1,0%	0,5%	0,5%	1,0%

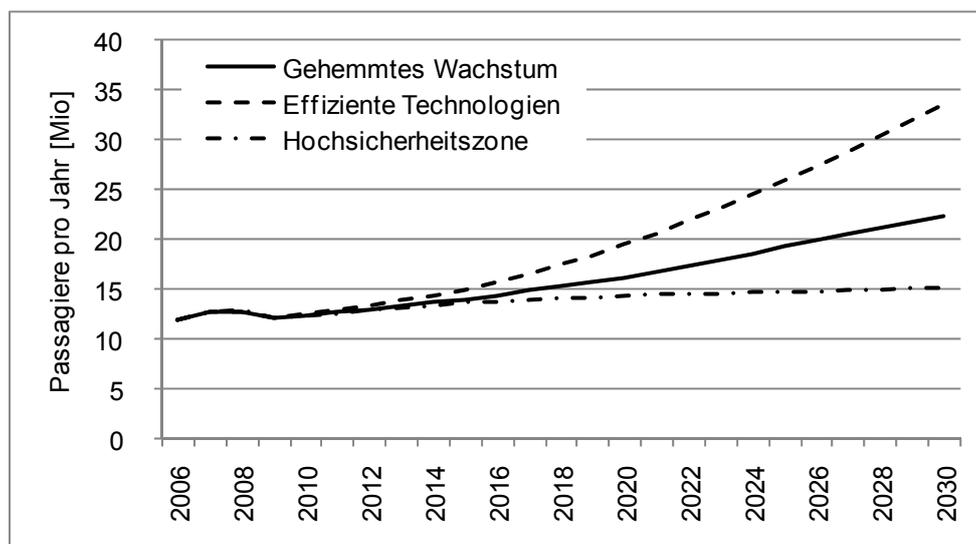


Abbildung 7: Verläufe des lokalen Passagierwachstums in den drei Szenarien

Die entwickelten Szenarien werden mit ihren zentralen Inhalten im Folgenden kurz zusammengefasst.

#### II - 1.1.2.1 Szenario A: „Gehemmtes Wachstum“

Dieses Szenario basiert auf dem ACARE Szenario „Constrained Air Traffic Growth“, das weitgehend moderate Wachstumsraten für die Weltwirtschaft (3 % p.a.) annimmt. Kapazitätsengpässe an Flughäfen verstärken sich trotz technischer und prozessualer Verbesserungen, weil Infrastrukturentwicklungen nur schleppend vorankommen. Dadurch wird das Luftverkehrswachstum gebremst und pendelt sich lokal bei ca. 3 % p.a. ein. Der wachsende Bedarf an Transportqualität führt zu einer erhöhten Anzahl von Point-to-Point Verbindungen und höherer Verkehrsdichte. Ein stark ansteigendes Umweltbewusstsein im Bereich lokaler und globaler Emissionen führt zu einer sowohl durch lokale operationelle Limitierungen als auch durch Entgelte-getriebene Luftfahrtemissionsgesetzgebung. Die Ausdehnung der operationellen Einschränkungen des Flugbetriebs aufgrund des hohen öffentlichen Drucks und der individuellen Sensibilität tragen zur Ausweitung der Kapazitätsproblematik bei. Vor allem tertiäre Flughäfen außerhalb von Ballungsräumen profitieren von dieser Entwicklung, weil sie in ihrem operationellen Betrieb weniger stark eingeschränkt sind und ihnen im Rahmen von Flughafenkooperationen erweiterte Aufgaben zugewiesen werden. Aufgrund der ansteigenden Kaufkraft wachsen Nachfrage und Ansprüche an Service und Komfort (Verkehrsanbindung, Passagierabfertigung, Shopping, etc.) sowohl im Leisure- als auch im Business-Segment moderat weiter.

#### II - 1.1.2.2 Szenario B: „Effiziente Technologien“ (starkes Wachstum)

Dieses Szenario basiert auf dem Szenario „Segmented Business Models“ von ACARE. Nach einer schnellen Überwindung der Finanzkrise in den Jahren 2008-2010 setzt der Globalisierungsprozess wieder in vollem Ausmaß ein und führt zu einem starken lokalen Wachstum von Wirtschaft (3,5 % p.a.) und Luftverkehr (5 % p.a.) bei stabiler politischer und wirtschaftlicher Lage. Das sehr hohe Luftverkehrswachstum erfordert allerdings die verstärkte Nutzung von sekundären und tertiären Flughäfen. Die hohe Investitionsbereitschaft in Technologien zur Steigerung der Energieeffizienz vor allem im stationären Bereich führen ab 2020 zu einer Entkoppelung von Wirtschaftswachstum und Energiebedarf. Die größere Anzahl an Airlines in unterschiedlichen Segmenten und der erhöhte Wettbewerbsdruck in Kombination mit moderaten Kerosinpreisen führen zu einer Stabilisierung der durchschnittlichen Ticketpreise. Passagiere reagieren auf das Preis-Leistungs-Verhältnis von Flugreisen aufgrund der großen Auswahlmöglichkeiten an Airlines und deren angebotenen Leistungen sensitiver.

#### II - 1.1.2.3 Szenario C: „Hochsicherheitszone“ (Stagnation)

Das dritte Szenario basiert auf dem „Block Building“ Szenario von ACARE und zeichnet sich durch ein schwaches Wirtschafts- (1 % p.a.) und Luftverkehrswachstum (1-2 % p.a.) aus. Wirtschaftliche, religiöse und politische Konflikte dominieren die Entwicklung, wodurch der

internationale Handel mit Waren und Dienstleistungen (und damit die gesamte Globalisierung) massiv eingeschränkt werden. Da durch diese Konflikte und den generell erschwerten Zugang zu international gehandelten Gütern auch Öl erneut zum knappen Gut wird, steigen die Energiepreise und verbleiben auf hohem Niveau. Die steigenden Energiepreise sind ebenso für das verlangsamte Wachstum des Luftverkehrs verantwortlich. Vor allem im Bereich der Security Gesetzgebung kommt es aufgrund politischer und religiöser Spannungen zu einer erheblichen Erhöhung des Aufwandes. Das Ticketpreisniveau wird kontinuierlich angehoben, Flugreisen werden daher im Vergleich zum verfügbaren Einkommen teurer. Deshalb wird die Bahn vor allem auf der Kurzstrecke als Verkehrsträger attraktiver. Non-Aviation-Revenues gewinnen für die Flughäfen zunehmend an Bedeutung, weil die durch Flugaktivitäten erzielten Erlöse aufgrund des stagnierenden Luftverkehrs kaum steigen.

### II - 1.1.3 **Anforderungsanalyse**

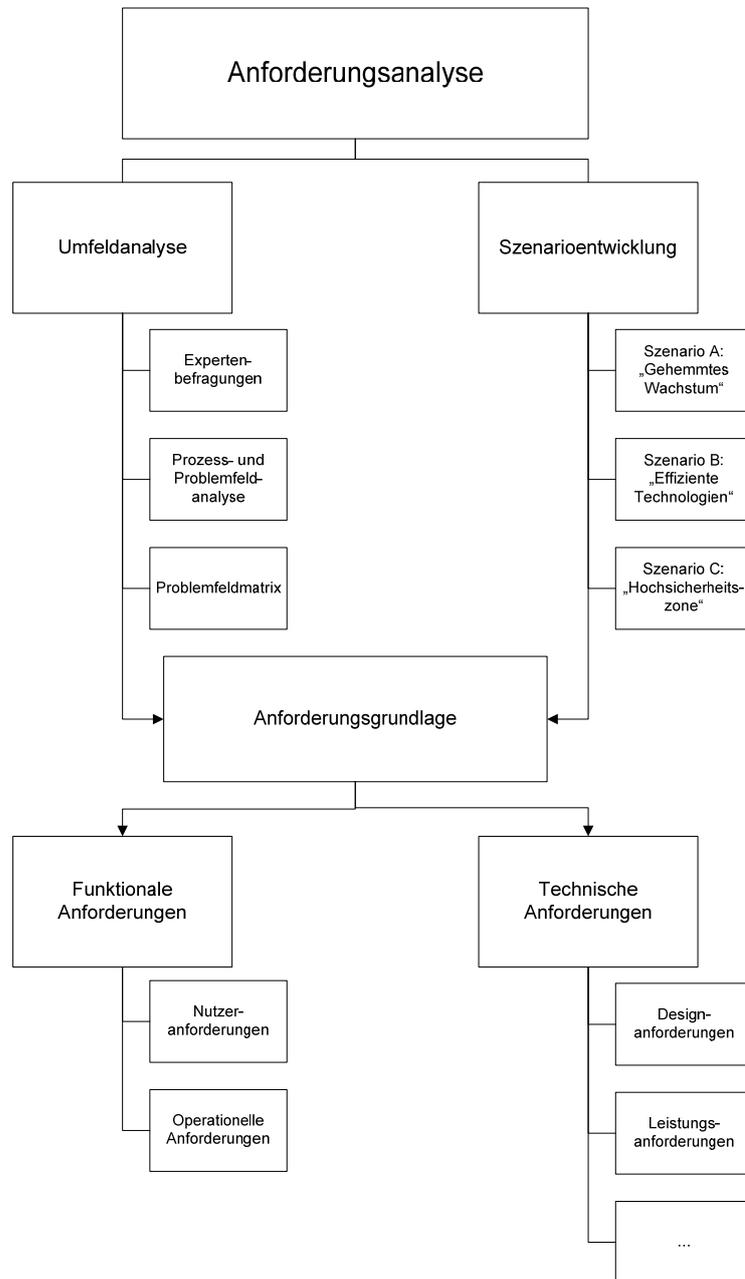
Das Projekt „Effizienter Flughafen 2030“ umfasst die Entwicklung unterschiedlicher Flughafentechnologien. Diese umfassen Technologien und Systementwicklungen in den Bereichen Passagierlenkung im Terminal, hochautomatisierte Flugplatz- und Vorfeldkontrolle, Flugzeugkonfiguration für optimierte Bodenprozesse und landseitige Verkehrsmodellierung. Es sollen Prototypen als auch technische Konzepte entwickelt werden, deren Spezifikationen den vorher zu ermittelnden Anforderungen folgen sollen.

Anforderungen legen fest, welche Funktionalitäten, operationellen Charakteristiken und Architektur einem technischen System oder Prozess zugrunde gelegt werden. Anforderungen sollten eindeutig, prüfbar und messbar sein. Systementwickler sollten daher Systemgrenzen definieren, innerhalb derer die aufgestellten Anforderungen Geltung haben. Diese können u.a. aus der bereitgestellten Problemfeldmatrix abgeleitet werden. In diesem Zusammenhang spielen funktionale Anforderungen seitens der Systemnutzer eine entscheidende Rolle. Zusammen mit technischen Anforderungen wird eine Anforderungsgrundlage erstellt, anhand derer die Technologien im weiteren Vorgehen entwickelt und bewertet werden können.

Die Bewertung der Technologien nimmt bereits bei der Identifizierung der Anforderungen eine Rolle ein. Der Gesamtprozess beginnt mit der Darstellung von Nutzeranforderungen, die sich hauptsächlich auf ökonomische sowie auf funktionale Anforderungen beziehen. Die Festlegung von Effektivitätsgrößen ist Teil der Technologiebewertung und sollte eng mit den Nutzern sowie mit den Entwicklern abgestimmt werden. Weitere Punkte zur Erarbeitung einer Anforderungsgrundlage sind beispielsweise die Definition von technischen als auch HMI-Schnittstellen und die Festlegung von Life-Cycle-Prozessen (Wartungsabläufe etc.).

Die Anforderungen sollen im weiteren Vorgehen in funktionale und in technische Anforderungen eingeteilt werden. Dabei sollen funktionale Anforderungen generelle Nutzeranforderungen als auch spezifische operationelle Anforderungen spezieller Systemanwender, wie z.B. Vorfeldlotsen, enthalten. Sie dienen der Erstellung von technischen Anforderungen, die insbesondere von Systementwicklern aufgestellt werden.

Welche technischen Bereiche durch diese Anforderungen konkret abgedeckt werden, hängt wiederum von den Funktionalitäten, also den funktionalen Anforderungen ab. Technische Anforderungen können beispielsweise Leistungs- und Schnittstellencharakteristiken erfassen. Jeder funktionalen Anforderung können i.d.R. ein oder mehrere Leistungsanforderungen zugeordnet werden, anhand derer festgelegt wird, in welchem technischen Umfang eine bestimmte Funktionalität erfüllt werden muss. Technische Anforderungen bilden anschließend die Grundlage der Bewertung einer bestimmten Technologie. Die folgende Abbildung 8 stellt die erläuterte Vorgehensweise dar. Der Nutzung der erarbeiteten Szenarien im Rahmen der Anforderungsanalyse liegt die Motivation zugrunde, Flughafen-technologien und -systeme für einen längeren Nutzungszeitraum zu konzipieren. Die zu entwickelnden Technologien müssen deshalb gegenüber den erarbeiteten Szenarien robust ausgelegt werden. Es kommt darauf an, welches der drei Szenarien die größten Herausforderungen an die Leistungsfähigkeit der jeweiligen Technologie stellt. Dies ist abhängig von den Ausprägungen der ausschlaggebenden Szenariofaktoren, wie beispielsweise Entwicklungen im Bereich Verkehrswachstum oder Security. Die Entscheidung, welches Szenario individuell als kritisches Referenzszenario verwendet wird, liegt bei den Systementwicklern. Da die Anforderungen als Grundlage weiterer Arbeiten dienen, erhalten sie eine Kennung, um spätere Zuordnungen zu ermöglichen. Die Kennung entspricht der Systematik von Tabelle 6 und Tabelle 7.



**Abbildung 8: Ableitung von Anforderungen**

Herausforderungen an die Leistungsfähigkeit der jeweiligen Technologie stellt. Dies ist abhängig von den Ausprägungen der ausschlaggebenden Szenariofaktoren, wie beispielsweise Entwicklungen im Bereich Verkehrswachstum oder Security. Die Entscheidung, welches Szenario individuell als kritisches Referenzszenario verwendet wird, liegt bei den Systementwicklern. Da die Anforderungen als Grundlage weiterer Arbeiten dienen, erhalten sie eine Kennung, um spätere Zuordnungen zu ermöglichen. Die Kennung entspricht der Systematik von Tabelle 6 und Tabelle 7.

**Tabelle 6: Kennung Funktionale Anforderungen**

Kennung	Anforderung	Erläuterung/Kommentar
Funk_DigiBa_xx	Funktional Digitale Boardingassistenz (Generell)	Funktionale Anforderung
Funk_GHA_xx	Funktional Ground Handling Arbeitsplatz	Funktionale Anforderung
Funk_VKA_xx	Funktional Vorfeldkontroll-Arbeitsplatz	Funktionale Anforderung
Funk_FHL_xx	Funktional Flughafenleitstand	Funktionale Anforderung
Funk_FK2015_xx	Funktional Flugzeugkonfiguration 2015 (FHG)	Funktionale Anforderung
Funk_FK2030_xx	Funktional Flugzeugkonfiguration 2030 (FHG)	Funktionale Anforderung
Funk_GroLas_xx	Funktional Bodeninfrastruktur für fahrwerklose Flugzeugkonfiguration 2030	Funktionale Anforderung
Funk_GVM	Funktional Gesamtverkehrsmodell	Funktionale Anforderung

**Tabelle 7: Kennung Technische Anforderungen**

Kennung	Anforderung	Erläuterung/Kommentar
Tech_DigiBa_Arch	Systemarchitektur	Technische Anforderung
Tech_DigiBa_Perf	Systemleistung	Technische Anforderung
Tech_DigiBa_HMI	Mensch-Maschine-Schnittstelle	Technische Anforderung
Tech_GHA_xx	Technisch Ground Handling Arbeitsplatz	Technische Anforderung
Tech_VKA_xx	Technisch Vorfeldkontroll-Arbeitsplatz	Technische Anforderung
Tech_FHL_xx	Technisch Flughafenleitstand	Technische Anforderung
Tech_FK2015_xx(-xx)	Technisch Flugzeugkonfiguration 2015	Technische Anforderung
Tech_FK2030_xx	Technisch Flugzeugkonfiguration 2030	Technische Anforderung
Tech_GroLas_xx	Technisch Bodeninfrastruktur für fahrwerklose Flugzeugkonfiguration 2030	Technische Anforderung
Tech_GVM_xx	Technisch Gesamtverkehrsmodell	Technische Anforderung

Der detaillierte Anforderungskatalog überschreitet den Umfang dieses Dokumentes. Insgesamt wurden 8 Technologiefelder abgedeckt, für die insgesamt 82 funktionale und 76 technische Anforderungen ermittelt wurden. Die folgende Tabelle 8 führt beispielhaft funktionale Anforderungen für den Groundhandling-Arbeitsplatz auf.

**Tabelle 8: Funktionale Anforderungen Groundhandling-Arbeitsplatz**

Funktionale Anforderungen Groundhandling Arbeitsplatz		
Kennung (Req. Nummer)	Requirement	Kommentar
<b>Personalplanung</b>		
Funk_GHA_01	Das System sollte die multifunktionale Einsetzbarkeit von Groundhandling-Personal unterstützen.	
<b>Funktionalitäten</b>		
Funk_GHA_03	Das System soll eine Integration wesentlicher Funktionalitäten aktueller Systeme darstellen.	
Funk_GHA_04	Das System soll in der Lage sein, bestehende Auftragszuweisungen zu <ul style="list-style-type: none"> <li>• ändern</li> <li>• Annullieren</li> <li>• Ressource ändern</li> </ul> Kurzfristige Änderung von Positionen/Zeiten	
Funk_GHA_05	Das System soll automatisch einen anstehenden Abfertigungsprozess erkennen Inbound: 60 Miles (Änderung bei Einführung von Airport-CDM) Outbound Anbindung an das URI System	
Funk_GHA_06	Es sollen Informationen zwischen Einsatzzentrale und Fahrzeug per Datenlink ausgetauscht werden.	Reduzierung des hohen Anteils an Sprechfunk
Funk_GHA_07	Das System/der Fahrer soll fahrzeugseitig Zeitstempel aufzeichnen und an die Disposition weitergeben.	Einfache Eingabe von Abfertigungsschritten oder automatisierte Erkennung von Meilensteinen
Funk_GHA_08	Das System soll eine geeignete Ressource für die Abfertigung vorschlagen.	Auf Basis verschiedener (noch festzulegender) Kriterien
<b>HMI</b>		
Funk_GHA_09	Informationen über Flüge und Fahrzeuge sollen in Labels enthalten sein.	
Funk_GHA_10	Das System soll eine Darstellung der Zuweisung von Aufträgen beinhalten.	Farb-Codierung über Zuweisung (Disponent) und Akzeptanz(Fahrer)
Funk_GHA_11	Das System soll eine Verkehrslagedarstellung besitzen.	
Funk_GHA_12	Die Verkehrslage soll Fahrzeuge und Flugzeuge umfassen.	Fahrzeuge mit Transponder und mit WFF System
Funk_GHA_13	Es soll eine einfache und intuitive Möglichkeit der Zuweisung von Ressourcen zu Flügen erfolgen.	
Funk_GHA_14	Das System soll eine Darstellung des Standes des Abfertigungsprozesses beinhalten.	
Funk_GHA_15	Es sollen in Abhängigkeit von der Gewichtsklasse der Flugzeuge unterschiedliche Symbole verwendet werden.	
Funk_GHA_16	Es soll eine klare Verbindung zwischen Inbound und zugehörigem Outbound (Turnaround) dargestellt werden.	Hilfreiche Informationen über Blockzeiten und eventuelle Delays

## II - 1.2 Effiziente Passagierflussteuerung – Beschreibung des Flughafen Hamburg und Prozessmodell 2015

In diesem Kapitel wird zunächst der landseitige Teil des Flughafens Hamburg beschrieben. Anschließend werden auf Grundlage einer Literaturrecherche des DLR Institutes für Flughafenwesen und Luftverkehr verschiedene Methoden zur Beschreibung der Übersichtlichkeit und des Level-of-Service von Flughafenterminals diskutiert. Der so ermittelte Visibility Index für den Flughafen Hamburg wird im nachfolgenden Ergebniskapitel II - 1.3 für die Passagierflusssimulation zur Ermittlung der Auswirkungen von Indoor-Navigation verwendet. Als letzter Teil dieses Ergebniskapitel werden optimierte Prozessketten für 2015 diskutiert und ein entsprechender Maßnahmenkatalog vorgestellt.

### II - 1.2.1 *Beschreibung und des Flughafen Hamburg*

Der Flughafen Hamburg verzeichnete im Jahr 2011 13,56 Millionen Fluggäste.

Die Passagiere werden über drei Gebäude abgefertigt: Zwei Terminalgebäude, in denen sich die Check-in Schalter und Check-in Automaten befinden, sowie die sog. „Airport-Plaza“.

Die Airport-Plaza liegt zwischen den beiden Terminals und bildet einen Übergang zwischen ihnen. Dort ist die zentrale Sicherheitskontrolle untergebracht und dahinter befinden sich zahlreiche Shops und Restaurants. Diese sind Bestandteile des nicht-öffentlichen Bereichs des Flughafens. Der Fluggastpier ist mit der Plaza verbunden und verfügt über 52 Flugzeugpositionen (vgl. Abbildung 9).

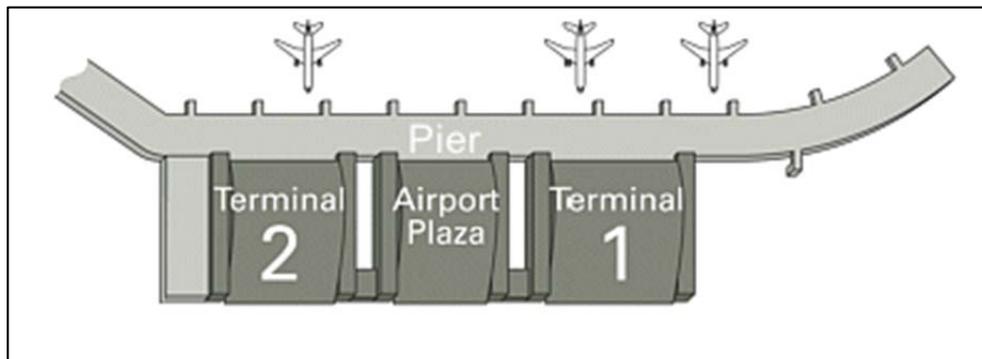


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Flughafen Hamburg (Quelle: [www.airport.de](http://www.airport.de))

Im Terminal 2 operieren überwiegend die Deutsche Lufthansa, Condor, Germanwings und Mitglieder der Star Alliance und deren Partner. Andere Fluggesellschaften wie Air Berlin, British Airways, Continental, Air France und Low-Cost-Airlines sowie der Linie- und Charterreiseverkehr befinden sich im Terminal 1.

### II - 1.2.1.1 Terminal 1

Das Terminal 1 hat eine Hallengrundfläche von 6300 m<sup>2</sup> und kann von den abfliegenden Passagieren über folgende Eingänge erreicht werden:

- Vier Eingänge von der Landseite
- Eine Treppe, eine Fahrtreppe und ein Fahrstuhl verbinden die An- und Abflugebene im Terminal 1

### II - 1.2.1.2 Terminal 2

Die Terminalhalle 2 hat eine mit 5800 m<sup>2</sup> etwas geringere Fläche als das Terminal 1. Die abfliegenden Passagiere erreichen die Abflughalle vom Terminal 2 über:

- Zwei Eingänge von der Landseite
- Zwei Eingänge vom Parkhaus
- Eine Treppe, eine Fahrtreppe und ein Fahrstuhl, verbinden die An- und Abflugebenen im Terminal 2

Hier konzentrieren sich überwiegend die Abflüge der deutsche Lufthansa, Germanwings und der Star Alliance. Den operierenden Airlines im Terminal 2 stehen ein Sperrgepäck-Abfertigungsschalter und 50 Check-in-Schalter zur Verfügung.

Der Check-in Bereich im Terminal 2 besteht aus zwei Blöcken:

- Der rechte Block wird von den Star Alliance Mitgliedern benutzt
- Der linke Block steht den anderen Fluggesellschaften zur Verfügung

Die zwei Check-in Blöcke im Terminal 2 sind mittig angeordnet. Damit die Passagiere ihre Abfluggates erreichen können, begeben sie sich nach der Registrierung durch einen einzigen Durchgang zur Airport-Plaza um dort zu der zentralen Sicherheitskontrolle zu gelangen.

### II - 1.2.1.3 Airport-Plaza

Die Airport-Plaza verbindet die Terminals 1 und 2 und kann durch folgende Punkte erreicht werden:

- Durchgang 1 vom Terminal 1
- Durchgang 2 vom Terminal 2
- Zwei Eingänge von der Landseite

Nach dem Erreichen der Airport-Plaza müssen die Passagiere zuerst durch eine von zwei Kontrollstellen gehen:

- Bordkartenkontrollstelle 1
- Bordkartenkontrollstelle 2

Je nachdem, welche Bordkartenkontrollstelle die Passagiere passieren, werden sie sich aufhalten in:

- Wartezone 1 bzw. Wartezone 2 für die Economy Passagiere
- Eine dritte Wartezone, die eine schnellere Abfertigung für die Passagiere der Business- und First-Class ermöglicht

Damit die Passagiere nach der Sicherheitskontrolle ihre Abfluggates durch einen einzigen Durchgang erreichen können, müssen sie zuerst durch eine von 16 Sicherheitskontrollstellen passieren.

#### II - 1.2.1.4 Pier

Der Pier beinhaltet neben den Passkontrollstellen, 24 Gate-Warteräumen und 52 Flugzeugabstellpositionen. Die Passagiere erreichen ihre Abfluggates und entsprechende Warteräume nur über eine Übergangsstelle von der Airport-Plaza.

Die Passagiere mit Reisezielen in Non-Schengen Staaten müssen eine von sieben Grenzkontrollstellen passieren, bevor sie sich in ihre Abfluggate-Warteräume begeben.

Dort halten sie sich bis zum Aufruf zum Boarding auf, um letztendlich das Flughafenterminal über die Boardingkontrollstellen zu verlassen.

## II - 1.2.2 **Übersichtlichkeit von Terminalgebäuden und deren Level of Service**

Bezogen auf die Orientierung der Passagiere ist ein idealer Entwurf des Terminalgebäudes gegeben, wenn alle Prozessstellen und die Wegeführung so ausgelegt sind, dass zu jedem Zeitpunkt und an jedem Ort des Terminals eine ungehinderte Sichtlinie zum Flugzeug für die abfliegenden und zur Landseite für die ankommenden Fluggäste gewährleistet ist (vgl. [8]).

So unterstützt die IATA in ihrem Airport Development Reference Manual (IATA, [19]) ausdrücklich ein offenes Design mit transparenten Wänden und Glasfassaden. Die Passagiere haben dadurch ihr Ankunftsziel ständig vor Augen, außerdem kann eine effiziente Führung der Passagierströme erreicht werden ohne den Einsatz eines aufwendigen und kostspieligen Wegeleitsystems.

Bei kleineren Flughäfen ist dieses Ziel leichter zu erreichen. Für Terminals jedoch, die bedingt durch ihr hohes Passagieraufkommen, große Distanzen zwischen dem Eingang und den Gates vorweisen, gestaltet sich die Umsetzung einer permanenten freien Sicht als schwierig (vgl. [8]).

Wenn komplexe Routen unabdingbar sind, ist ein effizientes Wegeleitsystem von elementarer Bedeutung. Die IATA und die ICAO haben deshalb Empfehlungen für visuelle Informationssysteme (z. B. Beschilderung, Bildschirme) ausgesprochen um Symbole zu vereinheitlichen und damit Sprachbarrieren zu überbrücken.

Trotzdem interpretieren nicht alle Menschen alle Symbole gleichermaßen. Außerdem kennen nicht alle Passagiere die Bedeutung der Wörter „Gate“, „Departure“ oder „Arrival“<sup>1</sup>.

Wenn dazu noch Schilder und andere Informationstafeln schlecht zu lesen oder platziert sind, zu viele Informationen enthalten und die Räume unübersichtlich sind, gestaltet sich die Wegefindung schwierig.

Wie lässt sich aber die Übersichtlichkeit eines Gebäudes bzw. die Komplexität einer Wegefindungsaufgabe innerhalb eines bestimmten Raumes messen? Lässt sich im konkreten Fall eines Fluggastterminals ein Rückschluss auf das Service-Niveau des Flughafens ziehen? Im Folgenden werden zwei Modelle vorgestellt, die sich dieser Fragestellung widmen.

### II - 1.2.2.1 **„Wayfinding“ im Terminalgebäude**

Der Aufenthalt am Flughafen und die Suche nach den relevanten Prozessstellen sind teilweise erzwungene Aktivitäten, da der Flughafen kein Ziel per se ist, sondern ein Übergangsort während einer Flugreise (vgl. [22], [17]). Insbesondere für Gelegenheitsflieger kann der Prozess der gezielten Fortbewegung innerhalb eines Terminalgebäudes ein traumatisches Erlebnis im Hinblick auf die Zielfindung (z. B. Check-in Schalter oder Gate) oder auf die Lokalisierung des eigenen Standortes bedeuten (vgl. [15]).

<sup>1</sup> Laut Interviews am Informationsschalter des Flughafen Hamburgs und vgl. Caves & Pickard (2001, S. 11).

Bei der Flughafenplanung sollte neben dem verfügbaren Freiraum und einer kurzen Abfertigungsdauer besonders auf eine gute Orientierungsmöglichkeit Wert gelegt werden, da sonst das empfundene Service-Niveau des gesamten Flughafens beeinträchtigt werden kann (vgl. [7]). Passagierumfragen und empirische Studien, wie sie etwa Fodness & Murray [18] oder auch Correia [10] durchgeführt haben, bestätigen die Abhängigkeit zwischen der Orientierung und der Beurteilung der Service-Qualität des gesamten Flughafens.

Im Folgenden wird auf die Frage eingegangen, ob alle Passagiere auf die gleiche Weise ihren Weg durch ein Terminal finden und welche Techniken dabei eingesetzt werden. Anschließend wird eine Methode aufgezeigt, die es ermöglicht die Übersichtlichkeit eines Raumes bzw. eines Fluggastterminals quantitativ zu bestimmen um daraus einen Level-of-Service für Orientierung zu ermitteln.

#### *Prinzipien des „Wayfinding“*

Während die Orientierungsproblematik von Fußgängern in der deutschsprachigen Forschung kaum thematisiert wurde, wird im englisch sprachigen Raum seit den 1980er Jahren unter dem Stichwort „wayfinding“ untersucht (vgl. [25]).

Nach Passini ([21], [22]) bezeichnet der Begriff „wayfinding“ sowohl die kognitive Begabung als auch das situationsbezogene Verhalten einer Person, um ein räumliches Ziel zu erreichen und wird als ein räumlicher Problemlösungsprozess verstanden.

#### *Routenwahl*

Die Wahl des Weges bedingt sich zum einen durch das Ziel und zum anderen durch die von der Umwelt bereitgestellten Hinweise auf die vermeintlich richtige Position und die notwendige Gehrichtung um das Ziel zu erreichen.

Fewings [15] unterscheidet zwei Typen und drei Formen der Entscheidungsfindung:

Es wird zwischen einer „statischen“ und einer „dynamischen“ Problemstellung bei der Routenwahl differenziert. Ersteres ergibt sich aus einer Situation, in der eine Reihe von festen Routen zwischen Start und Zielort zur Auswahl stehen. Dies kann z. B. der Fall sein, wenn ein Flugreisender bei der Anfahrt vom Wohnort zum Flughafen die Wahl zwischen verschiedenen ihm bekannten Verkehrsverbindungen hat. Der zweite Typ der Entscheidungsfindung liegt vor, wenn ein Subjekt aktiv nach neuen, unbekanntem Routen sucht bzw. darüber Leitinformationen empfängt. Typischerweise sind Fluggäste damit konfrontiert, die erstmalig ein Fluggastterminal betreten. Die Routenwahl hängt also mit dem Bekanntheitsgrad der zu folgenden Wege eng zusammen. Seidel [36] bestätigt empirisch, dass eine höhere Nutzungsfrequenz eines Flughafenterminals einen positiven Einfluss auf das wayfinding hat.

Die Formen des wayfinding hingegen gliedern sich in „recreational“, „resolute“, und „emergency“ wayfinding. Der „recreational wayfinding“-Prozess ist mit Freude und Vergnügen gekennzeichnet, wie bei einem Spaziergang durch einen Park oder beim Besuch

eines Labyrinths. Der Weg ist hier das Ziel. Die zweite Form des wayfinding, das emergency wayfinding, hat als alleinige Aufgabe den Zielort schnellstmöglich zu erreichen und kann plötzlich und überall eintreten. Beim „resolute wayfinding“ steht die effiziente Wegfindung im Vordergrund. Mit dieser zweckgebundenen Aufgabenform sehen sich die Fluggäste überwiegend konfrontiert, da sie ihren Weg für das Einchecken bis zum entsprechenden Abfluggate unter Zeitdruck und den örtlichen und prozeduralen Gegebenheiten finden müssen.

### *Räumliche Vorstellung*

Bei der räumlichen Vorstellung entwickelt der Mensch sogenannte kognitive Karten, also mentale Repräsentationen der Umwelt, so wie sie von ihm empfunden wird (vgl. [38]).

Raubal & Egenhofer [29] vertreten die Annahme, dass das räumliche Wissen des Menschen durch drei kognitive Einheiten aufgebaut ist: Knotenpunktwissen, Streckenwissen und Überblickswissen.

Das Knotenpunktwissen beinhaltet einzelne Orientierungspunkte in der Umgebung, die getrennt wahrgenommen werden. Dazu zählen z. B. Schilder, Gebäude oder Landmarken. Wenn diese Punkte in Verbindung gesetzt werden, entstehen sequentielle Strukturen, die die Raumelemente in einer beschreibbaren Beziehung zusammenfügen und als Wege oder Strecken näher bestimmen. Es entsteht Streckenwissen. Eine komplexe Struktur bildet sich wenn eine Anzahl differenzierter Strecken und Knotenpunkte identifiziert wurden. Die Person erhält somit einen Überblick über den Raumausschnitt (vgl. [5]).

Aus diesen drei Einheiten entwickelt der Mensch schließlich je nach kognitiver Fähigkeit und persönlicher Verfassung, die für ihn und für seine Belange sinnvollste Strategie um seinen Weg zu finden (vgl. [35]). Wenn z. B. das räumliche Vorstellungsvermögen einer Person für eine bestimmte Aufgabe nicht hinreichend ausgeprägt ist, dann könnte sie sich u. U. auf ihr verbales Ausdrucksvermögen verlassen und sich nach dem Weg erkundigen.

Die Komplexität der Umgebung hat bei der räumlichen Vorstellung bzw. beim wayfinding einen großen Einfluss und wird im nächsten Abschnitt behandelt.

### **II - 1.2.2.2 Modell von Raubal & Egenhofer**

Raubal & Egenhofer [28] haben ein simples Modell entwickelt um die Komplexität der Wegefindungsaufgaben innerhalb von verschiedenen Gebäuden vergleichen zu können. Dabei greifen sie auf zwei kritische Elemente zurück: Entscheidungspunkte und Hinweise.

#### *Entscheidungspunkte*

Entscheidungspunkte sind vorzufinden sobald eine Person die Wahl zwischen verschiedenen Wegen hat. An diesen Punkten steht die Person vor einer statischen bzw. dynamischen Problemstellung. Je mehr Entscheidungspunkte ein Gebäude hat, desto schwieriger wird die „wayfinding“-Aufgabe. Dabei wird zwischen Entscheidungspunkten mit

nur einer Wahlmöglichkeit (erzwungener Entscheidungspunkt) und Entscheidungspunkten mit mehr als einer Möglichkeit bei der Routenwahl unterschieden.

### *Hinweise*

Hinweise sind Eigenschaften eines Raumes, wie Schilder oder architektonische Elemente, die als Orientierungspunkte dienen. Im Modell von Raubal & Egenhofer werden Hinweise in zwei Kategorien eingeteilt: „Vorhanden“ und „Nicht vorhanden“. Vorhandene Hinweise werden weiter in „Gut“ und „Schlecht“ unterteilt.

### *Kombination von Entscheidungspunkten und Hinweisen*

Die Kombinationen aus den zwei möglichen Ausprägungen der Entscheidungspunkte und der drei Typen von Hinweisen ergeben sechs mögliche Situationen eines „wayfinding“-Szenarios.

- Wahlmöglichkeiten = 1 und Hinweise = Gut  
An erzwungenen Entscheidungspunkten haben die Menschen keine andere Alternative als sich in eine Richtung fortzubewegen. Gute Hinweise bestätigen, dass der richtige Weg weiter befolgt wird. Die Wegefindung ist einfach.
- Wahlmöglichkeiten = 1 und Hinweise = Schlecht  
Obwohl es nur einen einzigen Weg gibt, können die Personen in Zweifel geraten, ob sie tatsächlich auf das gewünschte Ziel steuern.
- Wahlmöglichkeiten = 1 und Hinweise = Nicht vorhanden  
In dieser Situation können wieder Unsicherheiten entstehen bezüglich des richtigen Weges obwohl nur eine Bewegungsrichtung verfügbar ist.
- Wahlmöglichkeiten > 1 und Hinweise = Gut  
An Entscheidungspunkten mit mehreren Wahlmöglichkeiten werden Hinweise für das Auswählen des korrekten Weges benötigt. Sind diese Hinweise vollständig, gut leserlich und verständlich, gestaltet sich die „wayfinding“-Aufgabe als einfach.
- Wahlmöglichkeiten > 1 und Hinweise = Schlecht  
Bei diesen Entscheidungspunkten mit unvollständigen oder irreführenden Hinweisen haben Personen Schwierigkeiten den richtigen Weg ausfindig zu machen.
- Wahlmöglichkeiten > 1 und Hinweise = Nicht vorhanden  
Dieses Situation stellt das „worst case“-Szenario für das wayfinding dar. Ohne jeglichen Hinweis können sich die Personen nicht zurechtfinden und sind desorientiert.

Tabelle 9: Entscheidungspunkt-Hinweis Modell

		Wahlmöglichkeiten = 1	Wahlmöglichkeiten > 1
<b>Hinweise</b>	<b>Gut</b>	O.K.	O.K.
	<b>Schlecht</b>	O.K. (Hinweise nicht nötig)  Unsicherheiten (Bestätigung nicht vorhanden)	Probleme
<b>Keine Hinweise</b>		O.K. (Hinweise nicht nötig)  Unsicherheiten (Bestätigung nicht vorhanden)	Große Probleme

Zur Bewertung der Komplexität einer „wayfinding“-Aufgabe innerhalb von Gebäuden wird die Anzahl der problematischen Entscheidungspunkte (Wahlmöglichkeiten > 1 und keine bzw. schlechte Hinweise) entlang des zurückgelegten Weges ermittelt. Das Gebäude mit der höheren Punktzahl wird als das komplexere definiert. In einer von Raubal & Egenhofer durchgeführten Fallstudie kam heraus, dass für die Aufgabe der Wegfindung von der Abflughalle zu einem bestimmten Gate der Frankfurter Flughafen mit zehn Punkten als komplexer eingestuft wurde als der Flughafen Wien mit fünf Punkten (vgl. [30]).

### II - 1.2.2.3 Visibility Index

Braaksma und Cook [6] haben erstmals eine Metrik entwickelt um die Übersichtlichkeit eines Gebäudes zu quantifizieren: Der Visibility Index (VI).

Der VI ist das Verhältnis zwischen der Anzahl der verfügbaren Sichtlinien zu der Anzahl aller Sichtlinien, die innerhalb eines Terminals verfügbar sein sollten. Dabei wird das Terminal als ein Netzwerk mit Knoten und Kanten betrachtet. Die Knoten repräsentieren Standorte von

Anlagen wie z. B. Check-in Schalter oder Toiletten, sowie Entscheidungspunkten. Die Kanten stellen Sichtlinien zwischen den Knoten dar.

Das Netzwerk des Terminals wird dann in eine binäre Matrixform überführt, die visuelle Verbindungsmatrix (s. Abbildung 10 und Tabelle 10). Wenn ein Knoten  $j$  von einem anderen Knoten  $i$  aus sichtbar ist, so nimmt die Verbindung  $c_{ij}$  den Wert 1 an, ansonsten wird der Wert 0 zugeteilt. Die visuelle Wahrnehmung berücksichtigt sowohl direkte als auch indirekte Sichtlinien. Indirekte Sichtlinien ergeben sich aus der Zuhilfenahme von Hinweisen auf Schildern.

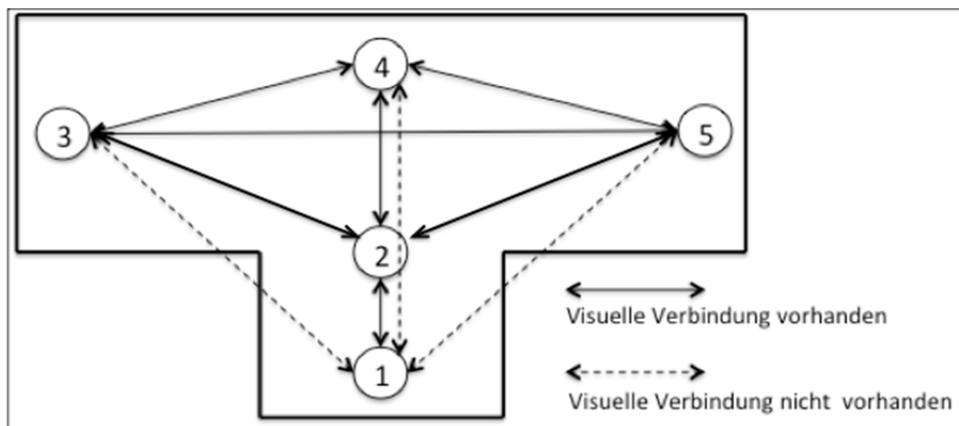


Abbildung 10: Netzwerk aus Knoten und Kanten (Quelle: [21])

Der VI für ein Terminal mit  $N$  Knoten ist somit:

$$VI = \frac{\sum_{i,j} c_{ij}}{N(N-1)} \quad (1)$$

Je höher der VI desto übersichtlicher der Terminal und einfacher die Orientierung für die Fluggäste.

Tabelle 10: Visuelle Verbindungsmatrix (Quelle: [12])

Knoten	1	2	3	4	5	Summe
1		1	0	0	0	1
2	1		1	1	1	4
3	0	1		1	1	3
4	0	1	1		1	3
5	0	1	1	1		3
Summe	1	4	3	3	3	14

Man beachte, dass beim Nenner  $N(N - 1)$  in Gleichung (1), Braaksma und Cook annehmen, dass der Beobachter den Knoten an dem er sich befindet nicht wahrnimmt.

Um einen realistischeren Maßstab zu erhalten, haben Tosic und Babic [33] diese Annahme verworfen und zwei Änderungen beim VI eingeführt:

Einerseits werden nur noch relevante visuelle Verbindungen betrachtet unter Einbeziehung einer strikten Reihenfolge der Benutzung von Anlagen und Prozessstellen. Die zugrundeliegende Annahme beruht auf der Beobachtung, dass bei Passagieren kein Bedarf mehr besteht bereits passierte Prozessstellen im Blick zu halten. Mit dem Faktor  $r_{ij}$  wird die Relevanz der visuellen Verbindungen berücksichtigt und erhält den Wert 1 falls die Relevanz gegeben ist, ansonsten 0.

Abfliegende Passagiere werden zuerst zum Check-in gebeten (Knoten  $i$ ), dann zur Sicherheitskontrolle und anschließend zum Gate (Knoten  $j$ ). In diesem Sinne ist die Verbindung als relevant anzusehen ( $r_{ij} = 1$ ). Jedoch wird nicht davon ausgegangen, dass abfliegende Passagiere wieder den Check-in Schalter aufsuchen. Hier ist die visuelle Verbindung als irrelevant anzusehen ( $r_{ij} = 0$ ).

Weitere Überlegungen haben Tosic und Babic [33] veranlasst die Anlagen in primäre und sekundäre Einrichtungen zu klassifizieren. Wie bereits benannt, sind die primären Einrichtungen diejenigen, die vom Passagier besucht werden müssen, wie etwa Check-in Schalter oder Abfluggates. Sekundäre Einrichtungen wie Restaurants, Duty Free Shops oder Geldautomaten sind dagegen optional. Aus dieser Prioritätensetzung wird ein Gewichtungsfaktor  $w_j$  für die einzelnen Anlagen eingeführt. Wenn bei den Primäranlagen der Faktor 1 postuliert wird (vgl. [31]), so sind die Faktoren für die Sekundäranlagen aus Beobachtungen über die Häufigkeit der Nutzung der jeweiligen Einrichtung abgeleitet und sind kleiner 1. Es wird davon ausgegangen, dass Anlagen und Bereiche mit einer höheren Frequentierungsrate einen höheren Stellenwert bei den Nutzern einnehmen.

Dies führt zum folgenden Ausdruck des modifizierten VI:

$$VI = \frac{\sum_{i,j} c_{ij} r_{ij} w_j}{\sum_{i,j} r_{ij} w_j} \quad (2)$$

Die Nutzungshäufigkeit einer bestimmten Anlage wurde von Tosic & Babic [33] an einem typischen Verkehrstag ermittelt, jedoch sind nicht alle Einrichtungen und Dienstleistungen zu jeder Zeit zugänglich und verfügbar. Daher ist u. U. die Frequentierungsrate keine aussagekräftige Größe um die Gewichtungsfaktoren der sekundären Anlagen zu bestimmen.

Eine alternative Methode zur Ermittlung von  $w_j$  und weiterführende Arbeiten zum VI haben Dada [11] und Dada & Wirasinghe [9] entwickelt:

An drei unterschiedlichen Flughäfen wurden Passagierumfragen durchgeführt um die empfundene Wichtigkeit der Anlagen quantitativ zu beurteilen. Eine anschließende

statistische Auswertung hat sehr ähnliche Ergebnisse zwischen den drei Flughäfen ergeben. Die Rangliste und Gewichtung der sekundären Aktivitäten kann Tabelle 11 entnommen werden.

**Tabelle 11: Empfundene Wichtigkeit der Anlagen laut einer Passagierumfrage an drei unterschiedlichen Flughäfen [11]**

Sekundäranlage	Gewichtung $w_j$
Toiletten	0,95
Informationstafeln	0,94
Informationsschalter	0,85
Gastronomiebetriebe	0,83
Geldautomaten und Banken	0,76
Geldwechsel-Schalter	0,76
Gepäckwagen	0,74
Zeitschriftenladen	0,70
Sitzbänke	0,38
Öffentliche Telefone	0,34

Anders als bei der Gewichtung der Anlagen wird die Idee einer Relevanz der visuellen Verbindungen bei Dada und Wirasinghe [18] nicht angenommen. Sie argumentieren, dass obwohl Passagiere eine bestimmte Sequenz bei ihrer Abfertigung durchlaufen sollen, es für sie immer Gründe dafür geben kann zu einer bereits passierten Stelle zurück zu kehren.

Des Weiteren kann ein Etagenwechsel eine zusätzliche Herausforderung beim wayfinding innerhalb von Gebäuden darstellen, selbst wenn Orientierungspunkte wie Schilder vorhanden sind (vgl. [31]). Dada [11] hat deshalb einen weiteren Faktor  $k_{ij}$  vorgeschlagen um diese baulichen Gegebenheiten in die Berechnung der Übersichtlichkeit eines Gebäudes zu integrieren. Zur Ermittlung von  $k_{ij}$  wurde ein Experiment zur Orientierung in einem komplexen Gebäude durchgeführt (vgl. [13]). Zwei Gruppen wurden mit der Aufgabe vertraut jeweils gleiche vorgegebene Start- und Zielort-Paare innerhalb des mehrstöckigen Gebäudes zu durchlaufen.

Eine Gruppe bestand aus Experten, die mit dem Gebäude vertraut waren, wohingegen die zweite Gruppe nur Novizen beinhaltete. Bei der Erfüllung der „wayfinding“-Aufgabe schnitt die Gruppe der Experten besser ab. Aus der Differenz der durchschnittlichen Wegezeiten zwischen den zwei Gruppen hat Dada (1997) durch eine Regressionsanalyse den sog. Tardity Differential (T/D) ermittelt. Der Tardity Differential ist eine Zahl, welche den Einfluss der Etagenwechsel und der Schilder auf die Verzögerung beim wayfinding in einem Gebäude wiedergeben soll.

Bei der Durchführung der Regressionsanalyse konnte allerdings die „Anzahl Schilder“  $S$  nicht als erklärende Variable für den Tardity Differential dienen. Erst in Verbindung mit der zweiten unabhängigen Variable „Anzahl Etagenwechsel“  $E$  konnte ein Zusammenhang statistisch nachgewiesen werden [14]. Daher sind beiden Variablen in Gleichung (3) wiederzufinden:

$$(T/D) = (0,01S + 0,1E) \quad (3)$$

Mit

$S$	Anzahl Schilder
$E$	Anzahl Etagenwechsel

Da im Visibility Index Modell die visuellen Verbindungslinien einen minimalen Wert von 0 und einen maximalen Wert von 1 einnehmen können wurde T/D auf eine exponentielle Form gebracht um es im Modell integrieren zu können. Diese Form entspricht dem Faktor  $k_{ij}$ .

$$k_{ij} = e^{-(T/D)} \quad (4)$$

Das von Dada [20] vorgeschlagene Modell ist in Gleichung (5) präsentiert:

$$VI = \frac{\sum_{i,j}^N c_{ij} k_{ij} w_j}{N \sum_j^N w_j} \quad (5)$$

Im Vergleich zu den anderen vorgestellten Modellen benötigt das von Dada zwar mehr Daten, ist aber akkurater (vgl. [9]).

Unabhängig jedoch vom betrachteten Modell kann das Konzept des VI als Basis für die Ermittlung eines Level-of-Service (LOS) Standards für die Orientierung an Flughäfen dienen.

#### II - 1.2.2.4 Level-of-Service für die Orientierung an einem Flughafen

Die Einführung eines Maßes zur Bestimmung des Level-of-Service, den ein Flughafen seinen Passagieren anbietet, ist aus Sicht von Flughafenplanern zweifach begründet. Zum einen ist es erforderlich, den Erfolg von Maßnahmen zur Verbesserung bzw. zum Erhalt der Qualität von Serviceleistungen überprüfen zu können. Zum anderen kann eine solche

Quantifizierung des LOS Auskunft darüber geben, ob Ausgaben zur Verbesserung von Dienstleistungen tatsächlich gerechtfertigt sind (vgl. [10]).

In diesem Bestreben haben mehrere Luftfahrt-Organisationen, wie die Federal Aviation Administration, das Airports Council International sowie die IATA, Standards und Methoden ausgegeben um den LOS einzelner Terminalkomponenten zu ermitteln. Die Empfehlungen stoßen jedoch auf Kritik von Flughafenexperten. Unter anderem wird die mangelnde Berücksichtigung der Wahrnehmung der Passagiere bei der Ausarbeitung der LOS Standards beanstandet (vgl. [10]).

Um an diesen Punkt anzusetzen haben Correia et al. [10] einen globalen LOS entwickelt und sich dabei auf die Empfindungen der Passagiere am Flughafen São Paulo gestützt. In einem ersten Schritt wurden Fluggäste gebeten ein Urteil über die allgemeine Service-Qualität des Flughafens sowie über folgende Komponenten und Eigenschaften des Terminals abzugeben, die einen Einfluss auf das gefühlte globale LOS haben könnten:

- Flughafen Vorfahrt
- Check-in
- Sicherheitskontrolle
- Gate-Bereiche
- Bewegungsflächen
- Konzessionen
- Wegelängen
- Orientierung
- Sicherheit<sup>2</sup>

Danach wurden die qualitativen Daten aus den Befragungen in quantitative Größen transformiert. Anschließend wurde in Regressionsanalysen der mathematische Zusammenhang zwischen dem globalen LOS und der empfundenen LOS der jeweiligen wichtigsten Komponenten und Eigenschaften des Terminalgebäudes in São Paulo hergestellt. Die Regressionsgleichung hat folgende Form:

$$LOS (Global) = w_1 \cdot LOS (A_1) + w_2 \cdot LOS (A_1) + \dots + w_n \cdot LOS (A_n) \quad (6)$$

<sup>2</sup> Im Sinne von „Security“ im Englischen.

Mit

- $LOS(A_n)$  Level of Service der Komponente n bzw. der Eigenschaft n
- $w_n$  Gewicht der Komponente n bzw. der Eigenschaft n

Die Gewichte  $w_n$  sind die Parameter der Regressionsgleichung und ergeben sich durch die Wahrnehmung der Passagiere.

Im Fall des Flughafens São Paulo/Guarulhos International wurde festgestellt, dass die Vorfahrt, das Check-in, die Gate-Bereiche und die Orientierung bei der Beurteilung des LOS statistisch signifikant ins Gewicht fallen. Dabei war Orientierung als zweitwichtigstes Attribut bei den Fluggästen empfunden worden.

Ein ähnlich hoher Stellenwert von Orientierung geht aus einer Passagierumfrage aus dem Jahre 2008 am Hamburger Flughafen hervor (vgl. Abbildung 11).

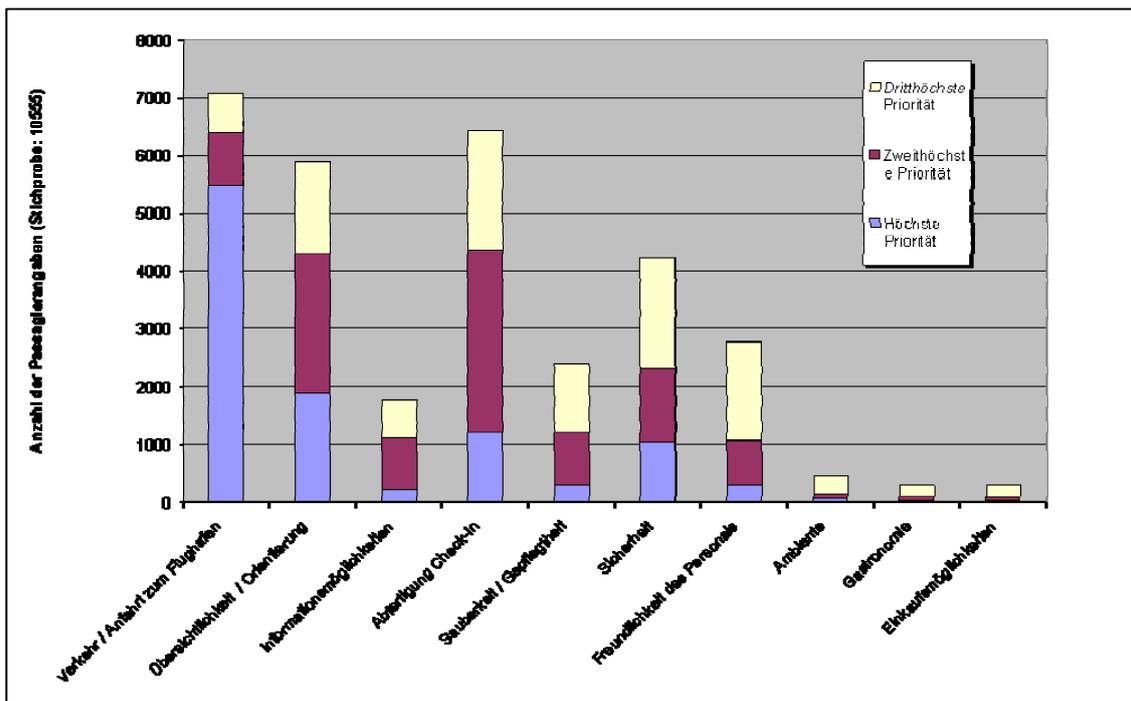


Abbildung 11: Wichtigkeit der Service-Qualität bei Fluggästen des Flughafen Hamburg (Quelle: Fluggastbefragung Flughafen Hamburg, 2008)

Auf die Frage, wie sich der LOS für die Orientierung an einem bestimmten Flughafen festlegen lässt, haben Seneviratne und Martel [43] subjektiv eine Reihe von LOS Standards vorgeschlagen.

Für Dada [11] erschienen jedoch diese Standards kaum erreichbar. Er schlug andere LOS Standards für die Orientierung vor, die auf das VI Modell basieren und aus fünf Kategorien von A bis E bestehen. Jede dieser Kategorien beinhaltet qualitative Beschreibungen des jeweiligen Service-Niveaus und entspricht einem definierten Bereich auf der VI Skala. Um die Ober- und Untergrenzen der jeweiligen Kategorien festzulegen hat Dada einen mittleren VI sowie die Standardabweichungen (SD) ermittelt und wie folgt eingesetzt<sup>3</sup>:

- LOS A: Weit überdurchschnittlich mit  $VI > \text{Mittlerer VI} + \frac{3}{2} SD$   
Gut übersichtliches Gebäude, wobei die meisten Aktivitätszentren aus den jeweils anderen ersichtlich sind. Es gibt sehr wenige Aktivitätszentren und vorhandene Schilder sind lediglich nötig um den Ortsnamen zu bestätigen.
- LOS B: Überdurchschnittlich mit  $\text{Mittlerer VI} + \frac{3}{2} SD > VI > \text{Mittlerer VI} + \frac{3}{4} SD$   
Das Gebäude ist nicht komplex, aber es sind mehrere Wahlmöglichkeiten an den Entscheidungspunkten vorhanden. Eine gute Anzahl Aktivitätszentren ist aus allen Orten innerhalb des Gebäudes sichtbar.
- LOS C: Durchschnittlich mit  $\text{Mittlerer VI} + \frac{3}{4} SD > VI > \text{Mittlerer VI} - \frac{3}{4} SD$   
Das Gebäude weist eine moderate Komplexität auf. Es sind mehrere Wahlmöglichkeiten an den Entscheidungspunkten vorhanden. Die Sichtbarkeit ist etwas beeinträchtigt.  
Es können „wayfinding“-Probleme auftreten und etwas Desorientierung ist zu erwarten. Es ist wahrscheinlich, dass Personen nach dem Weg fragen und eine größere Anzahl von wegweisenden Schildern nötig ist.
- LOS D: Unterdurchschnittlich mit  $\text{Mittlerer VI} - \frac{3}{4} SD > VI > \text{Mittlerer VI} - \frac{3}{2} SD$   
Das Gebäude ist komplex. Es sind mehrere Wahlmöglichkeiten an den Entscheidungspunkten vorhanden und Verwirrung ist wahrscheinlich. Die Sicht ist begrenzt und das Risiko für Orientierungs- und „wayfinding“-Probleme ist hoch. Es ist wahrscheinlicher, dass Personen nach dem Weg fragen. Eine erhebliche Anzahl von wegweisenden Schildern ist nötig.
- LOS E: Weit unterdurchschnittlich mit  $VI < \text{Mittlerer VI} - \frac{3}{2} SD$   
Das Gebäude ist sehr komplex. Es sind mehrere Wahlmöglichkeiten an den Entscheidungspunkten vorhanden. Nur wenige Orte sind von den Aktivitätszentren aus sichtbar. Die Personen richten sich fast ausschließlich nach wegweisenden Schildern bzw. fragen nach dem Weg. Das Risiko, sich zu verlaufen, ist hoch. Eine umfassende Beschilderung ist notwendig.

<sup>3</sup> Bei den qualitativen Beschreibungen handelt es sich um Übersetzungen des Verfassers. Zitate im Original vgl. Dada (1997, S. 178 ff.)

Dada [11] hat den mittleren VI sowie die Standardabweichungen an verschiedenen Flughäfen ermittelt. Lam [20] hingegen, hat diese Werte aus den VI einzelner Anlagen und kam zu einer anderen Verteilung der LOS Kategorien. Ein Überblick der verschiedenen LOS Standards für Orientierung ist in Abbildung 12 gegeben.

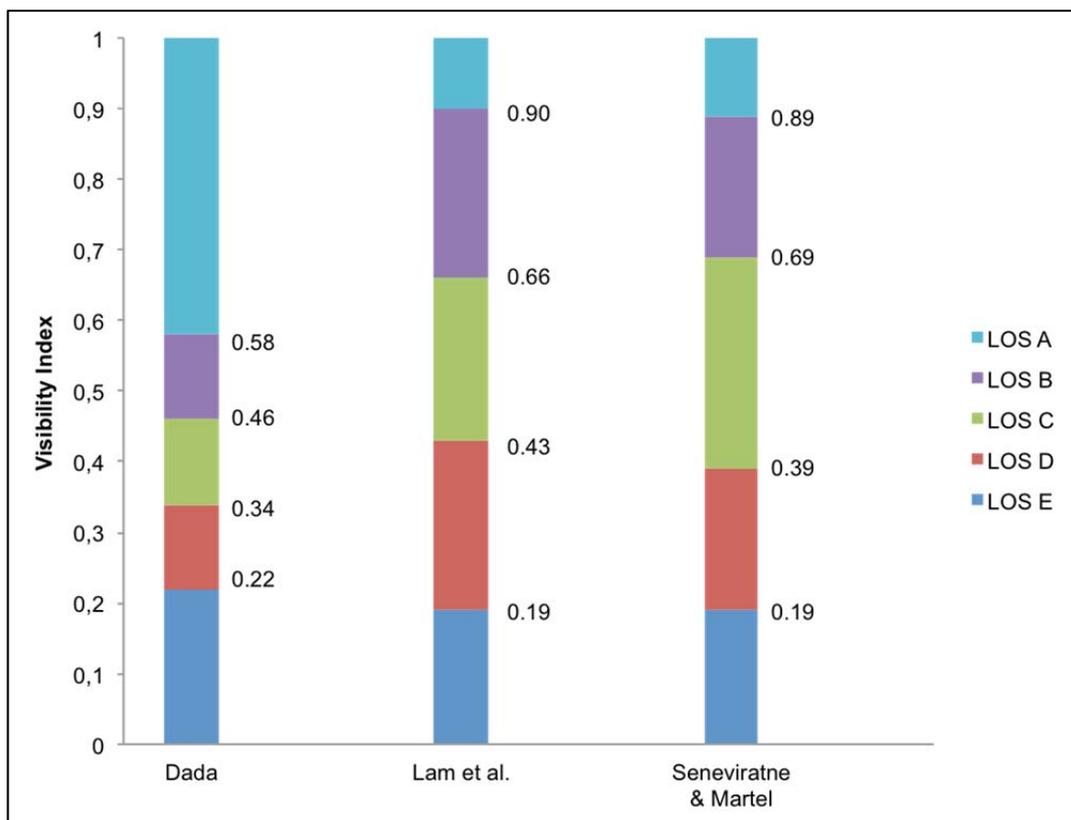


Abbildung 12: Level-of-Service Standards für Orientierung (Quelle: In Anlehnung an Tam & Lam [32] und Lam [20])

### II - 1.2.2.5 Übersichtlichkeit des Flughafens Hamburg

Um die Übersichtlichkeit bzw. die Entropie am Flughafen Hamburg zu ermitteln, wurde das Visual Index Modell in angepasster Form durch das DLR Institut für Flughafenwesen und Luftverkehr angewendet.

Da in der Simulation die Passagiere die Abfertigungskette nur flussaufwärts durchlaufen können, wird die Relevanz der Verbindungslinien zwischen den Anlagen und den Prozessstellen durch den Faktor  $r_{ij}$  berücksichtigt.

Zur Gewichtung der Sekundäranlagen werden die Koeffizienten  $w_j$  aus der Studie von Dada [11] übernommen. Für die Anlagen, die dort nicht aufgelistet sind (Sitzbänke und Gepäckwagen), wurden die Werte aus Lam [20] verwendet.

**Tabelle 12: Gewichtung der Sekundäranlagen für den Flughafen Hamburg**

Sekundäranlage	Gewichtung $w_j$
Toiletten	0,95
Informationstafeln	0,94
Informationsschalter	0,85
Gastronomiebetriebe	0,83
Geldautomaten und Banken	0,76
Geldwechsel-Schalter	0,76
Gepäckwagen	0,74
Zeitschriftenladen	0,70
Sitzbänke	0,38
Öffentliche Telefone	0,34

Der von Dada [11] vorgeschlagene Faktor  $k_{ij}$  zur Berücksichtigung der Etagenwechsel und der Güte der Beschilderung zwischen zwei Knoten muss in dieser Arbeit hingegen verworfen werden. Der Tardity Differential, auf den der Faktor  $k_{ij}$  basiert, beinhaltet aufgrund des Experimentaufbaus sowohl subjektive Faktoren des wayfinding als auch objektive Umgebungsfaktoren. Im Passagierflusssimulationsmodell TOMICS hingegen sind diese zwei Komponenten als unabhängige Eingangsparameter (Info-Level und Entropie) voneinander getrennt. Die Benutzung von  $k_{ij}$  würde also die Entropie um einen subjektiven Anteil verzerren.

Als Alternative wird daher das Modell von Raubal & Egenhofer verwendet um indirekte Sichtlinien  $k_{ij}$  zwischen zwei Knoten bewerten zu können. Die Entscheidungspunkte bilden dabei Knoten im VI-Modell und die Hinweise stellen die Schilder dar. Um aus diesem Modell das nun angepasste  $k_{ij}$  in die VI-Formel integrieren zu können, muss der Wert zwischen 0 und 1 liegen. Dazu wird eine Intervallskala aufgestellt, die an den LOS-Standards für Orientierung angelehnt ist (s. Abschnitt II - 1.2.2.4):

Wenn die Beschilderung von einem Knoten  $i$  klar sichtbar ist und eine problemlose Verbindung zum Knoten  $j$  ermöglicht, wird der Wert 1 zugeteilt (LOS A). Erlaubt die Beschilderung erst nach einem leichten Aufwand eine eindeutige Orientierung zum Knoten  $j$  (z. B. Schild leicht verdeckt), erhält  $k_{ij}$  den Wert 0,66 (LOS B-C). Ist die indirekte visuelle Verbindung zwischen den zwei Knoten jedoch nur schwer herzustellen (z. B. Schild stark verdeckt, schwer abzulesen, etc.), nimmt  $k_{ij}$  den Wert 0,33 ein (LOS D). In Tabelle 13 ist das angepasste Modell von Raubal & Egenhofer detaillierter dargestellt.

Tabelle 13: Angepasstes Modell von Raubal & Egenhofer zur Bewertung der indirekten visuellen Verbindungslinien (Quelle: Eigene Darstellung)

		Wahlmöglichkeiten am Knoten $i = 1$	Wahlmöglichkeiten am Knoten $i > 1$
<b>Beschilderung</b>	<b>Sehr Gut</b>	$k_{ij} = 1$	$k_{ij} = 1$
	<b>Gut</b>	$k_{ij} = 1$	$k_{ij} = 0,66$
	<b>Schlecht</b>	1 (Schild nicht nötig)  $k_{ij} = 0,66$ (Bestätigung nicht vorhanden)	$k_{ij} = 0,33$
<b>Keine Beschilderung zwischen <math>i</math> und <math>j</math></b>		$k_{ij} = 1$ (Schild nicht nötig)  $k_{ij} = 0$ (Bestätigung nicht vorhanden)	$k_{ij} = 0$

Zur Ausfüllung der visuellen Verbindungsmatrizen für jeweils Terminal 1, Terminal 2 und die Airport Plaza wurden zunächst die Knoten durch eine Besichtigung vor Ort festgelegt. Diese repräsentieren die Entscheidungspunkte (z. B. die Eingangsbereiche) und die Anlagen (Check-in Bereiche, der Security-Bereich, Toiletten, etc.).

Anschließend wurde aus allen Knoten der Algorithmus in Abbildung 13 befolgt um die Matrizen der visuellen Verbindungen in den verschiedenen Gebäuden zu erstellen.

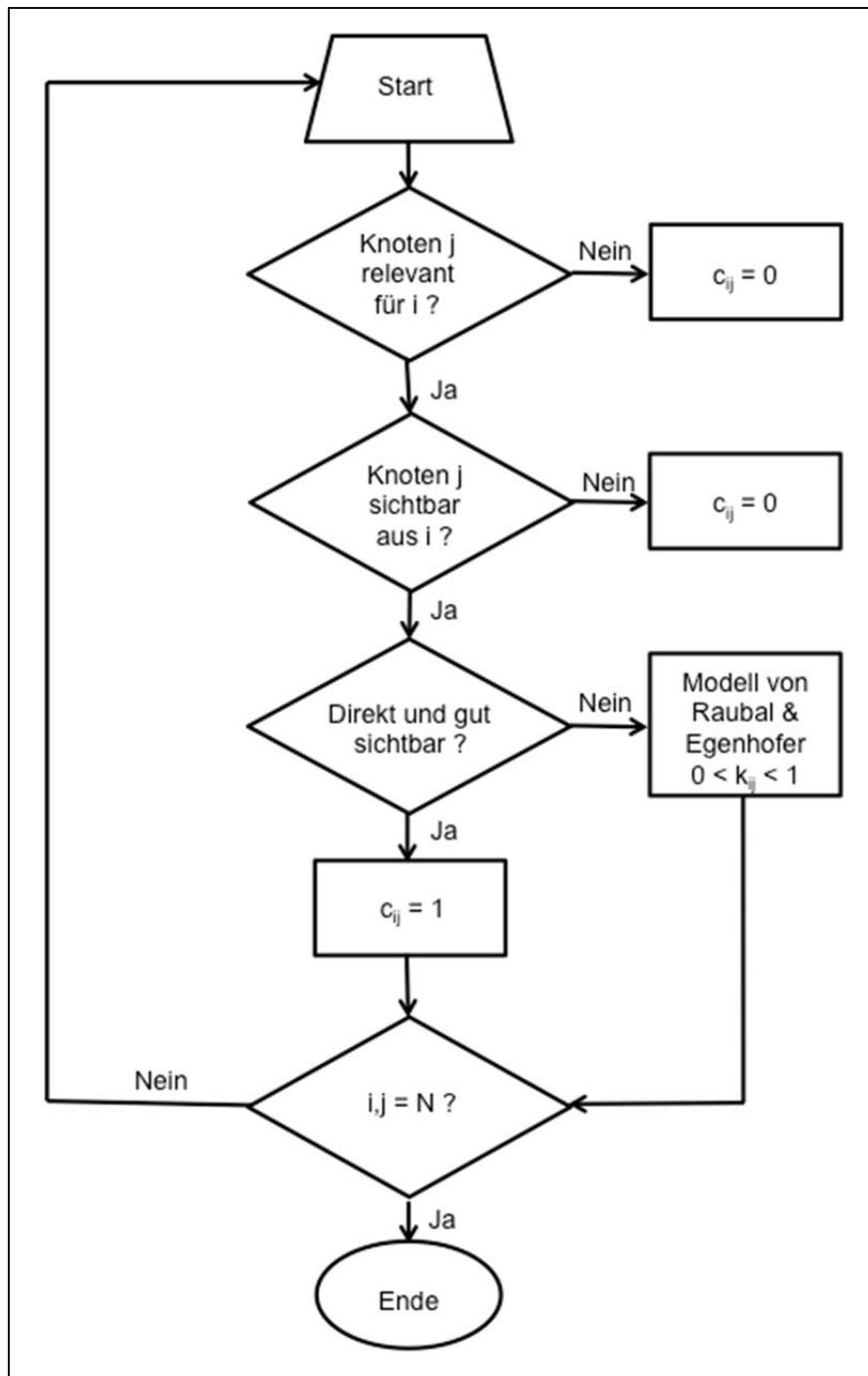


Abbildung 13: Algorithmus zum Aufbau der visuellen Verbindungsmatrix (Quelle: Eigene Darstellung)

Aus den Matrizen lässt sich nun mit der folgenden angepassten VI-Formel die Übersichtlichkeit in den untersuchten Gebäuden des Flughafens Hamburg bestimmen:

$$VI = \frac{\sum_{i,j}^N c_{ij} k_{ij} r_{ij} w_j}{N \sum_{i,j}^N r_{ij} w_j} \quad (8)$$

Für Terminal 1 ergibt sich aus 377 relevanten visuellen Verbindungen ein VI von 0,64. Dies entspricht dem LOS A nach Dada [11] und dem oberen Bereich des LOS C nach Tam & Lam [32] und Lam [20]. Die Übersichtlichkeit des Terminals 1 ist also mit einer Entropie von 36 % als sehr gut bis befriedigend einzustufen.

Für Terminal 2 sind aus 361 relevanten Sichtlinien 306 sichtbar. Die Quantifizierung der Güte dieser Verbindungen führt zu einem VI von 0,68. Terminal 2 bietet also eine gute bis sehr gute Übersichtlichkeit auf einem LOS zwischen A und B. Für die Entropie ergibt sich hieraus entsprechend ein Wert von 32 %.

Die Beobachtungen in der Airport-Plaza waren aufgrund der Sicherheitsbestimmungen am Flughafen nur aus den Knoten im öffentlichen Bereich möglich. Daher kann der oben vorgestellte Algorithmus nur für den Bereich vor der Security verwendet werden. Die Bewertung der visuellen Verbindungslinien für den Bereich hinter der Sicherheitskontrolle wurde, soweit möglich, aus Beobachtungen aus der Distanz, Fotos sowie CAD-Material geschätzt. Die Verbindungen, für die keine Schätzungen möglich waren, finden keine Berücksichtigung bei der Berechnung des VI.

Die Vorteile der transparenten und direkten Bauweise werden hier deutlich: Der öffentliche Bereich der Airport-Plaza bietet mit einem VI von 0,67 eine gute bis sehr gute Übersichtlichkeit und wird in TOMICS mit einer Entropie von 33 % versehen. Der nicht öffentliche Bereich erreicht ein VI von 0,77 bzw. eine Entropie von 23 %. Den Passagieren wird somit ein hohes LOS zwischen A und B angeboten.

Zur Bestimmung des VI im Pier konnte aufgrund des eingeschränkten Zugangs am Flughafen nur auf Fotos und CAD-Material zurückgegriffen werden. Der Pier besteht aus einem einzigen Gang. Der Übergang von der Airport-Plaza ist der hauptsächliche Entscheidungspunkt um an das richtige Gate zu gelangen. An diesem Knoten sind aufgrund der architektonischen Gegebenheiten lediglich zwei Möglichkeiten zur Routenwahl vorhanden: Der Weg in Richtung Norden und der Weg in südlicher Richtung. Die Hinweis-Schilder wurden als sehr gut befunden. Diese geringe Entscheidungskomplexität und die guten Hinweise, führen zu einem VI des Pier von 1; das entspricht einer Entropie von 0%. Eine empirische Ermittlung vor Ort würde höchstwahrscheinlich zu einem niedrigeren Ergebnis führen. Jedoch kann an dieser Stelle ohne weitere Anhaltspunkte kein anderer verlässlicherer Wert für den VI angenommen werden.

Der LOS der den Fluggästen geboten wird, bewegt sich, je nach angenommenem Standard, zwischen A und der oberen Grenze von C.

Tabelle 14: Übersichtlichkeit des Flughafen Hamburg (Quelle: Eigene Darstellung)

	Terminal 1	Terminal 2	Airport-Plaza (öffentlicher Bereich)	Airport-Plaza (nicht-öffentlicher Bereich)	Pier
<b>VI</b>	0,64	0,68	0,67	0,77	1
<b>Entropie</b>	36%	32%	33%	23%	0%
<b>LOS</b>	A-C	A-B	A-B	A-B	A

Die zur Verfügung gestellten topologischen Daten für die Erstellung des Flughafenmodells in TOMICS und die ermittelten Werte für den VI beziehen sich nur auf die heute existierende Infrastruktur. Eventuell geplante Baumaßnahmen, die zukünftig einen potentiellen Einfluss auf die Übersichtlichkeit und die Wegelängen im Terminal haben, können daher für den Referenzfall nicht berücksichtigt werden. Die ermittelten Entropie-Werte für den Flughafen Hamburg bleiben daher für die gesamte Betrachtungsperiode konstant.

II - 1.2.3 **Optimierte Prozessketten für 2015**

Dieses Kapitel beschreibt zunächst die vom DLR Institut für Flughafenwesen und Luftverkehr erarbeiteten alternativen Prozessmodelle für Flughafenterminals im Hinblick auf die Lage der Sicherheitskontrolle, da dies einen erheblichen Einfluss auf die Prozesskette und die Wegführung der Passagiere hat. Anschließend wird ein Maßnahmenkatalog für ein optimiertes Prozessmodell für 2015 vorgestellt, um in den verschiedenen Bereichen der Prozesskette gegenüber dem heutigen Stand Vorteil zu erzielen.

### II - 1.2.3.1 Variante „Zentrale Sicherheitskontrolle“

Die Variante der „zentralen Sicherheitskontrolle“ wird zurzeit am Flughafen Hamburg praktiziert.

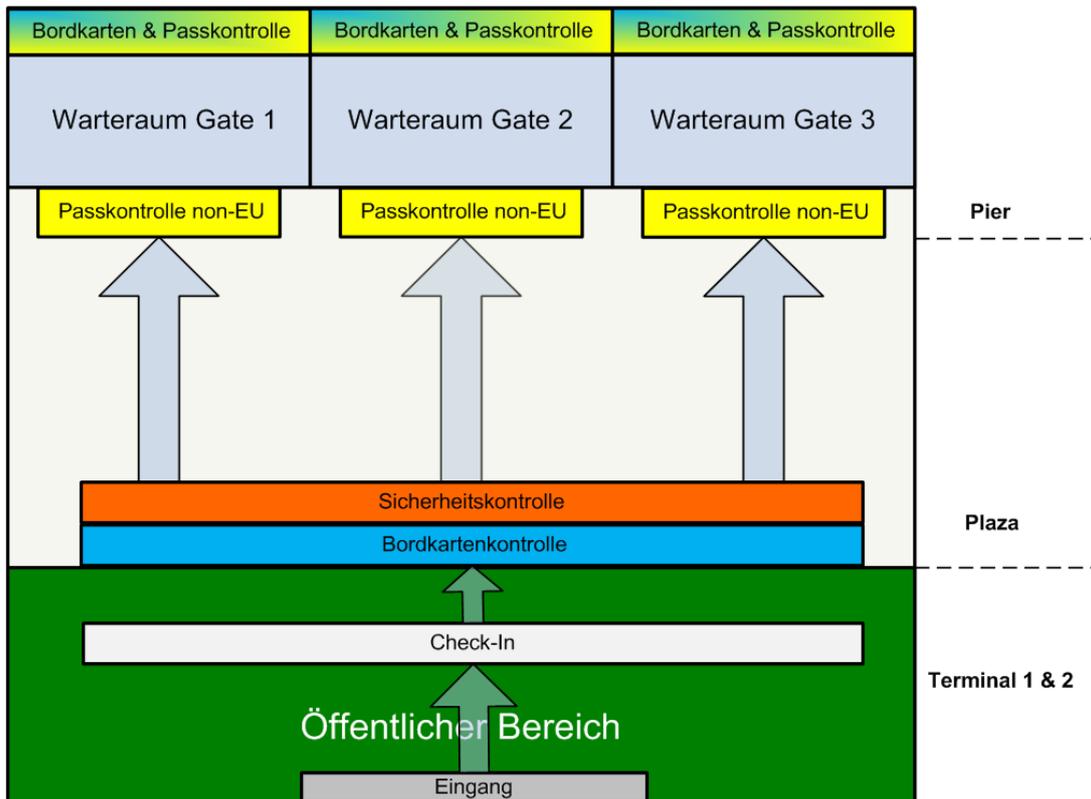


Abbildung 14: Schematische Darstellung der Variante „Zentrale Sicherheitskontrolle“

#### Vorteile

- Geringe Anzahl von Sicherheitskontrollgeräten wie Röntgenscannern und Torsonden erforderlich
- Wenig Sicherheitspersonal erforderlich

#### Nachteile

- Im relativ großen Bereich nach der Sicherheitskontrolle könnten gefährliche Gegenstände deponiert worden sein oder „normale Gegenstände“ zu gefährlichen Gegenständen umfunktioniert werden. Eine Kontrolle findet danach nicht mehr statt!
- Der Flughafen bleibt innerhalb des öffentlichen Bereichs unsicherer als bei der semizentralen Sicherheitskontrolle.

II - 1.2.3.2 Variante „Eingangssicherheitskontrolle“

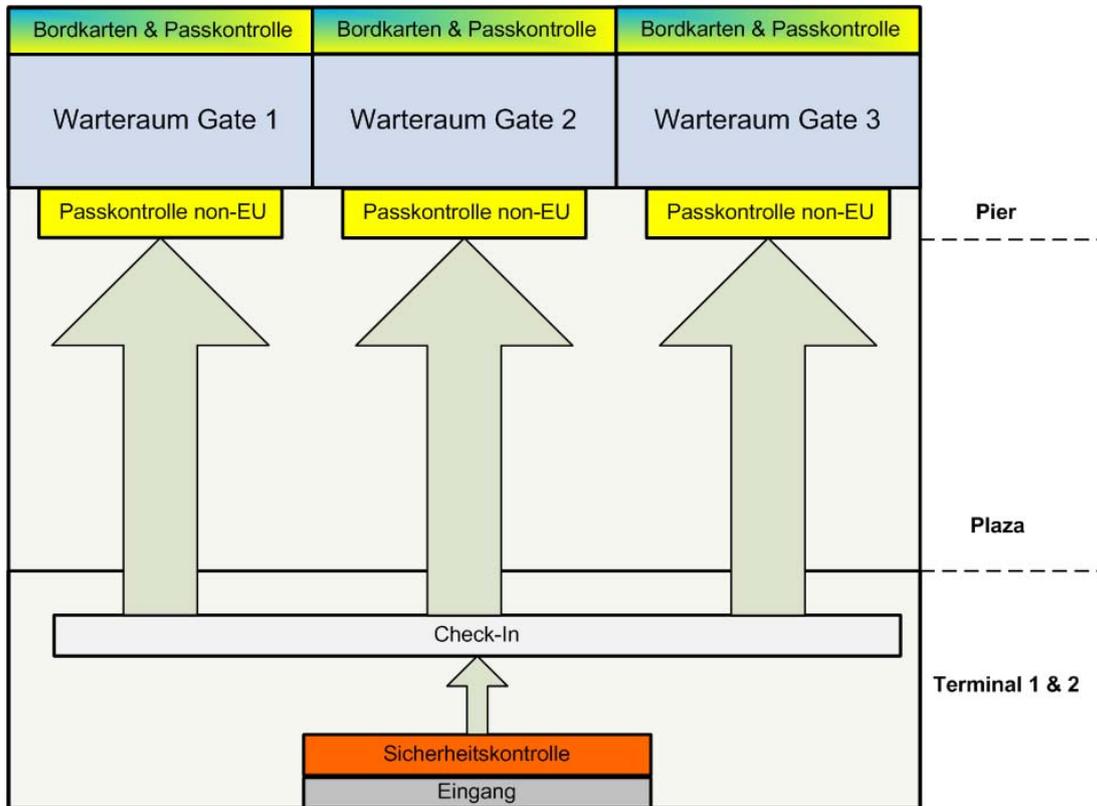


Abbildung 15: Schematische Darstellung der Variante „Eingangssicherheitskontrolle“

Vorteile

- Der gesamte Flughafen ist nach der Sicherheitskontrolle am Eingang sicher

Nachteile

- Im gesamten Bereich nach der Sicherheitskontrolle am Eingang könnten gefährliche Gegenstände deponiert worden sein oder „normale Gegenstände“ zu gefährlichen Gegenständen umfunktioniert werden. Eine Kontrolle findet danach nicht mehr statt!
- Höhere Anzahl von Sicherheitskontrollgeräten wie Röntgenscannern und Torsonden sowie Sicherheitspersonal erforderlich, weil auch Besucher kontrolliert werden.
- Das Warenangebot auf dem Flughafen ist aufgrund der Sicherheitsvorschriften eingeschränkt

II - 1.2.3.3 Variante „Dezentrale Sicherheitskontrolle“

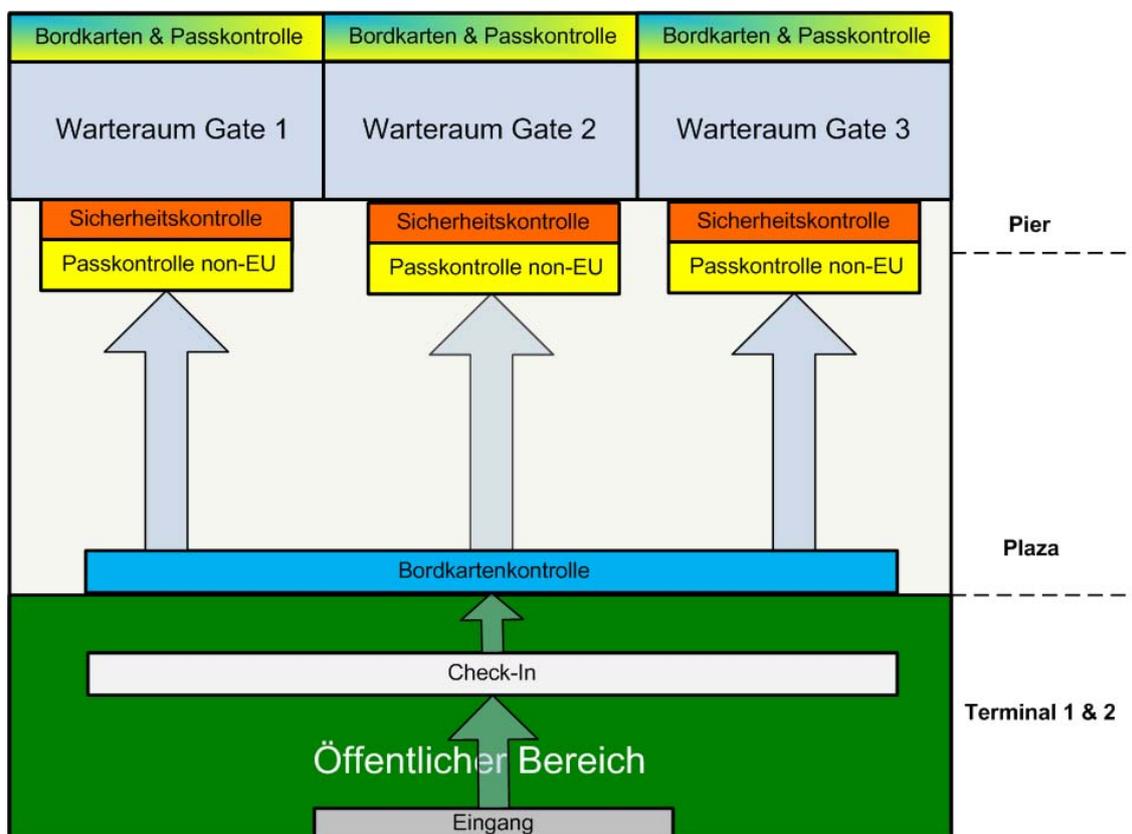


Abbildung 16: Schematische Darstellung der Variante „Dezentrale Sicherheitskontrolle“

Vorteile

- Da die Sicherheitskontrolle erst direkt vor dem Boarding stattfindet, bestehen weniger Möglichkeiten als in den anderen Varianten, gefährliche Gegenstände ins Flugzeug zu „schmuggeln“, somit wird der Bereich innerhalb des Flugzeugs sicherer.

Nachteile

- Höhere Anzahl von Sicherheitskontrollgeräten wie Röntgenscannern und Torsonden sowie Sicherheitspersonal als bei der zentralen Sicherheitskontrolle erforderlich, weil vor jedem Warteraum bzw. Gate Sicherheitskontrollen stattfinden
- Der Flughafen bleibt sowohl im öffentlichen als auch im nicht-öffentlichen Bereich relativ unsicher.

#### II - 1.2.3.4 Vergleich der Prozesskettenvarianten

Rein theoretisch wäre neben den drei oben genannten Varianten auch eine Kombination aus dezentraler und Eingangssicherheitskontrolle denkbar, die sowohl eine hohe Sicherheit im Flugzeug als auch innerhalb des Flughafens ermöglichen könnte, allerdings den Aufwand für Sicherheitstechnik und –personal in die Höhe treiben würde.

**Tabelle 15: Vergleich der Prozesskettenvarianten**

	Zentrale Sicherheitskontrolle	Eingangssicherheitskontrolle	Dezentrale Sicherheitskontrolle
<b>Sicherheit im Flughafen</b>	o	+	-
<b>Sicherheit im Flugzeug</b>	o	-	+
<b>Aufwand für Sicherheitstechnik und -personal</b>	+	o	o
<b>Anzahl benötigter Sicherheitskontrollstellen</b>	16	19	22
<b>Restriktionen bzgl. Warenangebot</b>	o	-	+

II - 1.2.3.5 Maßnahmenübersicht

Liste der Einzelmaßnahmen und ihrer Vorteile

Projekt	Typische Vorteile
A) Gepäck	
1. Einsatz von Transpondern zur Gepäckverfolgung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Authentifizierung des Gepäcks und Verfolgung über mehrere Stationen</li> <li>• Erhöhung der Sicherheit bei der Gepäckrückgabe insbesondere Reduzierung der Gepäckverluste</li> <li>• Beschleunigung der Gepäckabfertigung</li> <li>• Effiziente Auslastung bestehender Abfertigungskapazitäten</li> </ul>
2. Einführung biometrischer Verfahren zur Gepäckabfertigung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhöhung der Sicherheit durch die Zuordnung von Passagier und Gepäck bei der Gepäckkontrolle und –rückgabe</li> <li>• Reduzierung der Gepäckverluste</li> <li>• Optimierung von Gepäckabfertigungsprozessen</li> <li>• Effizientere Auslastung der Terminalanlagen</li> <li>• Beschleunigung der Gepäckabfertigung</li> <li>• Erhöhung der Durchsatzrate und Abfertigungskapazitäten</li> <li>• Verkürzung der Warte- und Bodenzeiten</li> <li>• Erhöhung der Kundenzufriedenheit (Komfort / Service)</li> <li>• Reduzierung personeller Engpässe an Flughäfen</li> </ul>
B) Parkraummanagement	
1. Einsatz von Teleparking	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimierung der MIV-Bedingungen</li> <li>• Vermeidung des Parksuchverkehrs (z. B. durch Reservierung) und Reduzierung der Umweltbelastung</li> <li>• Effektivere Nutzung der vorhandenen Kapazitäten an Parkräumen und im Straßenverkehr</li> <li>• Verbesserung der geschätzten Reisezeit und Anpassung</li> </ul>

	<p>an die unterschiedlichen Bedürfnisse der Kunden (Lang-, Kurzzeit, terminalnahes, preiswertes Parken)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimierung der infrastrukturellen Kapazitäten und der Sicherheit für Personen und Fahrzeuge</li> </ul>
2. Einführung automatisierter Parkplatzshuttles	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimierung der MIV-Bedingungen an Flughäfen</li> <li>• Effektivere Nutzung der vorhandenen Kapazitäten im Straßenverkehr und der Parkräume</li> <li>• Vermeidung von Parksuchverkehren und Reduzierung der Umweltbelastung</li> <li>• Schnelle und bequeme Erreichung der Terminalgebäude</li> <li>• Einfacheres, bequemerer, planbareres und kostengünstigeres terminalfernes Parken</li> <li>• Erhöhung von Service und Komfort</li> </ul>
<b>C) Roll- und Vorfeldbewegungen</b>	
1. Automatisierte Andocksysteme	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verbesserung des Ressourcenmanagements, der Rentabilität und der Sicherheit auf dem Roll- und Vorfeld auch bei schlechten Wetter- und Sichtbedingungen</li> <li>• Verkürzung der Einroll-, Boden- und Andockzeit der Flugzeuge</li> <li>• Optimale Andockführung</li> <li>• Vermeidung von Verspätungen</li> <li>• Verhindern von unnötigem Verkehr und Treibstoffverbrauch, dadurch Reduzierung der Umweltbelastung</li> <li>• Optimale Verkehrsplanung</li> </ul>
<b>D) Sicherheit</b>	
1. Einsatz von Body-Scanning für die physische Sicherheitskontrolle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohe Qualität der Sicherheitskontrolle</li> <li>• Kapazitätserhöhung der physikalischen Sicherheitskontrolle</li> <li>• Schnelle und effiziente Sicherheitskontrolle</li> <li>• Reduzierung von Wartezeiten der Passagiere</li> <li>• Hoher Komfort, Service und damit Kundenzufriedenheit</li> <li>• Effiziente Auslastung der Terminalanlagen</li> <li>• Vermeidung der Verlängerung von Bodenzeiten</li> <li>• Reduzierung personeller Engpässe</li> </ul>
2. Einsatz von biometrischen Verfahren zur Automatisierung der Zutrittskontrollen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimierung von Kontrollprozessen</li> <li>• Kapazitätserhöhung der Anlagen</li> <li>• Erhöhung der Sicherheit durch hohe Qualität der Zutrittskontrollen</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schnellere Abfertigung und damit kurze Wartezeit</li> <li>• Effiziente Auslastung der Terminalanlagen</li> <li>• Reduzierung personeller Engpässe</li> <li>• Verbesserung von Komfort, Service und damit Kundenzufriedenheit</li> <li>• Vermeidung der Verlängerung von Bodenzeiten</li> <li>• Hohe Zuverlässigkeit und Akzeptanz</li> </ul>
<b>E) Verkehrsflusssteuerung</b>	
1. Einführung von Verkehrsmanagementsystemen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bessere Verkehrsmittelwahl und damit verbesserte Erreichbarkeit, höhere Verkehrssicherheit und bessere Anpassung an Mobilitätsbedürfnisse für den Reisenden</li> <li>• Verfügbarkeit von realen Daten zur taktischen und strategischen Planung und der Abbildung der Ist-Situation für die Kommunen und Verkehrsplaner</li> <li>• Effektiver Fahrzeugeinsatz und Anschlusssicherung für ÖPNV-Betreiber</li> </ul>
2. Einführung von Informationsplattformen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zusammenführung, Aufbereitung und Bereitstellung von Verkehrs-, Stadt- und Regionsinformationen in einer gemeinsamen Plattform</li> <li>• Verbesserung der Informationsbereitstellung für Beteiligte bzw. Nutzer</li> <li>• Verbesserung der Informationsqualität und -aktualität</li> <li>• Verbesserung von Planungs-, Entscheidungs-, Steuerungs- sowie Kontrollstrategien</li> <li>• Verbesserung der Auslastung der vorhandenen Ressourcen- und Transportkapazitäten</li> <li>• Optimierung der Transportvorgänge</li> <li>• Effizienzsteigerung der Verkehrssysteme</li> <li>• Beeinflussung des Verkehrsablaufes und damit die Erhöhung der Attraktivität und Akzeptanz der ÖV</li> <li>• Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit</li> <li>• Verbesserung der Reiseplanerstellung</li> <li>• Minimierung der Übergangswiderstände (Entlastung der Zufahrtswege)</li> </ul>
3. Einsatz von Telematiksystemen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schaffung der technischen und organisatorischen Voraussetzungen zum Daten- und Informationsaustausch zwischen beteiligten Institutionen</li> <li>• Zugangsverbesserung zum Flughafen durch Bereitstellung aktueller, reisezweckspezifischer Informationen und Dienstleistungen</li> <li>• Integration vorhandener und etablierter Verkehrsleit- und</li> </ul>

Managementsysteme (z. B. Luft- u. Bodenverkehr, Parkraum, Stadtinformationen) und Verschmelzung zu einem integrierten Gesamtkonzept

- Gezielte Beeinflussung des Verkehrsablaufes durch neu entwickelte Strategien
- Verkehrsträgerspezifische Effizienzsteigerung
- Rollführungsmanagementsysteme zur Steigerung der Kapazität, Sicherheit und Effizienz der Fahrzeugbewegungen auf dem Flughafengelände
- Integrierte Informations-, Buchungs- und Zahlungssysteme
- Effektive Nutzung der vorhandenen Verkehrsinfrastrukturen
- Reduzierung von Umweltbelastungen durch Steuerung des Verkehrs

## II - 1.3 Effiziente Passagierflusssteuerung – Digitale Boarding-Assistenz (DigiBA)

Auf Basis der im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Vorarbeiten wird im Folgenden die Modellierung und Bewertung einer Technologie beschrieben, die den Passagier bei der Wegfindung im Flughafenterminal unterstützen soll. Dazu wird zunächst auf das technische Konzept der Digitalen Boarding Assistenz (DigiBA) eingegangen. Anschließend wird die Art der Modellierung des Flughafen Hamburg und den gegebenenfalls mit einer DigiBA ausgestatteten Passagieren in einer Passagierfluss-Simulation des DLR Instituts für Flughafenwesen und Luftverkehr erläutert. An die Simulationsergebnisse schließt sich eine Cost Benefit Analyse (CBA) an. Die Beschreibung der Terminalpassagierflusssimulationen, auf denen die ermittelten Wegzeitreduktionen der Passagiere basieren, sowie die Methoden, die zur Monetarisierung des Nutzens bei der DigiBA angewendet wurden, sind in [1] erarbeitet worden.

### II - 1.3.1 *Technisches Konzept der DigiBA*

Der DigiBA-Ansatz sieht die Entwicklung einer Technologie für ein dediziertes mobiles Endgerät vor. Dieses Gerät soll eine graphische Darstellung von Nachrichten und Navigationsanweisungen ermöglichen. Aus der Anforderung, die Maße des Gerätes gering zu halten, ergibt sich die Notwendigkeit möglichst platzsparende Akkus einzusetzen und stromsparende Komponenten einzubauen. Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, verwendet die DigiBA-Technologie das IEEE 802.15.4 Protokoll.

Der IEEE 802.15.4 Standard erlaubt eine Signalübertragung mit geringer Leistungsaufnahme und einen langen Batteriebetrieb. Typisches Anwendungsgebiet ist die drahtlose Datenübertragung zur Hausautomation über Fernbedienungen und Sensoren. Mit der IEEE 802.15.4a Erweiterung setzt ein erster Standard an die Ortung mobiler Geräte an, sodass die Vorstellung der Indoor-Navigation grundsätzlich Gestalt annehmen kann.



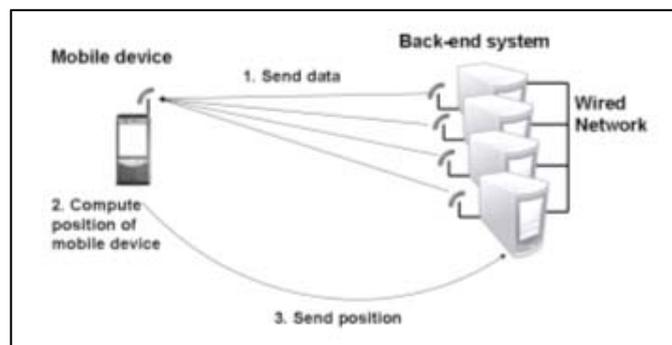
Abbildung 17: Prototyp der DigiBA (Quelle: Großmann et al., 2011b, S. 3)

Für eine zukünftige Implementierung der Indoor-Navigation auf Basis der oben vorgestellten Technologie würde eine neue dedizierte Netzwerk-Infrastruktur nötig sein, welche aus den mobilen DigiBAs, im Terminal verteilten Basis-Stationen und einen oder mehreren zentralen

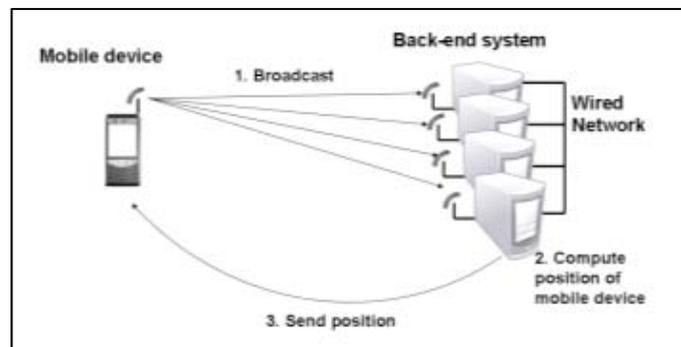
Servern besteht. Grundsätzlich sind zwei Infrastrukturen für die Positionsbestimmung vorstellbar:

- **Eigene Positionsbestimmung:** Das mobile Endgerät ist in der Lage seine Position aus Daten der funkenden Basisstationen zu ermitteln. Die Ortsinformation verbleibt grundsätzlich im Gerät und wird nicht nach außen weitergegeben. Werden jedoch Positions-basierte Dienste in Anspruch genommen, muss die Positionsangabe den Servern übertragen werden.
- **Verteilte Positionsbestimmung:** Die Berechnung der Position des Endgerätes wird durch ein Back-End System unter Zuhilfenahme von Daten verschiedener Basisstationen durchgeführt. Die Ortsinformationen befinden sich in diesem Fall erzwingenermaßen im Back-End System. Dieses Szenario ist für Endgeräte interessant, die beschränkte rechnerische und akkutechnischen Kapazitäten besitzen.

Aufgrund der fortschreitenden Verbesserung der Rechenleistung und der sinkenden Preise im Telekommunikationsbereich ist das erste Szenario auf lange Sicht wahrscheinlicher. Für die DigiBA-Technologie eignet sich hingegen eine verteilte Positionsbestimmung.



**Abbildung 18: Eigene Positionsbestimmung des mobilen Endgerätes**  
(Quelle: Großmann et al., 2011, S. 108)



**Abbildung 19: Verteilte Positionsbestimmung des mobilen Endgerätes**  
(Quelle: Großmann et al., 2011, S. 108)

In diesem Bericht wird schwerpunktmäßig auf die Digitale Boarding-Assistenz (DigiBA) und nur zur Vergleichszwecken auf das Digitale Bording Unterstützungssystem für Smartphones (DiBUS) eingegangen, da hierfür ein eigenständiger Abschlussbericht des Projektes DiBUS vorliegt.

### II - 1.3.2 **Modellierung des Flughafen Hamburg mit TOMICS**

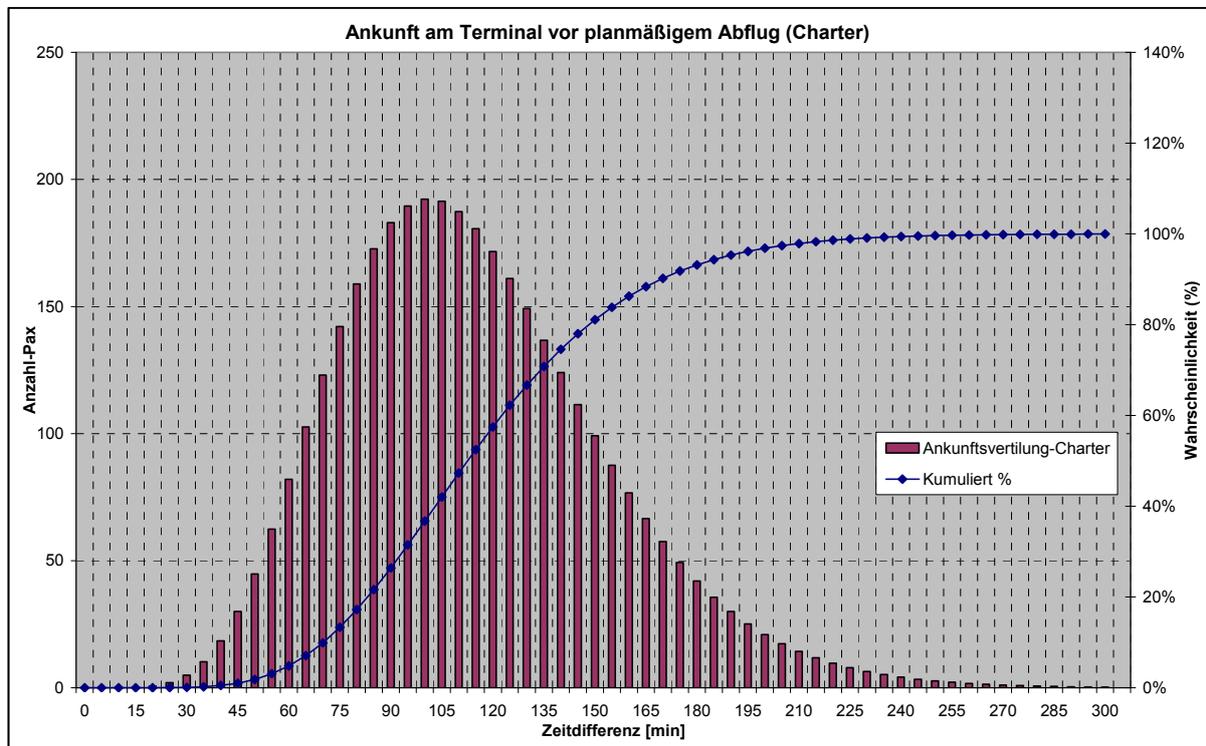
Im Arbeitspaket 2.3 „Terminalpassagierfluss-Simulation“ wurden auf Basis der erwarteten Navigations-Funktionen der DigiBA-Technologie Simulationen mit dem „Traffic Oriented Microscopic Simulator (TOMICS)“ des DLR Instituts für Flughafenwesen und Luftverkehr durchgeführt, um die Wechselwirkungen der Prozesse im Terminal unter Nutzung dieser Navigationstechnologien zu untersuchen und deren Wirkungsnachweis zu erbringen. Die Simulationen können ebenfalls dazu dienen, Schwachstellen der angestrebten Technologien aber auch der dazugehörigen Abfertigungsprozesse und deren Level-of-Service aufzudecken.

TOMICS ist ein mikroskopisches Schnellzeitsimulationsprogramm zur Modellierung einzelner Personenbewegungen (z. B. Passagiere) in einem Verkehrsraum (Terminal) und zur Identifikation von Problemen an Flughäfen. TOMICS ist so ausgelegt, dass möglichst alle Verkehrs- und Abfertigungsprozesse eines Flughafenterminals simuliert werden können. Die Modellierung erfolgt anhand einer elementaren Struktur von Grundelementen der Verkehrssystemtheorie. Die Basis bilden Ereignisse, die innerhalb eines vordefinierten Raumes zwischen Quellen und Senken beschrieben werden. Alle Bewegungen im Raum (bzw. im Terminal) werden durch kontinuierliche zeitschrittbezogene Berechnungen von Richtung und Geschwindigkeit unter Einbeziehung einer Konfliktprüfung simuliert.

Hierzu müssen zunächst die Terminalgebäude des Flughafen Hamburg mithilfe der vom Flughafen zur Verfügung gestellten Daten abgebildet (z. B. Lagepläne, topografische und flughafenspezifische Daten) werden. Mithilfe von CAD-Kartenmaterial wurden dazu die topologischen Gegebenheiten des Terminal 1, des Terminal 2, der Airport-Plaza sowie des Piers in TOMICS modelliert. Zudem wurden die Passagierabfertigungsprozesse (z. B. Check-in, Sicherheits-, Pass-, Boardingkontrolle) mithilfe der Eingabeparameter für Standardvorgänge im Modell beschrieben. Aufgrund fehlender Daten wurden die Sekundärflächen in der Simulation nicht berücksichtigt.

### II - 1.3.3 **Modellierung der Passagiere und deren Orientierungsfähigkeit**

Um die Passagiere in der TOMICS-Simulation zu generieren, wird ein Tagesflugplan herangezogen, um die Passagierverkehre im Basisjahr 2010 sowie in den Prognosejahren 2015 und 2030 zu simulieren. Für jeden Flugtyp wird ein Sitzladefaktor angenommen um die Passagierzahlen zu erzeugen. Wichtig für die Beschreibung des Verkehrsflusses sind die Ankunftszeiten der Passagiere am Terminal. Anhand einer Passagierbefragung, im Auftrag des Flughafens Hamburg, wurden diese Ankunftszeiten vor Abflug generiert. Diesbezügliche Untersuchungen haben ergeben, dass sich die Ankunftszeiten über die Gammaverteilung relativ realitätsnah modellieren lassen (s. Abbildung 20 und Abbildung 21).



**Abbildung 20: Ankunft der Passagiere (Charter) am Terminal vor Abflug**

Aus Abbildung 20 wird ersichtlich, dass sich die Passagiere für Charterflüge im Durchschnitt 113 Minuten im Hamburger Flughafen aufhalten. Für Linienflüge hingegen liegt die Verweildauer der Fluggäste bei durchschnittlich 87 Minuten (vgl. Abbildung 21).

Für die Modellierung der Abfertigungszeiten an den Check-in Schaltern sowie an den Sicherheits- und Passkontrollen werden je nach Prozessstelle, auf Basis empirischer Untersuchungen, entweder Normalverteilungen oder Deltafunktionen angenommen. Aufgrund fehlender Flughafeninformationen, die die Ankunftsprozesse betreffen (z. B. topologische Gegebenheiten des Ankunftsgebietes und Prozesszeiten), werden nur abfliegende Passagiere berücksichtigt. Außerdem wird die Benachrichtigungs- und Kommunikationsfunktion der DigiBA außer Acht gelassen. Neben den topologischen Gegebenheiten des Flughafen Hamburg und der Festlegung der Prozesszeiten, ist es notwendig das Orientierungsverhalten der Passagiere modellieren zu können. Dazu sind drei Eingangsparameter festgelegt worden, die jeweils die Übersichtlichkeit eines Gebäudes (Entropie), die individuellen „wayfinding“-Fähigkeiten eines Passagiers (Informiertheitsgrad) und den Verbreitungsgrad von Indoor-Navigationsgeräten widerspiegeln.

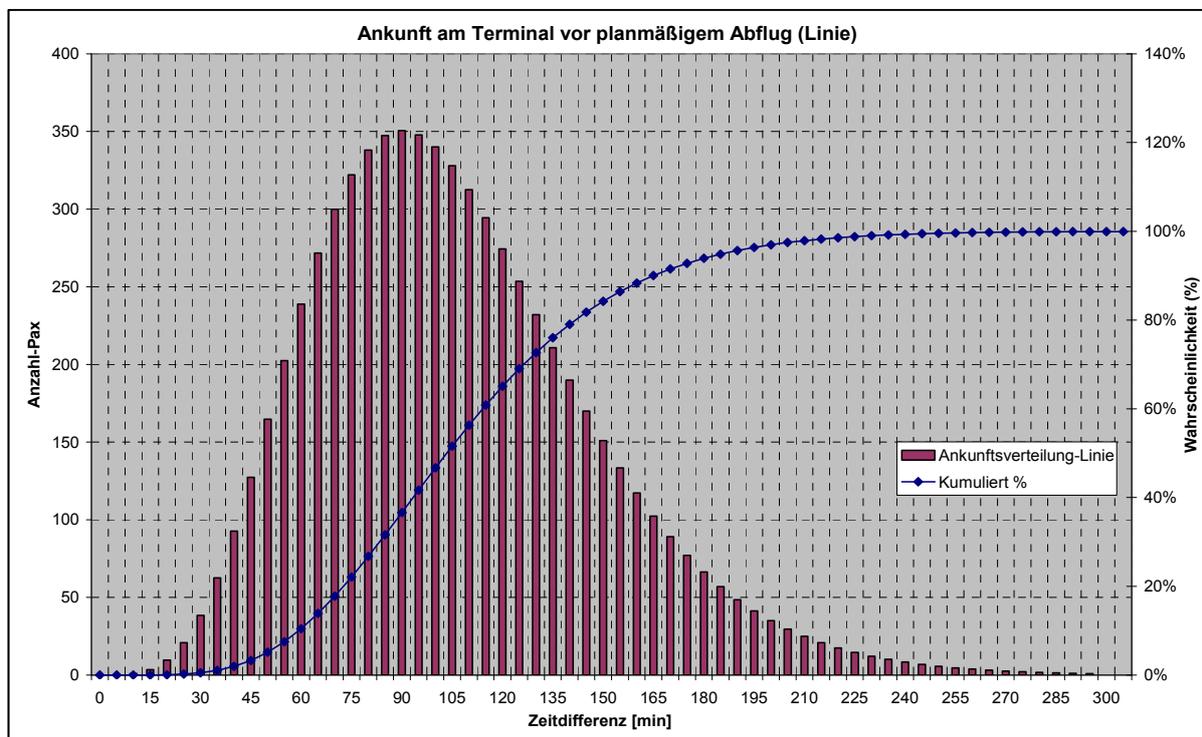


Abbildung 21: Ankunft der Passagiere (Linie) am Terminal vor Abflug

### II - 1.3.3.1 Die Übersichtlichkeit des Flughafens

Die „Entropie“ ist im Simulationsmodell TOMICS ein Maß für die Übersichtlichkeit eines Flughafenbereichs. Sie kann einen beliebigen Wert zwischen 0 und 1 haben. Ein Wert von 0 bedeutet, dass alle Passagiere innerhalb eines bestimmten Raumes theoretisch eine perfekte Orientierungsmöglichkeit angeboten bekommen. Ein Wert von 1 bedeutet das Gegenteil, nämlich, dass aufgrund der Komplexität des Gebäudes alle Passagiere niemals ihr Ziel finden und endlos auf dem Flughafen umherlaufen. Die Entropie kann in der TOMICS-Simulation nicht individuell für einen Passagier, sondern nur für einen bestimmten Bereich eines Flughafens definiert werden. Die Entropie  $E$  steht somit in folgender Beziehung zum VI:

$$E = 1 - VI \tag{7}$$

### II - 1.3.3.2 Der Informiertheitsgrad eines Passagiers

Neben dem objektiven Faktor der Übersichtlichkeit, die durch die Entropie festgelegt wird, können auch die individuellen Faktoren beim wayfinding, wie kognitive Fähigkeiten und Vertrautheit mit der Umgebung, in TOMICS berücksichtigt werden. Dazu wird jedem Passagier eine individuelle Variable „Info-Level“ zugeteilt.

Ein Info-Level von 0 bedeutet, dass der Passagier keinerlei Informationen über die Topologie am Flughafen besitzt. Bei einem Info-Level von 1 handelt es sich um den perfekt über die Topologie informierten Passagier, der sich z. B. auch innerhalb eines sehr unübersichtlichen und kaum beschilderten Bereichs eines Flughafens perfekt zurecht findet und an den Entscheidungspunkten stets die richtige Routenwahl trifft. Dies könnte z. B. bei einem Flughafenmitarbeiter oder einem Passagier, der mit Indoor-Navigation ausgestattet ist, der Fall sein. Ist hingegen ein Flughafenbereich sehr übersichtlich bzw. gut beschildert, kann auch ein wenig informierter Passagier sein Ziel relativ einfach erreichen.

In TOMICS wird angenommen, dass die Passagiere, die über eine DigiBA verfügen, immer die höchste Informiertheit für die Bewältigung der „wayfinding“-Aufgaben haben, was einem Info-Level von 1 bzw. 100% entspricht. Für Passagiere ohne DigiBA wird ein Info-Level von lediglich 0,2 bzw. 20% angenommen.

#### II - 1.3.3.3 Der Durchdringungsgrad von Indoor-Navigationsgeräten

Zusätzlich zum Info-Level und der Entropie kann im Simulationsmodell der Durchdringungsgrad von Indoor-Navigationsgeräten unter den Passagieren variiert werden. Der Durchdringungsgrad gibt an, zu welchem Anteil die Passagiere mit einem Indoor-Navigationssystem ausgestattet sind und es tatsächlich benutzen. Der Wertebereich des Durchdringungsgrads liegt zwischen 0 % und 100 %.

#### II - 1.3.4 *Simulationsergebnisse des Einsatzes von Indoor-Navigation*

Basierend auf einer von den Entwicklern erstellten Prognose des Durchdringungsgrads der DigiBA wurden vom DLR Institut für Flughafenwesen und Luftverkehr Simulationsszenarien für den Betrachtungszeitraum 2020 bis 2030 erstellt, aus denen sich Zeitersparnisse für die Passagiere gegenüber dem heutigen Referenzszenario ergeben (Kapitel II - 1.3.5). In Kapitel II - 1.3.5.1 werden die ermittelten Zeitersparnisse aus Sicht des Passagiers und in Kapitel II - 1.3.5.2 aus Sicht des Flughafenbetreibers und der Konzessionäre monetarisiert.

Die Simulationen mit TOMICS bestätigen, dass Indoor-Navigationsgeräte einen Einfluss auf die Wegezeiten von Passagieren haben. Dieser Einfluss ergibt sich in erster Linie aus einer erhöhten Informiertheit der Passagiere und führt zu einer verbesserten Wegeführung. Aus Abbildung 22 ist ersichtlich, dass mit zunehmendem Durchdringungsgrad der Indoor-Navigationsgeräte die mittlere Zeit zum Durchlaufen der Terminals sinkt.

Die Passagierflusssimulation der Szenarien für die Jahre 2020, 2022 und 2030, mit jeweils 66 % und 82 % Durchdringung, ergaben folgende Zeitersparnisse:

Tabelle 16: Durchschnittlicher Zeitgewinn bei den prozessbezogenen Aktivitäten pro Passagier durch den Einsatz der DigiBA

Jahr	Zeitgewinn für Passagiere aus T1		Zeitgewinn für Passagiere aus T2	
	Absolut [min]	Relativ	Absolut [min]	Relativ
2010	4,6	17,6%	4,0	16,6%
2015	4,7	17,7%	3,9	15,8%
2020	4,9	18,2%	3,9	16,2%
2030	5,2	16,8%	3,8	13,8%

Die unterschiedlichen Zeitgewinne zwischen Terminal 1 und 2 lassen sich dadurch begründen, dass das Terminal 2 eine höhere Übersichtlichkeit (Visibility Index = 0,68 gegenüber 0,64) aufweist. Je höher jedoch bereits die Übersichtlichkeit eines Terminals ist, desto geringer ist das Verbesserungspotenzial einer Indoor-Navigation auf die Wegfindung.

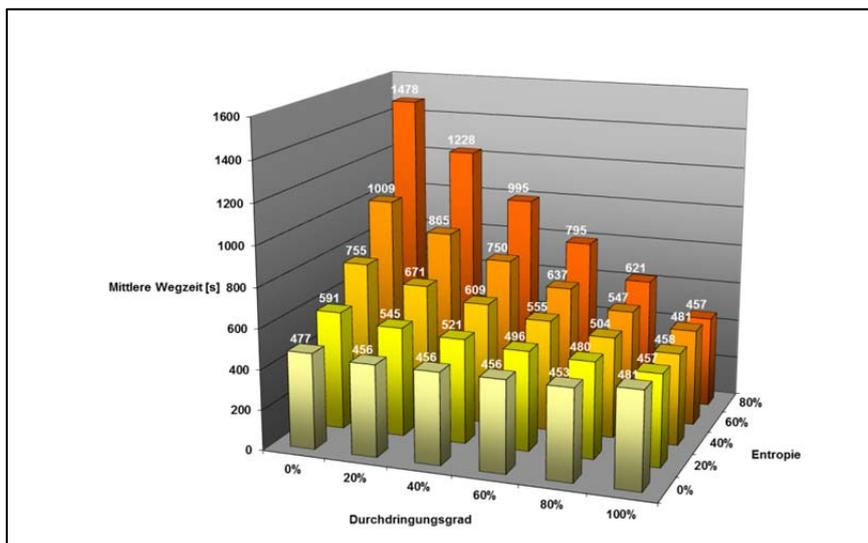


Abbildung 22: Mittlere Wegezeiten für abfliegende Passagiere in Terminal 1

II - 1.3.5 **CBA**

II - 1.3.5.1 **Monetäre Bewertung der Wegzeitreduktion für die Passagiere**

Bei näherer Betrachtung der Wege- und Wartezeiten ergeben sich ähnliche Feststellungen wie bei der Analyse des Einflusses der DiBUS (siehe DiBUS Abschlussbericht). Deswegen wird an dieser Stelle auf eine erneute Analyse verzichtet.

Der Nutzen für die einzelnen Passagiertypen, in den simulierten Jahren 2020, 2022 und 2030, entspricht nach [1] den folgenden monetären Beträgen:

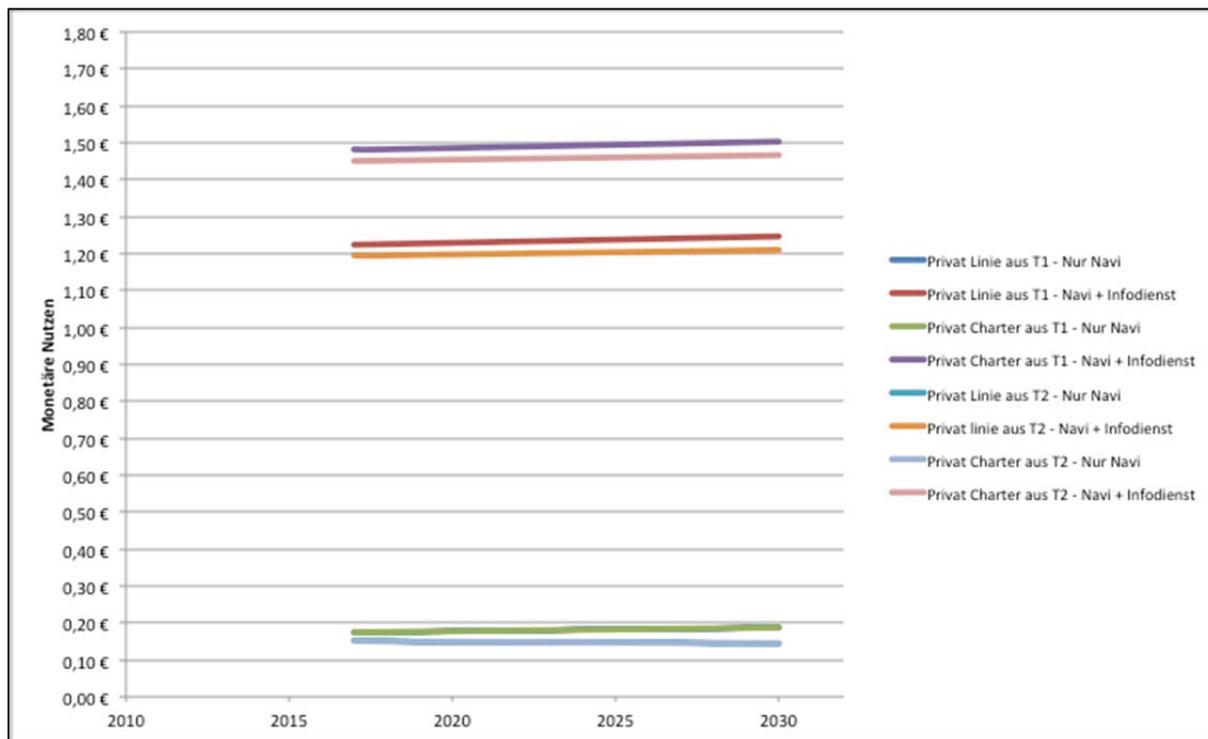
**Tabelle 17: Monetärer Nutzen für die einzelnen Passagiertypen bei Einsatz der DigiBA [1]**

Passagiertyp	2010	2015	2020	2030
<b>Nur DigiBA-Navigation</b>				
PLT1	0,17 €	0,17 €	0,18 €	0,19 €
PCT1	0,17 €	0,17 €	0,18 €	0,19 €
PLT2	0,15 €	0,15 €	0,15 €	0,14 €
PCT2	0,15 €	0,15 €	0,15 €	0,14 €
GT1	0,62 €	0,65 €	0,66 €	0,70 €
GT2	0,58 €	0,56 €	0,56 €	0,54 €
<b>DigiBA Navigation + Infodienst</b>				
PLT1	1,21 €	1,23 €	1,23 €	1,25 €
PCT1	1,47 €	1,48 €	1,48 €	1,50 €
PLT2	1,19 €	1,19 €	1,20 €	1,21 €
PCT2	1,44 €	1,45 €	1,45 €	1,47 €
GT1	4,50 €	4,56 €	4,57 €	4,64 €
GT2	4,41 €	4,44 €	4,46 €	4,50 €

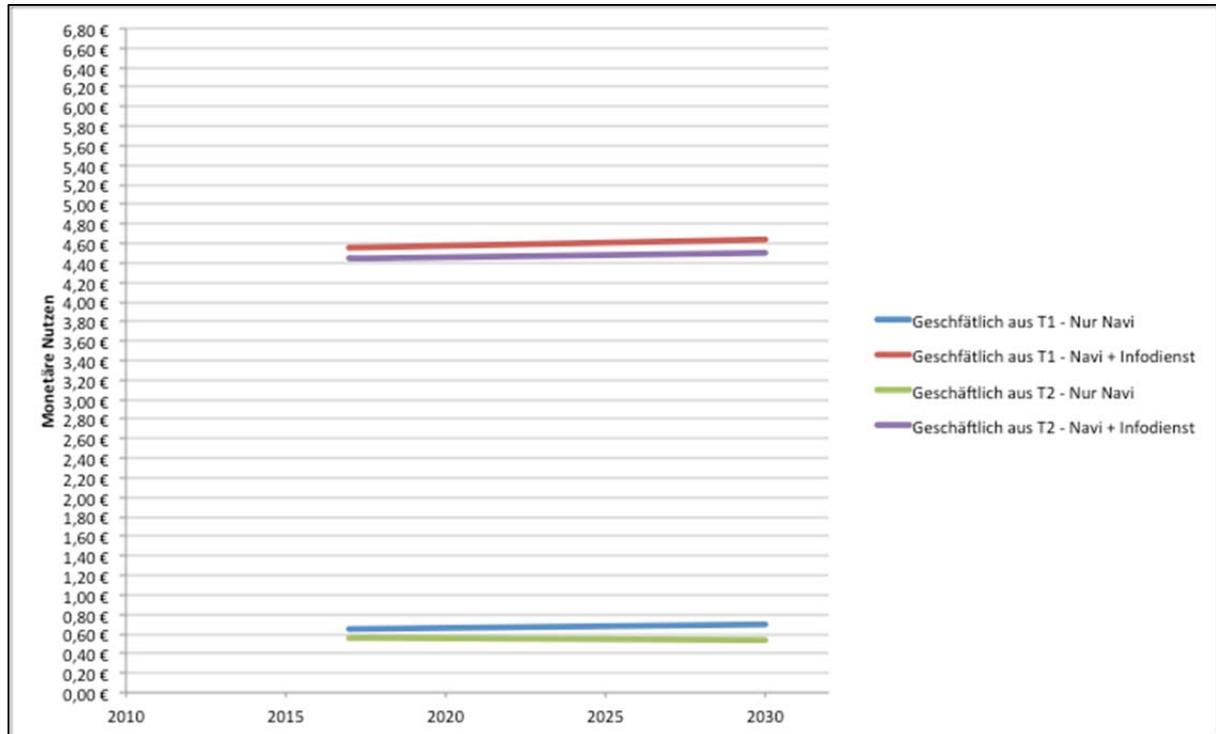
Aus Abbildung 23 und Abbildung 24 ist ersichtlich, dass der Nutzen für einen Passagier im Laufe der Jahre in etwa konstant ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Parameter Entropie, Durchdringungsgrad und Info-Level sowie die zurückzulegenden Distanzen auch konstant bleiben.

Die Befolgung der Navigationsanweisungen der DigiBA erspart zwischen 14 % und 18 % (siehe Tabelle 16) der prozessbezogenen Zeiten. Diese 4 bis 5 Minuten mehr Zeit für freie Aktivitäten am Flughafen werden von den Privatreisenden mit 0,14 € bis 0,19 € bewertet (siehe Tabelle 17). Die Zahlungsbereitschaft der zeitsensibleren Geschäftsreisenden liegt zwischen 0,54 € und 0,70 €.

Sinken neben der Komplexität der Wegefindung zusätzlich die flugbezogenen Unsicherheiten der Fluggäste durch die Kommunikationsfunktion der DigiBA, wächst der Zeitkostenvorteil über die gesamte Aufenthaltsdauer am Flughafen. Deshalb schöpfen die Charter-Passagiere einen höheren Vorteil daraus als die Linien-Passagiere, weil ihre durchschnittliche Verweildauer am Flughafen länger ist. Die Steigerung des Passagierkomforts in Kombination mit der Navigation entspricht einer monetären Bewertung von rund 1,20 € bis 1,50 € durch die Privatreisenden und circa 4,50 € durch die Geschäftsreisenden.



**Abbildung 23: Monetärer Nutzen des Einsatzes der DigiBA für Privatreisende im Betrachtungszeitraum [1]**



**Abbildung 24: Monetärer Nutzen des Einsatzes der DigiBA für Geschäftsreisende im Betrachtungszeitraum [1]**

Der diskontierte aggregierte Nutzen der DigiBA für alle Passagiere beläuft sich für das Modell des Hamburger Flughafens bei einem Aufkommen von 111,75 Mio. Passagiere zwischen 2017 und 2030 auf 21,1 Mio. € bei Einsatz der DigiBA ohne Informationsfunktion, und auf 149,6 Mio. € mit der Benachrichtigungsfunktion.

### II - 1.3.5.2 Monetäre Bewertung der Wegzeitreduktion für den Flughafen

Da nun für alle Passagiere die zusätzlich verfügbaren Zeiten bei Einsatz der DigiBA ermittelt worden sind, kann aus Gleichung (8) die Umsatzsteigerung im Betrachtungszeitraum  $\Delta U_{DigiBA}$ , die aus dem Bereich des Retailing entstehen, berechnet werden.

$$\Delta U_{DigiBA} = \sum_i \Delta U_{DigiBA_i} \quad (8)$$

$$\Delta U_{DigiBA_i} = W_i \cdot (t_{frei,kumuliert,DigiBA_i} - t_{frei,kumuliert_i})$$

Mit

- $i$  Jahr  $i$  des Betrachtungszeitraums
- $\Delta U_{DigiBA_i}$  Zusatzeinnahmen im Retailing im Jahr  $i$  durch den Einsatz der DigiBA gegenüber dem Referenzfall
- $W_i$  Umsatz pro frei verfügbarer Minute im Jahr  $i$
- $t_{frei,kumuliert_i}$  Kumulierte, freie Passagierminuten im Jahr  $i$  im Referenzfall

Der Ausdruck  $(t_{frei,kumuliert,DigiBA_i} - t_{frei,kumuliert_i})$  ist die kumulierte Zeitersparnis bei der Durchführung der prozessbezogenen Aktivitäten im Jahr  $i$  gegenüber dem Referenzfall.

$$(t_{frei,kumuliert,DigiBA_i} - t_{frei,kumuliert_i}) = \Delta t_{frei,T1_i} \cdot P_{T1_i} + \Delta t_{frei,T2_i} \cdot P_{T2_i} \quad (9)$$

Mit

- $\Delta t_{frei,T1_i}$  Zeitersparnis für die Passagiere aus Terminal 1 im Jahr  $i$  des Betrachtungszeitraums
- $\Delta t_{frei,T2_i}$  Zeitersparnis für die Passagiere aus Terminal 2 im Jahr  $i$  des Betrachtungszeitraums
- $P_{T1_i}$  Anzahl der Passagiere aus Terminal 1 im Jahr  $i$  des Betrachtungszeitraums
- $P_{T2_i}$  Anzahl der Passagiere aus Terminal 2 im Jahr  $i$  des Betrachtungszeitraums

Folglich werden die kumulierten, zusätzlichen Passagierminuten in den Jahren 2010, 2015, 2020 und 2030 berechnet, aufgelistet in der folgenden Tabelle.

**Tabelle 18: Zusätzlich verfügbare Passagierminuten durch den Einsatz der DigiBA**

Jahr	Zusätzlich verfügbare Passagierminuten
2010	24540071,8
2015	26651496,2
2020	41223826,4
2030	31508939,6

Die verfügbaren Passagierminuten im nicht-öffentlichen Bereich können nun aus diesen vier Jahreswerten, durch eine lineare Extrapolation, für jedes Jahr des Betrachtungszeitraums angenähert werden. Zusammen mit dem Umsatz pro verfügbare Minute, ergeben sich die Umsatzsteigerungen im Retail-Bereich durch den Einsatz der DigiBA wobei nur der Zeitraum 2017 bis 2030 relevant ist. Davon fließen 43,1 % als zusätzliche Umsatzmiete an den

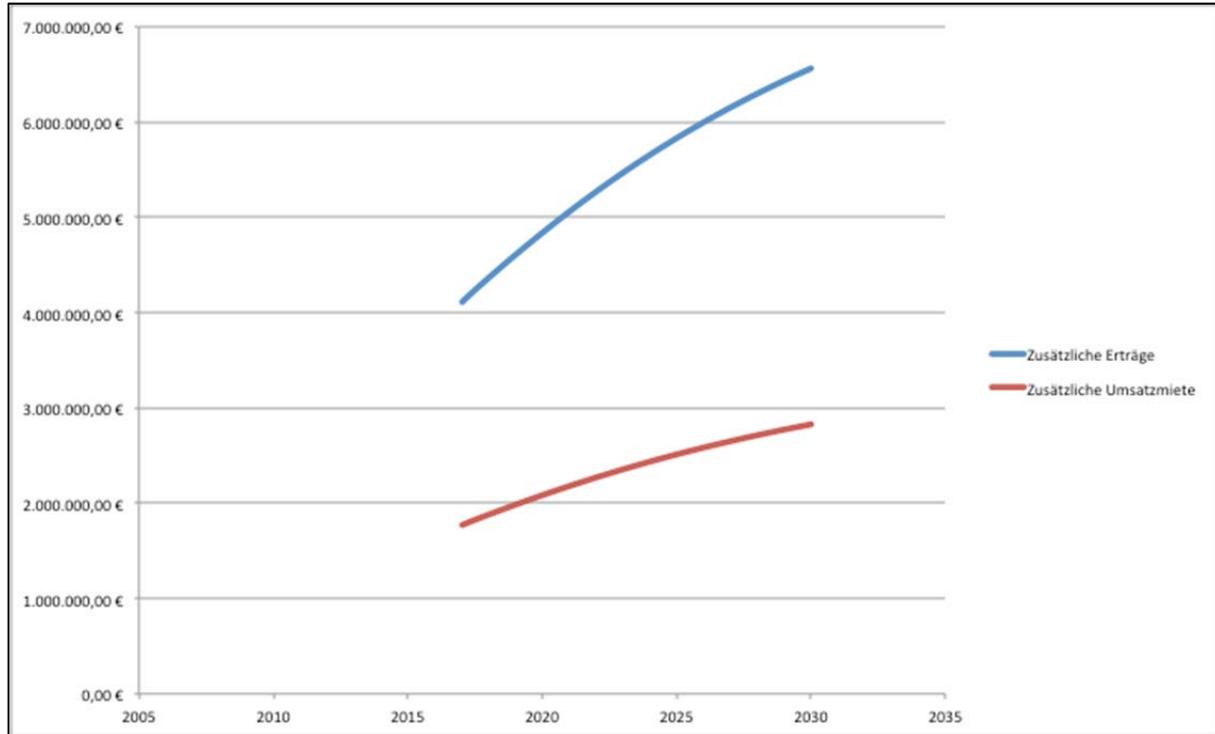
Flughafenbetreiber. Für die Betriebe des Retailing entsprechen diese zusätzlichen Umsätze je nach betrachtetem Jahr Mehreinnahmen von 0,62 € bis 0,70 € pro Kunde. Tabelle 19 fasst diese Ergebnisse zusammen<sup>4</sup>.

**Tabelle 19: Zusatzeinnahmen aus dem Retail-Bereich durch den Einsatz der DigiBA**

Jahr	Zusätzlich verfügbare Passagierminuten	Zusatzeinnahmen	Zusätzliche Umsatzmiete	Zusatzeinnahmen pro Kunde
2010	24540071,8			
2011	24962356,7			
2012	25384641,6			
2013	25806926,5			
2014	26229211,4			
2015	26651496,3			
2016	27622984,9			
2017	28594473,6	4.112.515,70 €	1.772.150,81 €	0,62 €
2018	29565962,3	4.363.314,75 €	1.880.224,25 €	0,64 €
2019	30537451,0	4.605.219,29 €	1.984.464,90 €	0,66 €
2020	31508939,6	4.837.166,62 €	2.084.414,83 €	0,67 €
2021	32480428,3	5.058.417,93 €	2.179.755,67 €	0,68 €
2022	33451917,0	5.268.531,05 €	2.270.296,88 €	0,69 €
2023	34423405,7	5.467.325,02 €	2.355.960,47 €	0,69 €
2024	35394894,3	5.654.840,35 €	2.436.763,92 €	0,70 €
2025	36366383,0	5.831.298,34 €	2.512.802,58 €	0,70 €
2026	37337871,7	5.997.061,85 €	2.584.232,81 €	0,70 €
2027	38309360,4	6.152.599,38 €	2.651.256,49 €	0,71 €
2028	39280849,0	6.298.453,33 €	2.714.107,36 €	0,71 €
2029	40252337,7	6.435.212,92 €	2.773.039,32 €	0,70 €
2030	41223826,4	6.563.491,90 €	2.828.316,85 €	0,70 €

<sup>4</sup> Die monetären Beträge sind an dieser Stelle noch nicht diskontiert.

Diese Ergebnisse sind in Abbildung 25 graphisch visualisiert.



**Abbildung 25: Zusatzeinnahmen aus dem Retail-Bereich durch den Einsatz der DigiBA  
(Quelle: Eigene Darstellung)**

Die Diskontierung der Zusatzeinnahmen über die gesamte Betrachtungsperiode mit 4 % p.a. führt zu einem aggregierten Nutzen von 44.7 Mio. €. Dabei ist zu beachten, dass dieser Betrag die zusätzliche Umsatzmiete beinhaltet.

## II - 1.4 Hochautomatisierte Prozesssteuerung – Leitstand

Ziel des Arbeitspaketes war die Konzeption, technische Umsetzung und Validierung eines Flughafenleitstandes am Flughafen Hamburg. Es ging darum, aus dem beim DLR Institut für Flugführung entwickelten allgemeinen Total Airport Management Konzept eine für den Flughafen Hamburg vorstellbare Lösung zu erarbeiten, die sowohl die für den Flughafen relevanten Prozesse abbildet, als auch eine mögliche technische Umsetzung beinhaltet. Abschließend sollte eine erste Validierung zeigen, ob und wie eine solche Lösung bei der Steuerung eines Flughafens unterstützen kann.

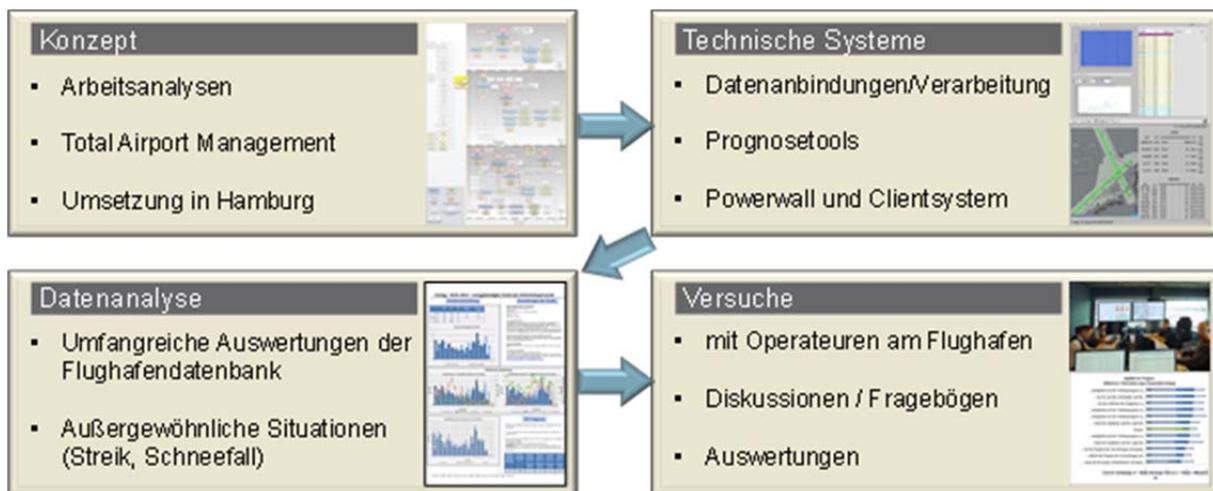


Abbildung 26: Vorgehen und Arbeitsinhalte Themengebiet Leitstand

Im Folgenden werden die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse eingehender beschrieben

### II - 1.4.1 **Konzept**

Die konzeptionellen Arbeiten beinhalteten Arbeitsanalysen und die Erstellung des operationellen Konzeptes.

#### II - 1.4.1.1 **Arbeitsanalyse**

Um die Abläufe hinsichtlich der längerfristigen Planungen am Flughafen Hamburg besser kennenzulernen wurden durch das DLR Institut für Flugführung Arbeitsanalysen in der heutigen Verkehrszentrale und der Arbeitsvorbereitung des Flughafens durchgeführt. Am 10.03.2010 fand die Besichtigung der Verkehrszentrale und am 15.9.2011 der Besuch in der Arbeitsvorbereitung statt. Beide Bereiche arbeiten mit unterschiedlichen Zeithorizonten und könnten in einem zukünftigen TAM-Konzept noch enger miteinander verbunden werden. Bei den Besuchen wurden folgende Punkte aufgenommen, die für die Entwicklung des operationellen Konzeptes ausgewertet wurden:

- Beschreibung der Arbeitspositionen und deren Aufgaben
- Benötigte Information, Informationsquellen, Informationsfluss

- Benutzte technische Systeme
- Arbeitsorganisation (Staffing, Arbeitszeiten, Training, etc.)
- Erhebung aktueller Betriebsprobleme und deren Ursache, potentielle Verbesserungsmöglichkeiten

Aus den gesammelten Informationen ergeben sich die Prozessabläufe, die für das betrachtete Themengebiet TAM relevant sind (Abbildung 27).

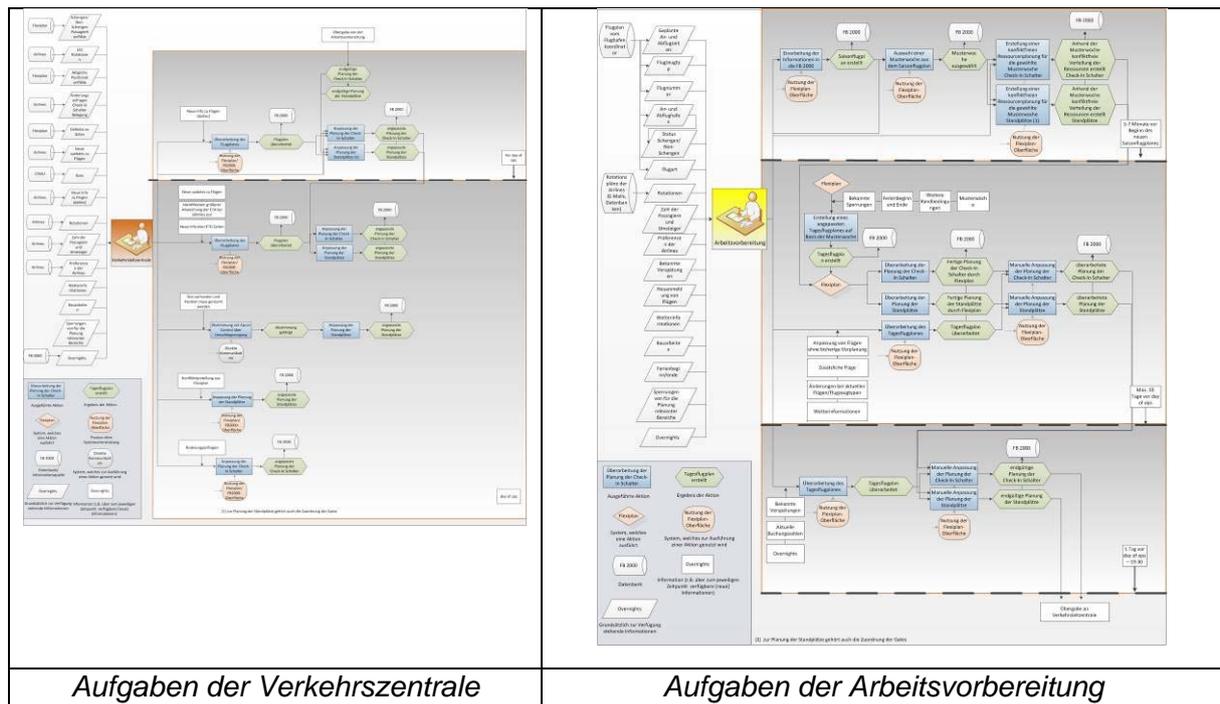


Abbildung 27: Modellierung Ergebnisse Arbeitsanalysen

### II - 1.4.1.2 Operationelles Konzept

Aufgrund der hohen Komplexität des Themas Total Airport Management wurde zusätzlich zu der ursprünglichen Zielstellung das Konzept nur für den Flughafen Hamburg zu schreiben, eine umfassende Beschreibung der allgemeinen Idee und der Ziele eingefügt. Nach der Einordnung in die globalen Rahmenbedingungen werden die Ziele und Kernelemente des allgemeinen TAM-Konzeptes ausführlich beschrieben. Hierbei wird im Detail erläutert:

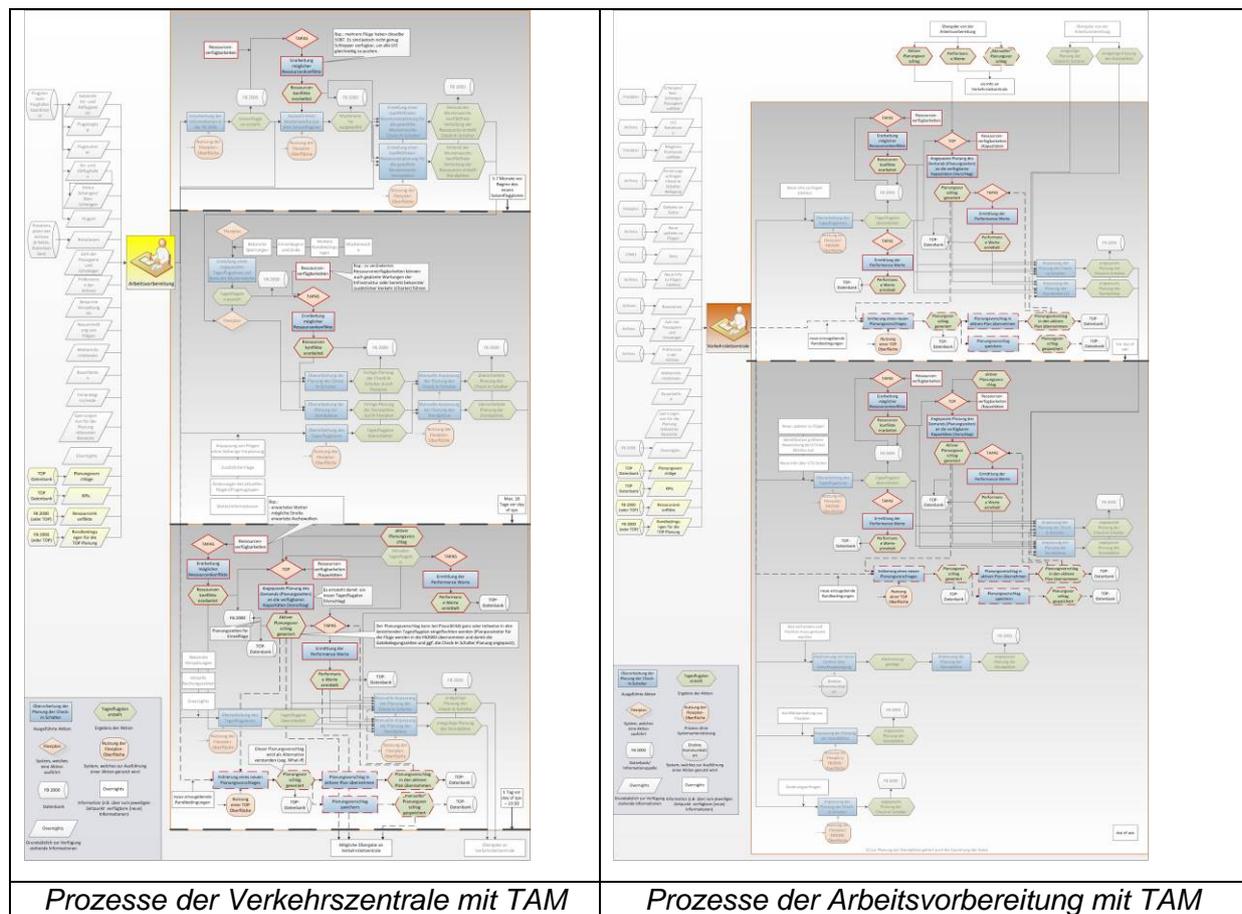
- Wie das Situationsbewusstsein erhöht werden soll
- Wie die Kooperation zwischen verschiedenen Stakeholdern erfolgen kann
- Welche Infrastruktur dafür genutzt wird und
- Welche technischen Systeme verwendet werden könnten

Aus diesen allgemeinen Beschreibungen wurde dann das für Hamburg angepasste Konzept abgeleitet und ausführlich beschrieben. Das Gesamtkonzept sieht dabei vor, eine

Umsetzung in drei wesentlichen Schritten vorzunehmen. Entsprechend der Zielsetzung des Arbeitspaketes spiegeln diese drei Schritte die anvisierten Zwischenstufen wieder, die die verschiedenen Ausprägungen des Total Airport Managements repräsentieren könnten. Definiert wurden:

Stufe 1	Performance Assessment und Prognose	Erhöhung des Situationsbewusstseins durch Darstellung von aktueller und prognostizierter Flughafensituation.
Stufe 2	Planung und Optimierung	Anpassung und Optimierung der Planung mit Systemunterstützung. Planungsvergleiche und What-If Probings zur gemeinsamen Entscheidungsfindung
Stufe 3	Manuelle Beeinflussung	Steuerung der eigenen Operations auf Basis der abgestimmten Ziele und Performance Kriterien

Ausgehend von den aktuellen Prozessabläufen am Flughafen Hamburg aus den Arbeitsanalysen und den drei Stufen einer möglichen TAM-Umsetzung ergeben sich neue und zum Teil veränderte Prozessstrukturen der Abläufe am Flughafen (Abbildung 28).



**Abbildung 28: Geänderte Prozessstrukturen mit TAM**

Anhand von speziellen Situationen wird im Konzept beschrieben, welche Verbesserungsmöglichkeiten sich durch die Einführung eines TAM ergeben und wie sich diese bemerkbar machen. Drei wesentliche Forschungsfragen

1. Welche Situationen können auftreten, bei deren Bewältigung TAM hilft?
2. Wenn diese Situationen erkannt worden sind, welche Möglichkeiten der Planung und Steuerung hat wer?
3. Wie hilft TAM bei der Planung und Steuerung?

wurden jeweils für die Situationen

- Kapazitätsreduktion aufgrund von Wettererscheinungen
- Nachfrage Überhang
- Streik, Zwischenfälle/Unfälle, Aschewolken

analysiert und umfassend beschrieben.

Abschließend beinhaltet das Konzept eine Beschreibung der Umsetzung des TAM-Konzeptes für den Flughafen Hamburg. Es hat sich gezeigt, dass bereits die Umsetzung der Stufe 1 im realen Umfeld zu großen Herausforderungen führt. Da zum einen die für die weiteren Stufen notwendigen Informationen über den täglichen Betrieb und die daraus abgeleiteten operativen Maßnahmen noch nicht vorhanden waren und zum anderen nicht alle Stakeholder im Projekt vertreten sind, werden die Stufen 2 und 3 im Rahmen des Projektes Airport2030 noch nicht betrachtet. Der Fokus wurde ausschließlich auf die Ausarbeitung der Stufe 1 gelegt.

#### II - 1.4.2 *Technische Umsetzung*

Die gesamte technische Umsetzung des Leitstandes beinhaltet verschiedene Komponenten, die in Kombination mit der Erweiterung der Airport Research and Innovation Facility Hamburg entwickelt wurden. Die Einrichtung des Contingency Raumes, der auch als Forschungsleitstand genutzt wird, mit Mobiliar und benötigter Hardware wurde durch das Institut für Flugführung außerhalb des Projektes Airport2030 durchgeführt (Abbildung 29). Durch die damit zur Verfügung stehenden räumlichen Gegebenheiten wurde das Konzept eines zentralen Leitstandes umgesetzt, bei dem die verschiedenen Stakeholder räumlich zusammensitzen.

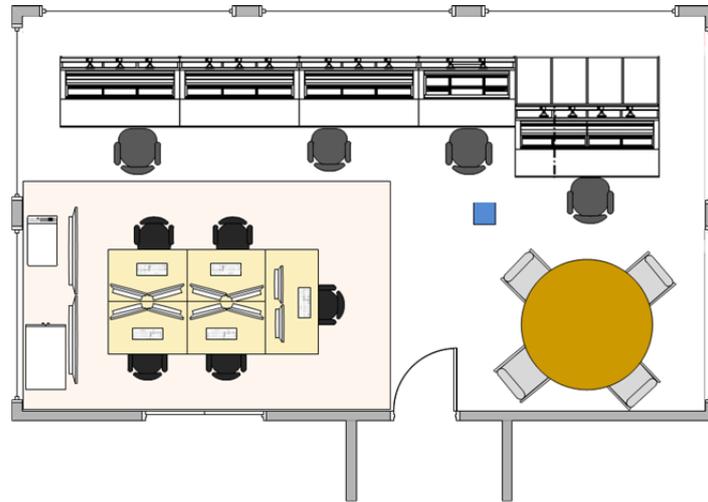


Abbildung 29: ARIF- Forschungsbereich Contingency Raum

Dezentrale Ausprägungen eines Leitstandes, bei dem entsprechende Arbeitspositionen direkt bei den Stakeholdern platziert werden, sind ebenfalls vorstellbar und wurden in den konzeptionellen Überlegungen ausführlich diskutiert.

Alle softwareseitigen Entwicklungen und Anpassungen erfolgten im Projekt Airport2030 und können wie folgt strukturiert werden (Abbildung 30):

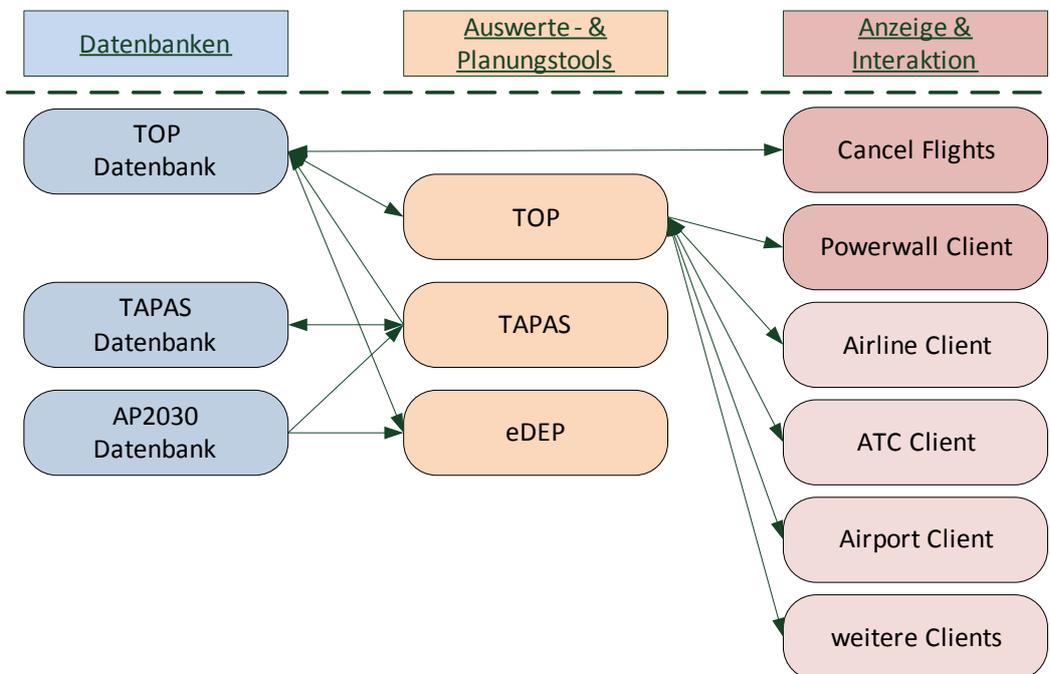


Abbildung 30: Übersicht/Struktur Systementwicklungen

#### II - 1.4.2.1 Datenanbindung / Datenbanken

Für das Arbeitspaket Leitstand waren vor allem Flugplandaten von großer Bedeutung. Diese wurden zunächst aus dem operationellen Flugplandaten-System abgerufen und in einer Airport2030-Projekt-Datenbank gespeichert. Im Rahmen des Projekts wurden die Datenbank und die dahinter liegende Schnittstelle zur Flughafendatenbank, die bereits in der Testplattform existierte, um die Verarbeitung von Wetterinformationen erweitert. Es waren damit zehntausend Windgeschwindigkeiten, -richtungen, sowie METAR-Daten verfügbar.

Da auch der zeitliche Verlauf der Informationen von großer Bedeutung war, wurden sämtliche Datenpakete auch zusätzlich in Logfiles abgelegt.

Sowohl das Auswertesystem TAPAS als auch das Prognosewerkzeug TOP arbeiten mit spezialisierten Datenbanken, bei denen nicht nur die Rohdaten sondern auch neu berechnete Zwischendaten abgelegt werden. Aus diesem Grund wurden diese zusammen mit den Werkzeugen im Forschungsnetzwerk integriert und konnten dann über entsprechende Importfunktionen auf die Airport2030 Datenbank und die Logfiles zugreifen.

Da der Leitstand auch eine Anzeige der aktuellen Verkehrslage bietet, wurden auch A-SMGCS Daten bereitgestellt und über eine spezielle eDEP Implementierung verarbeitet.

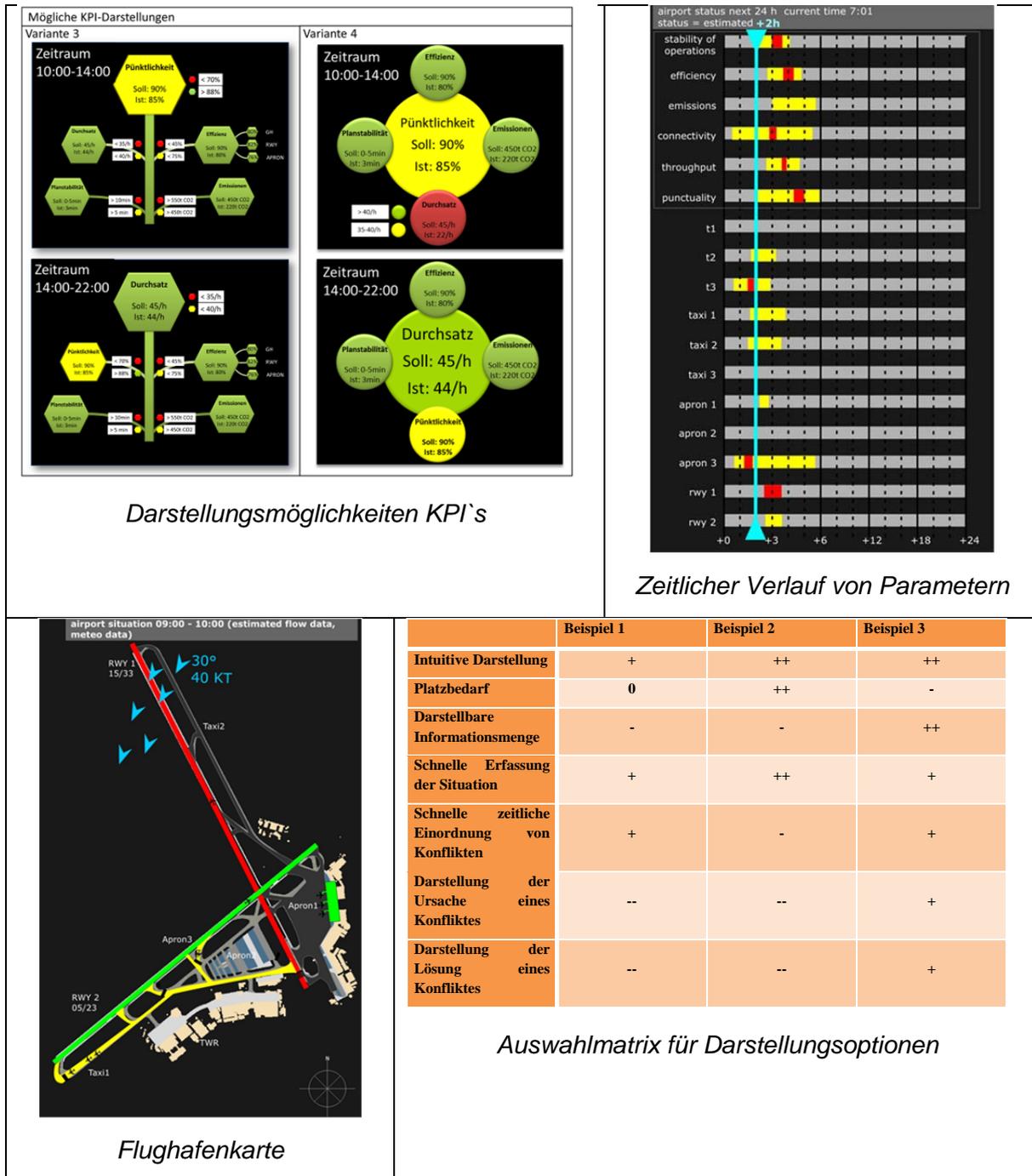
#### II - 1.4.2.2 Performance Assessment und Total Operations Planer

Das TAPAS – Total Airport Performance Assessment System - dient als Schnittstelle, um die Flugplaninformationen für die Verwendung im Leitstand aufzubereiten. Hierzu erfolgt ein zyklischer Import und Speicherung der relevanten Daten aus der AP2030 Datenbank. TAPAS ist ein Client-Server-System bei dem Auswertungen und Datenverwaltung in einem Service implementiert sind.

Der TOP – Total Operations Planner - liefert die Kennwerte zu den jeweiligen Flugplaninformationen. Er wurde als eines der zentralen Unterstützungssysteme für das Leitstandsarbeitspaket entwickelt. Auf Basis der Flughafendaten führt das System sowohl eine Performance Analyse als auch eine Prognose der zukünftigen Flughafensituation durch. Dazu können sowohl aufgezeichnete als auch Live-Daten verwendet werden.

#### II - 1.4.2.3 Powerwall

Die Darstellung der Flughafensituation stellt ein Kernelement von TAM dar. Eine mögliche Umsetzung dabei ist die Präsentation wesentlicher Informationen auf einem großen gemeinsamen Display, das als Powerwall bezeichnet wird. Für Airport2030 wurden umfangreiche Arbeiten hinsichtlich der Auswahl der darzustellenden Informationen als auch der Art und Weise der Darstellung durchgeführt (Abbildung 31).



**Abbildung 31: Darstellungsoptionen für Powerwall**

Aus den Betrachtungen wurde der schematische Aufbau abgeleitet, der dann systemtechnisch umgesetzt wurde (außer Livewetter und Video – diese Daten standen in Hamburg so nicht zur Verfügung) (Abbildung 32).

<p>1</p> <p><b>Verkehrssituation</b></p> <p>Events / Ereignisse:</p>	<p>2</p> <p><b>Performanz Monitoring</b></p> <p>Darstellung KPI aggregierte Werte</p>	<p>3</p> <p><b>Performanz Monitoring</b></p> <p>Flughafen-Karte</p>	<p>4</p> <p><b>Situationspezifische Informationen</b></p>
<p>5</p> <p><b>Verkehrssituation</b></p> <p>Live-Daten aus verschiedenen Quellen, z. B. Videostream, Werradar</p>	<p>6</p> <p><b>Performanz Monitoring</b></p> <p>Darstellung KPI im Zeitverlauf</p>		<p>8</p> <p>Situationspezifische Informationen</p>

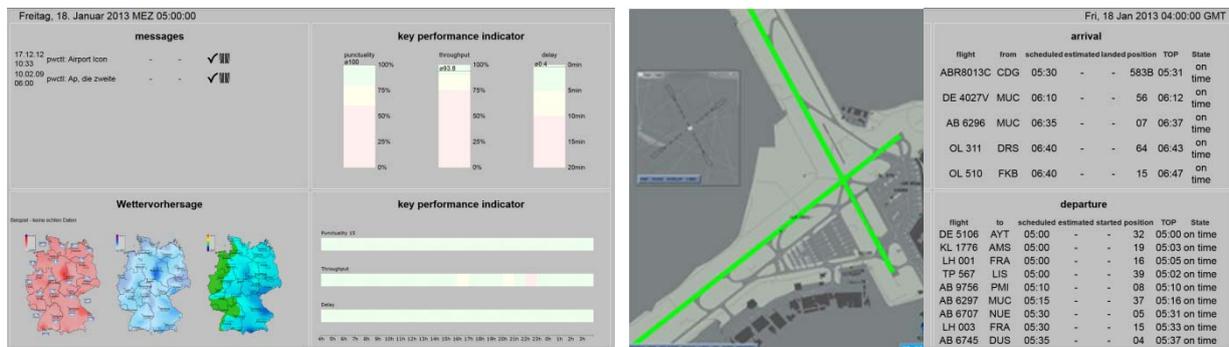


Abbildung 32: Umsetzung Powerwall Airport2030

#### II - 1.4.2.4 Clientsysteme

Im TAM Konzept geht es um die gemeinsame Entscheidungsfindung zwischen verschiedenen Stakeholdern. Die Clientsysteme stellen dabei die systemtechnische Unterstützung der verschiedenen Operateure dar. Da jeder Operateur unterschiedliche Verantwortlichkeiten und Eingriffsmöglichkeiten hat, wird für jeden Stakeholder ein auf ihn angepasstes Clientsystem eingebunden.

Die Clients sind eine Browser-Applikation, die eine graphische Oberfläche zur Nutzung des TOP-Services darstellt. Die Funktionen und teilweise auch die Ansichten im Client werden in Abhängigkeit vom jeweiligen ihn nutzenden User angeboten.

Neben speziellen Clients, wie z.B. der Powerwall, die nur Daten anzeigt oder der Funktion für Flugstreichungen wurden im Airport2030 folgende Stakeholder Clients integriert.

- ATC-Client
- Airline Client
- Airport Client

### II - 1.4.3 **Versuche**

Das Projekt Airport2030 hatte als wesentliches Ziel die entwickelten Konzepte und technischen Lösungen im realen Flughafenbetrieb zu untersuchen und mit Operateuren des Flughafens zu bewerten.

Vom Februar 2013 bis August 2013 fanden am Institut für Flugführung Auswertungen der am Flughafen aufgezeichneten Daten der FB2000 zur Bewertung der Prognosequalität statt. Am 04. und 05. September 2014 erfolgten anschließend in der Testplattform am Flughafen Hamburg Feldtests mit Operateuren aus unterschiedlichen Bereichen der FHG und Lotsen der DFS.

In der Vorbereitung der Tests wurde ein Testplan erstellt, der die Validierungsstrategie, den Versuchsaufbau, die dafür verwendeten Methodiken und die zur Auswertung genutzten Indikatoren und Metriken beschreibt. Basierend auf der E-OCVM Methode der Eurocontrol ergeben sich für alle drei Ausbaustufen eines Flughafenleitstandes unterschiedliche Validierungsziele und unterschiedliche Anforderungen. Da die technische Umsetzung des Leitstandes in Hamburg vorerst nur die Stufe 1 umfasst, konnten nur für diesen Bereich wesentliche Forschungsfragen definiert werden, die mit Hilfe der Versuche beantwortet werden sollten. Dazu gehörten:

- (1) *Welche Qualität hat die Prognose der Flughafenperformanz?*
- (2) *Sind die – für die Arbeitsumgebung gewählten Parameter und Metriken – geeignet, um die Performanz des Flughafens vorherzusagen?*
- (3) *Ist die Prognose der Flughafenperformanz für Operateure nachvollziehbar?*
- (4) *Werden die Parameter und Metriken in geeigneter Art und Weise dargestellt?*

#### II - 1.4.3.1 **Datenanalysen**

Um die erste Fragestellung zu bearbeiten, wurden aufgezeichnete Datensätze analysiert und ausgewertet. Für 168 Tage lagen Flugplandaten sowie alle Aktualisierungen im Tagesverlauf vor. Mit Hilfe von Makros konnten die Daten hinsichtlich verschiedener Kennwerte aufbereitet werden. Auf Basis der somit ermittelten Daten wurden mit dem TAPAS entsprechende Kennwertberechnungen und Prognosen erstellt.

Bei den Datenauswertungen hat sich gezeigt, dass der bestehende Datenumfang und die Qualität der Daten nicht ausreichen, um eine belastbare automatisierte Verkehrsprognose mit Hilfe des TOP zu erstellen. Systematische Fehler sind nicht auszuschließen, da es keine eindeutigen Regelungen zur Datenbereitstellung gibt, die von allen Stakeholdern eingehalten werden müssen. Zudem existieren politische und wirtschaftliche Interessen die dazu führen, dass Informationen nicht oder nur begrenzt veröffentlicht werden.

Da der Flughafen Hamburg A-CDM operationell einführt, ist zu erwarten dass sich die Datengrundlage wesentlich verbessern wird, womit die Prognosemöglichkeiten deutlich erhöht werden.

### II - 1.4.3.2 Szenarienerstellung

Mit den Operateuren im Feldtest wurden Simulations-Interviews durchgeführt, mit dem Ziel, den Operateuren ein herausforderndes Szenario zu präsentieren und zu ermitteln, welche Informationen für sie in diesen Fällen hilfreich sind oder zusätzlich benötigt werden. Dazu eigneten sich Tage, an denen Engpasssituationen aufgetreten sind und diese mit den technischen Systemen des DLR auch entsprechend abgebildet werden konnten.

Zwei Szenarien wurden für die Validierung vorbereitet. Szenario 1, der 09.12.2012, ist ein Tag mit „Winterwetter“. Szenario 2, der 18.01.2013, ist ein unangekündigter Streik am Flughafen.

Auf Basis der aufgezeichneten Daten dieser Tage konnte das Flughafengeschehen über den Tagesverlauf dargestellt und Auswirkungen von Entscheidungen und Interaktionen die am Flughafen stattgefunden haben abgebildet werden.

### II - 1.4.3.3 Versuchsreihen

An den Feldversuchen am Flughafen Hamburg nahmen insgesamt 9 Operateure der FHG (n = 8) und der Deutschen Flugsicherung DFS (n = 1) teil. Die Operateure kamen dabei aus den folgenden Zuständigkeitsbereichen:

- Passagierservice (n = 2)
- Security (n = 2)
- Arbeitsvorbereitung (n = 2)
- Verkehrsleiter vom Dienst (n = 2)
- Supervisor Tower (n = 1)

Der geringe Umfang einer jeden Untergruppe erlaubt keine statistisch gesicherten Rückschlüsse auf die Bewertungen durch einzelne Arbeitsbereiche (beispielsweise waren bestimmte Informationen für den Bereich Flugsicherung relevanter als für den Bereich des Passagierservice).

Bei den Versuchen wurden die Prognosequalität und die Mensch-Maschine-Interaktion mit unterschiedlichen Methoden untersucht. Hierzu wurde im Testplan eine strukturierte Durchführung der Versuche festgelegt.

**Tabelle 20: Testplan**

04.09.2013 (05.09.2013 analog)		Konfiguration TOP
09:30 – 10:00	Begrüßung; Einverständniserklärung, Briefing - Ziel des Tests → Feedback von operationellen Experten - Funktionalität des Leitstands → Prognose der Verkehrssituation - Funktionalität TOP, Kennwerte und Anzeigen	
10:00	Vorstellen des Szenarios „Streik“	
10:10	Fragebogen „Biographische Daten & Aktuelle Planung“	Start Szenario 18.01.2013 in TAPAS und TOP
10:15	Simulations-Interviews „Streik“	
10:50	Fragebögen – „tailormade questionnaire“, Fragen aus dem DLR Projekt P-AIR-FORM	Umschalten zu Live-Verkehr
11:00	Demonstration – Live-Verkehr Fragebogen – Abschätzung der Verkehrsentwicklung; Abschätzung Entwicklung der KPI	
11:20	Finale Fragebögen: AIM, (SASHA), SATI (Trust in Automation), Usability	
11:30	Ende	Umschalten der Systeme auf Szenario „Winterwetter“

In vier Versuchsläufen wurde das beschriebene Vorgehen unter Nutzung standardisierter Fragebogen durchgeführt und anschließend hinsichtlich verschiedener Punkte ausgewertet.

- Qualität der Prognose
- Informationen und Visualisierung
- Situationsbewusstsein
- Vertrauen in Automatisierung
- Kommentare zum Konzept

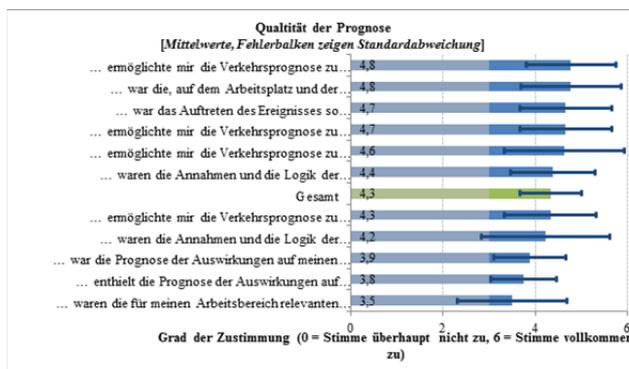


Abbildung 33: Qualität der Prognose

Die Operateure bewerteten die automatische Verkehrsprognose mit Hilfe des experimentellen Leitstands-Arbeitsplatzes als machbar. Die Bewertung der Qualität der Prognose, der Informationsvisualisierung sowie des Vertrauens in die Automatisierung waren überdurchschnittlich. Das Situationsbewusstsein der Operateure war jedoch im unteren Drittel der Skala und muss damit verbessert werden.

Die Herausforderung liegt für die Zukunft darin, die Qualität der Prognose durch das Assistenzsystem TOP zu verbessern. Erste Ansätze für Verbesserungen wurden im Rahmen der Validierung bereits erarbeitet.

#### II - 1.4.4 CBA

Im Projekt hat sich gezeigt, dass die Ausrichtung der Arbeiten im HAP3 eine reine CBA nicht zulässt. Bei der CBA werden sowohl Kosten als auch Auswirkungen und Nutzen monetär erfasst. Dabei geht man grundsätzlich von ausgereiften, zulassungsfähigen und operationell einsatzbereiten System aus. Da im Projekt jedoch eine erste prototypische Realisierung des Leitstandes vorgenommen wurde, ist die Bestimmung der Kostenseite für einen am Flughafen operationell genutzten Leitstand sehr schwierig. Noch schwieriger gestaltet sich die monetäre Bewertung des Nutzens, da hier zum Teil völlig neue Prozessabläufe vorausgesetzt werden, die zurzeit weder quantifizierbar noch monetär abbildbar sind.

Aus diesem Grund wurden verschiedene Bewertungsmöglichkeiten gesucht, um erste Aussagen hinsichtlich der Effekte der neuen Technologien treffen zu können. Zu diesen gehörten neben der monetären Kosten-Nutzen-Analyse auch die nicht monetären Ansätze der Kosten-Wirksamkeitsanalyse und der Nutzwertanalyse.

Als in Frage kommende Bewertungsmethodiken wurden die bereits im Projekt CARMA (Car Management on Aprons) erstellten und angewandten Verfahren als auch die von der Eurocontrol veröffentlichte Herangehensweise EMOSIA hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit geprüft. Letztendlich wurde ein reziproker CBA Ansatz genutzt, der bestimmt, nach welcher Zeit sich Investitionen amortisieren. Aufgrund der hohen Unsicherheiten mit denen die

Parameter und Randbedingungen angenommen wurden, ist eine verlässliche Aussage kaum möglich.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die Bewertung eines Leistandes nur durch umfangreiche Simulationen durchgeführt werden kann. Aufgrund der hohen Komplexität des gesamten Themas Total Airport Management sind zum einen die Auswirkungen im Flughafenbetrieb, als auch deren monetäre Bewertung mit dem aktuellen Entwicklungsstand nicht abschätzbar.

## II - 1.5 Hochautomatisierte Prozesssteuerung – Groundhandling

Das Thema Fahrzeugmanagement auf Vorfeldern wurde bereits in mehreren Vorgängerprojekten bearbeitet. Das DLR Institut für Flugführung, universitäre Partner und der Flughafen Hamburg hatten dazu schon Vorarbeiten und technische Umsetzungen geleistet, auf die im Airport2030 aufgebaut wird. Das Hauptziel des Projektes war die Entwicklung eines Disponentenarbeitsplatzes, der die Operateure beim Einsatz ihrer Ressourcen unterstützt. Wie bereits beim Leitstand wurde zunächst mit konzeptionellen Arbeiten begonnen, nachfolgend die technische Umsetzung erarbeitet und abschließend die Versuche mit Operateuren am Hamburger Flughafen durchgeführt und ausgewertet.

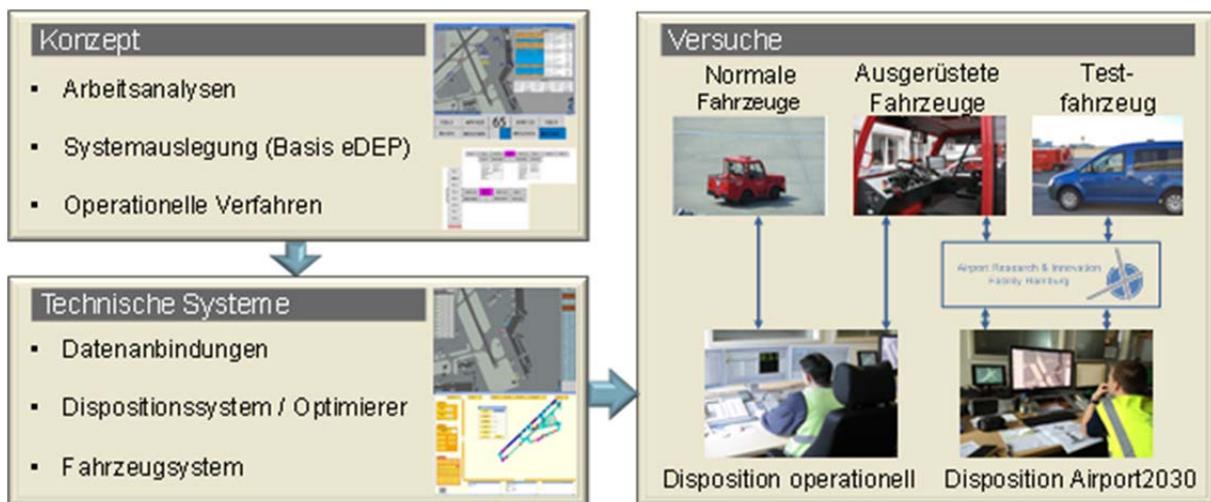


Abbildung 34: Vorgehen und Arbeitsinhalte Themengebiet Groundhandling

### II - 1.5.1 *Konzept*

Die konzeptionellen Arbeiten beinhalteten Arbeitsanalysen und die Erstellung des operationellen Konzeptes. Bei den Arbeitsanalysen konnten bereits vorhandene Informationen aus den Vorgängerprojekten genutzt werden. Wie bereits in den Projekten CARMA und WFF wurde eng mit dem Groundhandler Groundstars des Flughafens Hamburg zusammengearbeitet. Da sich die Vorarbeiten auf die Transportprozesse des Gepäcks auf dem Vorfeld bezogen, lag der Fokus im Projekt Airport2030 auch auf diesem Teilgebiet.

#### II - 1.5.1.1 *Arbeitsanalyse*

Im Oktober 2009 wurde die Arbeitsanalyse bei der Disposition der Gepäckfahrzeuge bei der Firma Groundstars am Flughafen Hamburg durchgeführt. Die Arbeitsanalyse erfolgte durch Beobachtungen und Befragungen während des operativen Dispositionsprozesses in der Leitzentrale von Groundstars.

Aufgenommen wurden dabei Informationen zu den aktuell benutzte technischen Systemen, zu den grundsätzlichen Prozessen bei der Disposition und zu Problemen und Verbesserungswünschen der Operateure.

Wesentliche Ergebnisse der Arbeitsanalyse waren:

- Keine Sicht auf das Vorfeld – Situationsdarstellung sehr wünschenswert
- Sprechfunk bietet zwar schnelle Kommunikationsmöglichkeit stellt aber in Spitzenzeiten hohe Anforderungen an die Operateure.
- Systemunterstützung in manchen Bereichen zu kompliziert

Insgesamt ist festzuhalten, dass sich mögliche Verbesserungen nicht allein auf die Disposition sondern auf das Gesamtkonzept eines Fahrzeugmanagements bezogen und somit auch nicht isoliert betrachtet werden können.

#### II - 1.5.1.2 Operationelles Konzept

Aus den Erfahrungen der Vorgängerprojekte und der Arbeitsanalyse vor Ort wurde ein mögliches operationelles Konzept abgeleitet und erstellt. Um den Ressourceneinsatz zu optimieren und das Situationsbewusstsein zu erhöhen sind folgende Ziele definiert worden:

- Visualisierung der Verkehrslage
- Bereitstellung von Managementfunktionalitäten
- Kopplung mit einem Flughafenleitstand

Aufbauend auf diesen Zielen beschreibt das Konzept die vorgesehenen technischen Lösungen und die operationellen Verfahren, die sich mit dem Einsatz der Systeme ergeben.

Wie bereits erwähnt, ist das neuartige Dispositionssystem nicht ohne das Gesamtsystem eines Fahrzeugmanagements zu betrachten, da zum einen Interaktionen zwischen Disposition und Fahrer und zum anderen auch die dafür notwendige Infrastruktur zu betrachten ist.

Die Grundidee des Fahrzeugmanagements besteht in der Ortung der Fahrzeugressourcen auf dem Vorfeld und einer auf dieser Basis optimierten Zuweisung von Fahrzeugen zu abzufertigenden Flügen. Die Kopplung von Fahrzeug und Fluginformationen ermöglicht dabei einen verbesserten Einsatz der zur Verfügung stehenden Ressourcen. Genutzt werden dazu Informationen aus den operationellen Flughafensystemen (A-SMGCS und Flugplandatenbank) und den entwickelten Fahrzeugsystemen (Abbildung 35).



Abbildung 35: Kopplung Fahrzeug und Flugzeuginformationen

Für das Dispositionssystem sollte ein integriertes Display entwickelt werden, welches Verkehrslage und Interaktion miteinander verbindet. Bei der konzeptionellen Ausarbeitung wurde ein völlig neuer Ansatz der Aufbereitung der Informationen genutzt. Während bisherige Systeme den Flug in den Mittelpunkt setzen und alle Informationen dazu zusammenstellen, geht das neue Konzept von der Parkposition als zentrales Element aus.

Auf die topographische Darstellung des Flughafenlayouts wird für jede Parkposition eine Informationsbox gelegt, die über Text- und Farbinformationen die aktuelle Situation der Flüge und der Abfertigung wiedergibt und über Schaltflächen die Interaktion durch den Disponenten ermöglicht (Abbildung 36). Weitere Informationen sind als Label, Farb- und Formkodierungen an den beweglichen Symbolen für die Luftfahrzeuge und Fahrzeuge verfügbar.

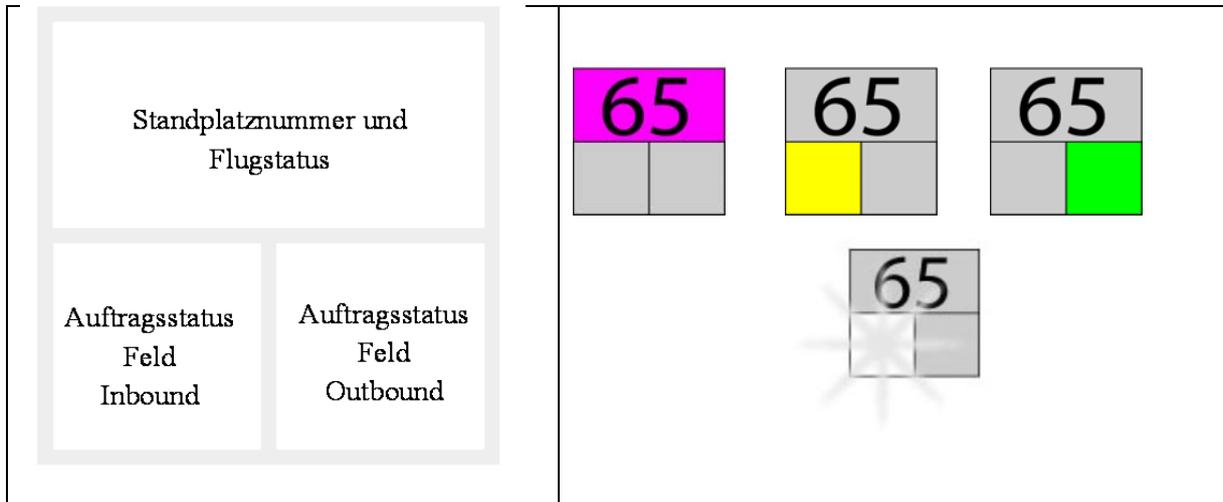


Abbildung 36: Systemzustände einfaches Standplatzsymbol

Für Zuweisungsoperationen und detailliertere Informationen zu Flügen und Abfertigungsprozess erweitert sich das Symbol bei Überfahren mit der Maus (Abbildung 37).

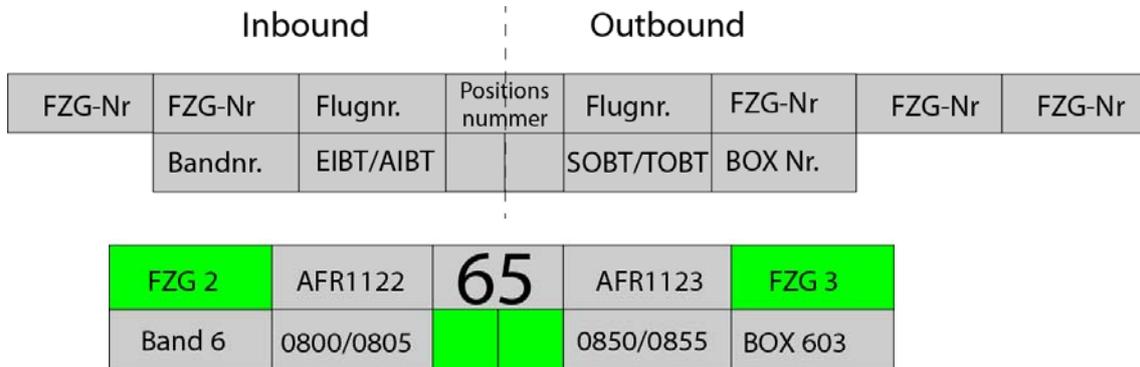


Abbildung 37: Erweitertes Standplatzsymbol (Mouseover)

Auch hier werden Farbcodes genutzt um die aktuelle Situation gut erfassen zu können. Mit einem Klick auf einzelne Felder werden nochmals Informationen eingeblendet falls diese benötigt werden (Abbildung 38).

FZG 1	FZG 2	AFR1122	65	AFR1123	FZG 3	FZG 4	FZG 5																																
	Band 6	0800/0805		0850/0855	BOX 603																																		
		<table border="1"> <tr><td>Anzahl Paxe</td><td>Registration</td></tr> <tr><td>Flugzeugtyp</td><td>Herkunft</td></tr> <tr><td>SIBT/EIBT</td><td>Gepäckbandnummer der Einreise</td></tr> <tr><td>SITA-Meldungen</td><td></td></tr> <tr><td>Hold 1: 345 kg</td><td></td></tr> <tr><td>Hold 2: 0</td><td></td></tr> <tr><td>Hold 3: 0</td><td></td></tr> <tr><td>Hold 4: 1500 kg</td><td></td></tr> </table>		Anzahl Paxe	Registration	Flugzeugtyp	Herkunft	SIBT/EIBT	Gepäckbandnummer der Einreise	SITA-Meldungen		Hold 1: 345 kg		Hold 2: 0		Hold 3: 0		Hold 4: 1500 kg				<table border="1"> <tr><td>Anzahl Paxe</td><td>Registration</td></tr> <tr><td>Flugzeugtyp</td><td>Destination</td></tr> <tr><td>SOBT/TOBT</td><td>Gepäckbandnummer im Gepäckkeller</td></tr> <tr><td>LOAD PLAN</td><td></td></tr> <tr><td>Hold 1: 0 kg</td><td></td></tr> <tr><td>Hold 2: 500 kg</td><td></td></tr> <tr><td>Hold 3: 0</td><td></td></tr> <tr><td>Hold 4: 1500 kg</td><td></td></tr> </table>		Anzahl Paxe	Registration	Flugzeugtyp	Destination	SOBT/TOBT	Gepäckbandnummer im Gepäckkeller	LOAD PLAN		Hold 1: 0 kg		Hold 2: 500 kg		Hold 3: 0		Hold 4: 1500 kg	
Anzahl Paxe	Registration																																						
Flugzeugtyp	Herkunft																																						
SIBT/EIBT	Gepäckbandnummer der Einreise																																						
SITA-Meldungen																																							
Hold 1: 345 kg																																							
Hold 2: 0																																							
Hold 3: 0																																							
Hold 4: 1500 kg																																							
Anzahl Paxe	Registration																																						
Flugzeugtyp	Destination																																						
SOBT/TOBT	Gepäckbandnummer im Gepäckkeller																																						
LOAD PLAN																																							
Hold 1: 0 kg																																							
Hold 2: 500 kg																																							
Hold 3: 0																																							
Hold 4: 1500 kg																																							

**Abbildung 38: Erweitertes Standplatzsymbol mit Zusatzinformationen (Click)**

Die Möglichkeit schrittweise immer mehr und detailliertere Informationen einzublenden sorgt für einen guten Überblick in der Standardansicht ermöglicht aber auch den Zugriff auf spezielle Daten falls diese gebraucht werden.

In den Fahrzeug und Fluglisten sind die Informationen nochmals mit anderem Fokus aufbereitet. Diese ermöglichen einen schnellen Überblick über die verfügbaren Ressourcen und die Verkehrslast, die zurzeit und in den kommenden Stunden am Flughafen herrscht. Diese Informationen sind eher für strategische Überlegungen und vorbereitende Aktionen nützlich. Grundsätzlich ist es jedoch auch möglich, über diese beiden Elemente Interaktionen durchzuführen. Alle drei Teilbereiche sind miteinander verlinkt, so dass bei Überfahren einzelner Elemente mit der Maus die korrespondierenden Informationen in den anderen Bereichen entsprechend hervorgehoben werden.

Der Optimierer hat die Aufgabe, den Disponenten bei der Auswahl der verfügbaren Ressourcen für die Vergabe von Gepäckaufträgen zu unterstützen. Auf Basis der aktuellen Positionen der Fahrzeuge und der Parkposition des Luftfahrzeuges wird ermittelt, welches Fahrzeug den kürzesten Weg hat und damit mit möglichst wenig Wegstrecke den Auftrag ausführen kann. Das ausgewählte Fahrzeug wird dem Disponenten bei der Zuweisung als Vorschlag angezeigt (Hervorhebung). Dieser kann den Vorschlag annehmen oder eine eigene Lösung in das System eingeben.

Abschließend wird im Konzept beschrieben, wie mit dem System in den einzelnen Situationen gearbeitet wird und wie die Informationsdarstellung in den Prozessabläufen erfolgt.

## II - 1.5.2 Technische Umsetzung

Die Umsetzung des Dispositionsarbeitsplatzes an sich beruht im Wesentlichen auf einem normalen Desktop PC und der Entwicklung von Softwaremodulen. Um den Arbeitsplatz jedoch in seinen Funktionalitäten entsprechend zu testen und zu validieren ist es notwendig, das Gesamtsystem eines Fahrzeugmanagementsystems aufzubauen und zur Verfügung zu stellen. Durch die Vorgängerprojekte CARMA und WFF war die Grundidee und Teile der technischen Ausrüstung bereits verfügbar und konnte im Projekt Airport2030 genutzt

werden. Über die Airport Research and Innovation Facility Hamburg konnte die benötigte Infrastruktur beigestellt werden.

#### II - 1.5.2.1 Datenanbindung / Datenbank

Über die grundsätzlich verfügbare Anbindung der Testplattform an die operationellen Flughafensysteme sind in der Testplattform zum einen A-SMGCS-Daten als auch Flugplaninformationen enthalten.

Die Daten des A-SMGCS werden dabei kontinuierlich im Forschungsnetzwerk über ein Multicastverfahren in einem standardisierten Format zur Verfügung gestellt. Anwendungen können diese Daten an dafür eingerichteten Ports abgreifen und nach entsprechender Dekodierung nutzen. Über diese Schnittstelle sind jedoch zunächst nur Flugzeugdaten verfügbar. Die für das Groundhandlingsystem notwendige Position der Fahrzeuge wird über zusätzliche Systeme eingespielt. Ein abgesichertes WLAN Segment, das von der FHG zur Verfügung gestellt wurde, ist mit dem Forschungsnetzwerk verbunden, so dass im Fahrzeug ermittelte Positionen und Informationen direkt in das Forschungsnetzwerk eingespielt werden konnten. Da es darum ging, Flugzeuge und Fahrzeuge miteinander zu kombinieren, wurden die Positionen von Fahrzeugen und Flugzeugen miteinander fusioniert. Dabei sind die Fahrzeuge speziell gekennzeichnet, damit eine Unterscheidung zwischen Flugzeugen und Fahrzeugen getroffen und Fahrzeuge mit eigenständigen Symbolen dargestellt werden können.

Die Flugplaninformationen werden analog zum operationellen System in Form einer SQL-Datenbank verarbeitet. Die bereits in der Testplattform bestehenden Daten der Forschungsdatenbank sind im Zuge des Projektes um die sogenannten Baggage-Informationen erweitert worden. Dafür wurde in die SQL-Datenbank eine weitere Tabelle eingefügt, in die diese Gepäckinformationen eingetragen wurden. Diese beinhaltet neben Informationen zu Menge und Position im Gepäckkeller auch die Information, dass dort fertig beladene Wagen für abfliegende Flugzeuge bereitstehen. Dieser Trigger ist für die Disposition für ausgehende Flüge entscheidend, um entsprechende Fahraufträge zu generieren.

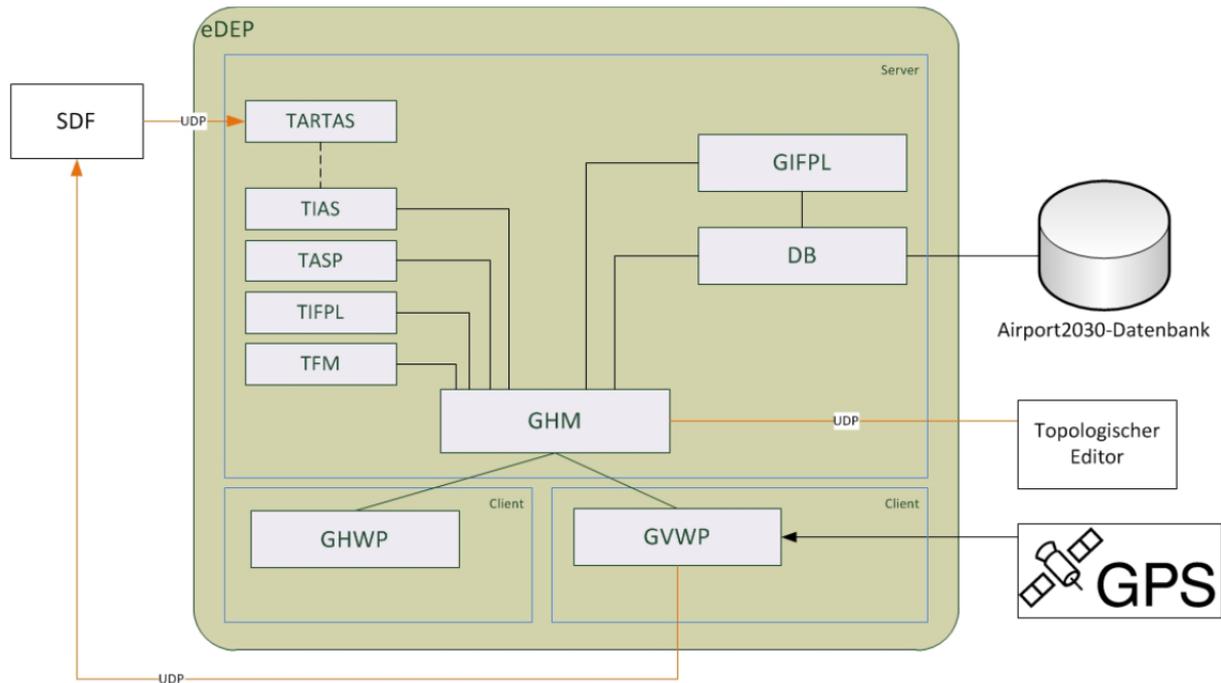
#### II - 1.5.2.2 Dispositionsarbeitsplatz

Für die technische Umsetzung des Arbeitsplatzes wurde von einer Eigenentwicklung abgesehen. Die Eurocontrol besitzt mit der early Demonstration and Evaluation Platform (eDEP) bereits eine Plattform, die eine mögliche Basis für diese Art von Lösungen darstellt. Das DLR hat daher einen engen Kontakt zur Eurocontrol aufgebaut und eine Nutzungs- und Weiterentwicklungsvereinbarung abgeschlossen. Damit konnte auf ein bestehendes System aufgesetzt werden.

Die eDEP ist eine von der EUROCONTROL entworfene und entwickelte Simulationsplattform für den Bereich des Air Traffic Management (ATM). Diese Plattform stellt die Grundlage für die schnelle Entwicklung prototypischer Applikationen dar. Die eDEP

ist eine zu 100 % in der Programmiersprache Java geschriebene Software. Zudem setzt sie auf ein Toolkit auf, das Graffica System Development Kit (GSDK), welches ebenfalls zu 100 % aus Java-Code besteht.

Das Gesamtsystem besteht aus verschiedenen Modulen, die den Anforderungen entsprechend für das Groundhandling erweitert wurden (Abbildung 39).



**Abbildung 39: Übersicht Gesamtsystem eDEP (angepasst für Groundhandling)**

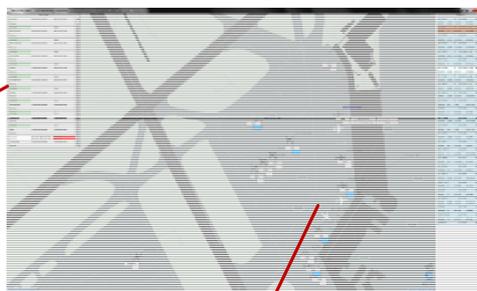
Die eDEP Komponenten haben Schnittstellen zu externen Systemen wie der Datenbank, dem Optimierer (Topologischer Editor) und der Sensor Datenfusion (SDF), die die Verkehrslage liefert.

eDEP intern ist der Groundhandling Manager (GHM) die datenhaltende und -verarbeitende Komponente sowohl für die GHWP (Ground Handling Working Position - Dispositionsarbeitsplatz) als auch für die GVWP (Ground Vehicle Working Position – Fahrzeugsystem), die bereits bestehende Komponenten und Funktionen der eDEP nutzt.

Der Dispositionsarbeitsplatz stellt ein integriertes System dar, wobei das Display aus drei Teilbereichen besteht (Abbildung 40). Der Fahrzeugliste, die den aktuellen Status der Fahrzeugressourcen anzeigt, der Flugliste, die alle relevanten Informationen zu den Flügen enthält und der Verkehrslage, die gleichzeitig den zentralen Interaktionsbereich für den Disponenten darstellt.

Fahrzeuge		
Vartee	Schichtzeiten	Pausenzeit
Timer		
V1135		frei
Bernstein	Schichtzeiten	Pausenzeit
Timer		
V1129		frei
Hus-Keter	Schichtzeiten	Pausenzeit
Timer		
V1119		frei
Yolande	Schichtzeiten	Pausenzeit
Timer		
V1126		frei
Xann	Schichtzeiten	Pausenzeit
Timer		
V1130		frei
Friedrichs	Schichtzeiten	Pausenzeit
Timer		
V1120		frei
Klein	Schichtzeiten	Pausenzeit
Timer		
V1124		frei
Heinrichs	Schichtzeiten	Pausenzeit
Timer		
V1116		frei
Overtzu	Schichtzeiten	Pausenzeit
Timer		
V1115		frei
Rau	Schichtzeiten	Pausenzeit
Timer		
V1234	D: BA 965 @ 31	Defekt
Carstein	Schichtzeiten	Pausenzeit
Timer		

Fahrzeugliste



Flugliste				
LH 015	S	S:1100		16
EDDF 110	A319	DAIBG		33
DCWIR	N	A:1102 (+5)		706
EDDK 5	D320	DCWIR		15
LH 2996	*	S:1105		32
EDDM 123	A3202	DAIQT		33
AB 3762	S	S:1105		18
EDDM 100	A3202	DABDU		33
LH 2065	F	A:1108 (+3)		15
EDDM 102	A3202	DAIPD		33
PAV 512		S:1110		705
EDDM 5	D320	DCCLA		33
AB 3264	E	E:1110 (+20)		08
EDDM 100	E737	DABBK		33
FV 254	F	A:1111 (+6)		20
EDDM 100	A319	VQBAS		33

Flugliste



Verkehrslage

Abbildung 40: Displayelemente Disposition Groundhandling

Als Hauptelement wurde das Standplatzsymbol der Parkpositionen genutzt und um verschiedene Funktionalitäten erweitert. Sowohl für den ankommenden als auch für den ausgehenden Flug sind alle wesentlichen Informationen direkt verfügbar. Neben der Informationsdarstellung wird das Symbol auch für die Interaktion zwischen Disponent und Fahrzeug benutzt. Über entsprechende Maus-Steuerungsoptionen können Informationen abgerufen und Zuweisungen von Aufträgen durchgeführt werden.

Die Umsetzung der im Konzept erarbeiteten Darstellungen und Funktionalitäten wurde mit den in der eDEP enthaltenen Möglichkeiten realisiert. Dies bedeutet, dass einige der Elemente in ihrem Aussehen nicht 1 zu 1 aus dem Konzept übernommen wurden. Dies gilt insbesondere für das Design von Fenstern oder Schaltflächen. Die Funktionalität an sich ist davon nicht betroffen.

Da auf dem Arbeitsplatz viele Informationen präsentiert werden aber trotzdem ein entsprechend großer Kartenausschnitt für den Disponenten verfügbar sein muss, wurde ein

30“ Display als Monitor benutzt. Es gab Überlegungen noch größere Monitore zu nutzen, was aber aufgrund der geringen Auflösung (geringere Qualität) zum damaligen Zeitpunkt verworfen wurde.

### II - 1.5.2.3 Fahrzeugsystem

In den vorangegangenen Verbundprojekten CARMA und WFF wurden bereits Fahrzeugsysteme entwickelt. Die Rechte an diesen Systemen lagen jedoch nicht beim DLR. Damit konnten die Systeme nicht auf die neue Systemarchitektur angepasst und im Projekt verwendet werden. Aus diesem Grund wurde das bestehende Fahrzeugsystem portiert und ebenfalls auf eDEP-Basis realisiert. Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde ein entsprechendes Konzept erarbeitet und systemtechnisch umgesetzt (Abbildung 41).

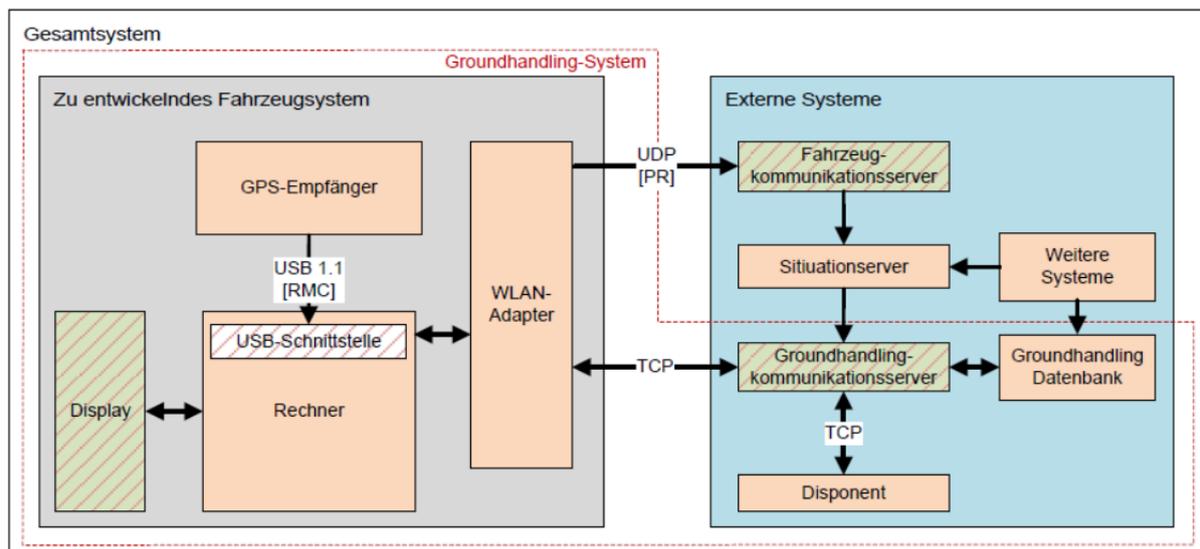
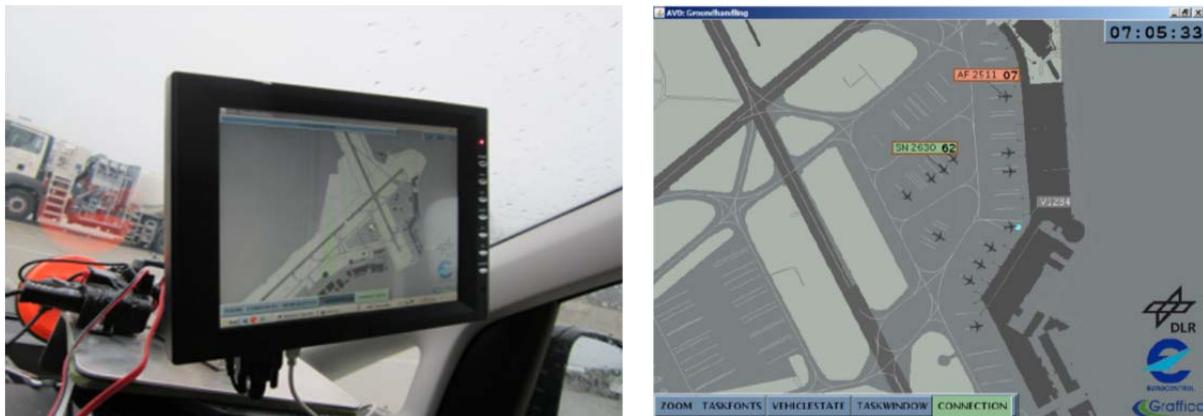
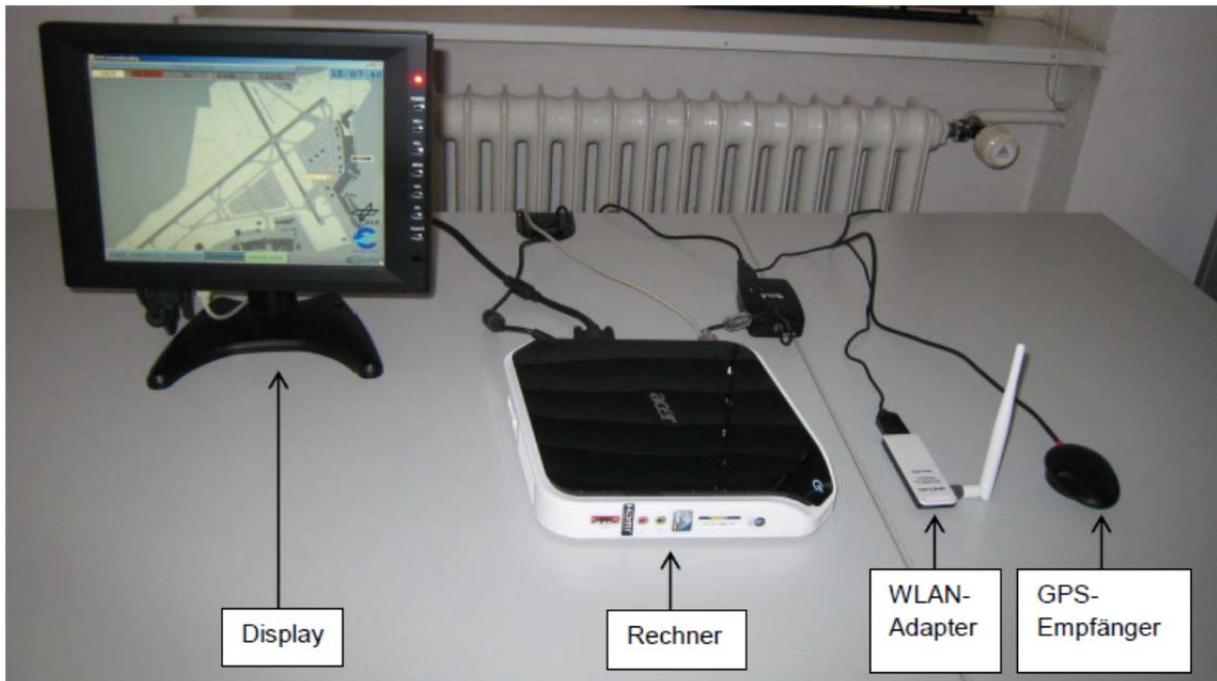


Abbildung 41: Konzept Fahrzeugsystem

Mit der Portierung hat sich die gesamte Kommunikationsstruktur zwischen den Komponenten verändert. Wurden bisher proprietäre Kommunikationsprotokolle genutzt, kommunizieren die Komponenten jetzt in einer Server Client Struktur über interne Events.

Das Fahrzeugsystem besteht aus einem Touchdisplay, einem CarPC, einer GPS Maus und einer WLAN- Antenne (Abbildung 42). Die Stromversorgung erfolgt über das Gepäckfahrzeug und zusätzlich über eine Pufferbatterie, die das System am Laufen hält, sollte das Fahrzeug kurzfristig ausgeschaltet werden.



**Abbildung 42: Systemkomponenten Fahrzeugsystem**

Die Bedienoberfläche wurde sehr einfach gehalten, zeigt nur die für die Fahrer wichtigen Informationen an und ermöglicht eine einfache Kommunikation, da vordefinierte Buttons über das Touchdisplay leicht zu handhaben sind.

Zentrales Element ist die Darstellung der Verkehrslage, bei dem der Fahrer seine eigene Position und die Position der Luftfahrzeuge sieht. Die für ihn wichtigen Flüge, für deren Gepäcktransport er verantwortlich ist, werden farblich markiert. Einzelne Prozessschritte kann der Fahrer jeweils durch drücken von Buttons bestätigen, wodurch eine Verfolgung des Arbeitsfortschrittes für das System und damit auch für den Disponenten ermöglicht wird.

#### II - 1.5.2.4 Optimierung

Zur Umsetzung des Optimierers wurden verschiedenen Möglichkeiten diskutiert (eDEP intern, eigenständiges Programm, Matlab). Da im DLR bereits Know-How verfügbar war, eine Optimierung auf Basis einer Matlab-Implementierung vorzunehmen, wurde dieser Weg gewählt. Damit mussten zusätzlich noch Schnittstellen und Kommunikationsmechanismen geschaffen werden, die das Matlab-Modul mit der eDEP verbindet.

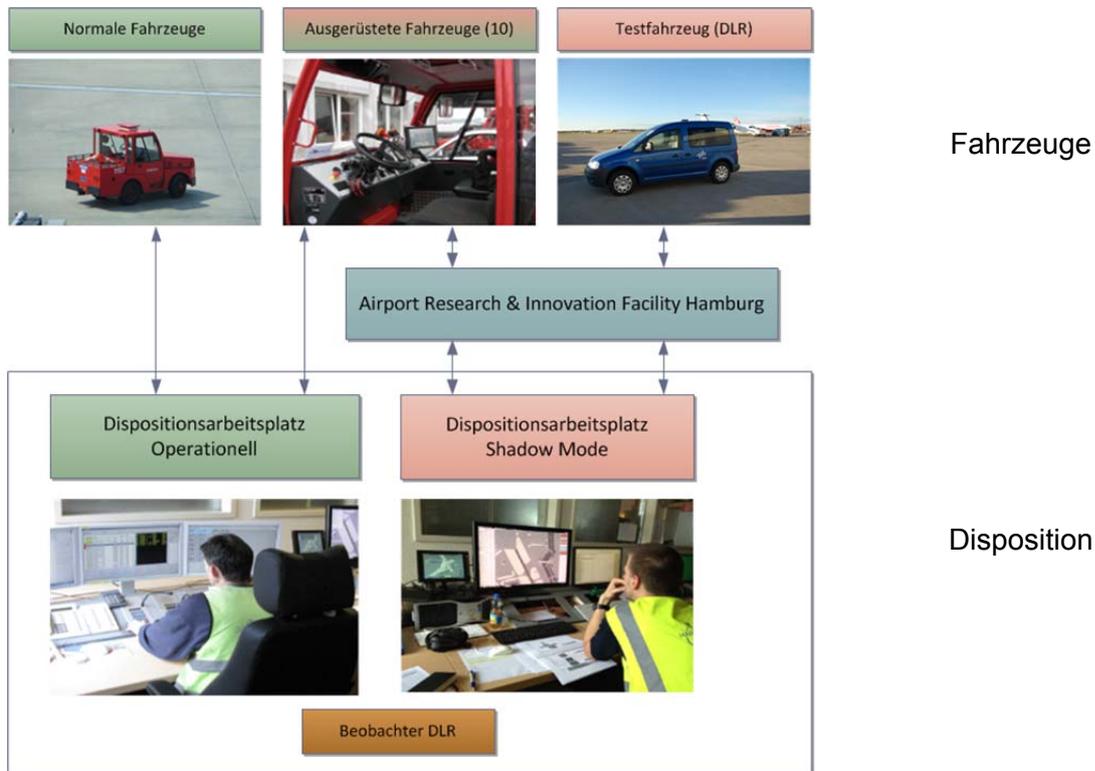
Mit Hilfe des entwickelten Topologischen Editors konnte das Roll- und Straßenwegenetz des Flughafens Hamburg in ein Kanten- und Knotenmodell portiert werden. Über die implementierte Schnittstelle zum eDEP Server erhält der Optimierer die aktuelle Position aller verfügbaren Fahrzeuge und eine Zielposition, zu der das Fahrzeug fahren soll. Über mathematische Algorithmen wird für jedes Fahrzeug der kürzeste Weg zwischen den beiden Punkten berechnet und der insgesamt kürzeste ermittelt. Dieses Fahrzeug wird dann als Vorschlag wieder an die eDEP und den Disponenten versendet.

Drei verschiedene Algorithmen wurden getestet wobei sich gezeigt hat, dass sich für das vorliegende Problem sowohl die Rechenzeit als auch das errechnete Ergebnis nicht voneinander unterscheidet und somit alle Algorithmen genutzt werden könnten.

#### II - 1.5.3 Versuche

Versuchsvorbereitend wurden 10 Fahrzeugsysteme in die Gepäckfahrzeuge eingerüstet und der Dispositionsarbeitsplatz aufgebaut. Mit Unterstützung von Groundstars konnte das Airport2030-System direkt neben dem operationellen Arbeitsplatz in der Einsatzzentrale für den Gepäcktransport aufgebaut werden.

Neben den Gepäckfahrzeugen wurde außerdem das DLR Testfahrzeug mit einem System ausgerüstet und ein Fahrzeugsystem direkt in der Einsatzzentrale positioniert. Damit konnte den Disponenten gezeigt werden, wie die Interaktion zwischen Disponent und Fahrer insgesamt realisiert ist (Abbildung 43).



**Abbildung 43: Testsetup Versuche Groundhandling**

Die Vorbereitung und Durchführung der Tests wurde in einem Testplan beschrieben. Enthalten sind hierbei:

- Beschreibung der technischen Tests (Verifikation)
- Beschreibung der Versuche mit Operateuren (Validierung)

Die technischen Tests wurden während mehrerer Integrations- und Testphasen durchgeführt. Hierbei hat sich gezeigt, dass ein Großteil der Funktionalitäten korrekt implementiert wurde und entsprechend der konzeptionellen Überlegungen umgesetzt werden konnte. Einige Funktionalitäten konnten nicht oder nur in begrenztem Umfang integriert werden. Dies lag vor allem an der Auslegung des eDEP-Basis-Systems, bei dem ein erheblicher Aufwand notwendig gewesen wäre um es entsprechend anzupassen. Davon betroffen sind aber keine grundlegenden Funktionen sondern Sonderfälle, die entsprechend abgefangen werden müssten.

Die Versuche mit Operateuren wurden in der KW25 2013 vom 17.-21.06.2013 durchgeführt. Aufgrund der Verkehrssituation stand nur eine begrenzte Anzahl an Disponenten für die Versuche zur Verfügung. Aus diesem Grund wurde bei der anschließenden Auswertung auch auf statistische Kriterien verzichtet und im Wesentlichen eine Qualitative Analyse durchgeführt.

In den Versuchsläufen arbeitete die Versuchsperson mit dem Airport2030 System während der operationelle Disponent wie gewohnt den Betrieb regelte. Durch die Nähe beider Arbeitsplätze konnten die Aktionen des operationellen Disponenten mit dem Airport2030 System nachvollzogen und entsprechende Anweisungen an ausgerüstete Fahrzeuge übermittelt werden. Mit Hilfe von Interviews und Fragebögen wurde Informationen zur Nutzbarkeit des Systems erhoben. Genutzt wurden standardisierte Methoden wie

- Situational Awareness for SHAPE (SASHA)
- Shape Automation Trust Index (SATI)
- SHAPE Teamwork Questionnaire (STQ-s)
- Akzeptanzfragebögen

Grundsätzlich konnte die Nutzbarkeit und Akzeptanz des neuen Systems nachgewiesen werden. Es haben sich jedoch im Rahmen der Implementierung und der Versuche Probleme gezeigt, die in weiteren Entwicklungen berücksichtigt werden müssen. Die verwendeten Technologien führten teilweise zu technischen Problemen, die jedoch nur mit größerem Aufwand behoben werden können bzw. infrastrukturelle Änderungen auf dem Flughafen bedingt hätten.

#### II - 1.5.4 **CBA**

Durch einen integrierten Groundhandling-Arbeitsplatz kann im Wesentlichen eine Reduzierung der Arbeitsbelastung des Disponenten erreicht werden, welche nicht direkt monetär messbar ist. Während die Kosten noch gut ermittelbar sind (Technische Systeme, Schulungen), lässt sich der Nutzen nur an anderen Auswirkungen erkennen. Hier könnten vor allem bessere Prozessabläufe (zeitgenaue Anweisungen), geringere Fehlerquoten (Missverständnisse, Nachfragen) oder auch weniger Fehlzeiten durch gesunkenen Arbeitsbelastung herangezogen werden.

Wie auch beim Leitstand wurde eine Reziproke CBA angesetzt, die ermittelt, wann sich die Einführung der neuen Technologie amortisiert hat. In den Vorgängerprojekten CARMA und WFF wurde hierzu bereits Untersuchungen durchgeführt, deren Methodik auch für das Projekt Airport2030 übernommen wurden.

Für Airport2030 bestand das Problem, dass der entwickelte Dispositionsarbeitsplatz nicht unabhängig von der Einführung eines gesamten Fahrzeugmanagementsystems bewertet werden kann. Funktionalitäten wie Verkehrslage (Positionsdarstellung) oder Datenlinkkommunikation sind nur verfügbar, wenn entsprechende Fahrzeugsysteme und Übertragungssysteme verfügbar sind.

Folgende Punkte wurden als möglicher Nutzen erarbeitet:

- Erhöhung des Situationsbewusstseins
- Reduzierung der Arbeitsbelastung

- Fehlerfolgekostensenkung
- Betriebskostensenkung
- Kapazitätserhöhung

Grundsätzlich sind für die Bestimmung der monetären Auswirkungen umfangreiche Simulationen mit reproduzierbaren Situationen notwendig. Da diese im Projekt nicht vorgesehen waren, erfolgte eine qualitative Bewertung. Während der Versuche wurde mit Fragebögen versucht, entsprechende Informationen aufzunehmen, die im Rahmen der Nutzenbewertung ausgewertet wurden. Die begrenzte Anzahl an Versuchspersonen führt hier jedoch zu statistisch nicht belastbaren Ergebnissen. Damit sind auch die in der Nutzenbewertung angesetzten Annahmen und Resultate lediglich als erste Indikatoren zu sehen.

## II - 1.6 Hochautomatisierte Prozesssteuerung – Vorfeld

Ziel dieses Arbeitspaketes des DLR Instituts für Flugführung war die Konzeption, technische Umsetzung und Validierung eines integrierten Arbeitsplatzes für die Vorfeldkontrolle. Es ging darum, einen Lotsenarbeitsplatz zu entwickeln, die Informationen, die auf verschiedene Systeme verteilt sind, zu konsolidieren und über neue Funktionalitäten die Arbeit der Lotsen zu unterstützen. Wie bei den Arbeitspaketen Leitstand und Groundhandling wurden zunächst Arbeitsanalysen und konzeptionelle Arbeiten durchgeführt. Danach folgten die technische Umsetzung, die Durchführung der Versuche und eine abschließende Auswertung (Abbildung 44).

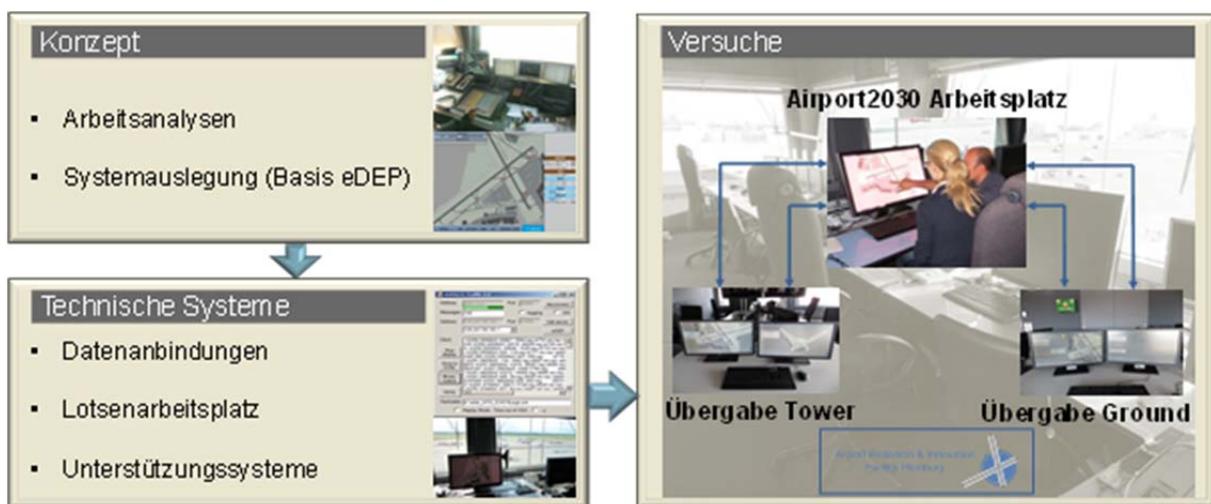


Abbildung 44: Vorgehen und Arbeitsinhalte Themengebiet Vorfeld

### II - 1.6.1 Konzept

Die konzeptionellen Arbeiten beinhalten die Arbeitsanalyse in der Vorfeldkontrolle und die Erstellung des operationellen Konzeptes.

#### II - 1.6.1.1 Arbeitsanalyse

Die Durchführung der Analyse fand am 02.12.2009 durch zwei Mitarbeiter des DLR statt, die für drei Stunden in der Vorfeldkontrolle die folgenden Punkte untersuchten.

- Beschreibung der Arbeitspositionen und deren Aufgaben
- Benötigte Information, Informationsquellen, Informationsfluss
- Benutzte technische Systeme
- Arbeitsorganisation (Staffing, Arbeitszeiten, Training, etc.)
- Erhebung aktueller Betriebsprobleme und deren Ursache, potentielle Verbesserungsmöglichkeiten

Es wurde eine detaillierte Prozessanalyse- und Beschreibung erarbeitet, um die einzelnen Arbeitsschritte, die der Lotse während seiner Arbeit durchzuführen hat, im Konzept entsprechend zu berücksichtigen. Als Ergebnis wurde Verbesserungspotenzial bei der Koordination zwischen den verschiedenen Prozessbeteiligten erkannt. Eine systemtechnische Kopplung und entsprechender Datenaustausch kann hier positive Auswirkungen haben.

Aus den Auswertungen der Arbeitsanalyse hat sich zudem gezeigt, dass Informationen zum Teil mehrfach in verschiedenen Systemen zur Verfügung gestellt werden und damit Optimierungspotential besteht.

Die in der Arbeitsanalyse gewonnenen Erkenntnisse fließen dann direkt in das Konzept des integrierten Arbeitsplatzes ein.

#### II - 1.6.1.2 Operationelles Konzept

Das operationelle Konzept stellt eine umfassende Beschreibung des zu entwickelnden Systems dar. Neben den Zielen und den Randbedingungen sind die detaillierte Beschreibung des HMI und die damit verbundenen operationellen Verfahren die zentralen Bestandteile. Als wesentliche Ziele lassen sich die folgenden Punkte zusammenfassen.

- Reduzierung der Anzahl von Displays und Peripheriegeräten
- Vereinfachung der Koordination zwischen den Arbeitspositionen
- Reduzierung redundanter Flugplandateneingaben
- Vorbereitung auf das Ersetzen von Flugstreifen

Basierend auf dem ersten Ziel ging es darum, ein einzelnes HMI zu nutzen, auf dem alle notwendigen Informationen dargestellt werden und das gleichzeitig sämtliche notwendige Interaktionsmöglichkeiten bietet, um die Luftfahrzeuge auf dem Vorfeld zu koordinieren. Der grundsätzliche Aufbau des HMIs ist in Abbildung 45 dargestellt.

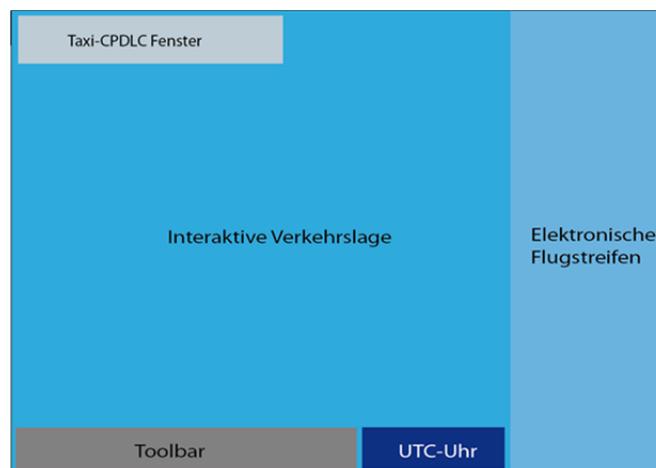


Abbildung 45: Grundkonzept Vorfelddisplay

*Interaktive Verkehrslagedarstellung*

Die interaktive Verkehrslagedarstellung (iVLD) stellt die zentrale Benutzerschnittstelle des zukünftigen integrierten Arbeitsplatzes für den Vorfeldlotsen dar. Darauf abgebildet sind das Airport Layout, die Luftfahrzeuge und Fahrzeuge in Form von Symbolen, Labels (enthalten Informationen zu den Flügen/Fahrzeugen) und weitere Informationsfenster (Tabelle 21).

**Tabelle 21: Integriertes Elektronisches Flugstreifensystem**

<p>Radarlabel</p> 	<p>Luftfahrzeug-Radarlabel</p>	<p>Grundlegende Informationen zum Flugzeug/ Flug, kann noch erweitert werden, um zusätzliche Daten anzuzeigen</p>
	<p>Bodenfahrzeug-Radarlabel</p>	<p>Grundlegende Informationen zum Fahrzeug</p>
	<p>Callsign-Menü</p>	<p>Hauptinteraktionselement, über dieses Element kann der Lotse Freigaben, Anweisungen oder Transfers zu anderen Arbeitspositionen eingeben</p>
	<p>RWY-Entry Menü</p>	<p>Zuweisung, zu welcher Runway die Rollführung erfolgen soll.</p>
	<p>Parkpositions-statusmenü</p>	<p>Anzeige und Zuweisung der Abstellpositionen für das jeweilige Luftfahrzeug</p>
<p>Taxiway Statusmenü</p> 		<p>Über dieses Menü können bestimmte Abschnitte des Rollwegesystems gesperrt oder freigegeben werden. Dies ist für die Berechnung von Rollrouten relevant</p>
<p>Routing</p> 		<p>Über diese Funktion kann eine Rollroute ins System eingegeben werden. Dies wird auch zur Überwachung der Rollbewegung genutzt. Bei entsprechend ausgerüsteten Flugzeugen kann die Rollanweisung ohne Sprechfunk direkt ins Flugzeug übertragen werden (Datalink-Kommunikation).</p>

Anhand des Aussehens der Symbole und der Farbkodierung von Texten und Hintergründen in den Labels, können verschiedene Informationen abgebildet werden. Dazu gehören

- Status des Luftfahrzeuges (z.B. Arrival, Departure, Schlepp, Anflug, Gelandet)
- Ausrüstungszustand (Datalink oder nicht)
- Aktuell zuständige Kontrollinstanz (z. B. Tower, Clearance delivery, Apron)

Klassische Papierflugstreifen werden sowohl in der Flugsicherung als auch in der Vorfeldkontrolle zunehmend durch elektronische Flugstreifensysteme (EFS) oder durch streifenlose Darstellungen ersetzt. In der FHG Vorfeldkontrolle wird bereits ein von der Firma Frequentis entwickeltes EFS „Smart Strip“ benutzt. Für den integrierten Vorfeldlotsenarbeitsplatz wurde ein neues, in die interaktive Verkehrslage integriertes EFS-Konzept vorgestellt.

Grundsätzlich orientiert sich das EFS an bekannten Systemen und nutzt einen ähnlichen Ansatz (Baykonzept) (Abbildung 46). Es wurde jedoch mit den anderen Elementen der iVLD verknüpft und um neue Funktionalitäten erweitert.

PENDING ARR						
E1200	DLH2234	A320/M	47		05	ASSUME
E1200	BAW5617	A320/M	16		05	ASSUME
T1210	DLH1170	A320/M	43		05	TAXI
TAXI IN						
E1200	DLH3560	A320/M	23		05	
TAXI OUT						
T1210	DLH6570	A320/M	43		33 R	121.7
T1215	DLH4711	A320/M	42		33 R	121.7
PUSHBACK						
T1217	SAS1213	A320/M	31		33 R	TAXI
PENDING DEP						
T1200	IBE1245	A320/M	17		33 R	PUSH
E1200	DLH4790	A320/M	44		33 R	ASSUME
E1203	DLH4970	A320/M	48		33 R	ASSUME

Abbildung 46: Flugstreifenbereich iVLD

Das EFS bietet umfangreiche Möglichkeiten der Interaktion und stellt ein weiteres Interface dar, das den Lotsen bei der Koordination des Verkehrs unterstützt. Die Flugstreifen können hinsichtlich des Umfangs der dargestellten Informationen angepasst werden. Wesentliche

Funktion ist die neuartige Verknüpfung mit den Positionskameras, bei denen nach einem Klick ein Fenster erscheint, welches den betreffenden Standplatz zeigt.

#### *Flugplanfenster*

Das Flugplanfenster dient zur Anzeige und ggf. anschließender Bearbeitung von Flugplandaten.

#### *Eingeben komplexer Taxi-Clearances*

Die Eingabe einer Rollroute erfolgt über das Anklicken einzelner Taxiwaysegmente (bestimmter Fangpunkte) auf dem Verkehrslagedisplay. Die Funktion ist sehr umfangreich und ermöglicht verschiedenste Freigaben und Kontrollmöglichkeiten

#### *Alarmer und Warnungen*

Alarmer und Warnungen dienen der schnellen Erfassung von kritischen Situationen. In zwei Stufen (1. Warning, 2. Alert) werden dem Lotsen sofort Informationen über Art der Situation und die Beteiligten geliefert. Dies erfolgt in allen Elementen des HMIs.

#### *Integration der Informationen aus einem Departure Management System*

#### *Das Taxi-CPDLC Fenster*

Die Arbeiten im Airport2030 gehen davon aus, dass in Zukunft immer mehr Flugzeuge mit einem sogenannten Datenlink ausgerüstet werden und die Kommunikation nicht mehr über Sprechfunk sondern systemisch erfolgt. Aus diesem Grund ist ein spezielles Fenster vorhanden, das diese Art der Kommunikation unterstützt. In dem Fenster werden alle aus- und eingehenden Nachrichten zur Nachverfolgung angezeigt. Zusätzlich sind Interaktionen über einzelne Elemente möglich

#### *Toolbar*

Die Toolbar ermöglicht die Konfiguration des HMI zur Laufzeit ohne das System neu starten zu müssen. Eine Vielzahl von Einstellungsmöglichkeiten hinsichtlich des Umfangs und der Art der Darstellung von Informationen der einzelnen Displayelemente steht hier zur Verfügung.

Neben der Beschreibung der Displayelemente enthält das Konzept auch die operationellen Verfahrensweisen bei der Durchführung der Lotsenaufgaben. Hierbei wird beschrieben, wie der Lotse mit dem neuen System umgeht, wie Anweisungen und Eingaben umgesetzt werden und wie das System den Lotsen unterstützen kann.

## II - 1.6.2 **Technische Umsetzung**

Die technische Umsetzung erfolgte wieder unter Nutzung der Airport Research and Innovation Facility Hamburg sowie der Anpassung und Adaptierung der von der Eurocontrol zur Verfügung gestellten eDEP.

### II - 1.6.2.1 Datenanbindung

Für den Vorfeldarbeitsplatz wurde ebenfalls auf die Daten der Flughafendatenbank und der Verkehrslagedaten des A-SMGCS zurückgegriffen. Die Flugplandaten waren im Projekt in einer Airport2030-Datenbank in der Testplattform gespeichert. Die Positionsdaten der Flugzeuge wurden über ASTERIX im Netzwerk verteilt.

### II - 1.6.2.2 Lotsenarbeitsplatz

Für den Lotsenarbeitsplatz wurde die eDEP der Eurocontrol verwendet. Anders als beim Groundhandlingsystem, stellt die eDEP für den Vorfeldbereich bereits umfangreiche Funktionalitäten zur Verfügung, die für die Verwendung im Airport2030 angepasst werden mussten. Das Gesamtsystem wurde in einer Client/Server Architektur aufgesetzt wobei die einzelnen Module komplex miteinander vernetzt sind. Eine Übersicht stellt die folgende Abbildung 47 dar. Deutlich zu erkennen sind die Schnittstellen zu den datenliefernden Systemen, die serverinternen Komponenten und die verschiedenen Arbeitspositionen, die das HMI für die jeweiligen Operateure darstellen (jeweils mit den Buchstaben WP für „Working Position“ am Ende).

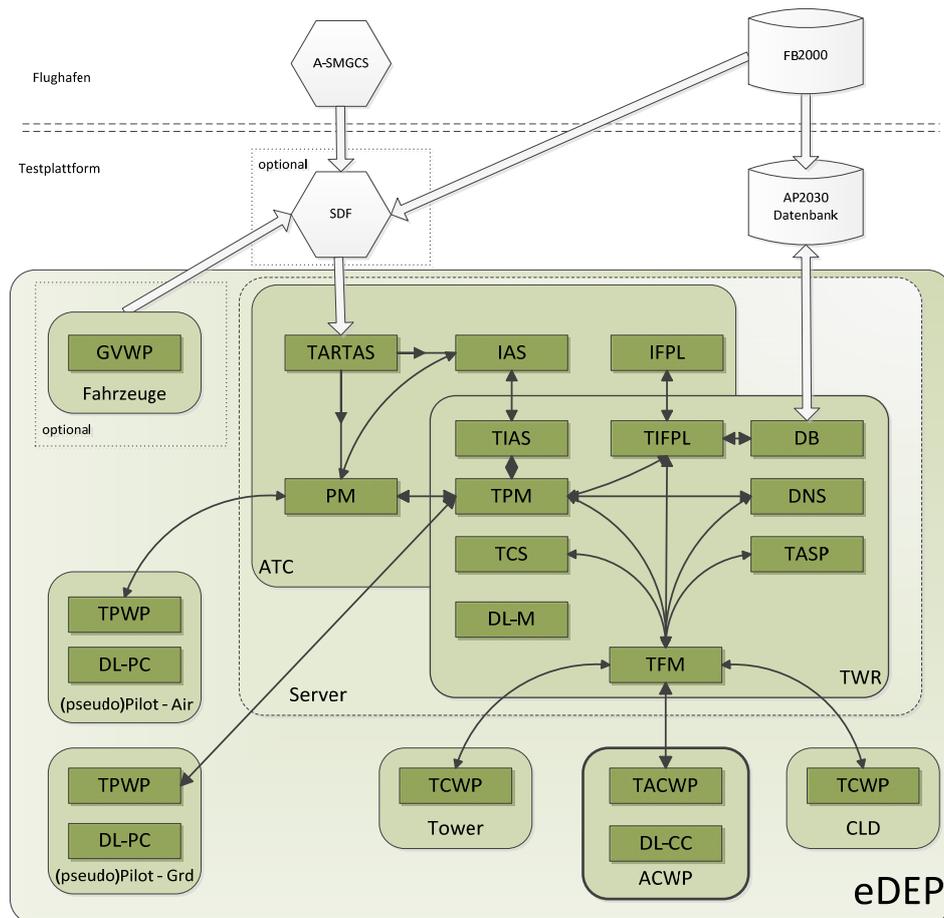


Abbildung 47: Übersicht Gesamtsystem eDEP (angepasst für Vorfeld)

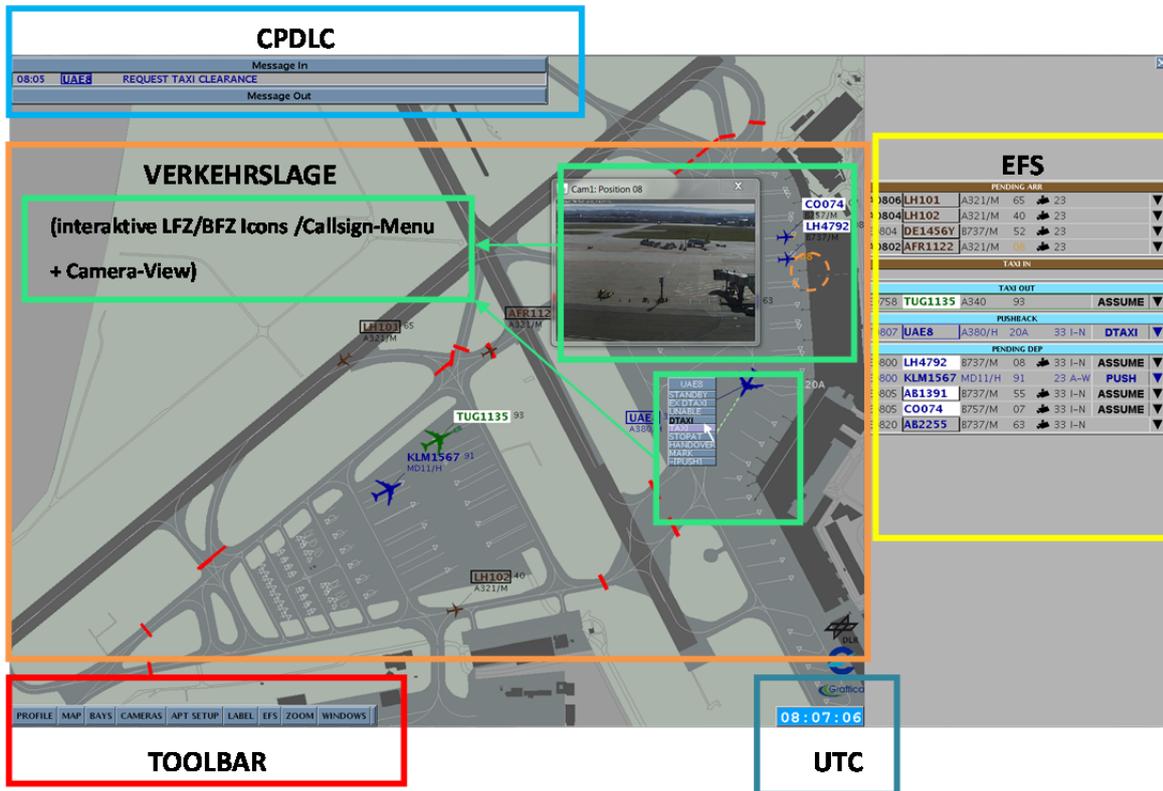


Abbildung 48: Umsetzung integriertes Vorfelddisplay

Das dem Design zugrunde liegende allgemeine HMI-Layout wurde direkt dem operationalen Konzept entnommen. In der Abbildung 48 ist anhand einer Beispielsituation die Umsetzung des Schemas in der eDEP abgebildet.

Größte Herausforderung bei der Umsetzung des Lotsenarbeitsplatzes war die Anpassung an die Verwendung von Live-Daten am Flughafen Hamburg. Hier ging es weniger um die Implementierung der Funktionen an sich (diese werden von der eDEP bereits bereitgestellt), als vielmehr darum die ursprüngliche Ausrichtung der eDEP als Simulationsplattform in ein Realdatensystem zu portieren.

Es hat sich gezeigt, dass gerade in diesem Bereich umfangreiche Anpassungen in den internen Modulen notwendig waren. Während bei Simulationsläufen alle benötigten Daten von Anfang an vorliegen, laufen diese in operationellen Systemen teilweise nacheinander ein und werden immer wieder erneuert oder ändern sich. Ein Großteil der technischen Umsetzungsarbeit bestand somit darin, die Grundfunktionen in einem realen Livedaten-Umfeld einzubinden und funktionstüchtig zu gestalten.

### II - 1.6.2.3 Unterstützungssysteme

Um das Vorfeldlotsendisplay in den Versuchen möglichst realistisch verwenden zu können, wurden zusätzliche Arbeitspositionen eingebunden, die die Kommunikation mit dem Vorfeldlotsen abbilden. Hierbei ging es vor allem um den Austausch von Flugstreifen zwischen Flugsicherung (Bereich der Runways), Vorfeldkontrolle (Apron) und Boden (Anlassfreigabe).

Um die Kommunikation zwischen Luftfahrzeug und Lotse nachzubilden, wurden spezielle Pseudo-Pilotenstationen genutzt, die Anweisung über Sprechfunk oder Datenlink entsprechend umsetzen bzw. eigene Anfragen stellen, auf die der Lotse dann reagieren muss.

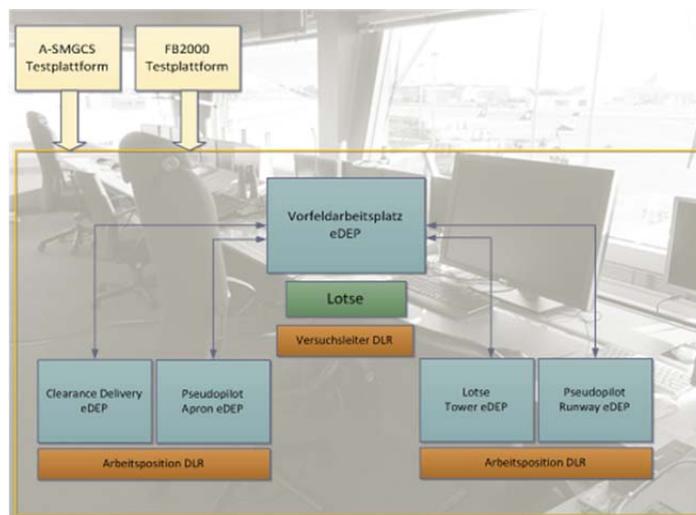
### II - 1.6.3 Versuche

Zur Vorbereitung der Versuche wurde ein Testplan erstellt, der neben der Beschreibung der Validierung mit Operateuren auch die technische Verifikation des Systems beschreibt. Die technischen Tests dienten dabei zum einen zur Überprüfung der implementierten Funktionalitäten und zum anderen der Durchführung der technischen Tests in der Research and Innovation Facility Hamburg und der Vorbereitung der Validierung. Für die Verifikation wurden Testblätter für verschiedene Funktionskomponenten definiert, die das Testziel, die Testmethode und die Testergebnisse beinhalten. Diese wurden dann in den jeweiligen Testläufen durchgegangen und überprüft, ob die Funktionalitäten entsprechend der konzeptionellen Überlegungen umgesetzt wurden und das entsprechende Ergebnis liefern.

Der Testplan enthält außerdem eine detaillierte Beschreibung der Validierungsstrategie, des Versuchsaufbaus, der Durchführung der Versuche und der Daten, die aufgezeichnet und ausgewertet werden sollten.

Die Versuche zum Vorfeldarbeitsplatz fanden in KW33 des Jahres 2013 im Zeitraum vom 12.08.2013 - 16.08.2013 im Contingency Raum des Hamburger Flughafens statt. 5 Lotsen der Vorfeldkontrolle nahmen an den Versuchen teil, wobei jeder Versuchslauf ca. 2 Stunden dauerte. Durch die Nutzung des Contingency Raumes konnte der Vorfeldarbeitsplatz mit direkter Sicht auf das Vorfeld aufgebaut werden. Damit ergaben sich nahezu identische Bedingungen im Vergleich zum operationellen Arbeitsplatz in der Vorfeldkontrolle. Um auch die Prozesse und Arbeitsabläufe realistisch zu gestalten, wurden auch die angrenzenden Prozessschritte abgebildet. Dies war insbesondere für die Übergabe von Flugstreifen und die Kommunikation wichtig.

Die Versuche fanden im passive Shadow-mode statt. Dies bedeutet, dass mit dem Airport2030 System der Verkehr nicht operationell gesteuert wurde. Die reale Verkehrssituation wurde aus den operationellen Systemen übernommen und Anweisungen des operationellen Lotsen über das System nachgeführt. Damit konnte überprüft werden, wie sich das Airport2030 System im Betrieb verhält und ob es den Lotsen entsprechend unterstützt. Die im Airport2030 System enthaltenen neuen Funktionalitäten (z.B. Datalink Communication) wurden durch die Pseudopilotenstationen abgebildet, die vom DLR bedient wurden.



**Abbildung 49: Versuchssetup Vorfeld**

Während der Versuche konnten die Versuchspersonen nach einem Briefing und einer ersten Einweisung das System eigenständig testen und bedienen. Über Diskussionen während der Versuche und Fragebögen konnte die Nutzungs- und Gebrauchstauglichkeit des Systems untersucht werden.

Insgesamt wurde das HMI Konzept eines hochintegrierten Vorfeldlotsendisplays als gelungen umgesetzt bewertet. Die Akzeptanz für das neue System im Sinne eines hochintegrierten und übersichtlichen Designs scheint somit gegeben. Jedoch waren die Einschätzungen zur Bedienbarkeit einiger Funktionen nur auf einem mittleren bis niedrigem Bewertungsniveau, was zeigt, dass hier Verbesserungen möglich sind.

#### II - 1.6.4 **CBA**

Für den integrierten Lotsenarbeitsplatz gelten in Bezug auf die CBA die gleichen Ausgangsbedingungen wie für Leitstand und Groundhandlingarbeitsplatz. Zum einen lässt sich das Lotsensystem nicht unabhängig von anderen technischen Systemen bewerten (Datenlink muss auch flugzeugseitig verfügbar sein), zum anderen können diese Technologien nur in Simulationen quantitativ konkret bewertet werden. Da dies hier nicht gegeben war, wurde in einem ersten Schritt eine qualitative Bewertung über Fragebögen während der Versuche durchgeführt. Im zweiten Schritt wurden diese Resultate dann mit einem reziproken CBA Ansatz bewertet. Dabei wurde bestimmt, ab welchem Jahr sich die angenommenen Investitionen amortisieren.

## II - 1.7 Flugzeugkonfigurationen für effiziente Bodenoperationen – Flugzeugkonfiguration 2030

Das Ziel dieses Arbeitspaketes des DLR Instituts für Lufttransportsysteme war es, Herausforderungen des Flughafenbetriebs zu identifizieren, die aus dem Einsatz zukünftiger Konfigurationen erwachsen. Mit dem Zeithorizont 2030 sind Konfigurationen möglich, die sich deutlich von heutigen Flugzeugmustern unterscheiden.

### II - 1.7.1 *Flugzeugentwurf*

#### II - 1.7.1.1 Auslegung neuer Flugzeugkonfigurationen

Die Erforschung neuer Luftfahrzeugkonfigurationen ist im Allgemeinen durch die Reduzierung von Kosten oder der Umweltwirkung bezogen auf die Transportmission motiviert. Schlüsselfaktoren sind hier die Effizienz des Antriebs, die Masse des Luftfahrzeugs, seine aerodynamische Effizienz sowie die Lärmcharakteristik.

#### *Konfiguration*

Zur Steigerung der aerodynamischen Effizienz sind seit längerer Zeit sog. „Drei Flächen Flugzeuge“ in der Diskussion. Diese entsprechen konventionellen Drachenkonfigurationen, die mittels eines Canard Flügels in der Lage sind, den Widerstand des getrimmten Flugzeugs zu reduzieren. Der Canard Flügel im Bereich des Cockpits würde ggf. eine Modifikation der Boarding-Brücke erfordern, hätte jedoch keine signifikanten Einflüsse auf das Bodenhandling. Eine erheblich stärkere Verbesserung der aerodynamischen Effizienz kann durch sog. Joint Wing oder Box Wing Konfigurationen erreicht werden. Hierbei handelt es sich um Konfigurationen mit konventionellem Rumpf und zwei Paaren Tragflügel, die Pfeilungen unterschiedlichen Vorzeichens aufweisen und mittels einer vertikalen Fläche an ihren Enden verbunden sind. Diese Konfiguration besitzt das Potential, den induzierten Widerstand erheblich zu verringern. Dieser Vorteil wird durch die durch die Kopplung der Flügel initiierte Massenzunahme der Flügel etwas relativiert. Durch das zweite Paar Flügel ist jedoch der Zugang zum Rumpf stark eingeschränkt, so dass signifikante Auswirkungen auf die Bodenabläufe zu erwarten sind. Die grundlegenden Techniken wie z.B. das Frachtladekonzept können jedoch beibehalten werden. Die Konfiguration ist zur Aufnahme der beschriebenen neuen Treibwerkskonzepte am Heck geeignet.

Noch tiefgreifendere Eingriffe in die Bodenprozesse erfordern Blended-Wing-Body (BWB) Konfigurationen. In ihnen sind Rumpf und Flügel fließend ineinander integriert. Da die Nutzlast mehr in Spannweitenrichtung verteilt ist, können die strukturell dimensionierenden Biegemomente reduziert werden. Eine Reduzierung der Gesamtmasse konnte bisher trotzdem nicht nachgewiesen werden, da die flache Bauform hinsichtlich der Auslegung der Kabine als Druckkörper sehr ungünstig ist. Die Konfiguration bietet dafür eine signifikante Reduktion der umströmten Oberfläche, so dass der Reibungswiderstand deutlich vermindert wird. Die Bauform begünstigt ebenso die Montage neuer Triebwerke auf der Oberseite des Rumpfes, wodurch sich Lärm-reduzierende Abschattungseffekte einstellen. BWB Konfigurationen gelten als sehr aussichtsreich für die Verwendung als militärische Tanker und Transporter. Insbesondere das Ableiten ziviler Transport- und

Passagierkonfigurationen aus potentiellen militärischen Mustern lassen das Auftreten solch unkonventioneller Konfigurationen auf zivilen Flughäfen auch in einer nicht sehr fernen Zukunft möglich erscheinen.

Somit wurde eine am Institut für Lufttransportsysteme entworfene BWB Konfiguration aufgrund ihres großen Potentials, ihres auch aus Flughafensicht hohen technischen Anspruchs sowie der dem AP4.2 angemessenen Realisierbarkeit für die Untersuchung im Spitzencluster ausgewählt.

Die Konfiguration kann mit einer Vielzahl neuer Technologien ausgestattet werden. Von besonderer Bedeutung ist die strukturelle Bauweise, da diese wie oben beschrieben aufgrund der Bauform generell kritisch ist bei dieser Konfiguration. Weiterhin beeinflusst sie wesentlich durch Anordnung der Türen und Ladeluken die Schnittstellen zum Flughafen und die Bodenprozesse. Neben der geometrischen Gestaltung sollen die Verwendung neuer Werkstoffe sowie unterschiedliche Frachtladekonzepte untersucht werden.

Die Auslegung von BWB Konfigurationen ist anspruchsvoll, da die konventionellen Vorentwurfssysteme auf Statistiken oder elementaren physikalischen Modellen beruhen, die der integrierten Bauweise nicht gerecht werden. Aus diesem Grund ist am Institut für Lufttransportsysteme ein Gesamtentwurfssystem nach dem Prinzip der multidisziplinären Optimierung erstellt worden, in dem angemessen detailliert abbildende Analysewerkzeuge miteinander verkoppelt werden. Diese Arbeiten am Institut für Lufttransportsysteme stützen sich auf das Entwurfssystem des DLR, welches Werkzeuge mittels des kommerziellen Netzwerkprogramms PHX ModelCenter sowie der einheitlichen DLR Datenschnittstelle CPACS (Common Parametric Aircraft Configuration Scheme) miteinander verkoppelt (siehe Abbildung 50). Im Rahmen des Spitzenclusters sind insbesondere die Schnittstellen hinsichtlich BWB Konfigurationen zu erweitern, Werkzeuge für die strukturelle Modellierung zu erstellen sowie Werkzeuge für Flughafen-spezifische Analysen in das System zu integrieren.

Um den Einfluss dieser neuen Konfiguration quantifizieren zu können, wurde zunächst ein konventionelles Referenzflugzeug entworfen und die Sensitivitäten der primären Entwurfsparameter und Technologiefaktoren berechnet.

#### *Antrieb*

Der erfolgversprechendste Ansatz zur Steigerung der Effizienz des Antriebes mit Auswirkung auf die Konfiguration besteht in der Vergrößerung des Nebenstromverhältnisses. Das kann bei ummantelten Triebwerken in Kombination mit Getriebefans und ggf. gegenläufigen Fans oder ohne Ummantelung mit sog. Open Rotor Konzepten realisiert werden. In beiden Fällen vergrößert sich der Triebwerksdurchmesser, so dass konventionelle Anordnungen der Triebwerke unter dem Flügel aufgrund der großen notwendigen Fahrwerkslängen unwirtschaftlich werden. Open Rotor Konzepte bieten i.A. gute Flugleistungen beim Start, emittieren jedoch erheblich mehr Lärm als ummantelte Antriebe. Aus diesem Grund entsprechen ummantelte Triebwerke besser den Anforderungen insbesondere aus Sicht des Flughafens.

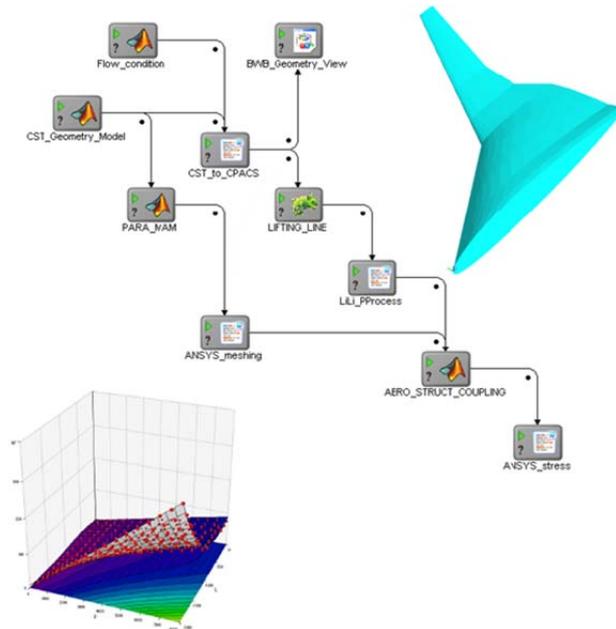


Abbildung 50: Entwurfssystem der BWB Konfiguration

### II - 1.7.1.2 Referenzkonfiguration für das Jahr 2030

Die Auslegung von BWB Konfigurationen ist anspruchsvoll, da der Entwurf nur auf physikalischen Modellen beruhen kann. Aus diesem Grund wurde zunächst eine Methode am Institut für Lufttransportsysteme aufgebaut, um Aerodynamik und Struktur analysieren und optimieren zu können. Um eine Konfiguration für den Reiseflug optimieren zu können, war der Aufbau von weiteren Komponenten für die Entwurfsumgebung nötig. Ein zusätzliches Massen-Modell sowie ein Modell zur Auslegung von Primärsteuerflächen wurden ergänzt, um flugmechanische Bewertungen durchführen zu können. Für die Auslegung der BWB Konfiguration wurden die folgenden Teildisziplinen verwendet:

In der **Aerodynamik** Analyse werden die Wechselwirkungen der äußeren Form der Konfiguration mit der Umgebung untersucht, ferner die Kräfte und Momente die aufgrund von Luftumströmung auf diese wirken. Auswirkungen aus der Variation der äußeren Form bzw. durch die Variation des Grundrisses (Planform) und der Profilverteilung, welche einen Einfluss auf Performance und andere Disziplinen haben, können analysiert und auf gegebene Zielfunktionen optimiert werden.

Die **strukturelle Gestaltung** (und damit die Gewichtsabschätzung) einer BWB Konfiguration gehört zu einer der wesentlichen Herausforderungen. Durch den nicht runden, bedruckten Rumpf und die spannweite Dickenverteilung lassen sich konventionelle Abschätzungs- und Vorentwurfsverfahren nicht anwenden. Höherwertige Verfahren wie Finite Elemente Methoden (FEM) bilden hier eine ausreichend gute Näherung des physikalischen Verhaltens nach und werden hier verwendet. Das für die FEM Analyse benötigte Strukturmodell, wird durch die DLR in-house Anwendung PARA\_MAM aus einer Punktwolke, welche die äußere

Form beschreibt, erzeugt. Aerodynamische Lasten werden auf die Struktur aufgeprägt, wonach diese dimensioniert bzw. die Dickenverteilung optimiert wird und somit das Strukturgewicht minimiert wird.

In der **Flugmechanik** Analyse werden das Flugverhalten bzw. die Fliegbarkeit, die Stabilität und die Steuerbarkeit sowie die Performance untersucht. Es werden Abschätzungen der nichtstrukturellen Massen, der Gesamtmasse und der Lage des Schwerpunktes (in Abhängigkeit vom Beladungszustand) gemacht, welcher signifikante Auswirkung auf das Flugverhalten hat.

Das **Massen-Modell** generiert aus der äußeren Flugzeughülle und der inneren Struktur ein Komponenten-Modell (siehe Abbildung 51). Basierend auf diesem Komponenten-Modell können Sekundär-Massen (z.B. Systemmassen) über Flächen und Längen abgeschätzt werden. Zusammen mit der Strukturmasse aus der Aerodynamik-Strukturanalyse können zum einen ein Gesamtgewicht und eine Schwerpunktlage sowie Flächen-Trägheitsmomente der Gesamtkonfiguration abgeschätzt werden.

Eine Methode zur Entwicklung der **primären Steuerflächen** führt die geometrische Dimensionierung der Steuerflächen und Leitwerke durch. Dies ist unter anderem wichtig, um eine grundsätzliche Aussage über die Fliegbarkeit bzw. die Steuerbarkeit und Stabilität einer solchen neuartigen Konfiguration treffen zu können.

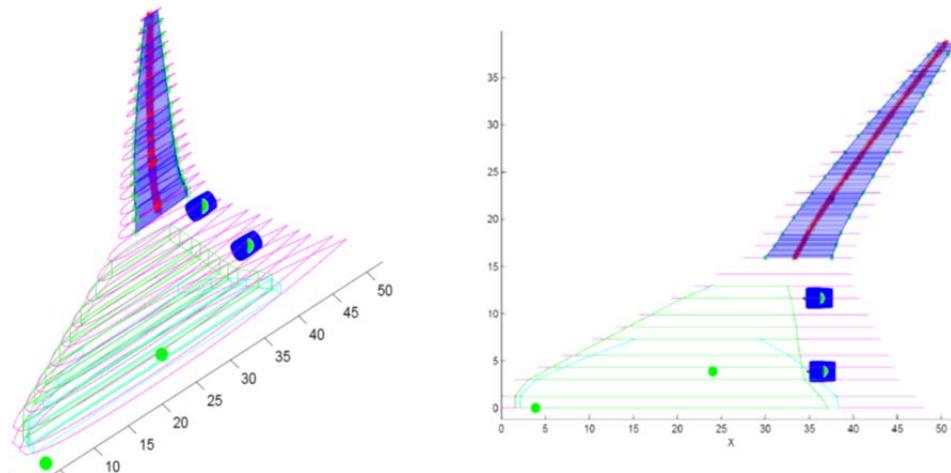


Abbildung 51: Generiertes Komponenten-Modell

### II - 1.7.1.3 Entwurfs-Optimierung

Es wurde am Institut für Lufttransportsysteme eine multidisziplinäre Optimierung für den Reiseflug durchgeführt. Als Zielfunktion wurde dort der Missionskraftstoffverbrauch ausgewählt. Die Parameter, die in der Optimierung eine wesentliche Rolle spielten, waren die Flügelgeflügelung, die Flügelverwindung, die Spannweite sowie die Länge des Rumpfes (siehe Abbildung 52).

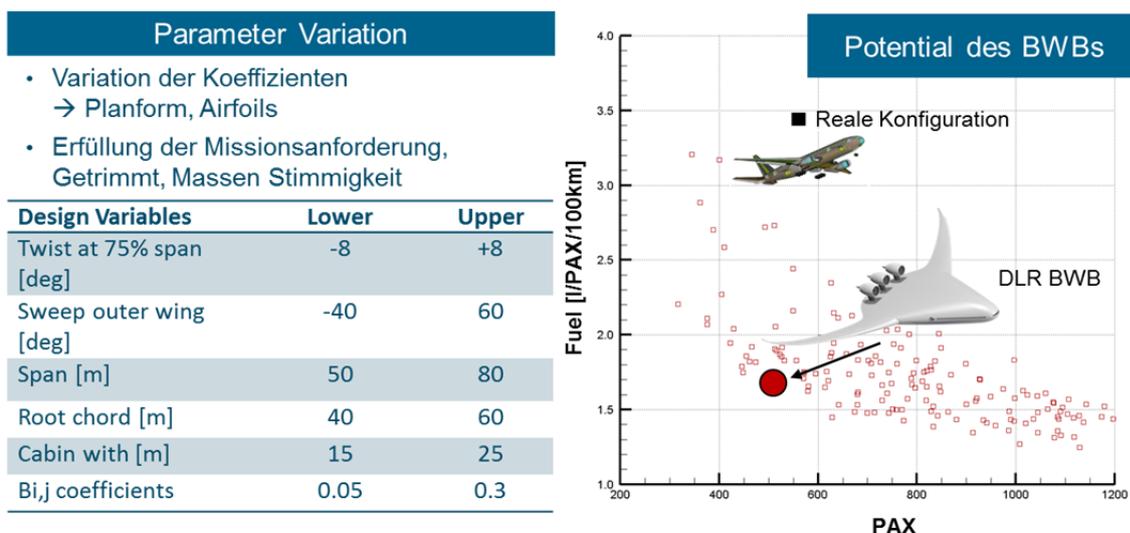


Abbildung 52: Multidisziplinäre Optimierung

Die wesentlichen Eigenschaften die sich aus den Anforderungen und der Optimierung ergeben sind in der Tabelle 22 zusammen gefasst. Diese Konfiguration dient als Grundlage für alle weiteren Analysen.

Tabelle 22: Eigenschaften der optimierten Konfiguration

Parameter	Wert
Passagiere	500
Fracht	50 Tonnen
Reichweite	14000 Km (7560 nm)
Meter Spannweite	80 Meter
Länge	50 Meter
Betriebsleermasse	330 Tonnen
Abflugmasse	550 Tonnen
Triebwerke	3

## II - 1.7.2 *Integration am Flughafen*

Eine Airline setzt ein Flugzeug in mehreren, aufeinanderfolgenden Flugmissionen ein, bei denen es im Passagierluftverkehr sowohl Passagiere als auch Fracht zwischen Flughäfen transportiert. Zwischen den einzelnen Flugmissionen muss das Flugzeug am Boden operieren und abgefertigt werden.

### II - 1.7.2.1 *Kompatibilität zur luftseitigen Infrastruktur*

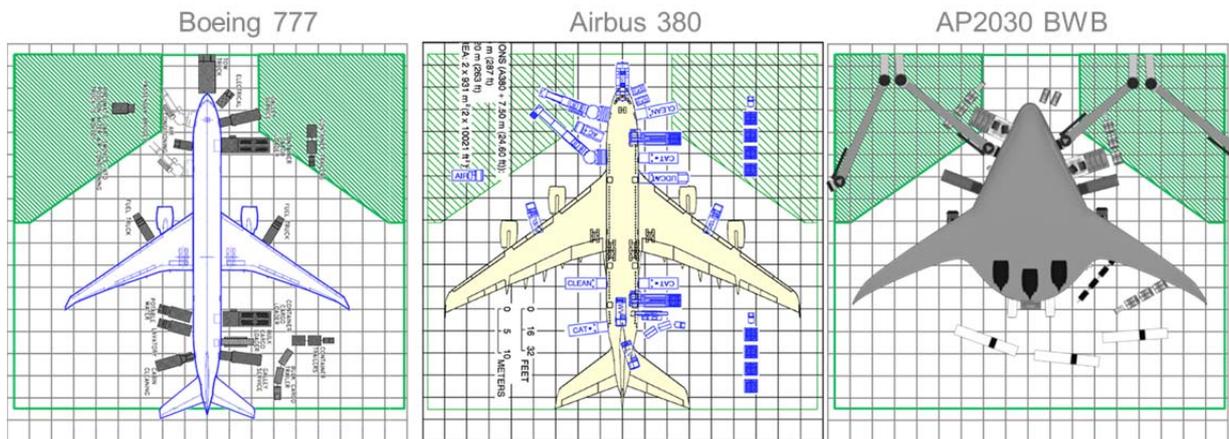
Bei der Operation einer neuartigen BWB Konfiguration am Boden spielen eine Reihe von Einflussgrößen eine Rolle. Mit Sicht auf den gesamten Flughafen ist die Kompatibilität dieser Konfiguration zu Start- und Landebereichen, Rollwegen (Taxi) und Parkpositionen (Pier oder Vorfeld) zu gewährleisten. In der Tabelle 23 sind die wesentlichen Parameter aufgelistet und dessen Relevanz für die BWB-Konfiguration. Evident wird dabei, dass der BWB aus makroskopischer Sicht keine wesentlichen Besonderheiten zeigt und damit gut in bestehende Flughäfen integrierbar ist.

**Tabelle 23: Übersicht der Flughafenkompatibilität**

	<b>Flughafenkompatibilität</b>	<b>Relevanz für den BWB</b>
1.	Flugzeuggeometrie	
	Bodenfreiheit, Türabmessungen und -positionen, Frachtladebereiche, Sensoren	Kann einen Einfluss Haben Zugänglichkeit Keine Besonderheit Keine Besonderheit
2.	Bodenbetrieb	
	Wenderadien, Cockpitsichtfeld, Start-/Landebahnstrecken	Keine Besonderheit Keine Besonderheit Keine Besonderheit
4.	Triebwerkslärm	
	Lärmteppich	Lärm Abschirmung
5.	Wirbelschleppen	
	Wirbelschleppenintensität, -abstände	f(MTOM)
6.	Bewegung am Boden	
	Fahrwerksgeometrie, Fahrwerkslasten, Lastklassifikation	Keine Besonderheit f(MTOM) f(MLM)

### II - 1.7.2.2 *Kompatibilität zu bestehenden Ressourcen*

Die Infrastruktur für die Bodenabfertigung der BWB Konfiguration unterscheidet sich aus der Sicht des Flughafens nicht wesentlich von denen konventioneller Flugzeugkonfigurationen (siehe Abbildung 53).



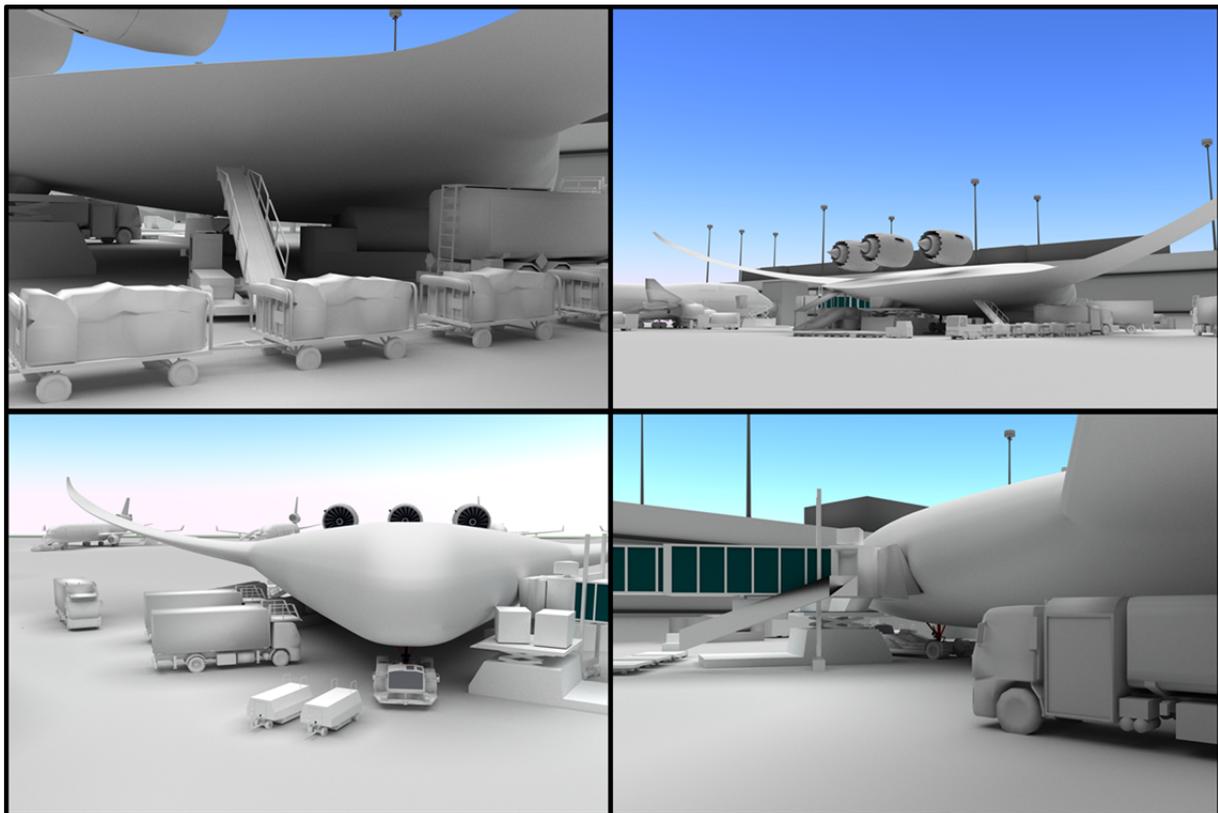
**Abbildung 53: Vergleich der Parkpositionen von konventionellen Flugzeugen und BWB**

Somit kann die luftseitige Infrastruktur der Bodenverkehrsdienste auch für diese Konfiguration genutzt werden. In der Tabelle 24 sind die einzelnen Prozesse aufgelistet, welche vom Flughafen für die Bodenabfertigung bereitgestellt werden und bei welchen Prozessen sich eine Änderung für die BWB Konfiguration ergibt.

**Tabelle 24: Auswirkungen auf die luftseitigen Bodenverkehrsdienste am Flughafen**

Prozess	BWB Besonderheiten ggü. B777 oder A380	Ressourcen
(De)Boarding	keine	Brücken, Treppen + Personal
Positionierung von Brücken und Treppen	keine	Personal
Catering	keine	Catering-Fahrzeug + Personal
Reinigung	keine	Reinigungs-Fahrzeug + Personal
Gepäckabfertigung	<b>andere Zugänglichkeit</b>	Gepäcktransport Fahrzeug, Container-Hubwagen, Gepäckband + Personal
Betankung	<b>andere Zugänglichkeit</b>	Tankwagen
Klimatisierung	keine	Klimaanlage
Bodenstromversorgung	keine	Stromanschlüsse an Gates und GPUs
Schmutzwasser-Entsorgung	keine	Schmutzwasserfahrzeug
Frischwasser-Zufuhr	keine	Frischwasserfahrzeug
Sichern und Entsichern	keine	Personal
Start up / walk out	keine	Personal
Push back / Umschleppen	keine	Push-back-Fahrzeug
Enteisung	<b>andere Zugänglichkeit</b>	Enteisungsfahrzeug/-vorrichtung
Wartung	<b>andere Zugänglichkeit</b>	Technisches Service Personal

Änderungen können sich in der Gepäckabfertigung, beim Betanken, beim Enteisen und bei der Wartung aufgrund der geometrischen Gegebenheiten ergeben (siehe dazu Abbildung 54). Die Gepäckabfertigung kann sich dadurch ändern, dass die Türen des Gepäckraumes eine andere Lage haben und sich damit die Beladungs- und Entladungsvorgänge ändern. Dies würde ggf. neue Fahrzeuge erfordern. Ein weiterer Unterschied besteht in der Unterbringung der Fracht im Frachtraum, da dieser geometrisch anders gestaltet ist als bei konventionellen Flugzeug-Konfigurationen. Da die Flügel bei dieser BWB Konfiguration weit über dem Boden angeordnet sind, ist die Zugänglichkeit für den Betankungsprozess schlechter und könnte ggf. Tankfahrzeuge mit höheren Bühnen und größerem Betankungsdruck erfordern. Der Enteisungsprozess könnte sich ebenfalls schwieriger gestalten, da zum einen der Rumpf eine große Fläche besitzt und die Zugänglichkeit schwieriger ist. Für den Technik-Check sind die über dem Flügel befindlichen Triebwerke schlecht zugänglich.



**Abbildung 54: Darstellungen der kritischen Prozesse**

Landseitig werden keine Änderungen für die Abfertigung der BWB-Konfiguration erwartet. Die dafür benötigten Prozesse sind in **Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke.** aufgelistet.

**Tabelle 25: Auswirkungen auf die landseitigen Prozesse am Flughafen**

Prozess	BWB Besonderheit vgl. B777 oder A380
Passagier Check In / Boarding	Keine
Passagierbetreuung / Ticketing	
Lost & Found	
PRM	
Airline / TA Repräsentation	
Lounge Services	
Security	
Cargo/Mail Handling/Doc	
Flight Operations	
Ramp Coordination	

### II - 1.7.3 *Analyse des Turnaround Prozesses*

Der Turnaround-Prozess beschreibt die Bodenabfertigung eines Flugzeuges vom Beginn des Erreichens der Parkposition bis zum Verlassen der Parkposition, inklusive aller Serviceleistungen, die benötigt werden, um das Flugzeug wieder einsatzbereit zu machen. Dabei können der Prozessumfang und die Dauer je nach Airline und Anforderungsprofil an den folgenden Flug variieren.

Die einzelnen Teilprozesse des gesamten Turnaround-Prozesses werden in Tabelle 26 aufgelistet und in den folgenden Abschnitten erläutert. In der Regel hängt dabei die Turnaround-Zeit von den Prozessen ab, die sich auf dem kritischen Pfad befinden. Diese Prozesse müssen nacheinander erfolgen und erst nach Abschluss des vorherigen Prozesses darf mit dem darauffolgenden begonnen werden.

Eine Bewertungsmatrix über die Relevanz der Einzelprozesse auf die Bodenprozesszeit wurde aufgestellt um die Bedeutung der einzelnen Teilprozesse einzuschätzen und den Aufwand der Analysen zu reduzieren.

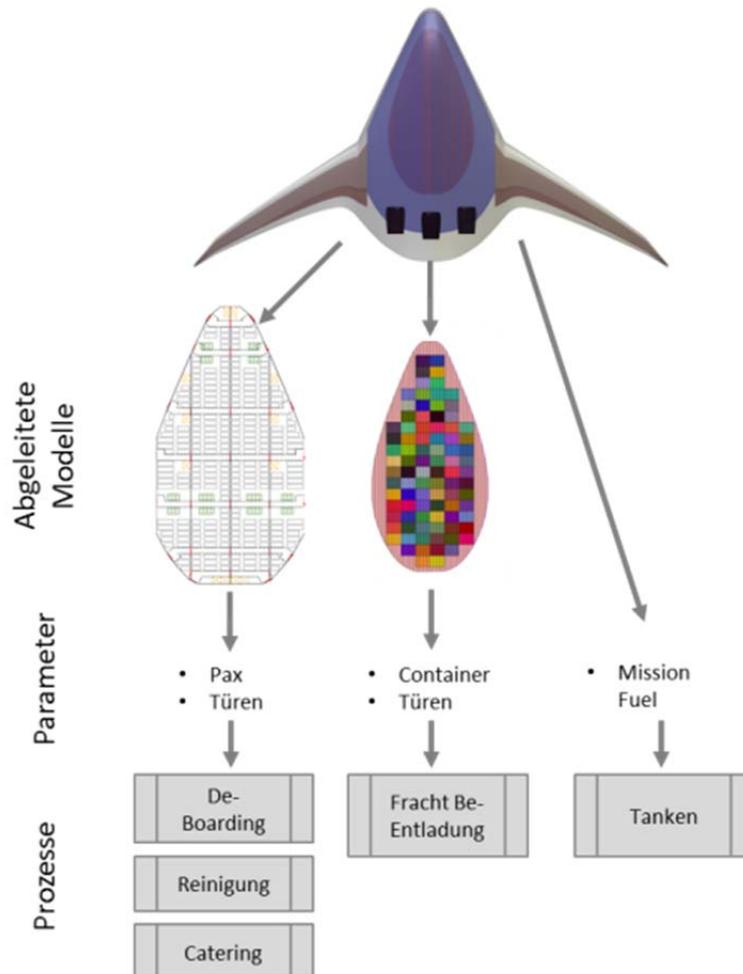
Aus der Bewertungsmatrix hat sich ergeben, dass nur (De)Boarding, Catering, Reinigung, Frachtabfertigung und Betankung relevant für die Bodenprozesszeit sind, so dass diese in einen genaueren Analyseprozess einzubinden sind. Die Relevanz des (De)Boarding-Prozesses wurde als hoch eingestuft, da dieser Prozess äußerst komplex ist und dieser von mehreren Flugzeug-Parametern beeinflusst wird. Catering und Reinigung sind stark abhängig von der Passagieranzahl und der Zugänglichkeit von Service-Fahrzeugen, welche durch eine Änderung der Flugzeuggeometrie ebenfalls beeinflusst werden. Der Frachtabfertigungs-Prozess ist ebenfalls von der Flugzeuggeometrie abhängig bzw. wird von der Zugänglichkeit und des für die Frachtabfertigung zur Verfügung stehenden Raumes beeinflusst. Die Betankung ist abhängig von der Zugänglichkeit und dem Missionstreibstoffverbrauch. All diese Prozesse können sich gegenseitig räumlich oder zeitlich beeinflussen. Um die einzelnen Einflüsse untereinander einschätzen zu können und einzelne Prozesszeiten abzuschätzen, wurden Analysewerkzeuge für jede Prozessklasse aufgebaut. Der Anspruch an diese Analysewerkzeuge war es einerseits, dass diese den Prozess noch genau genug abbilden können. Andererseits sollten die Analysewerkzeuge automatisiert ablaufen können und in ihrer Rechenzeit begrenzt sein, so dass diese in einer späteren Gesamtoptimierung für Bodenprozesse und Reiseflug eingebunden werden können.

**Tabelle 26: Auflistung der Teilprozesse des Turnarounds**

Prozess	Abhängigkeit/ Einflussfaktoren	Abbildungsmethode	Relevanz für Turnaround- Prozesszeit
Boarding und Deboarding	Anzahl Passagiere	Einzelkomponente + Boarding- Simulation + Semistatistisch	hoch
Catering	Airline	Abschätzungsmethode f(Pax, Personal, Türen)	mittel
Reinigung	Airline	Abschätzungsmethode f(Pax, Personal, Türen)	unkritisch
Gepäckabfertigung	Anzahl Pax und Fracht	Abschätzungsmethode f(Pax, Container, Türen)	mittel
Betankung	Reichweite, Nutzlast	Abschätzungsmethode f(Kraftstoffmasse, Förderleistung, Tankwagen)	hoch
Klimatisierung	Flughafen	-	keine
Bodenstrom- versorgung	Flughafen	-	keine
Schmutzwasser- Entsorgung	Anzahl Passagiere	Abschätzungsmethode f(Pax, Förderleistung)	unkritisch
Frischwasser-Zufuhr	Anzahl Passagiere	Abschätzungsmethode f(Pax, Förderleistung)	unkritisch
Positionierung Brücke und Treppen	Flughafen	Fix	unkritisch
Sichern und Entsichern			
Start up / walk out assistance			
Push back / Umschleppen			
Enteisung	Oberfläche	-	-
Technik	-	-	-

### II - 1.7.3.1 Kabinen- und Frachtraummodell

Die Ableitung der Parameter für den Turnaround-Prozess erfolgte aus einem am Institut für Lufttransportsysteme entwickelten Geometriemodell und der Flugleistungen der BWB Referenzkonfiguration. So wurde ein Kabinenmodell und ein Frachtraummodell von der äußeren Geometrie der BWB Konfiguration abgeleitet (siehe Abbildung 55).



**Abbildung 55: Ableitung der Prozesse**

Für die Generierung des Kabinenmodells wurde eine voll parametrische Methode am Institut für Lufttransportsysteme aufgebaut, die es ermöglicht eine Kabine optimal in die äußere Hülle einzupassen. Diese beinhaltet Sitzpositionen, Gänge, Küchen, Toiletten und Türen (siehe Abbildung 56). Basierend auf diesem Kabinenmodell können Schnittstellen zum Flughafen definiert werden. Dieses bot weiterhin die Grundlage für eine Bording-Simulation, für den Kabinen-Reinigungs-Prozess und den Catering-Service-Prozess.

Die Abmessung des Frachtraums ergibt sich aus dem noch zur Verfügung stehenden Platz, der sich unter der Kabine befindet und der nicht für Fahrwerk oder andere Systeme verwendet wird. Darüber hinaus können die Abmessungen der Container berücksichtigt werden, die in den Frachtraum geladen werden sollen (siehe Abbildung 56).

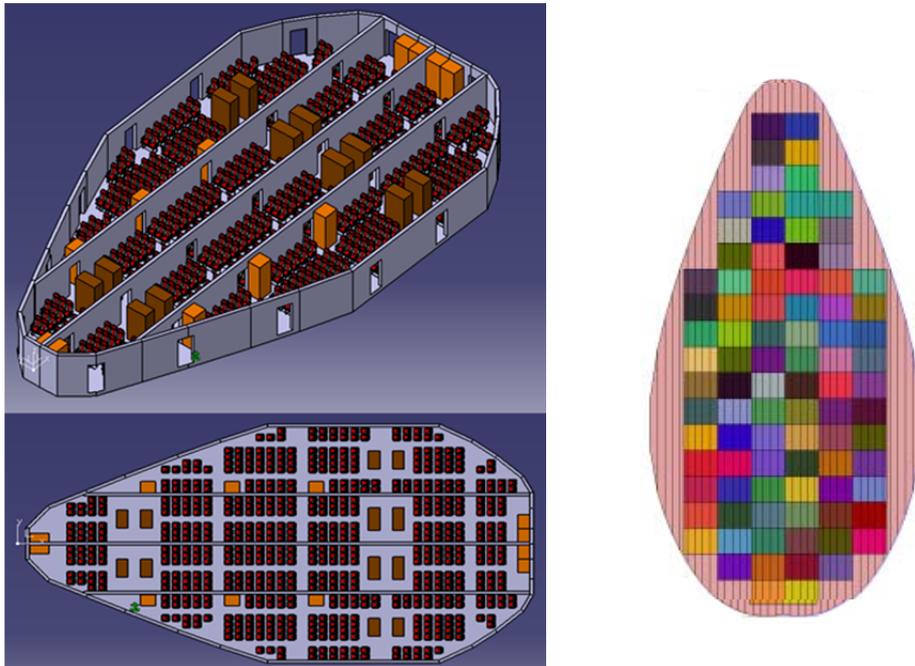


Abbildung 56: BWB Kabinen- und Frachtraummodell

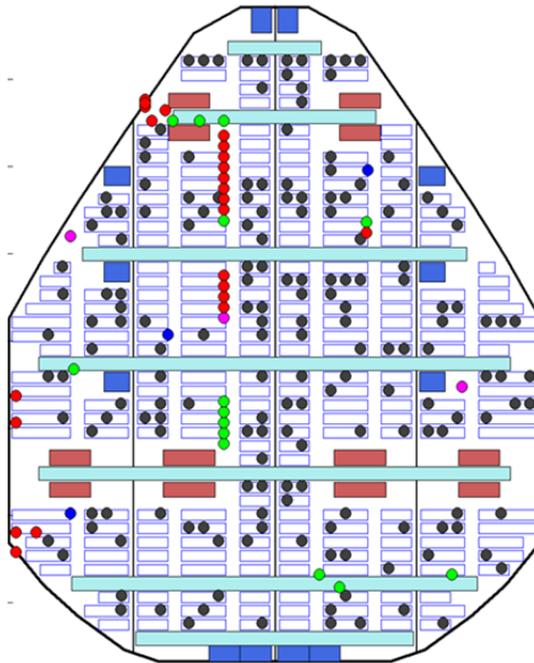
### II - 1.7.3.2 Ermittlung von Teil-Prozesszeiten

#### Prozesszeit für (De)Boarding

Wie zuvor erwähnt, gehören De-Boarding und Boarding zu den kritischen Prozessen. Deshalb bedarf es einer detaillierten Analyse des De-/Boarding Prozesses, um fundierte Aussagen über die Prozesszeiten zu treffen. Im Idealfall werden Datenbasen aus experimentellen Untersuchungen erstellt, die für die Entwicklung von Formeln und Parametern für die Zeitabschätzung benutzt werden. Für ein neues BWB-Kabinenkonzept gibt es jedoch noch keine detaillierten Datenbasen bezüglich der Prozesszeiten von De-/Boardingabläufen. Da in diesen Prozessen eine hohe Anzahl von Menschen involviert ist und deren Verhalten sich schlecht in einzelnen mathematischen Formeln beschreiben lässt, sind aufwendigere mathematische Modelle notwendig. Dabei erweist sich eine Simulation des Prozesses als brauchbares Werkzeug, um Abläufe zu prüfen und auf ihren Zeitrahmen zu untersuchen.

Ziel war es eine Simulationsbasis zu erhalten, mit deren Hilfe die Einflussfaktoren und die Dauer des De-/Boardingprozesses ersichtlich gemacht werden können. Die Boarding-Simulation ist eine Agenten-basierte Simulation, bei der jeder Passagier individuell durch die Simulation dargestellt wird (Siehe Abbildung 57). Es werden sowohl anthropologische Eigenschaften (Geschlechterverhältnis, Hüftbreite, Gehgeschwindigkeit etc.) als auch ein dynamisches Verhalten beim Auftreten von Hindernissen, sowie die Mitnahme von Handgepäck simuliert.

Gleichzeitig wurden die Einflüsse einer Variation der Kabinengeometrie und einer Variation der Anzahl der Türen analysiert. Die Variation der Kabinengeometrie zeigte einen relativ geringen Einfluss auf die Boarding-Zeit. Dies führte zu der Schlussfolgerung, dass eine Änderung der äußeren Hülle keinen maßgebenden Einfluss auf die Boardingzeit hat. Die Simulation zeigte des Weiteren, dass die Boarding-Zeit sich nicht signifikant verringert, wenn das Boarding über mehr als zwei Türen stattfindet. Der Einsatz von mehr Türen würde jedoch den Prozessaufwand (Kosten) erhöhen.



**Abbildung 57: Simulation des (De)Boarding-Prozesses**

#### *Prozesszeit für Frachtbe- und entladung*

Aus dem Frachtraumgeometriemodell ergibt sich die Anzahl der maximalen Container, die der Frachtraum aufnehmen könnte. Zur Abschätzung der Prozesszeit werden hier feste Zeiten pro Container angenommen. Bei der Verladung der Container wird hier von einer Verladungszeit von 1,7 min pro Container und beim Entladen der Container von 1,4 min ausgegangen. Weiterhin wird eine Wartezeit von 4 Minuten zwischen beiden Vorgängen veranschlagt.

#### *Prozesszeit für Kabinenreinigung*

Die Prozesszeit für die Kabinenreinigung setzt sich zusammen aus der Anzahl der Küchen, der Toiletten und der Sitze, die sich aus dem Kabinenmodell ergeben. Die einzelnen Prozesszeiten wurden wie folgt angenommen: 4,5 min pro Toilette, 10 min pro Küchenbereich und 0,55 min pro Sitz (Economy Class) [46]. Durch Multiplikation der

jeweiligen Stück-Zeiten mit der Anzahl ergeben sich die Einzelprozesszeiten der jeweiligen Monumente. Die Summe aller Einzelprozesszeiten dividiert durch die Anzahl des Personals ergibt die Gesamtprozesszeit pro Klasse. Die Anzahl des Personals ist eine variable Größe, welche hier auf einen fixen Wert von 40 gesetzt wurde.

#### *Prozesszeit für Catering*

Die Catering-Prozesszeit wird aus der Anzahl der Passagiere, der Anzahl der benötigten Trollys und der Anzahl des verfügbaren Personals ermittelt. Die Anzahl der benötigten Trollys ist eine Funktion der Passagierklasse und der Passagieranzahl. Für die Gesamtprozesszeit pro Klasse wird pro Trolley und Personal eine Austauschzeit von 1,5 min angenommen [46].

#### *Prozesszeit für Betankung*

Die Prozesszeit für die Betankung wird aus der Anzahl der zu Verfügung stehenden Tankfahrzeuge, der zu tankenden Kraftstoffmenge und dem Kraftstoffdurchsatz pro Tankwagen berechnet. Es wird davon ausgegangen, dass ein Tankfahrzeug einen Kraftstoffdurchsatz von 2720 l/min hat.

### II - 1.7.3.3 Gesamtbodenprozesszeit

Das folgende Gant-Chart-Diagramm zeigt die Verteilung und Dauer der Teilprozesse (inklusive Fahrzeugpositionierung/-wechsel) in Minuten an.

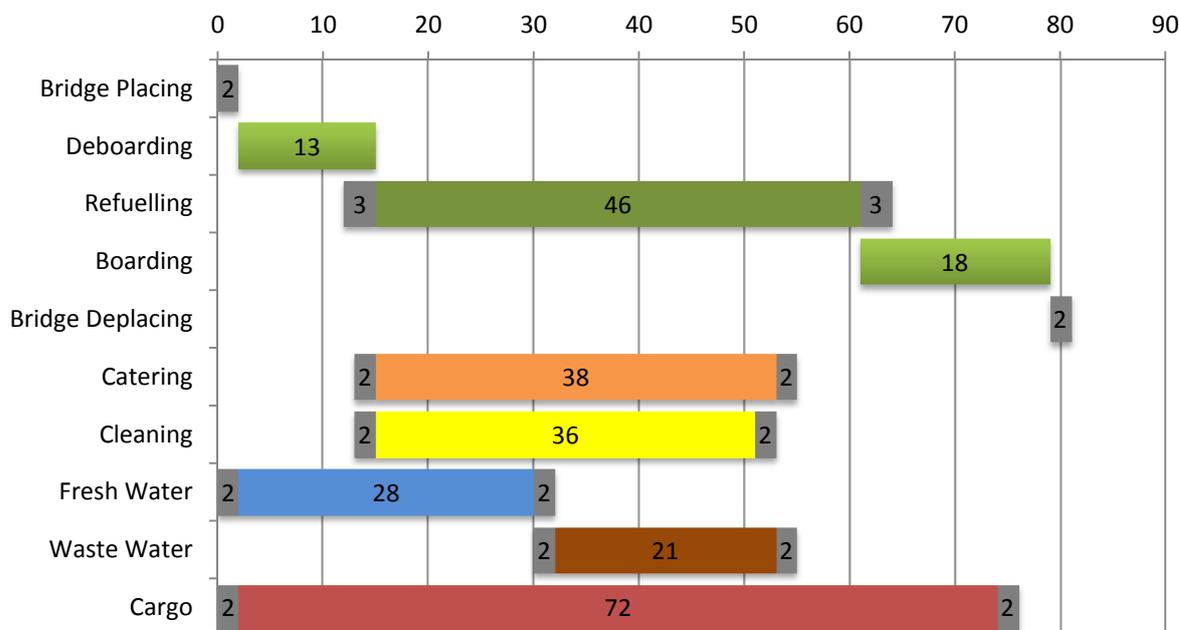
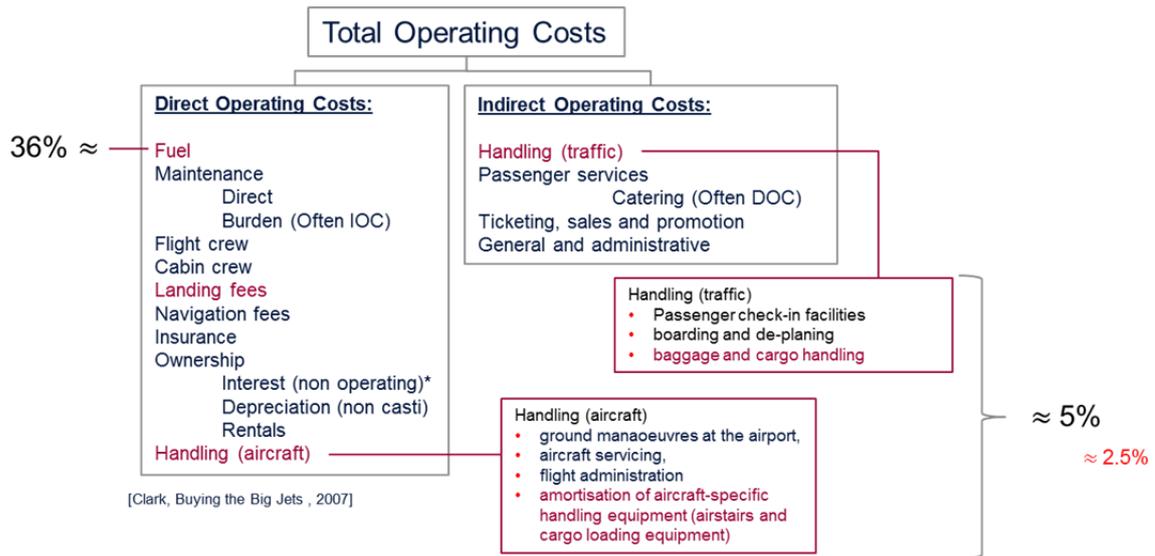


Abbildung 58: Darstellung der Turnaround-Prozesszeit

An der Verteilung ist zu erkennen, dass der kritische Pfad und damit der gesamte Turnaround-Prozess in weniger als 90 Minuten stattfindet. Die Turnaround-Dauer des BWB ist um ca. 9 Minuten kürzer als die des Airbus A380 [47]. Der Airbus besitzt darüber hinaus 102 Passagiere und 27 LD6 Frachteinheiten weniger. Die durchgeführte Simulation ergibt somit Vorteile der BWB-Konfiguration gegenüber konventionellen Flugzeugen.

### II - 1.7.4 CBA

Die Beurteilung des Potentials der BWB Konfiguration kann über die Kosten abgeschätzt werden. Dazu wird zunächst betrachtet, wie die Kosten aufgeteilt werden können und welche Kosten sich aus den Prozessen wo widerspiegeln. Als Grundlage wurde hier das Modell nach [48] verwendet und ist in Abbildung 59 dargestellt. Die totalen Betriebskosten werden in direkte und indirekte Betriebskosten unterteilt. Die relevanten Kosten für dieses Projekt sind die Kraftstoffkosten (Kosten für Luftoperationen) sowie die Handling-Kosten und die Flughafengebühren (Kosten für Bodenoperationen). Die Kraftstoffkosten werden maßgebend von der Reiseflug-optimalen BWB Konfiguration getrieben und werden vom Turnaround-Prozess nur geringfügig oder gar nicht beeinflusst. Die Handling-Kosten finden sich in den direkten Betriebskosten und in den indirekten Betriebskosten wieder. Diese lassen sich in weitere Untergruppen unterteilen.



**Abbildung 59: Aufteilung der totalen Betriebskosten nach direkten und indirekten Kosten**

Da absolute Zahlen der Kosten im Rahmen dieses Projektes nicht zugänglich waren, wurden nur die Kostenanteile betrachtet<sup>5</sup> (siehe Abbildung 60). Die Kraftstoffkosten machen dabei einen Anteil von rund 36 % aus und die Handling-Kosten von 5 %. Unter Hinzunahme der Flughafengebühren machen die Kosten der in diesem Projekt betrachteten Bodenoperation ca. 10 % aus. Die Flughafengebühren werden maßgeblich von Emissionen und maximaler Abflugmasse getrieben. Handling-Kosten unterteilen sich vorwiegend in Ausrüstungs- und Personalkosten, welche maßgebend vom Turnaround-Prozess getrieben werden.

<sup>5</sup> [www.iata.org/aoc/f](http://www.iata.org/aoc/f)

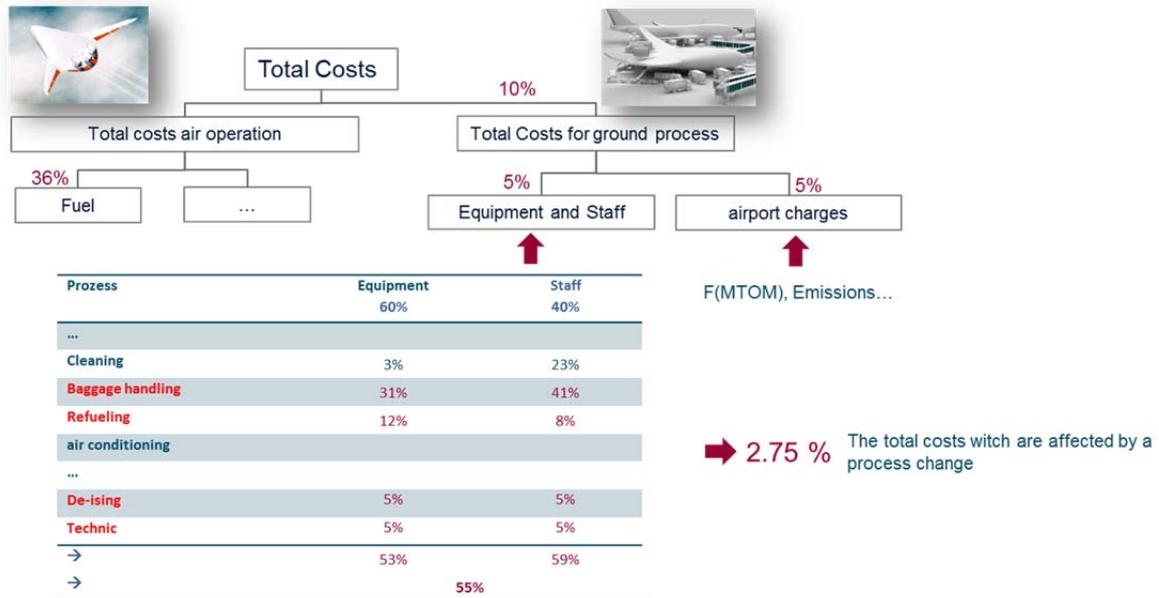


Abbildung 60: Aufteilung der Betriebskosten nach Reiseflug und Bodenprozessen

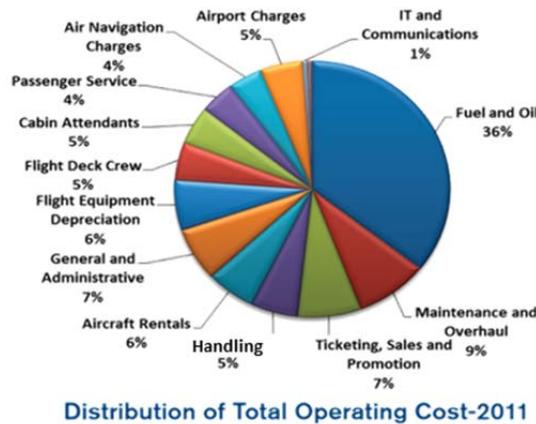


Abbildung 61: Prozentuale Kostenaufteilung eines Langstrecken-Fluges

Für die Aufschlüsselung der Kosten der einzelnen Prozesse wurde das intern entwickelte Programm *TurnaroundCost* verwendet, in dem die Ausrüstungs- (Equipment)- und Personalkosten in Abhängigkeit von der Einsatzzeit abgeschätzt werden. Die Ergebnisse für die BWB Konfiguration sind in der Tabelle 27 aufgelistet. Die Ausrüstungskosten machen dabei einen Anteil von rund 60 % und die Personalkosten von rund 40 % aus. Für den Prozess Klimatisierung lag keine Abschätzung vor. Dieser Kostenanteil wird jedoch als klein und vernachlässigbar angenommen.

**Tabelle 27: Prozentuale Auflistung der Ausrüstungs- und Personalkosten**

Prozess	Equipment 60%	Personal 40%
Boarding und Deboarding	10%	
Brücken, Treppen Positionierung		
Catering	7%	
Reinigung	3%	23%
<b>Gepäckabfertigung</b>	31%	41%
<b>Tanken</b>	12%	8%
Klimaanlage		
Bodenstromversorgung	7%	
Schmutzwasser	8%	8%
Frischwasser		
Sichern und Entsichern		12%
Start up / walk out Assistent		
Push back / Umschlepps	12%	8%
<b>Enteisung</b>	5%	4%
<b>Technik</b>	5%	4%

Durch die Prozesse, bei denen in der Regel konventionelle Mittel eingesetzt werden können, entstehen keine Kostenänderungen für das Berechnungsmodell. Für die Prozesse bei denen neue Ausrüstung angeschafft oder Personal speziell ausgebildet werden muss, sind die Kosten nicht eindeutig quantifizierbar. Diese Kosten werden hier als kritische Kosten bezeichnet und können sich bei genauerer Modellierung der Prozesse ändern. Diese Kosten machen jedoch nur einen prozentualen Anteil von 2,75 % der Gesamtkosten aus. Eine Änderung dieser Kosten z.B. um 10 % würde sich nur mit 0,275 % auf die Gesamtkosten auswirken.

Durch die genauere Betrachtung der Einzelprozesse konnte nachgewiesen werden, dass ein Großteil der Prozesse sich nicht maßgebend von denen der bereits etablierten Prozesse an existierenden Flugzeugen unterscheidet. Damit ist die Integration einer BWB Konfiguration aus geometrischer und ökonomischer Sicht unkritisch.

Änderungen im Vergleich zu konventionellen Flugzeugen sind bei Gepäckabfertigung, Betankung, Enteisung und Technikcheck zu erwarten. In der Relation zu den gesamten operationellen Kosten, sind die Infrastruktur-Kosten zur Integration des BWBs in den Flughafen gering (sofern die äußeren Abmessungen 80 Meter nicht überschreiten). Des Weiteren haben Analysen ergeben, dass die BWB Konfiguration mit ansteigender Größe ein steigendes Potential hat, so dass noch größere BWB Konfigurationen aus der Sicht des Flugzeugentwurfs und der Flughafenintegration zu analysieren sind.

## II - 1.8 Analyse, Integration und Bewertung – Gesamtsystembewertung

Der Aufbau der Technologiebewertung durch das DLR Institut für Lufttransportsysteme für das Projekt Airport 2030 ist in Abbildung 62 dargestellt. Basierend auf dem Jahr 2010 als Referenz werden drei Szenarien für das Jahr 2015 und das Jahr 2030 betrachtet. Insgesamt gibt es sechs Flugpläne, jeweils zwei für die drei Szenarien zu den beiden Zeitpunkten 2015 und 2013. Die Eingabe für die Simulationskette ist die Ankunftsverteilung der Passagiere. Zunächst gehen die Passagiere via landseitigen Modul zum Terminal, kommen am Gate an und besteigen ihr Flugzeug via luftseitigen Modul. Basierend auf dem Verlauf der Passagierströme können Kapazitäts- und Verzögerungsanalysen durchgeführt werden.

Die drei Komponenten der Gesamtsystembewertung sind die Kosten-Nutzen-Analysen (Cost Benefit Analysis, CBA) der Technologien in den Hauptarbeitspaketen, die Gesamtsystem-Bewertungskette und die zentrale Flughafen CBA  $CB_{\text{Airport}}$ . Die erstgenannten Komponenten werden zur Unterstützung der Flughafen CBA herangezogen.

Der folgende Abschnitt befasst sich zunächst mit der Entwicklung des luftseitigen Moduls der Gesamtsystem-Bewertungskette. Für das landseitige Modul und die übergreifende Software-Umgebung wird auf den Abschlussbericht des Institutes für Technische Informatik Systeme der Universität Hamburg verwiesen.

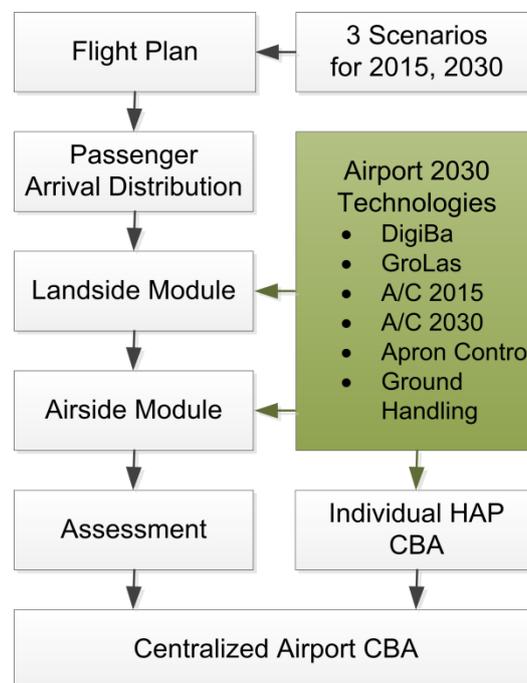
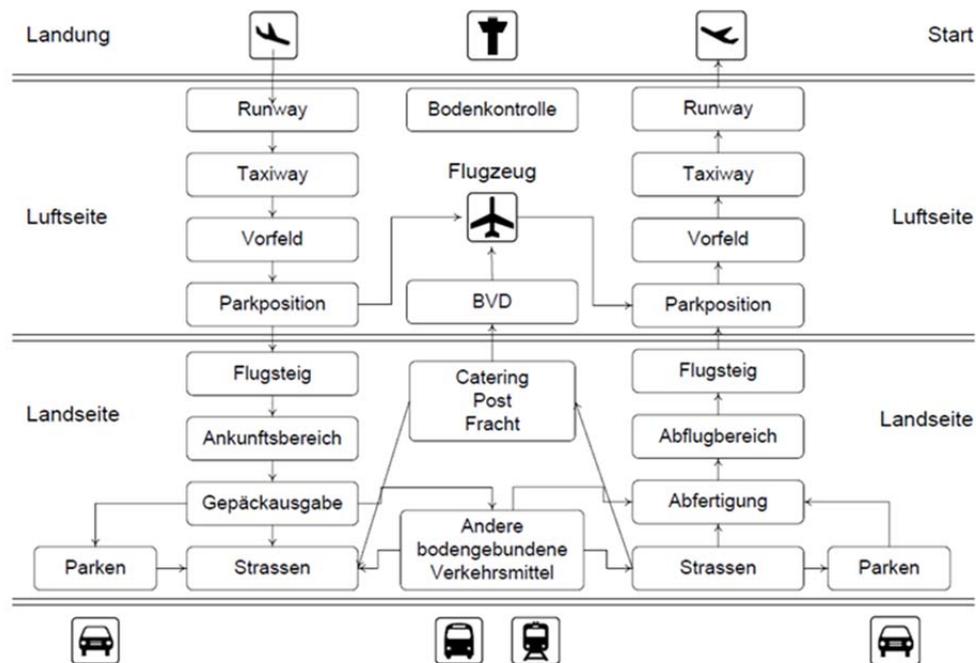


Abbildung 62: Der Aufbau der Technologiebewertung für das Projekt Airport 2030 (Quelle: Eigene Darstellung)

### II - 1.8.1 *Entwicklung des luftseitigen Modells der Gesamtsimulation*

Für die Verwendung innerhalb der Gesamtbewertungskette wurde durch das DLR Institut für Lufttransportsysteme ein luftseitiges Simulationsmodell entwickelt. Ein Ziel dieses Modells war die Abbildung der wesentlichen Charakteristiken der in den übrigen Arbeitspaketen entwickelten Technologien (z.B. des Blended Wing Body) sowie die anwendungsfreundliche Integration in die Gesamtsimulationskette, d.h. die Kopplung mit dem landseitigen Modul und dem Modul der Flughafenbindung. Die Flughafenbindung, das landseitige Modul sowie die übergreifende Softwareumgebung lagen in der Verantwortung der Projektpartner TUHH und Universität Hamburg. In der nachfolgenden Abbildung sind die im Projekt definierten „Systemgrenzen“ der Einzelmodule dargestellt. Die luftseitigen Prozesse beschränken sich auf Flugzeugbewegungen und die damit verbundenen Prozesse, z.B. Landung, Rollen, Abfertigung, Start.



**Abbildung 63: Untergliederung der luft- und landseitigen Prozesse**

Für die Modellierung der Prozesse wurden zwei verschiedene Ansätze untersucht:

- Ein auf Graphentheorie basierendes Rollverkehrsmodell (mikroskopisch)
- Ein prozessorientiertes Modell mit Elementen der Warteschlangentheorie (meso-/makroskopisch)

### II - 1.8.1.1 Mikroskopisches Rollverkehrsmodell

Das mikroskopische Modell berechnet konfliktfreie Rolltrajektorien für einzelne Flugzeugbewegungen. Hierfür muss das Netzwerk des Flughafens (ein so genannter Graph bestehend aus Knoten und Kanten) bekannt sein, auf dessen Grundlage die Berechnungen möglich sind. Für das Projekt wurden daher verschiedenen Softwarewerkzeuge umgesetzt, die die Generierung des Graphen ermöglichen.

Zunächst werden die Knoten (Verbindungspunkte) definiert. Abbildung 64 zeigt die hierfür entworfene grafische Benutzeroberfläche zum automatisierten Einlesen der Knotenpunkte auf Basis im Internet zur Verfügung gestellter Karten (GoogleMaps-Einbindung).



**Abbildung 64: Grafische Benutzeroberfläche des Softwarewerkzeugs zum Einlesen der Knotenpunkte und zur Definition der Adjazenzmatrix**

Zur Erstellung des Graphen wird die Datei mit den definierten Knotenpunkten in ein weiteres Softwarewerkzeug geladen, mit welchem die Kanten und die entsprechenden Kosten (z.B. maximale Rollgeschwindigkeiten) definiert werden (Abbildung 65).

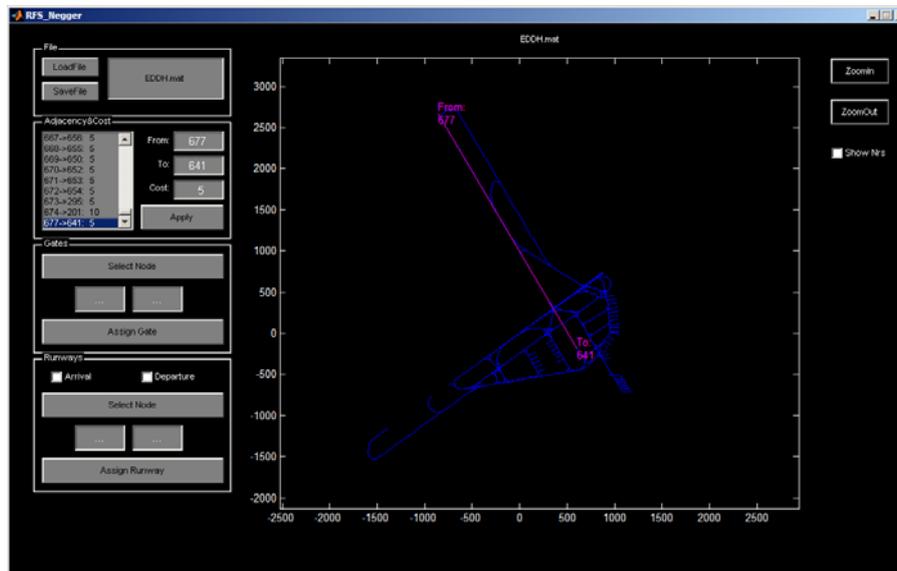


Abbildung 65: Grafische Benutzeroberfläche zur Definition der Kanten des Graphen (Kosten, Knoten der Parkpositionen, Knoten der Bahnschwellen, etc.)

Auf Grundlage eines Flugplans, in welchem die Start- und Zielpunkte (d.h. Kennzeichnung der Start- bzw. Landebahn, Parkposition, etc.) der zu simulierenden Flugbewegungen sowie Ein- und Austrittszeiten der Simulation definiert sind, werden dann die Rolltrajektorien und Rollzeiten mit Hilfe des Netzwerkslayouts ermittelt (Abbildung 66).

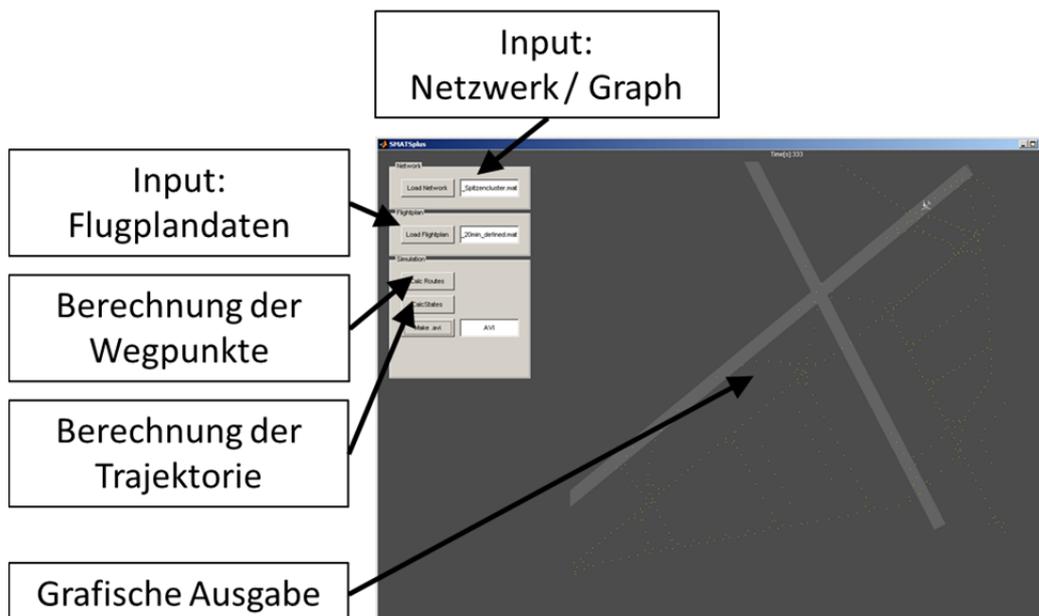
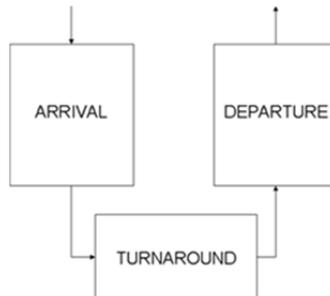


Abbildung 66: Grafische Benutzeroberfläche zum Aufrufen der Eingangsdaten und zur Simulation der luftseitigen Prozesse (exkl. Abfertigungsprozesse)

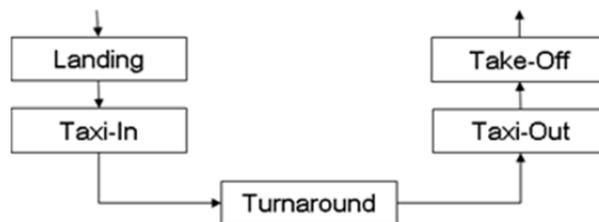
### II - 1.8.1.2 Meso/makroskopisches Rollverkehrsmodell

Aufgrund des hohen Rechen- sowie Initialisierungsaufwandes des eben beschriebenen mikroskopischen Modells wurde durch das DLR Institut für Lufttransportsysteme ein weiteres Modell entworfen, welches auf der Simulation diskreter Ereignisse der luftseitigen Prozesse basiert. Auf erster Ebene sind dies die Prozesse „Arrival“, „Turnaround“ und „Departure“ (Abbildung 67).



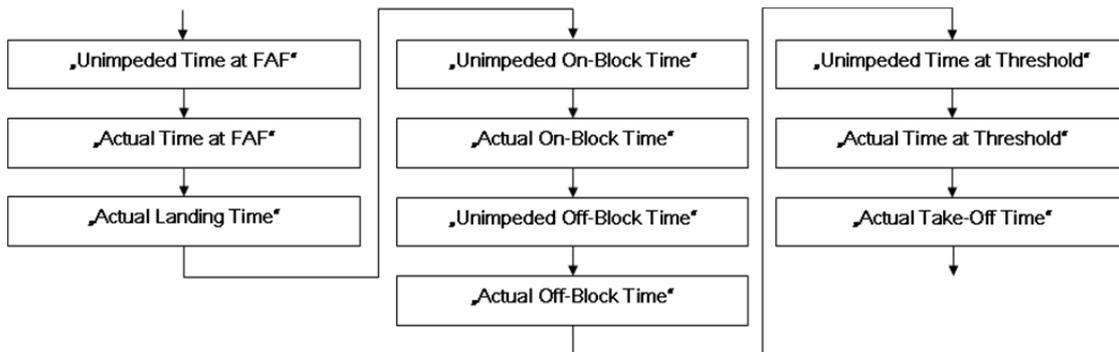
**Abbildung 67: : Untergliederung der luftseitigen Prozesse (1.Ebene)**

Auf zweiter Ebene werden diese Prozesse in die Unterprozesse „Landing“, „Taxi-In“, „Turnaround“, „Taxi-Out“ und „Take-Off“ untergliedert (Abbildung 68).



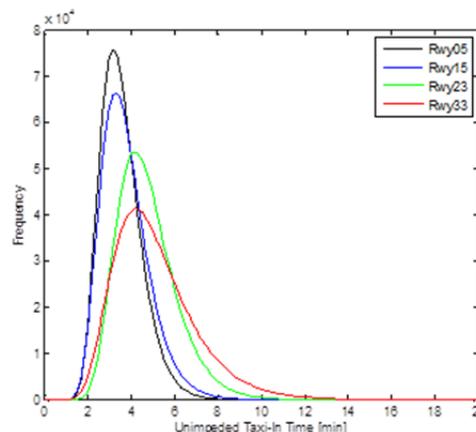
**Abbildung 68: Untergliederung der luftseitigen Prozesse (2.Ebene)**

Diesen Prozessen werden wiederum Zeitstempel zugeordnet und die entsprechenden Berechnungsmodelle entworfen. Das generelle Vorgehen ist, dass für jeden Prozessschritt eine minimale, notwendige Zeit definiert ist (bezeichnet als „unimpeded time“, Abbildung 69). Durch eventuelle Verzögerungen, die sich beispielsweise aufgrund eines zu hohen Verkehrsaufkommens an der Startbahn ergeben, kann sich eine von der verzögerungsfreien Zeit abweichende, also ggf. höhere Zeit ergeben (bezeichnet als „actual time“).



**Abbildung 69: Definition der Prozesszeiten ("Zeitstempel") der luftseitigen Prozesse (exkl. Abfertigung)**

Die verzögerungsfreien Zeiten wurden aus empirischen Daten des Hamburger Flughafens ermittelt. Für die Berechnung von Verzögerungen wurden Warteschlangenmodelle verwendet. Die Abbildung 70 zeigt die Verteilung der Rollzeiten bei Ankunft (Taxi-In) des Jahres 2007. Eine Unterscheidung der Rollzeiten hinsichtlich der letztendlichen Parkposition wurde in dieser Darstellung nicht vorgenommen. Die Lage der Verteilungen zeigt, dass das Rollen bei Landungen auf den Bahnen Rwy05 bzw. Rwy15 kürzer ist als in den anderen Fällen und illustriert das Vorgehen zur Bestimmung der verzögerungsfreien Zeiten (in diesem Fall Rollzeiten bei Ankunft).



**Abbildung 70: Beispielhafte Darstellung der Verteilung der verzögerungsfreien Rollzeiten bei Ankunft für unterschiedliche Landebahnen**

Für das Modell wurden diese Verteilungen weiter unterschieden in Abhängigkeit bestimmter Parkpositions-Cluster (Abbildung 71).

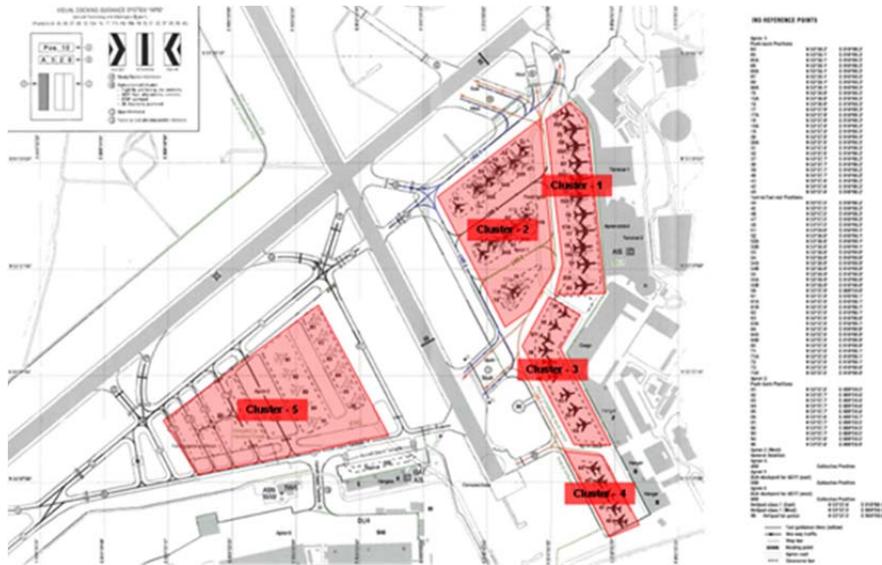
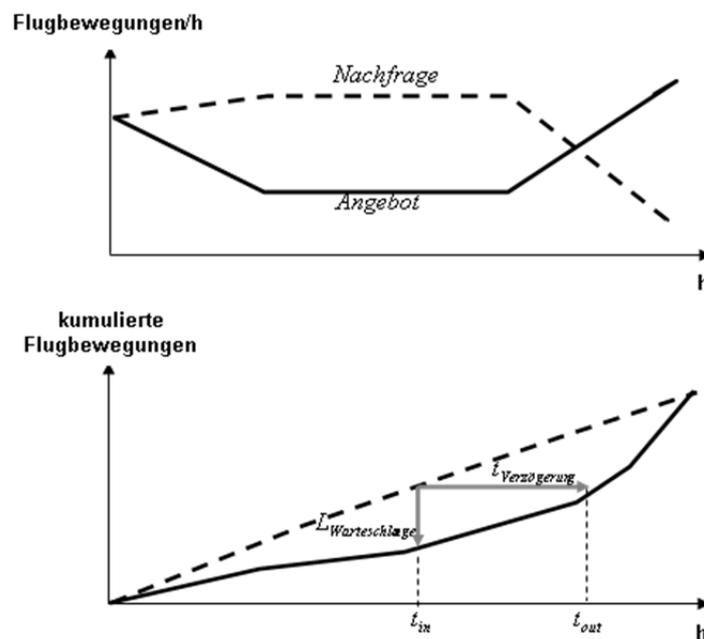


Abbildung 71: Parkpositions-Cluster des Flughafens Hamburg

Das Warteschlangenmodell bestimmt in Abhängigkeit vorgegebener Kapazitäten und des Verkehrsaufkommens die zu erwartenden Verzögerungen. Die Abbildung 72 zeigt diesen Zusammenhang schematisch. Das Verkehrsaufkommen (Nachfrage) selbst ist Eingangsgröße und wird durch die Modellkette bereitgestellt. Für das Beispiel der Startbahn wird die Kapazität für abfliegende Flugzeuge („Departure-Capacity“) vorgegeben (Angebot). Verzögerungen können somit ermittelt werden und ggf. auf die verzögerungsfreien Zeiten addiert werden. Dieses Vorgehen ist prinzipiell für eine Vielzahl flughafenrelevanter Prozesse anwendbar.



**Abbildung 72: Schematische Darstellung des Prinzips zur Bestimmung der Verzögerung mit Hilfe eines Warteschlangenmodells**

Eine mögliche Untergliederung des Turnarounds ist in Abbildung 73 wiedergegeben. Die einzelnen Prozesszeiten sind in erster Linie stark abhängig vom verwendeten Flugzeugmuster. Für die in der Simulation definierten Flugzeugmuster wurden daher von den Flugzeugherstellern angegebene Prozesszeiten verwendet, wie das unten stehende Beispiel einer B737 zeigt. Eine Unterscheidung der Abfertigungszeiten zur Abbildung unterschiedlicher Geschäftsmodelle von Luftverkehrsgesellschaften (z.B. Low-Cost Carrier) kann durch den Nutzer der Modellkette definiert werden. Die flugzeugspezifischen Prozesszeiten des Turnarounds wurden in Datenblättern gespeichert und werden in der Simulation aufgerufen. Dies erlaubt die Definition eigener Zeiten durch den Benutzer und ggf. die Integration neuer Flugzeugmuster wie das ebenfalls im Projekt untersuchte Nurflüglerkonzept (Blended Wing Body, BWB).

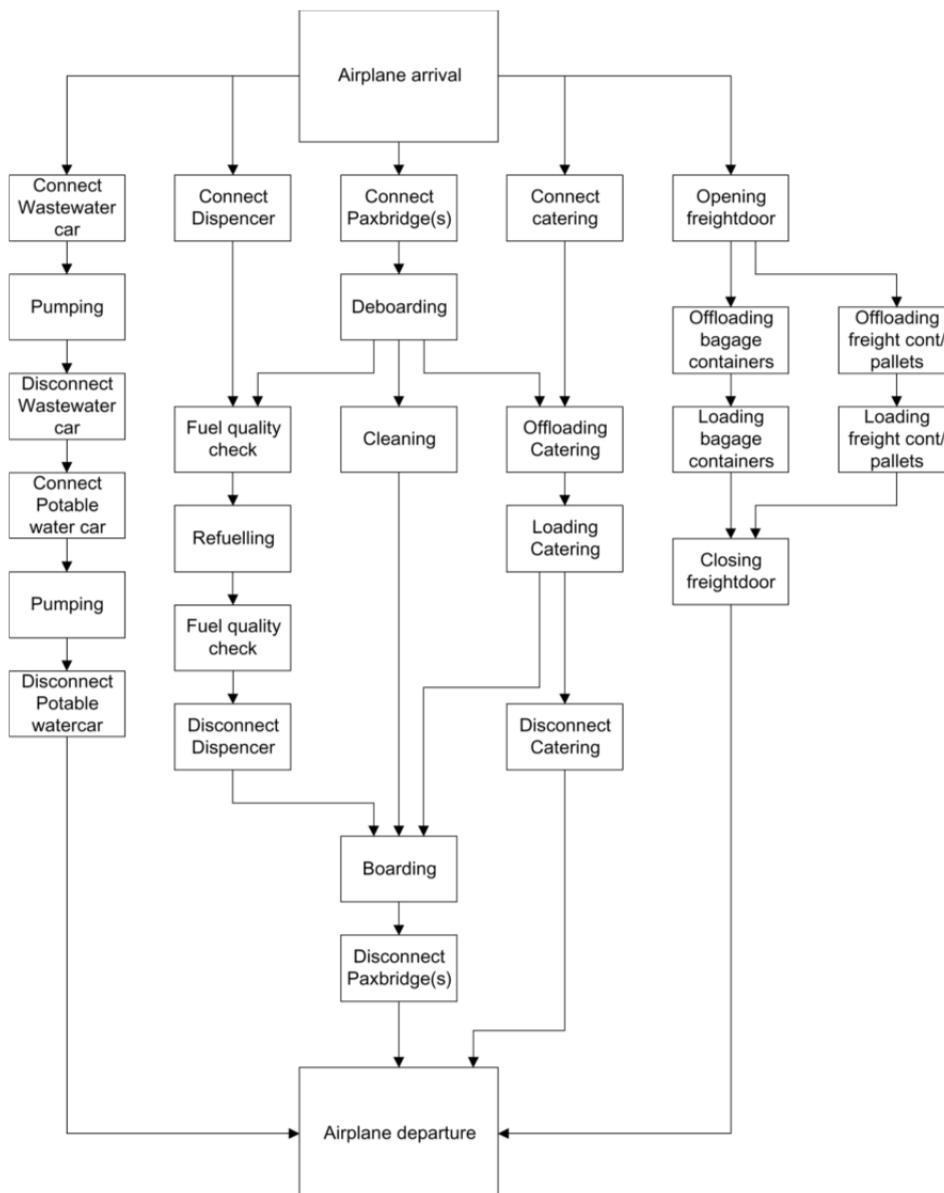
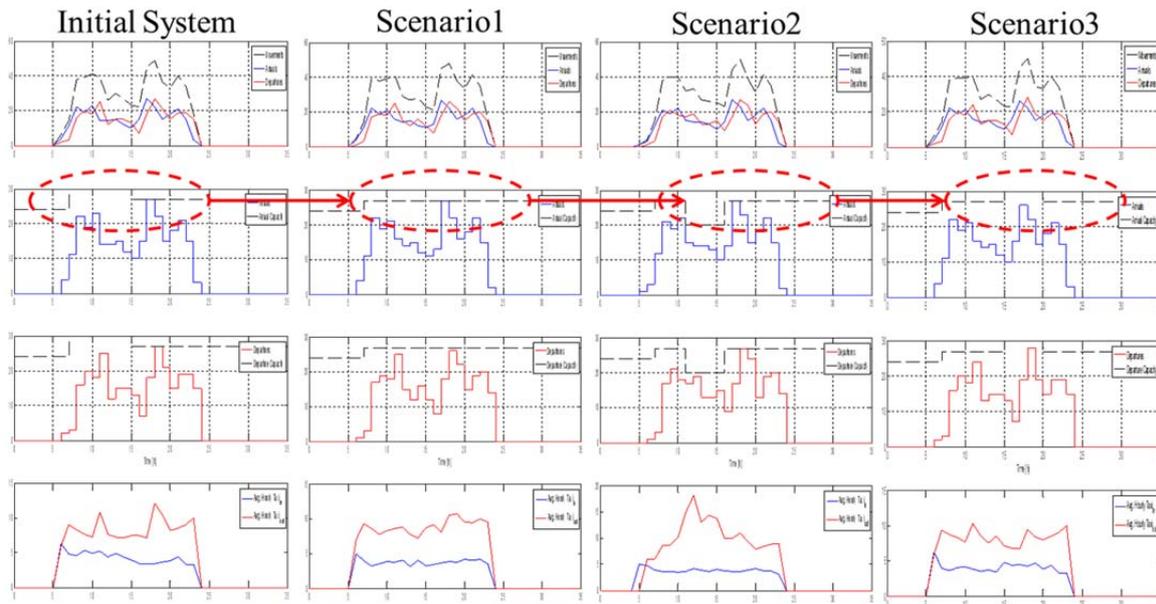


Abbildung 73: Schematische Darstellung der Prozesse der Flugzeugabfertigung



Ein exemplarisches Ergebnis der luftseitigen Simulation ist in Abbildung 75 gegeben. Gezeigt ist der Verlauf des Verkehrsaufkommens über einen Tag (24 h) und der Einfluss einer sich ändernden Bahnkonfiguration (Bahnnutzungs-Szenarien 1-3) und der damit einhergehenden Änderung der Bahnkapazitäten sowie die simulierten Auswirkungen auf die Rollzeit.

Dargestellt in Abbildung 75 sind die Flugbewegungen (Grafiken der ersten drei Reihen) unterteilt in landende (blaue Linie) und startende (rote Linie) Flugzeuge bei verschiedenen Kapazitäten des Start- und Landebahnsystems (gestrichelte schwarze Linien in den Graphen der zweiten und dritten Reihe). Die Graphen der untersten Reihe zeigen die Auswirkungen der unterschiedlichen Szenarien in Bezug auf Nachfrage und Kapazität auf die Rollzeiten bei Ankunft (blaue Linien) und Abflug (rote Linie).



**Abbildung 75: Beispiel für die grafische Ausgabe der Simulationsergebnisse des luftseitigen Modells für unterschiedliche Bahnnutzungs-Szenarien.**

### II - 1.8.1.3 Ein- und Ausgabeschnittstellen der Simulationskette

Die Simulationskette wird via SoapUI<sup>6</sup>, einem freien Open-Source Testing Tool, ausgeführt. Die Eingabe/Ausgabe-Schnittstelle ist in Abbildung 76 und Abbildung 77 dargestellt. Sowohl Ein-, als auch Ausgaben sind im XML-Format gespeichert. Für die spätere Analyse werden die Daten von XML in ein relationales Schema (Excel) konvertiert. Tabelle 28 gibt einen Überblick der Ein- und Ausgaben der Simulationskette.

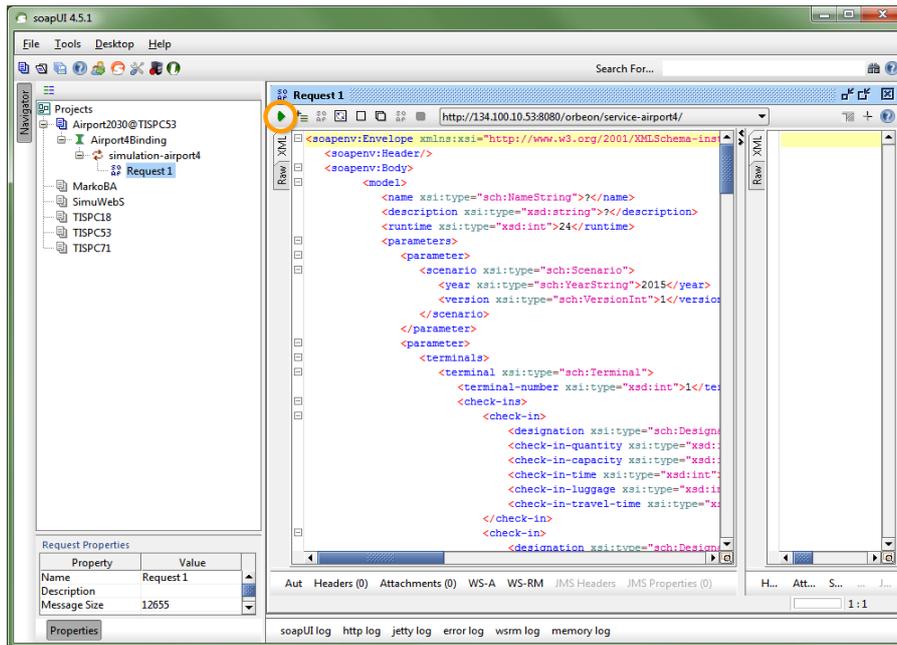


Abbildung 76: Die Eingabe-Schnittstelle der Simulationskette



Abbildung 77: Ausgabe-Schnittstelle der Simulationskette

<sup>6</sup> <http://www.soapui.org>

**Tabelle 28: Überblick der Ein- und Ausgaben der Simulationskette (Quelle: Eigene Darstellung)**

Input	Arrival Output	Departure Output	Flight Output
scenario	paxID	paxID	flight-number
terminals	date	date	flight-code
check-ins	arrival-terminal-hour	arrival-gate-time	aircraft
counter	arrival-terminal-minute	shopping-duration	gate-cluster
automatic	departure-flight-hour	free-time-duration	delay-possible
online	departure-flight-minute	departure-flight-hour	date
night-before	stay-duration-estimated	departure-flight-minute	actual-landing
luggage	travel-reason	stay-duration-actual	actual-take-off
check-in-quantity	check-in	travel-reason	scheduled-on-block
check-in-capacity	luggage-present	check-in	actual-on-block
check-in-time	gate-cluster	luggage-present	boarding-start
check-in-luggage	aircraft-type	luggage-arrival-check-in-time	boarding-end
check-in-travel-time	flight-number	luggage-arrival-gate-time	forward-unload-start
gates	flight-type	gate-cluster	forward-unload-end
gate-number	flight-goal	aircraft-type	forward-load-start
passenger-gate-travel-time	flight-code	flight-number	forward-load-end
luggage-gate-travel-time	delay-possible	flight-type	aft-unload-start
security		flight-goal	aft-unload-end
automatic-security-screening		flight-code	aft-load-start
manual-security-screening		delay-possible	aft-load-end
security-travel-time			scheduled-off-block
security-capacity			actual-off-block
passport-check			pax-total
passport-travel-time			pax-boarded
luggage			pax-last-id
automatic-luggage-screening			pax-last-time
level-2-luggage-screening			
luggage-travel-time			
sorting-time			

## II - 1.8.2 *Sensitivitätsanalyse mit der Gesamtsimulation*

In den nachfolgenden Abschnitten wird dargestellt, welche Simulationsszenarien in der Gesamtsimulation umgesetzt wurden, und es wird beispielhaft auf Ergebnisse von darauf basierenden Sensitivitätsanalysen des DLR Instituts für Lufttransportsysteme eingegangen.

### II - 1.8.2.1 *Definition von Simulationsszenarien auf Basis der Zukunftsszenarien*

Wie in Kapitel II - 1.1.2 dargestellt wurden drei Zukunftsszenarien für die Entwicklung des Passagieraufkommens von 2010 bis 2030 erarbeitet: gehemmttes Wachstum (Szenario 1), effiziente Technologien (Szenario 2) und Hochsicherheitszone (Szenario 3). Diese drei Zukunftsszenarien werden für die Jahre 2015 und 2030 betrachtet, so dass sich sechs Simulationsszenarien ergeben: 2015-1, 2015-2, 2015-3, 2030-1, 2030-2 und 2030-3 (Abbildung 78).

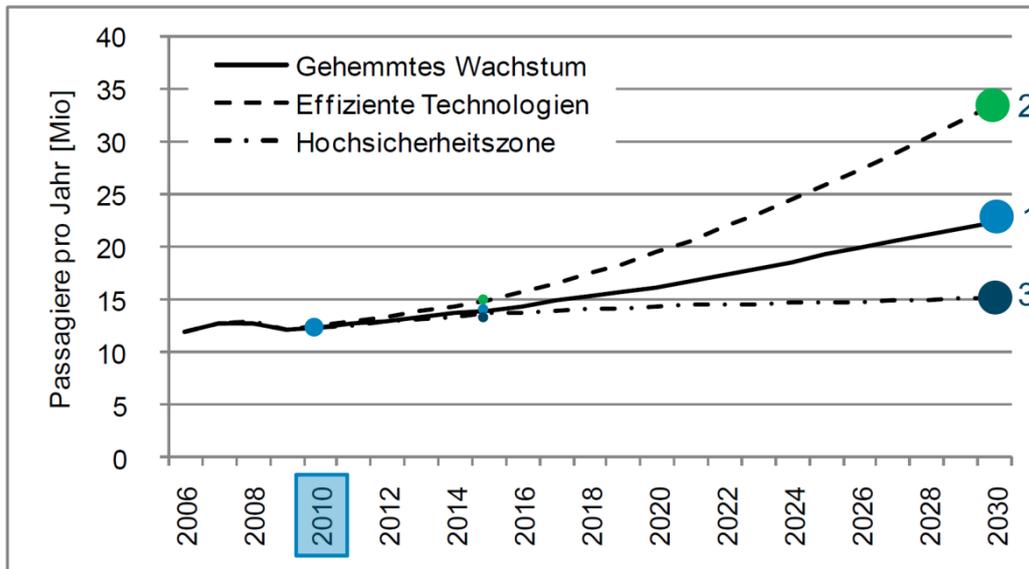


Abbildung 78: Definition der sechs Simulationsszenarien auf Basis der drei Zukunftsszenarien

### II - 1.8.2.2 *Generierung von Flugplänen für die Simulationsszenarien*

Mit dem Jahr 2010 als Referenz wurden vom DLR Institut für Lufttransportsysteme insgesamt sechs Flugpläne für die oben genannten Simulationsszenarien generiert. Ein Beispiel für solch einen Flugplan wird in Tabelle 29 gezeigt, wobei die erste Zeile Scheduled Off-Block Time (SOBT), Gate-Cluster (C1, C2, C3, C4 und Apron), Anzahl der Passagiere, Flugzeugmodelle, Flugziele, Flugtypen (Linie planmäßig, Low-Cost Carrier, Pauschalreiseverkehr) beinhaltet und die Information, ob die Flugzeuge auf Passagiere warten oder nicht.

Tabelle 29: Beispielflugplan

	A	B	C	D	E	F	G
1	SOBT	Gateclust	PAX	Flugzeugty	Destinatio	Flugtyp	Wartet? ja/ne
2	16.06.2010 06:00:00	C4	50	A319	LIS	Linie planmäßig Pass.	0
3	16.06.2010 06:00:00	Apron	66	A319	DUS	LowCost	0
4	16.06.2010 06:00:00	C1	117	B738	KGS	Pauschalreiseverkehr	1
5	16.06.2010 06:00:00	C4	132	B738	HER	Pauschalreiseverkehr	1
6	16.06.2010 06:00:00	C2	159	A320	PMI	Pauschalreiseverkehr	1
7	16.06.2010 06:10:00	C2	82	A320	MUC	Linie planmäßig Pass.	1
8	16.06.2010 06:10:00	C2	119	A321	FRA	Linie planmäßig Pass.	1
9	16.06.2010 06:15:00	Apron	74	A320	MUC	LowCost	0
10	16.06.2010 06:15:00	C2	100	A321	VIE	LowCost	0
11	16.06.2010 06:20:00	Apron	51	B737	SZG	LowCost	0
12	16.06.2010 06:25:00	C1	81	A319	ZRH	LowCost	0
13	16.06.2010 06:30:00	Apron	72	A319	FKB	LowCost	0
14	16.06.2010 06:30:00	C2	90	B737	STR	LowCost	0
15	16.06.2010 06:40:00	Apron	58	A319	STR	LowCost	0
16	16.06.2010 06:45:00	Apron	34	CRJ7	OSL	Linie planmäßig Pass.	0
17	16.06.2010 06:50:00	Apron	45	E190	AMS	Linie planmäßig Pass.	1
18	16.06.2010 06:50:00	Apron	51	B733	STR	Linie planmäßig Pass.	0
19	16.06.2010 06:50:00	Apron	34	CRJ7	GVA	Linie planmäßig Pass.	0
20	16.06.2010 06:50:00	C2	119	A321	MUC	Linie planmäßig Pass.	1
21	16.06.2010 06:50:00	Apron	67	RJ1H	BRU	Linie planmäßig Pass.	0
22	16.06.2010 06:50:00	C4	91	B733	DUS	Linie planmäßig Pass.	0
23	16.06.2010 06:50:00	Apron	50	CRJ2	CPH	Linie planmäßig Pass.	0
24	16.06.2010 06:55:00	C1	217	B753	HER	Pauschalreiseverkehr	1

Abbildung 79 gibt einen Überblick über die Anzahl der Passagiere pro Tag, sowohl für 2010 als auch für die verschiedenen Szenarien (1\*2010, 3\*2015, 3\*2030). In Abbildung 80 ist die dazugehörige Anzahl der Flüge angegeben. Es ist zu erkennen, dass Szenario 2030-2 das extremste Szenario bezüglich der Anzahl der Passagiere ist.

Die zeitliche Verteilung der ankommenden Passagiere, für alle Szenarien, ist Abbildung 81 zu entnehmen. Es ist zu erkennen, dass 7 Uhr morgens und 4 Uhr nachmittags die Spitzenzeiten sind.

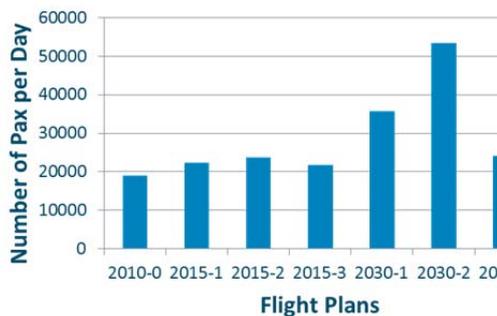


Abbildung 79: Überblick über die Anzahl der Passagiere pro Tag

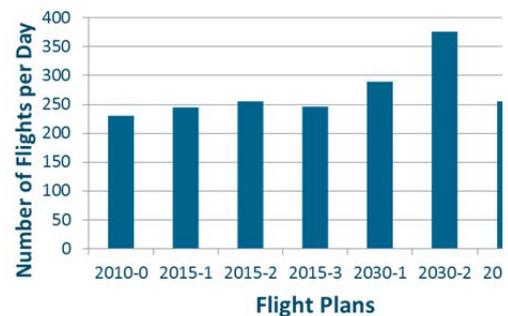


Abbildung 80: Überblick über die Anzahl der Flüge pro Tag

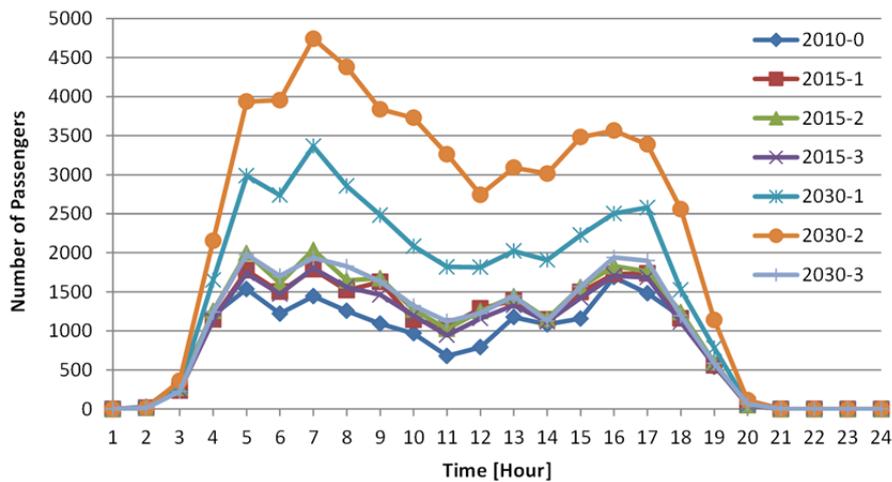


Abbildung 81: Die zeitliche Verteilung der ankommenden Passagiere im Terminal

Abbildung 82 zeigt weitere Eingangsdaten der Simulation auf Basis der Fluggastbefragungen 2006, 2008 und 2009, die für die Simulationen berücksichtigt wurden. Ungefähr 75% der Passagiere checken direkt am Schalter ein (dieser Anteil des Check-in am Schalter ist aus heutiger Sicht zu groß und wird zunehmend durch online-Check-in ersetzt). Die restlichen 25% entfallen auf E-Tickets, online und Night-before Check-in. Ca. 50% der Passagiere reisen innerhalb Europas und 30% innerhalb Deutschlands. Fast ¾ aller Passagiere reisen mit Gepäck. Gut die Hälfte aller Flugzeuge wartet auf verspätete Passagiere.

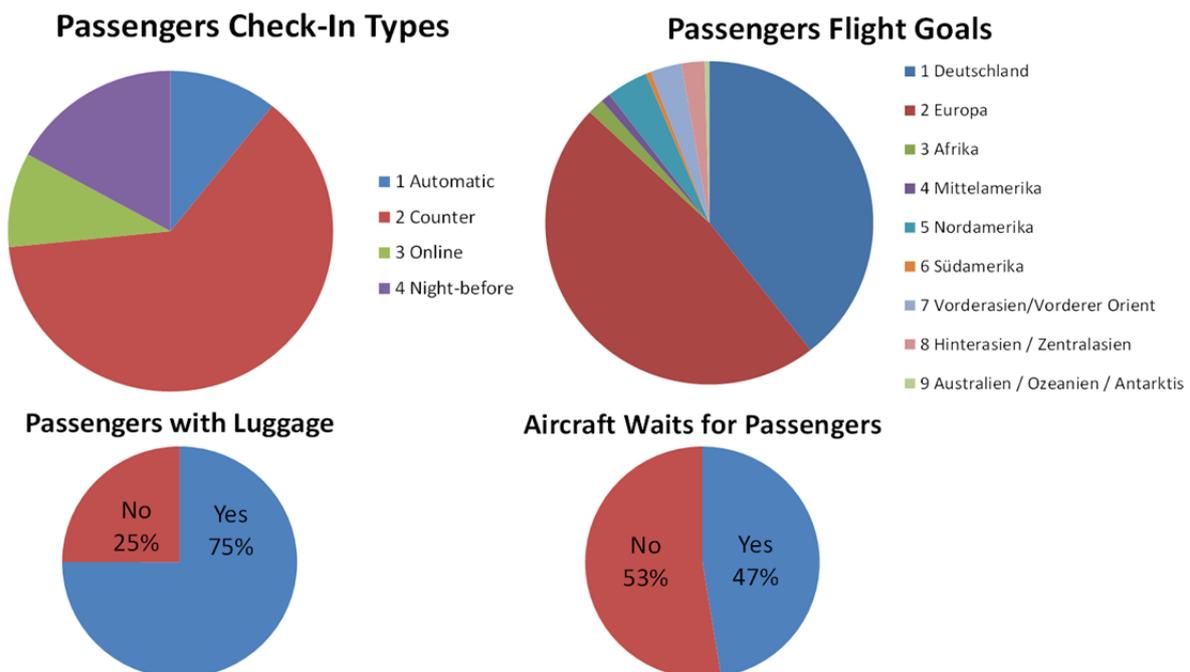
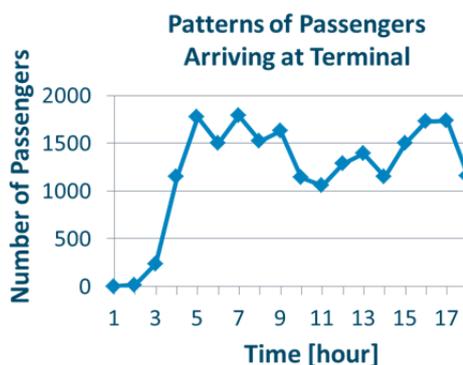


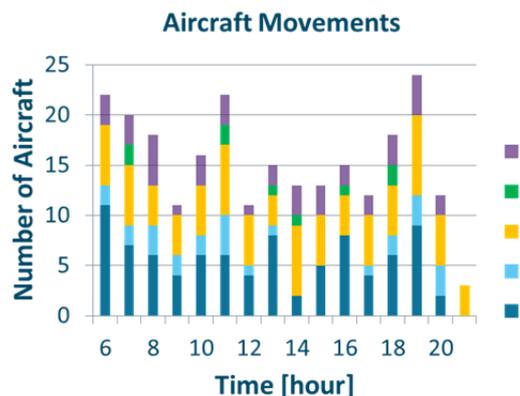
Abbildung 82: Die Profile der Passagiere für Szenario 2015-1

### II - 1.8.2.3 Ergebnisse der Gesamtsimulation

Die Fähigkeiten der Simulationskette werden beispielhaft anhand von Szenario 2015-1 demonstriert. Abbildung 83 zeigt die zeitliche Verteilung der ankommenden Passagiere am Terminal. Spitzenzeiten sind 5 Uhr morgens, 7 Uhr morgens und 4 Uhr nachmittags. Die zeitliche Verteilung der Abflugbewegungen, dargestellt in Abbildung 84, zeigt, dass 6 Uhr morgens, 11 Uhr vormittags und 7 Uhr abends Belastungsspitzen auftreten.

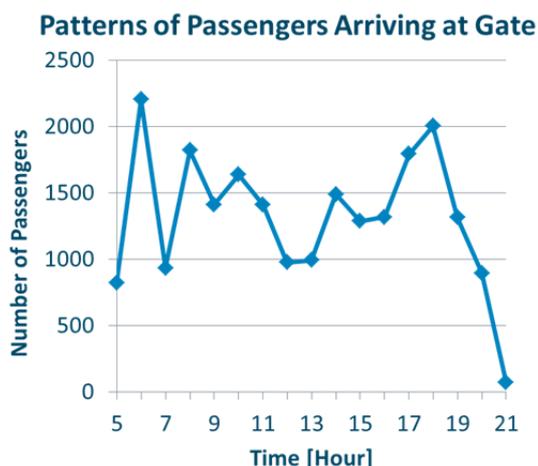


**Abbildung 83: Die zeitliche Verteilung der ankommenden Passagiere am Terminal**



**Abbildung 84: Flugbewegungen pro Tag**

Abbildung 85 zeigt die Bewegungsmuster der Passagiere im Terminal. Die Spitzenzeiten für Passagierankünfte am Gate sind 6 Uhr morgens und 6 Uhr abends.



**Abbildung 85: Die Bewegungsmuster der Passagiere am Gate in Szenario 2015-1**

Die Verweilzeit und freie Zeit der Passagiere in Szenario 2015-1 zeigt Abbildung 86. Die meisten Passagiere verbringen insgesamt 1,5 Stunden im Terminal und die durchschnittliche freie Zeit nach Ankunft am Gate ist eine Stunde. Das Verhältnis zwischen freier Zeit und Gesamtverweildauer ist zwischen 0,5 und 0,8. Das heißt, dass Passagiere mindestens 50 % Prozent der Zeit im Terminal zur freien Verfügung haben. In ihrer freien Zeit können die Passagiere einkaufen gehen oder andere Aktivitäten im Terminal verfolgen. Hier liegt ein großes Potential für das Generieren von nicht-flugbetrieblichen Einnahmen (non-aviation revenues).

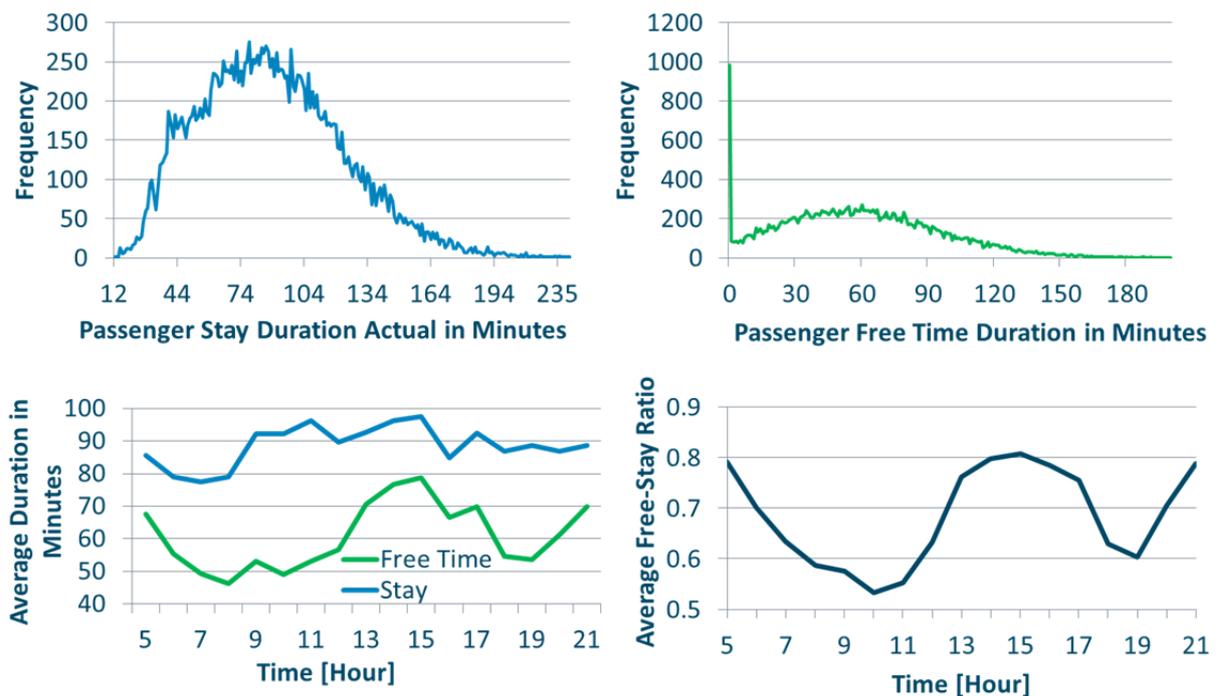


Abbildung 86: Die Verweilzeit und freie Zeit der Passagiere in Szenario 2015-1

Aus Abbildung 87 ist zu erkennen, dass eine im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse simulierte Erhöhung der Kapazität um 50 % (50 % mehr Check-in-Schalter, 50 % mehr Gepäckhandling-Kapazitäten, 50 % zusätzliche Sicherheitschecks) dazu führt, dass die Passagiere im Modell mehr Zeit am Gate verbringen. Diese Erhöhung der Kapazität um 50 % hat eine Veränderung des Verhältnisses zwischen freier Zeit und Gesamtverweildauer auf 0,8 zur Folge. Früher am Gate ankommende Passagiere erhöhen zudem auch die Pünktlichkeit der Abflüge.

Bei schnellerer Passagierabfertigung können die Passagiere alternativ auch die Wahl treffen, später zum Flughafen fahren. Die gesamte Reisedauer wird damit verkürzt, was besonders für zeitsensible Passagiere von Bedeutung ist.

Somit führt eine schnellere Passagierabfertigung je nach Passagierpräferenz und Situation zu mehr freier Zeit im Sicherheits- und Einkaufsbereich des Flughafens, zu einer verkürzten Gesamtreisedauer oder im Falle von Verzögerungen bei ansonsten gleichem Reiseverhalten zu einer höheren Pünktlichkeit der Passagiere am Gate und damit pünktlicheren Abflügen. Diese drei möglichen Auswirkungen entsprechen den Aufenthaltsszenarien bei Einsatz der DigiBa (Quelle: Effizienter Flughafen 2030, AP 2.7).

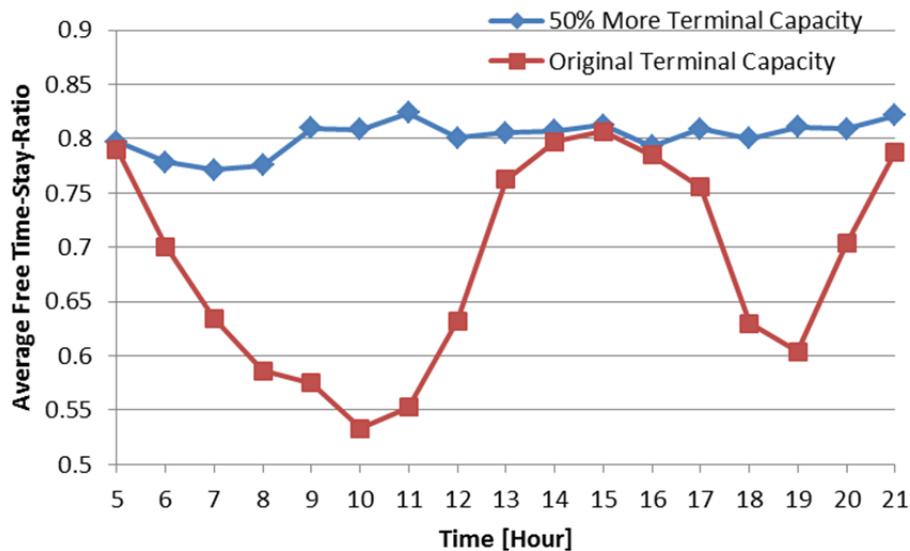
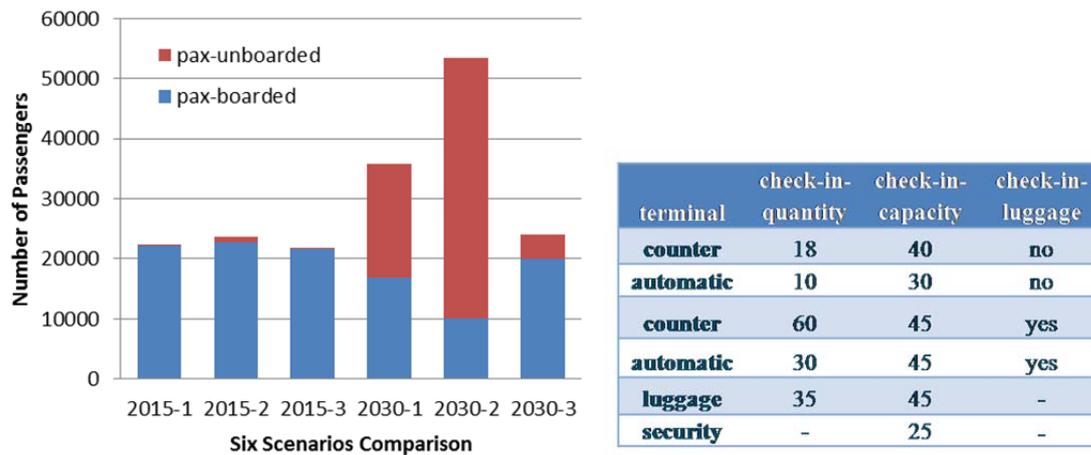


Abbildung 87: Vergleich zwischen Referenz und 50 % erhöhter Terminalkapazität in Szenario 2015-1

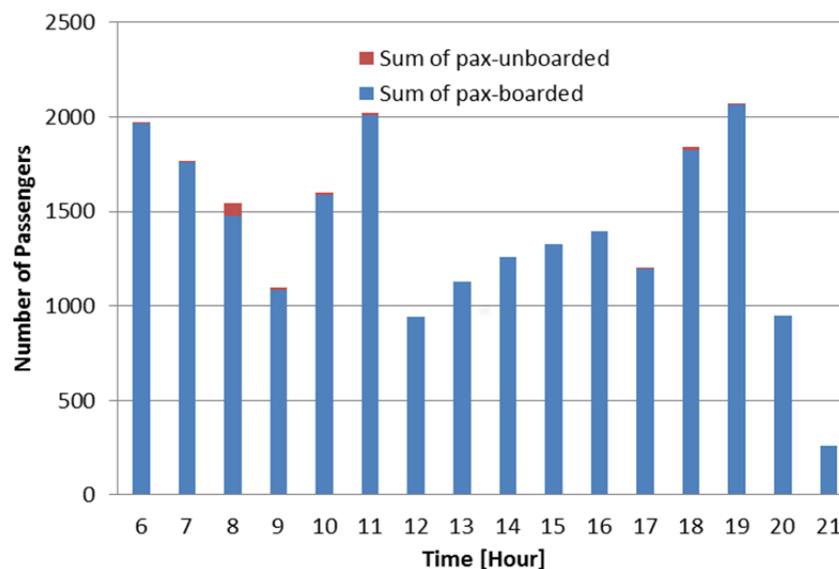
### II - 1.8.2.4 Leistungsfähigkeit des gekoppelten Land- und Luftseitenmodells

Es wurde durch das DLR Institut für Lufttransportsysteme ein gekoppeltes Land- und Luftseitenmodell entwickelt, indem einige der Luftfahrzeuge auf verspätet am Gate eintreffende Passagiere warten. Mit der gekoppelten Simulationskette ist es möglich zu zeigen, dass bei der ursprünglichen Terminalkapazität einige verspätete Passagiere ihren Abflug verpassen, die Flüge aber bei erhöhter Terminalkapazität erreicht werden. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 88 dargestellt.



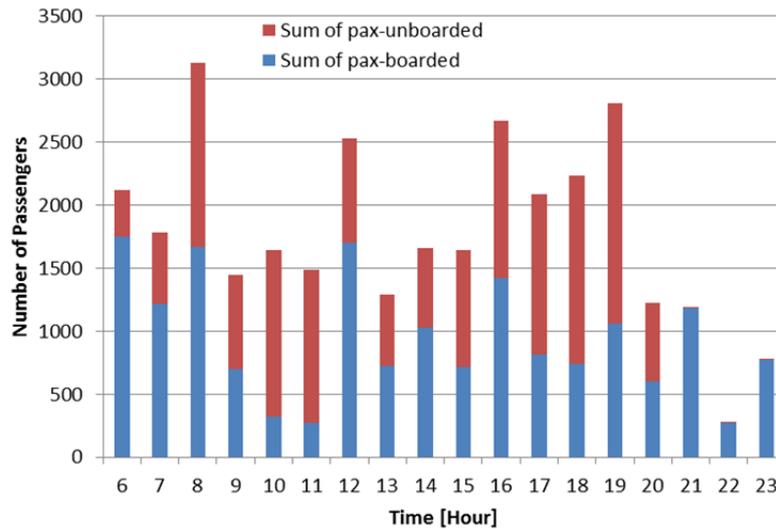
**Abbildung 88: Passagiere am Bord im Vergleich zu Passagieren nicht an Bord mit der ursprünglichen Kapazität in den sechs Simulationsszenarien**

Das 2015-1 Szenario zeigt, dass mit der ursprünglichen Terminalkapazität nur 0,6 % der Passagiere (133 von 22.371) ihren Flug nicht erreichen, wie in Abbildung 89 dargestellt.



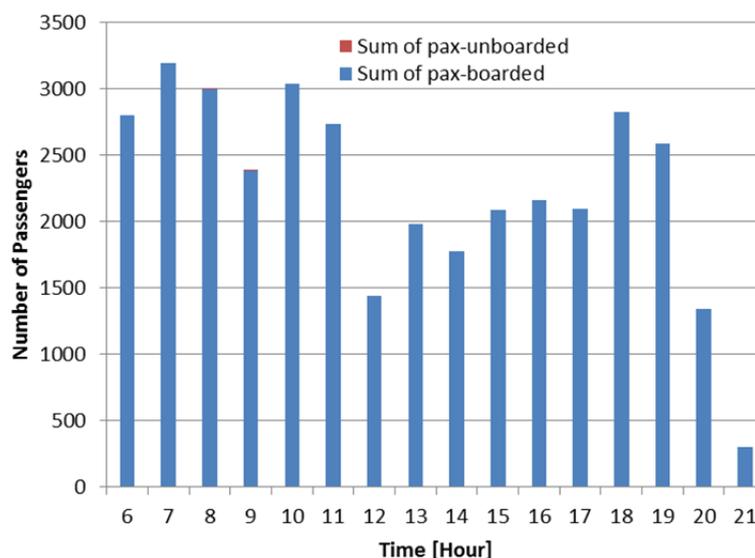
**Abbildung 89: Passagiere an Bord im Vergleich zu Passagieren nicht an Bord mit der ursprünglichen Kapazität in Szenario 2015-1**

Im 2030-1 Szenario ist die Anzahl der Passagiere stark gewachsen. Unter Annahme der ursprünglichen Kapazität und der Festlegung, dass 43 % der Flugzeuge auf Passagiere warten, erreichen 51% der Fluggäste (18.790 von 35.716) ihren Flug nicht (Abbildung 90).



**Abbildung 90: Passagiere an Bord im Vergleich zu Passagieren nicht an Bord mit der ursprünglichen Kapazität in Szenario 2030-1**

Die integrierte Simulationskette zeigt, dass bei Erhöhung der Terminalkapazität um 50 % nur noch 0,01 % der Passagiere (5 von 35.716) ihren Flug verpassen (Abbildung 91).



**Abbildung 91: Passagiere an Bord im Vergleich zu Passagieren nicht an Bord mit erhöhter Kapazität in Szenario 2030-1**

Zusammenfassend wurde ein gekoppeltes land- und luftseitiges Simulationsmodell entwickelt. Die gekoppelte Simulationskette bildet die Muster der am Gate ankommenden Passagiere, das Warteverhalten der Fluggesellschaften auf Passagiere, die Muster der Flugbewegungen pro Stunde und das Verhältnis von freier Zeit der Passagiere zu notwendigen Prozesszeiten ab. Eine Sensitivitätsanalyse der Flughafenkapazität kann mit dem integrierten Modell ebenfalls durchgeführt werden.

### II - 1.8.3 *Entwicklung der CBA<sub>airport</sub>*

Im diesem Abschnitt wird auf die Entwicklung des abschließenden Teils der Gesamtsystembewertung, die CBA<sub>airport</sub>, näher eingegangen. Zur Gesamtbewertung der in dem Projekt Airport 2030 und darüber hinaus entwickelten Technologien im Flughafenumfeld wurde ein integratives Analysewerkzeug am Institut für Lufttransportsysteme entwickelt, das auf der Grundlage der Methodik einer Nutzen-Kosten-Bilanz arbeitet. Es werden über einen langen Bilanzzeitraum die betriebswirtschaftlichen Vor- oder Nachteile von technischen, operativen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Veränderungen des vorab formulierten Referenzflughafens, hier Hamburg, eruiert und interpretiert. Das System wird dabei auch einem Stresstest unterzogen, welcher auf der Basis von Parametervariationen die Sensitivität des betriebswirtschaftlichen Verhaltens des Gesamtsystems Flughafen wiedergibt. Als wesentlicher Wirtschaftlichkeitsindikator wurde der Nettobarwert (NBW; engl. Net Present Value NPV) gewählt, da er vor allem bei der dynamischen Investitionsrechnung eine gute Interpretation der ökonomischen Auswirkungen der zeitvariablen Einnahmen und Ausgaben ermöglicht, welche v.a. durch operative, technische und wirtschaftliche Variablen getrieben werden.

#### II - 1.8.3.1 Grundlagen

Da es sich bei der Erstellung einer Kosten-Nutzen-Analyse zunächst um eine gewöhnliche Bilanzierung von Ausgaben und Einnahmen handelt, empfiehlt sich uneingeschränkt die Verwendung eines Tabellenkalkulationsprogramms. Die im Rahmen des Projektes erstellte Applikation basiert auf der Anwendung EXCEL und hat die Bezeichnung CBA<sub>airport</sub>. Die grundlegende Funktionalität ist in Abbildung 92 dargestellt.

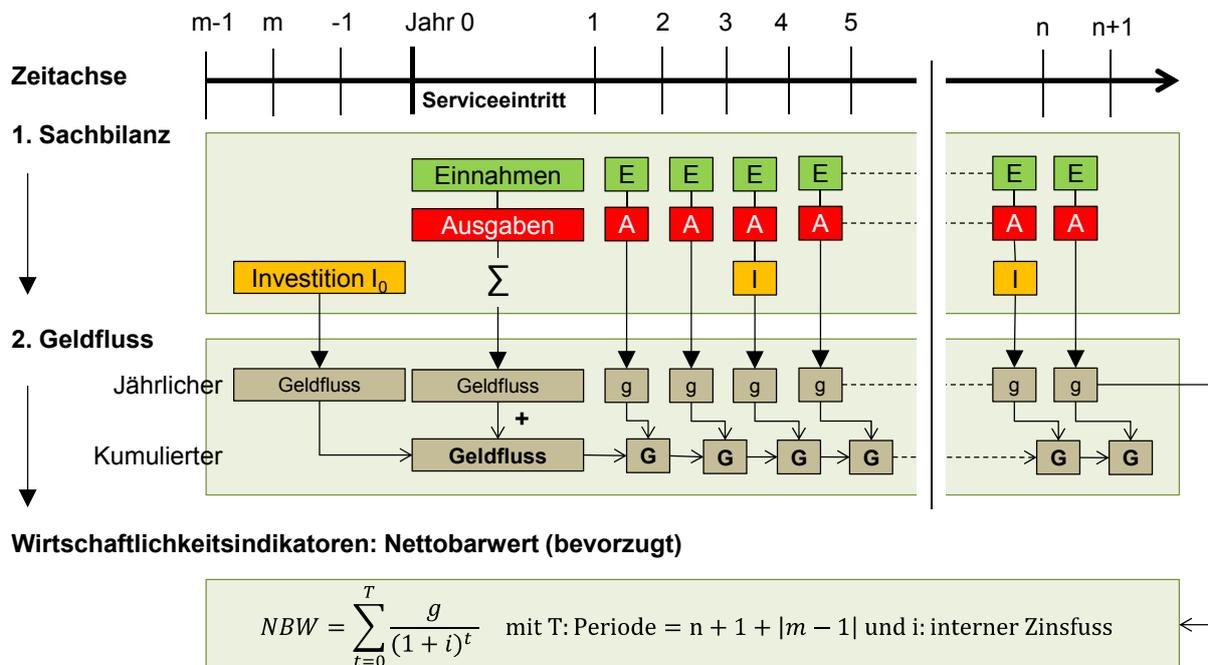


Abbildung 92: Grundlagen der Funktionalität der CBA<sub>airport</sub> [Quelle: Eigene Darstellung]

Entlang einer Zeitachse werden sämtliche jährlichen Ausgaben A und Einnahmen E quantifiziert, wobei Investitionen I als zeitlich begrenzte Ausgaben betrachtet werden. In dem Zeitraum vor dem Serviceeintritt, d.h. vor der Eröffnung des Flughafens, werden hier ausschließlich Investitionen angenommen, da weder Einnahmen aus dem Betrieb noch operative Ausgaben generiert werden. Der Zeitraum vor dem Serviceeintritt wird hier grundsätzlich für die Planung und den Bau des Hauptflughafens genutzt. Aus den Ausgaben, Einnahmen und Investitionen werden die jährlichen Geldflüsse g bilanziert, wobei die Wirtschaftlichkeitsparameter (z.B. Lohnkosten etc.) auf ein betriebswirtschaftliches Referenzjahr bezogen werden und somit die Inflationsrate bzw. sonstige dynamische Entwicklungen (z.B. Lohnkostenveränderungen) im jeweiligen Bilanzierungsjahr ( $|m-1| \rightarrow n+1$ ) berücksichtigt werden. Die jährlichen Geldflüsse werden diskontiert und der zum Betrachtungszeitpunkt bestehende Nettobarwert als Integral der Zahlungsströme berechnet.

Grundsätzlich wird in der  $CBA_{\text{Airport}}$  zwischen wiederkehrenden (RC) und einmaligen Kosten (NRC) unterschieden. Als einmalige Kosten verstehen sich insbesondere die Aufwendungen aus den Investitionen zur Errichtung oder Veränderung der Infrastruktur. Wiederkehrende Kosten sind vor allem die aus dem Flughafenbetrieb entstehenden Aufwendungen, welche v.a. die Personal-, Energie- und Instandhaltungskosten umfassen. Mit der Eingabe der Investition zur Errichtung des Hauptflughafens wird das Referenzsystem initialisiert. Dieses beinhaltet auch die Angabe des Serviceeintrittsjahrs (EIS) und das wirtschaftliche Bezugsjahr der eingetragenen Investitionsmittel.

		Year													
		-20	-15	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	EIS	5
Revenue															
Cost															
NPV															
CF															
Year of EIS		1970													
<b>MAIN AIRPORT</b>															
<b>Non Recurring Costs (NRC)</b>															
overall non recurring cost [m\$]		1.530,3													
NRC economic conditions		2004													
<b>Airport construction (CENTRAL)</b> [m\$]		1.455,3													
<b>Airfield area</b> [m\$]		520,1													
Runways [m\$]		67,6													
Taxiways [m\$]		95,4													
Apron ramps [m\$]		86,8													
Land acquisition [m\$]		122,0													
Land improvements [m\$]		15,6													
Others [m\$]		132,6													
<b>Terminal area</b> [m\$]		500,5													
Terminal building construction [m\$]		346,5													
Terminal support facilities [m\$]		127,2													
Others [m\$]		26,8													
<b>Support facilities</b> [m\$]		356,8													
Access roads [m\$]		43,6													
Service roads [m\$]		57,4													
Sanitary and storm sewer systems [m\$]		75,6													
Electrical, mechanical, fuel systems [m\$]		120,2													
Communication and security services [m\$]		20,0													
Emergency medical services [m\$]		20,0													
Crash, fire and rescue services [m\$]		20,0													
Others [m\$]		0,0													
<b>Hangar area</b> [m\$]		78,0													
Hangar building construction [m\$]		40,0													
Hangar support facilities [m\$]		15,0													
Others [m\$]		23,0													

		-20	-15	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	EIS	5
0%		0%	0%	0%	0%	0%	5%	10%	25%	20%	20%	15%	5%	0%	0%
0%		0%	0%	0%	0%	0%	5%	10%	25%	30%	20%	5%	5%	0%	0%
0%		0%	0%	0%	0%	0%	5%	10%	25%	30%	20%	5%	5%	0%	0%
0%		0%	0%	45%	5%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%		0%	0%	0%	5%	20%	20%	20%	10%	10%	5%	5%	5%	0%	0%
0%		0%	0%	0%	5%	20%	20%	20%	10%	10%	5%	5%	5%	0%	0%
0%		0%	0%	0%	0%	0%	5%	10%	15%	20%	30%	15%	5%	0%	0%
0%		0%	0%	0%	0%	0%	5%	10%	20%	30%	30%	5%	0%	0%	0%
0%		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	50%	50%	0%	0%
0%		0%	0%	0%	0%	5%	10%	20%	30%	20%	10%	5%	0%	0%	0%
0%		0%	0%	0%	0%	5%	10%	20%	30%	20%	10%	5%	0%	0%	0%
0%		0%	0%	0%	0%	5%	10%	20%	30%	20%	10%	5%	0%	0%	0%
0%		0%	0%	0%	0%	5%	10%	20%	30%	20%	10%	5%	0%	0%	0%
0%		0%	0%	0%	0%	5%	10%	20%	30%	20%	10%	5%	0%	0%	0%
0%		0%	0%	0%	0%	5%	10%	20%	30%	20%	10%	5%	0%	0%	0%
0%		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	75%	25%	0%	0%
0%		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	75%	25%	0%	0%
0%		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	75%	25%	0%	0%

Abbildung 93: Definition der Investition zur Errichtung des Hauptflughafens (BEISPIELWERTE) [Quelle: Eigene Darstellung]

Zusätzlich muss die zeitliche Distribution der Investitionstätigkeiten vor und um den Serviceeintritt angegeben werden. Die primären Investitionsbereiche des Flughafens wurden in der CBA<sub>airport</sub> entsprechend Abbildung 93 in 4 Bereiche unterteilt:

- Luftseitige Infrastruktur
- Terminal
- Unterstützende Infrastruktur (z.B. Kraftversorgungseinrichtungen)
- Hangaranlagen

Sämtliche Investitionen die nach der Eröffnung des Hauptflughafens getätigt werden sind separat mit der Angabe des Investitionstitels, der Investitionshöhe, des spezifischen Serviceeintrittsjahrs und der zeitlichen Mittelverteilung zu definieren. Somit müssen sämtliche einmaligen Kosten zur Einrichtung oder Erneuerung der Infrastruktur des Flughafens nach EIS, z.B. die Einführung des bodengestützten Start- und Landesystems (GroLaS), entsprechend Abbildung 94 definiert werden. Zudem ist anzugeben, ob die Kosten ausschließlich vom Flughafen getragen werden oder nicht.

Revenue		Cost		NPV		CF			
Non Recurring Costs (NRC)		since	1993						
overall non recurring cost		[m\$]	1.766,0						
NRC economic conditions			2004						
#	Project description	Airport costs related	EIS [year]	Cost [m\$] Total:	Invest. Distribution [year]				
					-2	-1	EIS	1	2
1	Terminal 4	yes	1993	220,0	5%	20%	70%	5%	0%
2	Apron extension	yes	1999	36,0	5%	20%	70%	5%	0%
3	Facility extensions (Noise hangar)	yes	2001	33,0	5%	20%	70%	5%	0%
4	Terminal (HAM21)	yes	2005	156,0	5%	20%	70%	5%	0%
5	Shopping plaza	yes	2007	80,0	5%	20%	70%	5%	0%
6	Parking systems	yes	2007	119,0	5%	20%	70%	5%	0%
7	Train station	no	2008	225,0	5%	20%	70%	5%	0%
8	Hotel	no	2005	80,0	5%	20%	70%	5%	0%
9	Landside access / Bypass	no	1993	235,0	5%	20%	70%	5%	0%
10		no							
11	GROLAS	yes	2045	250,0	0%	20%	65%	10%	5%
12	Infrastructure GROLAS	yes	2045	41,0	0%	80%	20%	0%	0%
13	GROLAS Alternate	yes	2045	250,0	0%	80%	20%	0%	0%
14	Infrastructure GROLAS Alternate	yes	2045	41,0	0%	80%	20%	0%	0%
15		no							
16		no							
17		no							
18		no							
19		no							
20		no							

Abbildung 94: Definition der Investitionen nach EIS (BEISPIELWERTE) [Quelle: Eigene Darstellung]

Die wiederkehrenden jährlichen Kosten wurden zunächst in direkte Kosten für Personal, Materialaufwendungen, Kraftversorgung, Kosten fremdbestimmter Leistungen und nicht weiter spezifizierte Kosten gruppiert (Abbildung 95). Diese Kostengruppe subsumiert sich jeweils unter die Hauptebenen jährlicher Betriebskosten, Instandhaltungskosten und Administrationskosten. Zum derzeitigen Projektstatus sind die Betriebskosten ausschließlich über die Personal- und Kraftversorgungskosten definiert. Instandhaltungs- und Verwaltungskosten werden derzeit nicht berücksichtigt.

Revenue	Cost	NPV	CF	Year	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
				Periode	41	42	43	44	45	46	47
	<b>Annual operating costs</b>			[t\$]	46521,2	49887,8	53484,8	57325,8	61364,7	65858,5	7058
	Direct costs for salaries			[t\$]	36175,1	38854,1	41717,9	44776,8	47981,7	51586,1	5536
	Direct costs for materials			[t\$]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Direct costs for supplies (e.g. energy)			[t\$]	10346,1	11033,7	11766,9	12549,0	13383,0	14272,4	1522
	Direct costs for outside services			[t\$]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Others			[t\$]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Airfield Area			[t\$]	20674,1	22185,5	23800,7	25525,7	27336,6	29361,1	3148
	Terminal Area			[t\$]	15247,8	16357,4	17543,0	18809,1	20139,4	21623,2	2318
	Support facilities			[t\$]	6204,0	6643,8	7113,5	7614,9	8143,9	8726,7	9341
	Hangar area			[t\$]	4395,3	4701,1	5027,6	5376,1	5744,8	6147,4	6573
	<b>Annual maintenance costs</b>			[t\$]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	<b>Annual administrative costs</b>			[t\$]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	<b>Total costs</b>			[t\$]	46521,2	49887,8	53484,8	57325,8	61364,7	65858,5	7058

Abbildung 95: Ausgabe der wiederkehrenden Kosten des Flughafenbetriebs (BEISPIELWERTE) [Quelle: Eigene Darstellung]

1	Reference year	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017		
2	2010	39	40	41	42	43	44	45	46	47		
29	<b>Employment definition</b>											
30	Total number of on-site employees	[1]	11803									
31	square function definition (a + pax*2 + b + pax)	a	0,01									
32		b	0,7245									
33	<b>direct employed at airport operator</b>	[%]	5,5%	624	650	677	705	735	766	798	832	86
34	<b>Distribution of employees to sites</b>											
35	Airfield area	[%]	50%									
36	Terminal area	[%]	35%									
37	Support facilities	[%]	10%									
38	Hangar area	[%]	5%									
39	<b>Airfield Area</b>	[t]	325	312	325	339	363	368	383	399	416	43
40	Ground handling	[%]	80%	250	260	271	282	294	306	319	333	34
41	Engineering	[%]	10%	31	33	34	35	37	38	40	42	43
42	Administration	[%]	8%	25	26	27	28	29	31	32	33	33
43	Management	[%]	2%	6	7	7	7	7	8	8	8	9
44	NIL	[%]	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	<b>Terminal Area</b>	[t]	228	219	228	237	247	258	269	280	292	30
46	Ground handling	[%]	80%	175	182	190	198	206	215	224	234	24
47	Engineering	[%]	10%	22	23	24	25	26	27	28	29	30
48	Administration	[%]	8%	18	18	19	20	21	22	22	23	23
49	Management	[%]	2%	4	5	5	5	5	5	6	6	6
50	NIL	[%]	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51	<b>Support facilities</b>	[t]	65	63	65	68	71	74	77	80	84	87
52	<b>Hangar area</b>	[t]	33	32	33	34	36	37	39	40	42	44
53	<b>Attendance per month</b>											
54	Ground handling	[h]	134,9									
55	Engineering	[h]	134,9									
56	Administration	[h]	134,9									
57	Management	[h]	134,9									
58	NIL	[h]	0									

Abbildung 96: Personalmodell in der CBA<sub>airport</sub> (BEISPIELWERTE) [Quelle: Eigene Darstellung]

Zur Berechnung der Personalkosten wurde in der CBA<sub>airport</sub> ein Personalmodell integriert, das zunächst auf der Grundlage der am Flughafen umgesetzten Work Load Units (WLU), die Höhe der statistisch zu erwartenden, durchschnittlichen Anzahl am Flughafen direkt beschäftigter Mitarbeiter berechnet. Entsprechend Abbildung 96 ist der quadratische Ansatz vom Benutzer individuell zu definieren. Zusätzlich ist die prozentuale Verteilung der Mitarbeiter auf die bereits in der Investitionsrechnung definierten Infrastrukturbereiche des Flughafens (Luftseite, Terminal, Versorgungseinrichtungen und Hangaranlagen) anzugeben. Darüber hinaus ist anzugeben, wie sich die Zahl der Mitarbeiter hinsichtlich der Berufsgruppierungen

- Bodenpersonal
- Technisches Personal
- Verwaltungspersonal und
- Leitung

aufteilt, mit der Angabe ihrer mittleren Präsenzzeit (hier z.B. 134,9 Stunden pro Monat).

In einem ähnlichen Vorgehen werden die Energieverbräuche ermittelt. Zunächst ist eine Energiekennzahl anzugeben, die den spezifischen Energieverbrauch des Flughafens in Abhängigkeit der jährlich umgesetzten WLU angibt. Entsprechend Abbildung 97 wurde hier beispielsweise ein Wert von 11 kWh pro WLU im Bezugsjahr 2010 und von dieser ausgehend eine jährliche Effizienzänderung von 1 % angenommen – also vor 2010 Effizienzverschlechterung und nach 2010 Effizienzsteigerung. Es ist zu definieren, wie viel Prozent des Gesamtbedarfs fremdbezogener Energie entspricht, woraus sich unmittelbar der Anteil eigenproduzierter Energie ergibt. Darüber hinaus wird angegeben, mit welchem Wirkungsgrad die flughafeneigene Energieversorgungseinheit operiert, um unter Angabe der Energieressource, ihr jährlichen Verbrauch zu ermitteln, der mit einem Kostenfaktor multipliziert, die Energiekosten ergibt. Für eine genauere Spezifikation und Analyse wird die Verteilung des Gesamtstromverbrauchs auf die einzelnen Nutzeinheiten entsprechend der Primärinfrastruktur angegeben.

Reference year	2010	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<b>Energy consumption parameter</b>										
Specific electricity consumption per year [kWh/WLU]	11,0	11,11	11,00	10,89	10,78	10,67	10,57	10,46	10,36	10,2
Efficiency factor (improvement per year) [%]	1,0%									
Electricity, produced off-site [%]	35,0%	3,89	3,85	3,81	3,77	3,74	3,70	3,66	3,62	3,55
Electricity, produced on-site (not purchased!) [%]	65,0%	7,22	7,15	7,08	7,01	6,94	6,87	6,80	6,73	6,65
<b>Power plant</b>										
Transform efficiency [%]	80,0%	9,0	8,9	8,8	8,8	8,7	8,6	8,5	8,4	8,3
Specific energy consumption for electricity production [kWh/WLU]	8,9									
Efficiency factor (improvement per year) [%]	1,0%									
Energy source (for cost calculation only) [1]	Gas									
<b>Distribution of electricity consumption on site</b>										
Airfield Area [%]	25,0%	2,78	2,75	2,72	2,70	2,67	2,64	2,62	2,59	2,55
Terminal Area [%]	25,0%	2,78	2,75	2,72	2,70	2,67	2,64	2,62	2,59	2,55
Support facilities [%]	25,0%	2,78	2,75	2,72	2,70	2,67	2,64	2,62	2,59	2,55
Hangar area [%]	25,0%	2,78	2,75	2,72	2,70	2,67	2,64	2,62	2,59	2,55

**Abbildung 97: Angaben zur Berechnung des Energieverbrauchs (BEISPIELWERTE)**  
**[Quelle: Eigene Darstellung]**

Auf der Einnahmenseite wird zwischen den Gruppen luftfahrtinduzierter und nicht-luftfahrtinduzierter Einkünfte unterschieden, wobei beide Gruppen grundsätzlich von den jährlichen Passagier- und Frachtströmen funktional bestimmt werden – entweder direkt oder indirekt, z.B. über die Anzahl und Art der eingesetzten Flugzeugmuster. Viele Parameter bestimmen z.B. die Start- und Landentgelte, wie z.B. das Abfluggewicht, die Passagierzahl, die Emissionskennziffern, Aufenthaltsdauer etc.

Es soll hier nicht im Detail auf die Berechnung der Einnahmen eingegangen werden, sondern die fundamentale Philosophie der Arbeitsstruktur dargelegt werden: Diese abstrahiert und reduziert sich auf die Bestimmung der Verkehrslast, letztendlich der Verkehrsströme (WLU / Jahr), welche in nahezu alle Transferfunktionen zur Einnahmen- und Ausgabenberechnung als Variable einfließen. Zudem beeinflussen auch alle technischen oder operativen Veränderungen am Flughafen den Verkehrsfluss, wodurch eine unmittelbare Verbindung zwischen den wirtschaftlichen Indikatoren und der am Flughafen getroffenen (Investitions-) Maßnahmen hergestellt wird; dieses ist ein wesentlicher Beitrag zur integrativen Betrachtung sämtlicher Technologien im Projekt Airport 2030, da auch hier auf die Erkenntnisse und Berechnungsverfahren der einzelnen Arbeitspakete zurückgegriffen werden muss. In Abbildung 98 sind die einzelnen Stationen der simplifizierten Prozesskette zur Bestimmung der jährlichen Flugbewegungen dargestellt.

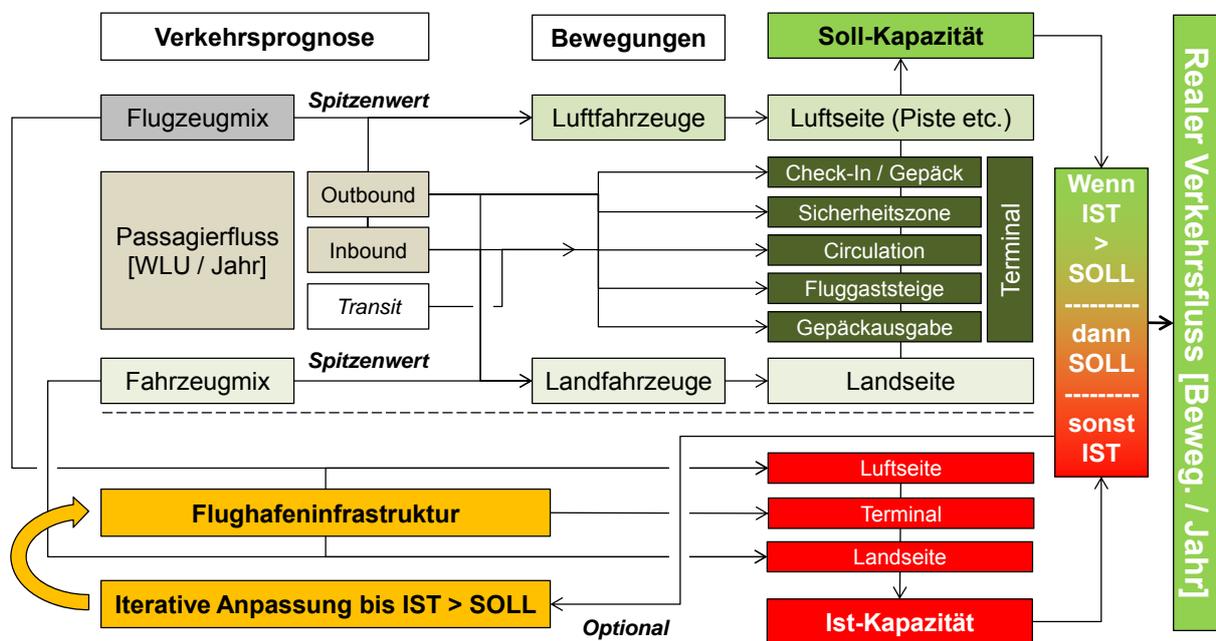


Abbildung 98: Bestimmung der Verkehrslast bzw. des realen Verkehrsflusses [Quelle: Eigene Darstellung]

Hier ist insbesondere auf die Gegenüberstellung der vom Flughafen durch seine Infrastruktur (einschließlich TMA) bereitgestellten Kapazität (IST-Kapazität) zu der aus der Verkehrsprognose (einschließlich Flottenmix) abgeleiteten Kapazität (SOLL-Kapazität) einzugehen: Begrenzt die Ist-Kapazität die Soll-Kapazität so wird in der Regel ein wirtschaftlicher Nachteil impliziert, da ausgehend von der bestehenden Nachfrage, eine höhere Anzahl an Flugbewegungen und somit auch Umsatz möglich wäre. Die gutachterliche Interpretation ist somit von zwei Ergebnissen geprägt, die sich um die Beantwortung der Fragen entfalten, wie viel Verlust generiert mein System auf der Grundlage der nicht zu befriedigenden Nachfrage bzw. welche Systemadaption ermöglicht mir die Nachfrage auch in Zukunft zu befriedigen, um bei Berücksichtigung der Investitionen und Betriebskosten einen Mehrwert zu erwirtschaften (NPV bzw.  $\Delta NPV > 0$ ).

In Abbildung 99 ist die Eingabemaske gezeigt, in der die primären Stellgrößen zur dynamischen Berechnung der jährlichen WLU und Flugbewegungen eingegeben werden. Es ist das Bezugsjahr anzugeben, von dem aus die jährlich definierte Veränderung (im Beispiel 3,58 % Passagierwachstum, 1,6 % Flugbewegungen) berechnet wird. Es ist das Passagierformat darüber zu definieren, wie groß der Anteil der „Originärpassagiere“, „Privatpassagiere“, „Einstiegspassagiere“ usw. ist, da diese Informationen für die weiteren Berechnungen, v.a. der nicht-luftfahrtinduzierten Einnahmen (Parkplatzvermietung, Einkäufe im Terminal etc.), erforderlich sind.

		Revenue	Cost	NPV	CF	2000	2010	2020	2030	2040	
Reference year	2010					30	40	50	60	70	
Use traffic capacity input vectors	NO										
Use traffic demand input vectors	YES										
Scenario selected	1										
<b>Annual work load units</b>											
Passengers	[1 mill.]	13.7				9,64	13,70	19,48	27,68	39,00	
Annual average change	[%]	3.58%				9,64	13,70	19,48	27,68	39,00	
Origin (Number of passengers)	[%]	99%				9,5	13,6	19,3	27,4	39	
Origin entrance	[%]	42%				4,0	5,7	8,1	11,5	16	
Private passengers	[%]	65%				2,6	3,7	5,3	7,5	10	
Business passengers	[%]	35,0%				1,4	2,0	2,8	4,0	5,5	
Transit (Number of passengers)	[%]	1,0%				0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	
Annual average change bw. origin / transit	[%]	0%									
Cargo											
WLU Cargo (1 WLU = 100 kg Cargo)	[mill. t]	13.7									
<b>Annual flight movements</b>											
Total	[1]	158.076				134874	158076	185269	217140	254000	
Annual average change	[%]	1.60%				134874	158076	185269	217140	254000	
Scheduled	[%]	95%				128130	150172	176005	206283	241000	
Annual average change bw. un-/ scheduled	[%]	0%				6743	7903	9263	10857	127000	
<b>Wake vortex category</b>											
		2010	Pre reference			Post reference					
Light (MTOW <= 7 t)	[%]	0,0%	1980	1990	2000	2020	2030	2040	0,0%	0,0%	0,0%
Medium (7 t < MTOW <= 136 t)	[%]	99,6%	99,6%	99,6%	99,6%	99,6%	93,3%	93,3%	99,6%	99,6%	93,9%
Heavy (MTOW > 136 t)	[%]	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	1,1%	1,1%	0,4%	0,4%	1,1%
Super heavy	[%]	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	5,0%	5,0%	0,0%	0,0%	5,0%
<b>DETAILED DATA</b>											
Aircraft type		2010	1980	1990	2000	2020	2030	2040			
A318		0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,6%	1,1%	1,1%	0	0	3024
A319		12,1%	12,1%	12,1%	12,1%	13,5%	1,1%	1,1%	16348	19160	24954
A320		15,2%	15,2%	15,2%	15,2%	15,5%	17,7%	17,7%	20435	23950	28735
A321		12,1%	12,1%	12,1%	12,1%	11,0%	31,0%	31,0%	16348	19160	20417
A388		0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	5,0%	5,0%	0	0	0

Abbildung 99: Eingabemaske zur Definition des zeitlich veränderlichen Verkehrsflusses und Flottenverschnitts [Quelle: Eigene Darstellung]

Darüber hinaus wird die Veränderung des Flottenmix über einen Zeitraum von 7 Dekaden festgelegt. Optional, aber dennoch empfehlenswert, ist die Verwendung extern berechneter Kapazitäts- und Verkehrsvektoren, die u.a. im Rahmen des Projektes Airport 2030 aus der Berechnungs-Kette folgt (Abbildung 100). Die Vektoren stellen die Soll- und Ist-Kapazität über den gesamt Betrachtungszeitraum gegenüber.

Es soll kurz auf ein Beispiel des Zusammenwirkens der Ergebnisse aus den unterschiedlichen Arbeitspaketen innerhalb der CBA<sub>airport</sub> eingegangen werden: In Abbildung 101 ist die Berechnung der Einnahmen aus der Vermietung von Gewerbeflächen dargestellt. Diese bedarf u.a. der Eingabe der Prozessparameter aus den Passagierbewegungen durch das Terminal, welche sich v.a. in der Warte- und Laufzeit an bzw. zwischen den unterschiedlichen Prozessstationen (z.B. Check-In) ergeben. Die Applikation der Universität Hamburg (hier als Terminal App bezeichnet) berechnet die durchschnittliche Verfügungszeit der Passagiere zum Konsum in der Sicherheitszone. Diese verändert sich mit dem Passagieraufkommen und verringert sich z.B., bei einem zunehmenden Wachstum bei gleichbleibender Infrastruktur, insbesondere der Sicherheitsschleuse. Mit der CBA<sub>airport</sub> des Instituts für Lufttransportsysteme und der Verwendung der Gesamtsimulation wird analysiert, welche Maßnahmen die Situation entspannen. Dieses könnte entweder durch eine infrastrukturelle Anpassung der Sicherheitsschleuse oder durch eine direkte Prozesssteuerung der Passagierflüsse für eine optimierte Zeitverteilung (vorgelegte oder verzögerte Ankunftszeit der Passagiere am Terminal oder Bewegungssteuerung im Terminal usw.) erfolgen.

CBA <sub>airport</sub>											
		Airport Capacity						Airport Traffic			
		Reference		Technology scenario 1		Technology scenario 2		Reference		Technology scenario 1	
YEAR		Flight movements	Passenger [in Mill]	Flight movements	Passenger [in Mill]	Flight movements	Passenger [in Mill]	Flight movements	Passenger [in Mill]	Flight movements	Passenger [in Mill]
2009		120000	10,0	140000	12,0	0	0	155586	13,23	0	0
2010		150000	20,0	170000	22,0	0	0	158076	13,70	0	0
2011		150000	20,0	170000	22,0	0	0	160605	14,19	0	0
2012		150000	20,0	170000	22,0	0	0	163174	14,70	0	0
2013		150000	20,0	170000	22,0	0	0	165785	15,22	0	0
2014		150000	20,0	170000	22,0	0	0	168438	15,77	0	0
2015		150000	20,0	170000	22,0	0	0	171133	16,33	0	0
2016		150000	20,0	170000	22,0	0	0	173871	16,92	0	0
2017		150000	20,0	170000	22,0	0	0	176653	17,52	0	0
2018		150000	20,0	170000	22,0	0	0	179479	18,15	0	0
2019		150000	20,0	170000	22,0	0	0	182364	18,80	0	0

Abbildung 100: Auszug der Eingabeebene fremdbestimmter Soll-/ Ist-Kapazitätsvektoren (BEISPIEL) [Quelle: Eigene Darstellung]

Verkehrsszenarien

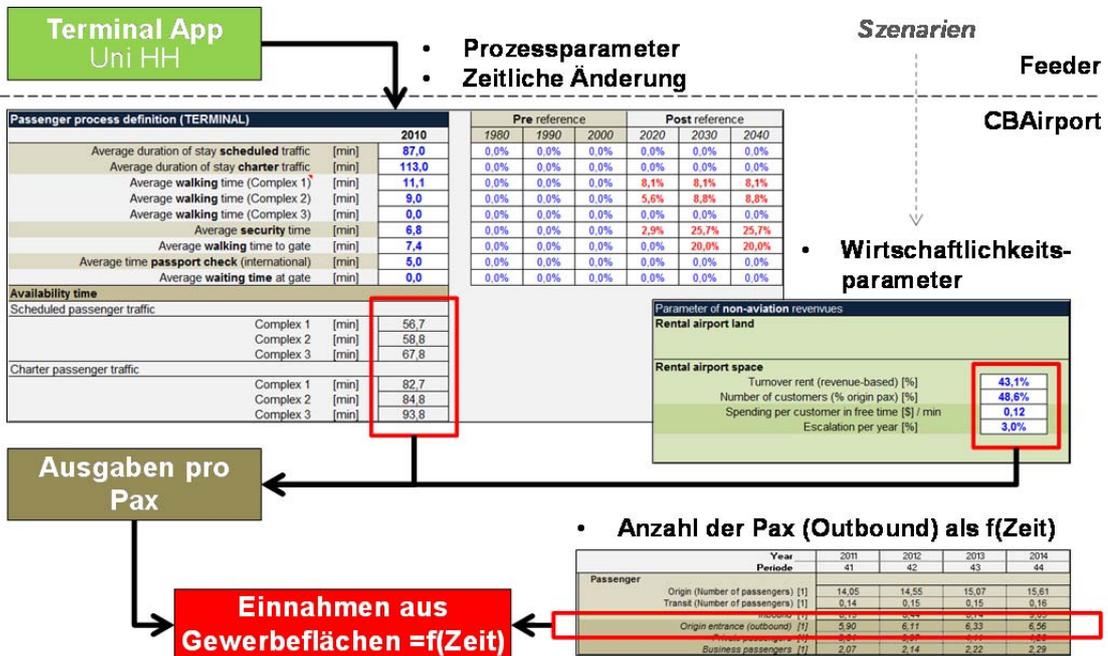
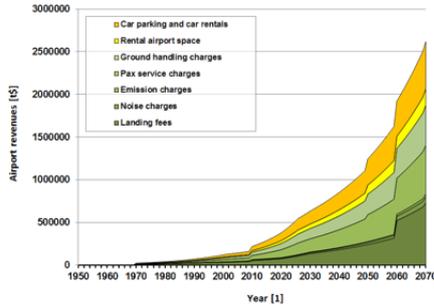


Abbildung 101: Nicht-luftfahrtinduzierte Einnahmen aus der Vermietung von Gewerbeflächen [Quelle: Eigene Darstellung]

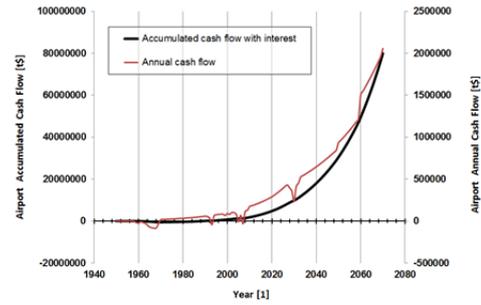
Aus der Kombination der berechneten Prozessparameter und der Wirtschaftlichkeitsparameter, die u.a. umfassen wie viel ein Passagier im Durchschnitt pro Zeiteinheit ausgibt oder die Höhe der Umsatzmiete (→ direkte Einnahme durch den Flughafen), folgt entsprechend Abbildung 101 die Berechnung der Einnahmen aus der Vermietung der Gewerbefläche.

Abschließend ist auf die vorläufige Ergebnisdarstellung nach Abbildung 102 einzugehen: Das Ziel ist, die Auswirkungen der im Flughafenumfeld betriebenen neuen Technologien (dieses beinhaltet auch neue Luftfahrzeugmuster) oder operativen Maßnahmen, bzgl. des NPV darzustellen, um eine erste Indikation bzgl. der Wirtschaftlichkeit der am Flughafen implizit oder explizit auftretenden Veränderungen anzugeben. Es werden die Einnahmen, Ausgaben bzw. Investitionen in einen Geldfluss überführt, aus dem, unter Berücksichtigung eines internen, flughafenspezifischen Zinsfußes, der Nettobarwert berechnet wird. Es wird eine Deltabetrachtung derart vollzogen, dass ausgehend von einem Referenzsystem jegliche technische oder operative Störung auf das Systemverhalten in Form eines geänderten Nettobarwerts untersucht wird (siehe Abbildung 102, Diagramm unten rechts).

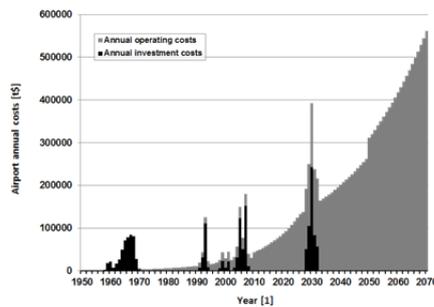
**Einnahmen**



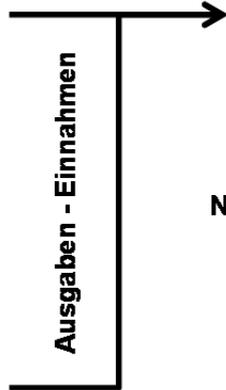
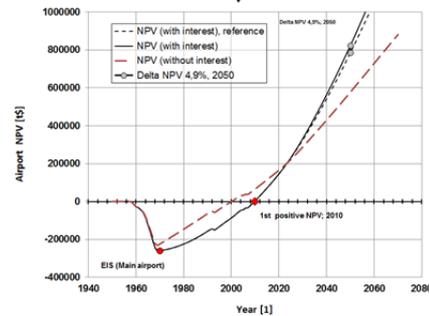
**Geldfluss**



**Ausgaben (inkl. Investitionen)**



**Nettoanwert**



**Abbildung 102: Ergebnisvisualisierung (BEISPIELDIAGRAMME) [Quelle: Eigene Darstellung]**

In den nachfolgenden Abschnitten wird die Applikation  $CBA_{airport}$ , für die im Projekt Airport 2030 erforderlichen Randbedingungen initialisiert und, auf der Grundlage der dem Autor zur Verfügung gestellten Daten der Technologien der Projektpartner, entsprechende Analysen gefahren. Diese sollen ein Gesamtbild der Auswirkung aller verfügbaren Airport 2030-Technologien am Flughafen Hamburg aufzeigen. Dabei kann durchaus die Situation eintreten, eine bestimmte Technologie aus wirtschaftlicher Sicht für den Flughafen Hamburg nicht zu empfehlen. In diesem Fall ist die Mehrwertanalyse über die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hinaus zu erweitern, wie z.B. im Projekt „Green Airport“ gezeigt.

**II - 1.8.3.2 Initialisierung des Referenzflughafens**

Unter der Initialisierung des Referenzflughafens versteht sich hier die betriebswirtschaftliche Modellierung über einen vordefinierten Zeitraum des bekannten Systems. Es werden die betriebswirtschaftlichen Ergebnisse dynamisch und in Abhängigkeit wirtschaftlicher, operativer und technischer Parameter abgebildet und die Ergebniskurven eingefroren – sie werden als Referenzkurven bezeichnet. Eine Änderung des originären Parametersatzes („Systemstörung“), sei es technisch z.B. durch die Einführung eines neuen Systems oder operativ z.B. durch die Veränderung des Flugzeugtypenmix, führt zu einer zeitvariablen Abweichung der Wirtschaftlichkeitskennwerte von den Referenzkurven. Das weitere Vorgehen verlangt nun zwei Prozeduren: Es sind einerseits die Abweichungen durch die

Systemstörung zu interpretieren, andererseits, falls die Abweichung negativ zu bewerten ist, mögliche Maßnahmen zu eruieren, welche die Systemstörung kompensieren, was sich in einer Deckung der Wirtschaftlichkeitsparameter mit den Referenzwerten zeigt; letzteres kann auch als Zielfunktion eines iterativen Prozesses aufgefasst werden.

Die  $CBA_{\text{airport}}$  erfordert die Systemeigenschaften wesentlicher Infrastrukturkomponenten des Flughafens abzubilden. Dieses wird in der durch die funktionale Beschreibung folgender Ebenen vollzogen:

- Jährliche maximale Passagierkapazität (Durchschnitt)
- Jährliche maximale Kapazität an Flugbewegungen (Durchschnitt)
- Profil der Beschäftigten
- Prozessparameter der Passagierflüsse im Terminal
- Parameter der Parkraumbewirtschaftung
- Energieverbrauch und -erzeugung

Um die Gültigkeit der Initialisierung zu überprüfen hat die Basisvalidation zum Ziel, das Bilanzergebnis aus Ausgaben und Einnahmen in der  $CBA_{\text{airport}}$ , den Angaben aus den Geschäftsberichten der FHG gegenüberzustellen; dieses erfolgt als Abschluss und in Ergänzung zu den Ergebnisüberprüfungen an ausgewählten Rechenpunkten. Dabei wurden die Gewinn-Verlust-Rechnungen der FHG auf die Positionen reduziert, die in der vorliegenden  $CBA_{\text{airport}}$  verwendet werden. So wurden keine Abschreibungen, Versicherungen oder außerordentliche Erträge bzw. Aufwendungen berücksichtigt, die in den Geschäftsberichten ausgewiesen sind. Der Vergleich zwischen den theoretisch bilanzierten Werten und den Angaben aus den Geschäftsberichten zeigt eine gute Übereinstimmung, wobei die durchschnittliche Abweichung bei etwa 5% liegt (siehe Tabelle 30 und Abbildung 103).

Ebenso wird deutlich, dass größere Abweichungen auf Jahressicht auftreten können, hier z.B. im Jahr 2012 mit knapp 11%, die auf einzigartige Betriebsentwicklungen zurückgeführt werden können, welche bei der Anwendung eines stetigen Bilanzmodells (z.B. stetige Verkehrsentwicklung) nicht abgefangen werden können. So entschleunigte sich das reale Passagierwachstum im Jahr 2012 (gegenüber 2011: +1,2%) erkennbar und die Anzahl der Flugbewegungen war sogar rückläufig (gegenüber 2011: -3%). Diese Schwankungen können in der  $CBA_{\text{airport}}$  ausschließlich durch die Eingabe eines detaillierten Verkehrsvektors (Passagiere / Flugbewegungen / Max-System-Kapazität) berücksichtigt werden. Die  $CBA_{\text{airport}}$  sieht die Möglichkeit vor, sie wurde jedoch in der vorliegenden Studie, in Ermangelung ausreichender Daten, nicht angewendet.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass die Initialisierung der  $CBA_{\text{airport}}$  für das Referenzsystem Flughafen Hamburg belastbare Ergebnisse liefert, wenngleich die Validation sowohl im Umfang der Bilanzierungsgrößen und des Bilanzzeitraums stark eingegrenzt wurde, bedingt durch eine limitierte Datenverfügbarkeit.

**Tabelle 30: Auszug aus der Gewinn-und-Verlust-Rechnung für die Jahre 2009, 2010, 2011 und 2012 der FHG und Gegenüberstellung zu den Ergebnissen des Referenzsystems in der  $CBA_{\text{airport}}$  für den Flughafen Hamburg [Quelle: Eigene Darstellung]**

	2009	2010	2011	2012
Umsatzerlöse	224,11 Mill. €	248,64 Mill. €	253,28 Mill. €	251,51 Mill. €
Roh-, Hilfs-, Betriebsstoffe	-5,25 Mill. €	-7,76 Mill. €	-5,69 Mill. €	-6,79 Mill. €
Bezogene Leistungen	-87,82 Mill. €	-101,97 Mill. €	-96,23 Mill. €	-97,61 Mill. €
Personalaufwand	-37,66 Mill. €	-35,61 Mill. €	-34,76 Mill. €	-39,48 Mill. €
<b>Reduziertes Bilanzergebnis *)</b>	<b>93,38 Mill. €</b>	<b>103,30 Mill. €</b>	<b>116,60 Mill. €</b>	<b>107,64 Mill. €</b>
<b>CBA<sub>airport</sub>-Bilanzergebnis</b>	<b>95,87 Mill. €</b>	<b>108,06 Mill. €</b>	<b>114,73 Mill. €</b>	<b>119,09 Mill. €</b>
<b>Abweichung zu FHG-Zahlen</b>	<b>2,7%</b>	<b>4,6%</b>	<b>-1,6%</b>	<b>10,6%</b>

\*) ohne Berücksichtigung von Versicherungen, Abschreibungen, außerordentliche Erträge / Aufwendungen

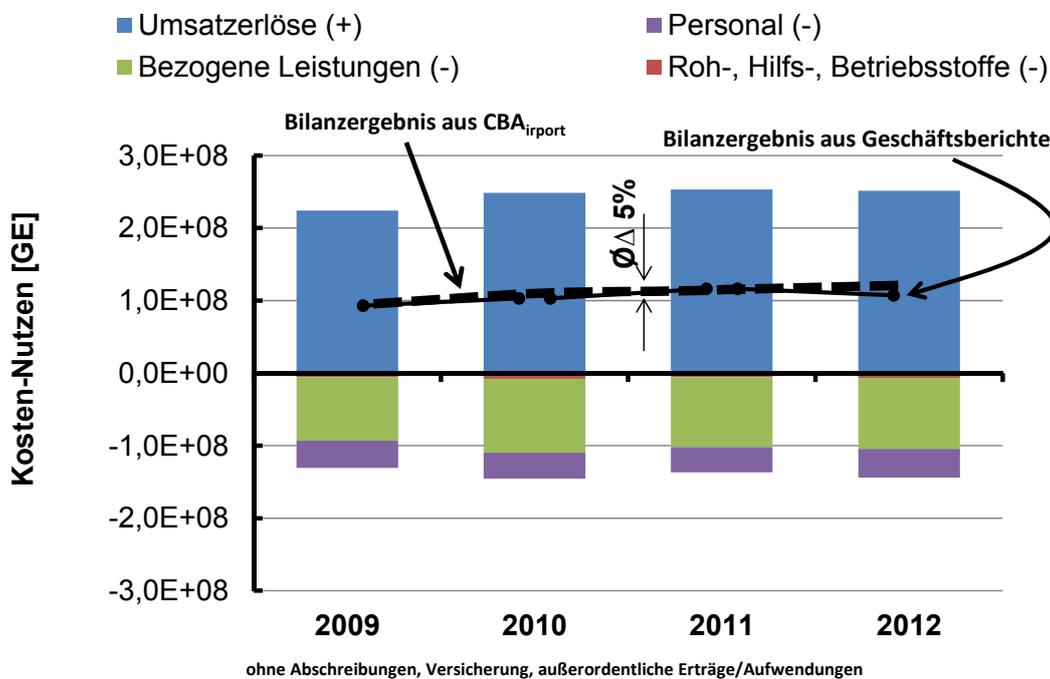


Abbildung 103: Theorie und Praxis: Ein Vergleich der Bilanzergebnisse aus der CBA<sub>airport</sub> und aus den Geschäftsberichten der FHG (Praxis) im Zeitraum 2009 bis 2012 [Quelle: Eigene Darstellung]

### II - 1.8.3.3 Wirtschaftlichkeitskennwerte und Ergebnisstabilität des Referenzsystems

Die Wirtschaftlichkeitskennwerte des Referenzsystems setzen sich zusammen aus der Entwicklung der jährlichen Einnahmen und Ausgaben und dem sich daraus erschließenden Geldfluss und abgeleiteten Nettobarwert. Die über den Bilanzzeitraum berechneten jährlichen Einnahmen sind in Abbildung 104 links, die jährlichen Ausgaben in Abbildung 104 rechts dargestellt. Beide Diagramme weisen gleiche markante Entwicklungsstellen auf, so u.a. eine Verlangsamung der Entwicklung ab 2020 und deren Sprung um 2040. Die Verzögerung ist bedingt durch das Erreichen der ab dem Jahr 2020 angenommenen Maximalkapazität des Flughafens von 20 Millionen Passagieren pro Jahr (Abbildung 104 links). Die Maximalkapazität folgt der Hypothese, dass der Flughafen zu diesem Zeitpunkt Maßnahmen umgesetzt hat, welche die prognostizierte Nachfrage kapazitätsseitig decken. Der Sprung um das Jahr 2040 wird durch die Annahme getrieben, dass der Flughafen ab diesem Zeitpunkt eine Kapazitätserweiterung realisiert hat, die eine Erhöhung der Passagierzahl von 20 auf 25 Millionen Passagiere ermöglicht; dabei ist der sprunghafte Anstieg modellbedingt und würde in der Realität wesentlich flacher verlaufen, wie Abbildung 104 links schematisch angedeutet. Die Anzahl der Flugbewegungen werden hier bzgl. der Kapazität als unproblematisch bewertet (Abbildung 104 rechts). Es bestand keine einheitliche Aussage darüber, mit welchen Maximalkapazitäten zu rechnen ist, weshalb in der vorliegenden Studie pragmatische Eingaben gemacht wurden.

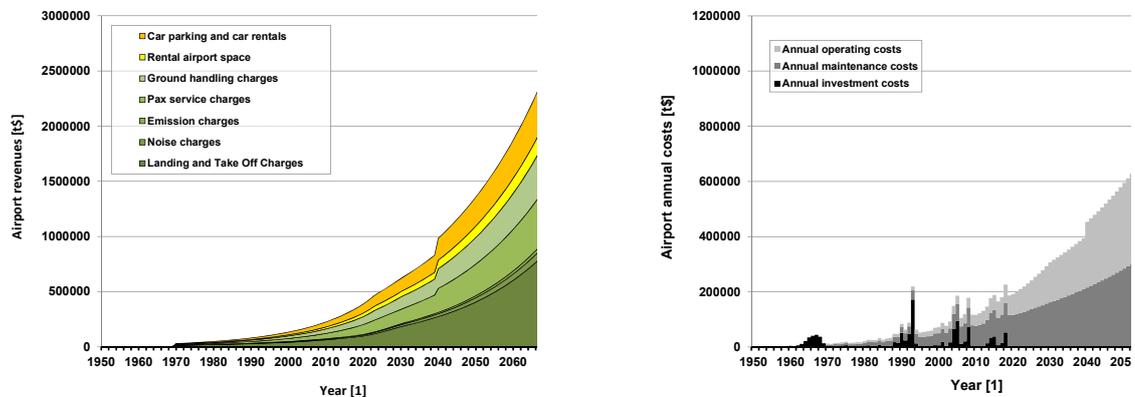
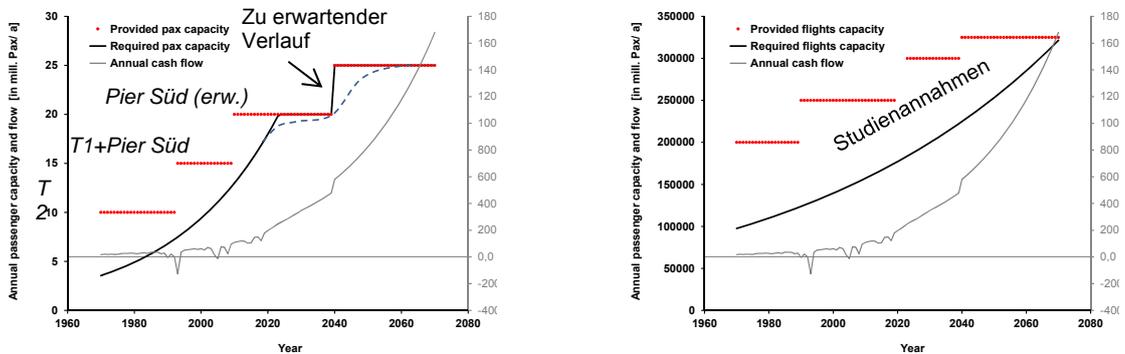
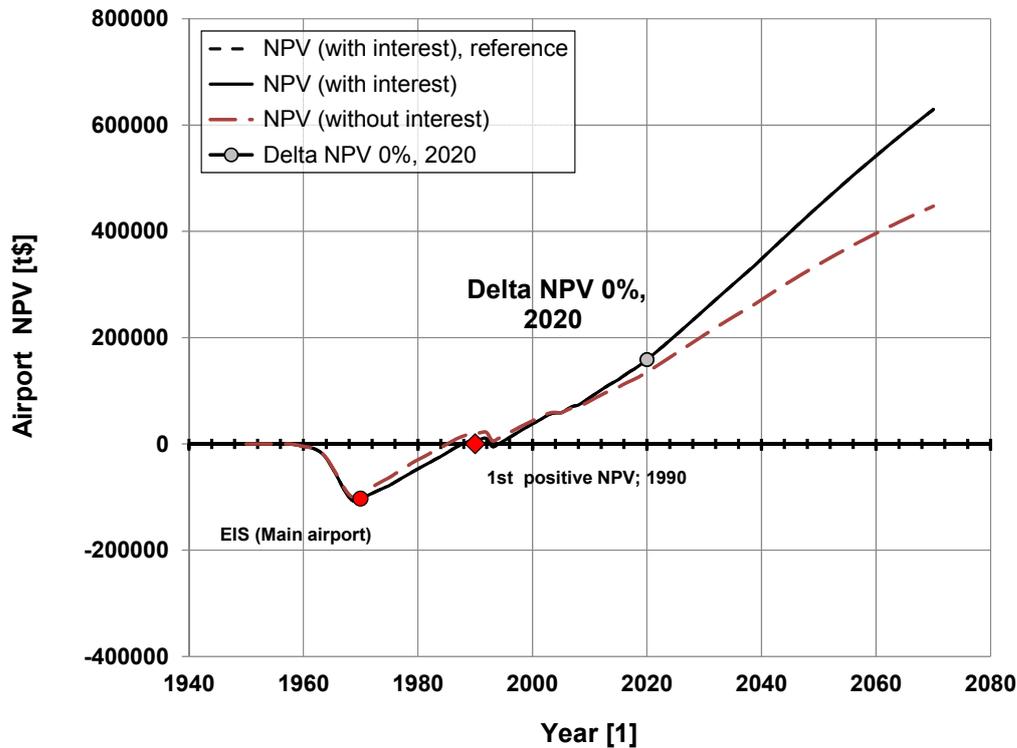


Abbildung 104: Bilanzierte Einnahmen (links) und Ausgaben (rechts) des Referenzsystems mit CBA<sub>airport</sub> [Quelle: Eigene Darstellung]



**Abbildung 105: Entwicklung der WLU (Diagramm links; hier Passagiere) und der Flugbewegungen (rechts) gegenüber der vorhandenen Kapazität (Studienannahmen!!!) seit Betriebsbeginn (1970) [Quelle: Eigene Darstellung]**

Die kumulative Betrachtung der Geldflüsse im Nettobarwert (NBW bzw. engl. NPV) führt zu einem geglätteten Verlauf seiner Kurve (siehe Abbildung 106). Ausschließlich größere Investitionen treten durch eine negative Entwicklung oder durch eine Abflachung der NPV-Kurve hervor, wie z.B. die Investitionstätigkeiten zum Beginn der 90er Jahre (z.B. Terminal 2, Pier-Süd) oder des 21. Jahrhunderts (Projekt HAM 21, erweitertes Pier-Süd). Erkennbar wird auch der zunehmende Einfluss der Kapazitätsbeschränkung, wobei ein Wendepunkt im Jahr 2020 liegt, an dem der Verlauf von einer progressiven in eine degressive Entwicklung übergeht – der Flughafen kann nach den hier getroffenen Annahmen der Kapazitätsentwicklung die Passagiernachfrage nicht mehr befriedigen. Eine leichte Erholung ist ab 2040 zu identifizieren, die infolge der angenommenen Kapazitätserweiterung eintritt. Unter den angenommenen Voraussetzungen wurde der erste positive NPV im Jahr 1990 erreicht, um dann aufgrund der Großinvestitionen (Terminal, Pier etc.) kurz negativ zu werden. Seit 1993 ist der NPV stets positiv.



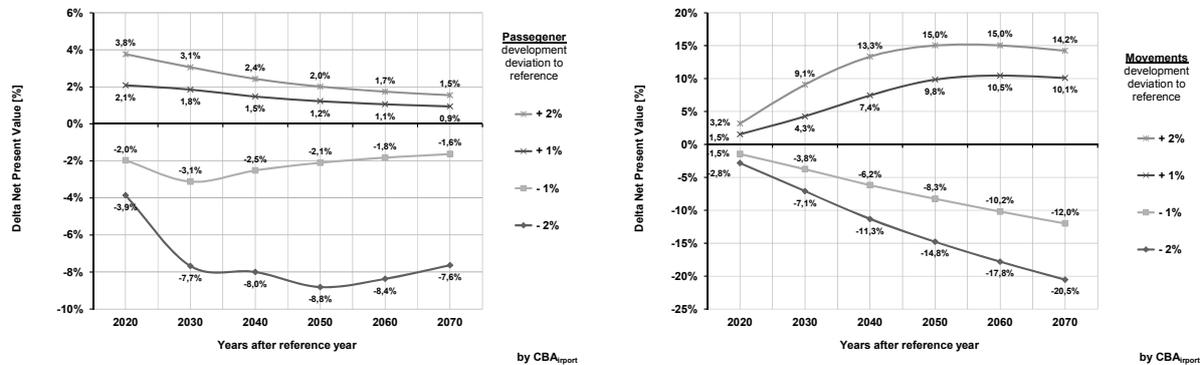
by CBA<sub>airport</sub>

**Abbildung 106: Nettobarwert des Referenzsystems über den Bilanzzeitraum  
[Quelle: Eigene Darstellung]**

Ausgehend vom Referenzsystem überprüft CBA<sub>airport</sub>, inwieweit sich Änderungen relevanter Systemparameter auf den Wirtschaftlichkeitskennwert NPV auswirken. Dazu werden u.a. die Wachstumsraten der Passagierzahlen und Flugbewegungen in einer Bandbreite von +2 % bis -2 % um die Referenzwerte, hier durchschnittlich +3,3 % Passagierwachstum und +1,2 % Flugbewegungen pro Jahr, variiert. Da dieses deutlich von der vorhandenen Flughafenkapazität, sowohl bzgl. der maximalen Flugbewegungen als auch Passagierströme, beeinflusst wird, ist dessen Einfluss auf das Wachstum zu berücksichtigen. Wie bereits zuvor ausgeführt, wird in Abbildung 106 die Störung der prognostizierten Entwicklung der Passagierzahlen (links) und Flugbewegungen infolge bestehender Kapazitätsschranken gezeigt. In Ermangelung ausreichender Daten wurden in der vorliegenden Studie die Kapazitätsgrenzen pragmatisch gesetzt, wobei der potenzielle Einfluss neuer Infrastruktureinheiten (z.B. neue oder erweiterte Terminalanlagen) abgewogen wurde.

In Abbildung 107 ist diesbezüglich das Antwortverhalten über einen Zeitverlauf von 50 Jahren nach dem Referenzjahr dargestellt. Es sind dabei folgende Merkmale herauszuarbeiten: Erkennbar werden die Auswirkungen der Kapazitätsgrenzen (Passagiere) ab dem Jahr 2020, die sich, trotz der Erhöhung des Wachstumsgradienten der Passagierzahlen, als ein wesentlicher Treiber der zunehmenden Verflachung der NPV Potenziale erweisen (Abbildung 107 links). Bei einer Verlangsamung des Wachstums tritt

dieser Effekt erst später, im Gleichklang mit der später erreichten Kapazitätsgrenze, in Erscheinung.



**Abbildung 107: Überprüfung der Ergebnisstabilität bzgl. Delta NPV mit Hilfe einer Sensitivitätsbetrachtung veränderter Flugbewegungen und Passagierströme zum Referenzsystem nach dem Referenzjahr (2010) [Quelle: Eigene Darstellung]**

Bei einem ansonsten unveränderten System (Referenzflughafen) führt ein Aufschlag zum Passagierwachstum um 1 % nach dem Referenzjahr (2010), d.h. hier absolut von 3,3 % auf 4,3 % pro Jahr, zu einer Zunahme des NPV von durchschnittlich 1,5 %. Dabei werden anfänglich größere Vorteile als zum Ende des Betrachtungszeitraums realisiert, was v.a. eine Folge der oben beschriebenen Kapazitätsprobleme ist. Umgekehrt würde ein Abschlag zum vom Passagierwachstum um 1 % ( $\rightarrow$  2,3 % pro Jahr) zu einem geringeren NPV um durchschnittlich 2,2 % führen. Auch bei einer Wachstumsbremse werden die Auswirkungen der Kapazitätsgrenzen sichtbar: So werden über den Zeitverlauf die Verlustmargen gegenüber der Referenz geringer, da das Wachstum beim Referenzsystem durch die Kapazitätsgrenzen gehemmt wird und sich somit der relative Abstand zwischen den Nettobarwerten verkleinert. Jedoch sind bei einem verkleinerten Passagierwachstum die Potenzialverluste höher als bei höherem Passagierwachstum die Potenzialgewinne; so ist zu erwarten, dass bei einem um 2 % gebremsten Wachstum ( $\rightarrow$  1,3 % pro Jahr), der über den Bewertungszeitraum entstehende durchschnittliche NPV-Verlust zum Referenzsystem bei 7,4 % liegt. Bei einer Veränderung der Flugbewegungen ist eine ähnliche Interpretation zu vollziehen, wie beim Passagierwachstum. Grundsätzlich ist jedoch das Kapazitätsproblem bei den Flugbewegungen in der vorliegenden Studie weniger eminent als beim Passagierwachstum; beim Referenzflughafen ist davon auszugehen, dass das Bewegungswachstum nicht gehemmt wird. Jedoch würde ein weiterer Anstieg von bereits 1 % ( $\rightarrow$  2,3 % pro Jahr) dazu führen, dass die Kapazitätsgrenze im Jahr 2040 erreicht wird. Dieses zeigt sich in einer zunehmenden Verflachung der NPV-Potenziale ab dem entsprechenden Jahr (Abbildung 107 rechts).

#### II - 1.8.4 *Monetäre Bewertung mit der CBA<sub>airport</sub>*

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Bewertung von zwei ausgewählten Technologiesystemen, GroLaS und die Indoor-Navigation, aus dem Projekt Airport 2030 zusammengefasst.

##### II - 1.8.4.1 *Konzept des Ground-based Landing Gear Systems (GroLaS)*

Das System GroLaS (Ground-based Landing Gear System), Entwurf der Firma mb+Partner, wurde bezüglich seiner Eignung für den Betrieb am Flughafen Hamburg bewertet. Bei GROLaS handelt es sich um ein System, das den fahrwerkslosen Entwurf von zukünftigen Luftfahrzeugen ermöglicht, in dem alle für den bodengebundenen Manövrierbetrieb erforderlichen Komponenten flughafenseitig zur Verfügung gestellt werden. Es wird hier keine Diskussion bzgl. der Machbarkeit geführt, vielmehr a priori die Gewährleistung der Verfügbarkeit, Integration und einwandfreien Funktionalität auf Grundlage der Angaben des Entwicklungsunternehmens vorausgesetzt. Das Gutachten beschränkt sich auf die Fragestellung, inwieweit die Einführung des Systems am Flughafen Hamburg auf dessen wirtschaftliche Bilanz wirkt. Grundsätzlich ist jedoch zu erwarten, dass durch den Verzicht der Installation des Fahrwerks am Luftfahrzeug große Vorteile beim wirtschaftlichen und ökologischen Luftfahrzeugbetrieb induziert werden, die sich nicht nur, infolge der geringeren Betriebsleermasse, auf eine verbesserte spezifische Reichweite auswirken, sondern darüber hinaus den Wartungs- und Instandhaltungsaufwand reduzieren. Eine verringerte Komplexität des Gesamtentwurfs impliziert zudem Vorteile für den Hersteller, der den geringeren Aufwand in erster Linie durch eine zu erwartende Abnahme der Recurring Costs ganz oder teilweise auf den Flugzeugpreis transferieren kann, was die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit des Produktes steigert. Dieser vor allem den Luftfahrzeugbetreibern und -herstellern zuzurechnende Nutzen wird in den nachfolgenden Ausführungen nicht betrachtet – es wird ausschließlich die Perspektive des Flughafens Hamburg eingenommen und die globale Systemintegration (Installation an anderen Flughäfen mit hoher Durchdringung) angenommen.

##### II - 1.8.4.2 *Kosten für die Installation von GroLaS am Flughafen Hamburg*

Auf der Grundlage der Angaben des Ingenieurbüros mb+Partner werden nachfolgend die vorrangigen operativen, technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen bei der Einführung von GroLaS behandelt. Ihre Kenntnis ist insofern notwendig, da daraus die erforderlichen Eingangswerte sowohl für die Zentralapplikation zur Kosten-Nutzen-Rechnung CBA<sub>airport</sub> als auch für die sie bedingenden Feeder-Applikationen (z.B. Kapazitätsberechnungen) direkt entspringen bzw. implizit abgeleitet werden.

Die unabdingbaren Schritte zur Installation von GroLaS am Flughafen Hamburg bestehen zunächst in einer Anpassung der vorhandenen Infrastruktur sowohl zur Aufnahme des Systems als auch der von ihm genutzten Luftfahrzeuge. Bei letzteren erweist sich insbesondere der Einsatz von Großraumrumpflugzeugen (wie z.B. A380 oder zukünftige BWB) am Flughafen Hamburg als große Herausforderungen für die Infrastrukturanpassung

und den ungestörten Betrieb, da vor allem die für den Bodenbetrieb erforderlichen Freiflächen nicht uneingeschränkt zur Verfügung stehen (vgl. [49]). Diese technische und teils auch regulative Beschränkung wird zunächst nicht tiefer betrachtet, da GroLaS einerseits nicht ausschließlich für Flugzeuge dieser Größenordnung genutzt werden kann bzw. soll, wenngleich die ersten Konzeptionen auf Basis dieses Typus wegen entwurfsspezifischer Vorteile gegenüber kleineren Maschinen erfolgte, andererseits der Autor die Auffassung vertritt, dass die o.g. potenziellen Infrastrukturprobleme gelöst werden können.

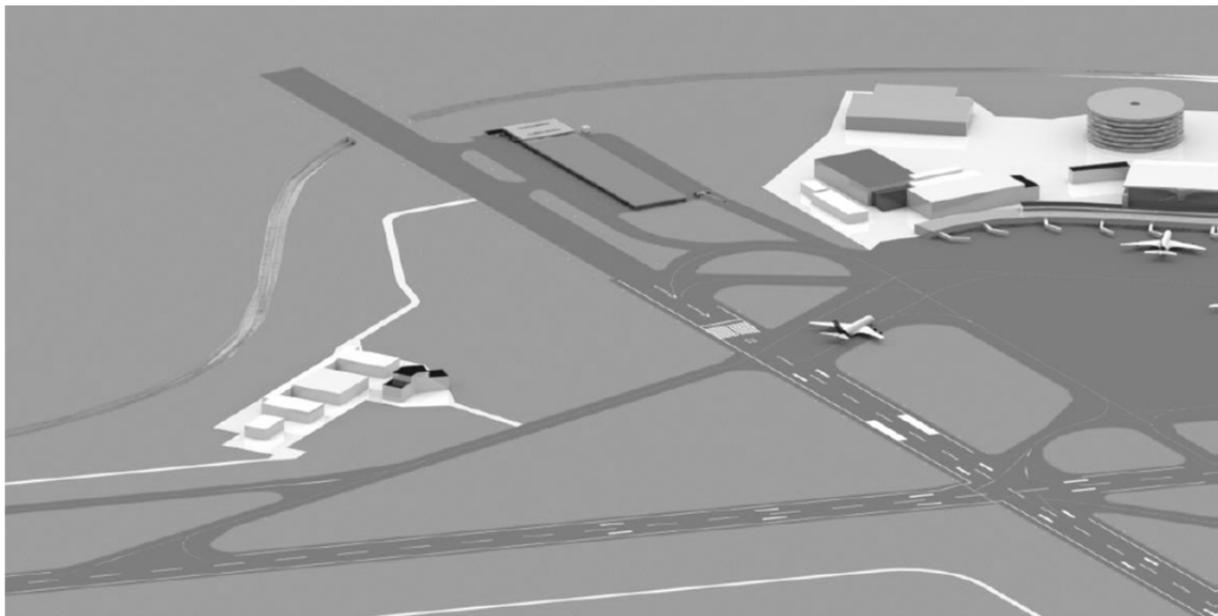
Vielmehr ist die Frage in den Vordergrund zu rücken, ob und ab wann sich GroLaS am Flughafen Hamburg amortisiert; dieses erfolgt u.a. mit Hilfe einer rückwärtigen Berechnung: Dabei wird durch eine Variation wesentlicher Parameter, wie z.B. der Anteil der GroLaS-basierten Luftfahrzeuge am Gesamtverkehr oder die Höhe zusätzlich oder solidarisch erhobener Landeentgelte, die Ausgabe des Wirtschaftlichkeitsindikators NBW überprüft und darüber hinaus die Forderung erhoben, dass dieser mit der Referenz (nicht geänderter Flughafen) in Parität gebracht wird. Grundsätzlich werden dabei die in diesem Projekt erarbeiteten Verkehrsszenarien gewürdigt, wobei in der vorliegenden Abhandlung auch das Wachstum parametrisch erfasst werden soll, damit dieses als eine weitere Indikation zur Entscheidungshilfe für oder gegen eine Investition in GroLaS dient. Es wird darüber hinaus eine staatliche Subvention zur Investition erörtert, da der Betrieb von GroLaS einen gesamtgesellschaftlichen Vorteil geringer Emissionseinträge (Schall und Schadstoffe) sowohl lokal als auch global verspricht.

Gemäß den Ausführungen in [49] sind folgende Maßnahmen für die flughafenseitige Installation von GroLaS am Flughafen zu ergreifen:

- *Landebahnseitige Installationen inklusive Antriebssystem, elektromagnetische Führung, Kabel, Erdarbeiten, Spalt- und Grabenabdeckungen etc.*
- *Energiesystem*
- *Kühlsystem inklusive Kühltürme*
- *Hangars für die Bodenfahrwerke an beiden Enden der ausgestatteten Runway*
- *Wartungshalle für die Bodenfahrwerke*
- *(Zubringertaxiways zwischen Hallen und Runway)*
- *(Synchronisationsstrecke vor der Bahnschwelle der Runway)*
- *Bürogebäude und Rechenzentrum*
- *Kontrolleinrichtung für GroLaS im Kontrollturm*
- *ggf. Notfallsystem auf einer anderen Bahn des gleichen Flughafens*

Um den sicheren Luftfahrtbetrieb auch bei einer unerwarteten Sperrung des (Haupt-) Flughafens zu gewährleisten, ist ein Ausweichflughafen mit GroLaS notwendig, was die Durchführung der o.g. Installationsmaßnahmen in verringertem Umfang auch an diesem notwendig macht. Dieses wird dann erforderlich, wenn in einem Radius von 550 km um den Zielflughafen kein weiterer mit GroLaS ausgerüsteter Flughafen zur Verfügung steht ([49]). Die entsprechenden Investitions- und Betriebskosten müssen dann im ungünstigsten Fall vollständig vom Betreiber des Hauptflughafens aufgebracht werden. Ist die Durchdringung von GroLaS soweit fortgeschritten, dass die primär nutzenden Flughäfen so nahe

beieinanderliegen, dass sie die Ausweichregelung erfüllen, so verbleiben die Kosten ausschließlich auf der Installation und des Betriebs eines Systems an diesen Flughäfen begrenzt. Ergänzend ist der Sachverhalt zu betrachten, dass ein Ausweichflughafen über seine eigentliche Funktionalität der flugbetrieblichen Redundanz hinaus dass fremdfinanzierte GroLa System bis zu einem bestimmten Grad für eigene Verkehrsabwicklungen nutzen kann; allerdings ist dabei zu berücksichtigen, dass im Extremfall das System die Flugbewegungen beider Flughäfen gleichzeitig bewältigen muss.



**Abbildung 108: GroLaS am Flughafen Hamburg: Blickwinkel Süd-Ost auf den Anfang der Piste 23 mit Synchronisationsstrecke und Bodenfahrzeughangar (Bildmitte oben) [Quelle: mb+Partner]**

Für den Flughafen Hamburg ergibt sich folgendes Bild: Der Flughafen Hamburg wurde in einer ersten Studie [49] aufgrund seiner zu erwartenden Verkehrsentwicklung nicht als Kategorie 1 Flughafen (Hauptflughafen) zur Installation von GroLaS identifiziert, was sich u.a. auch in seiner primären Funktion als Zubringerflughafen und der damit verbundenen Tatsache eines mit Kurz-/ Mittelstreckenmaschinen durchsetztem Flottenmix begründet. Die Nutzung von GroLaS auch für Maschinen dieser Größenordnung wurde dabei erst sekundär berücksichtigt, was dieses, wie oben bereits erwähnt, in Zukunft aber nicht ausschließt. Die Systemauslegung von GroLaS erfolgte auf Basis des schwersten Linienfliegers (A380), weshalb das System auch kleinere Flugzeuge aufnehmen kann, was im Rahmen einer weiteren Bodenfahrwerksklasse berücksichtigt wurde. Ausgehend von den ersten Studienergebnissen [49], in der unterschiedliche Fallbeispiele der globalen Durchdringung von GroLaS analysiert wurden, werden jedoch in allen Einföhrungsszenarien die Flughäfen Frankfurt und Amsterdam als potenzielle Erstbetreiber aufgeföhrt. Dieses ist hier insofern von Relevanz, da der Flughafen Hamburg mit einer Großkreisentfernung von 223 nm vom Flughafen Frankfurt und 205 nm vom Flughafen Amsterdam die Streckenforderung eines

Ausweichflughafens erfüllt. Inwieweit beide den Kapazitätsanforderungen für den Extremfall (sämtliche GroLaS-Flugbewegungen von Hamburg zum Ausweichflughafen) genügen, wird hier nicht beantwortet. Jedoch erlaubt die Möglichkeit einer Aufteilung der potenziellen Ausweichflüge zwischen Amsterdam und Frankfurt a priori die Schlussfolgerung, dass wohl keine kapazitätslimitierenden Einschränkungen zu erwarten sind.

Andererseits liegen Frankfurt und Amsterdam mit einer Großkreisentfernung von 197 nm so nahe beieinander, dass sie gegenseitig als Ausweichflughäfen genutzt werden können und somit ein zusätzlicher Ausweichflughafen, z. B. durch die Installation des GroLaS am Flughafen Hamburg, zunächst nicht erforderlich erscheint. Ausschließlich für den Fall, dass das GroLaS entweder in Amsterdam oder in Frankfurt die vollständige Abwicklung der zusätzlichen GroLaS-Flugbewegungen des jeweilig gesperrten Flughafens nicht leisten kann, ist die Einrichtung eines weiteren GroLaS-kompatiblen Flughafens erforderlich. mb+Partner sehen jedoch in 2 bzw. 3 ihrer 4 Entwicklungsszenarien die Einbindung der Flughäfen München (Szenario 2 + 3), London Heathrow und Paris (Szenario 1 + 2 +3) in das GroLaS-Verbundnetz vor, die neben ihrer Hauptfunktion als Ausweichflughäfen angefliegen werden können. Der Flughafen Hamburg kommt somit als Ausweichflughafen und der damit verbundenen möglichen Entlastung von den Investitionskosten nicht in Betracht, weshalb zu erwarten ist, dass der Betreiber diese vollständig selbst aufbringen muss.

Die Höhe der Investitionskosten für GroLaS richtet sich neben der Anschaffung und Installation des Primärsystems auch nach der Anzahl der erforderlichen Bodenfahrwerke, die sich wiederum als Funktion aus dem Anteil GroLaS-basierter Luftfahrzeuge am Gesamtverkehrsaufkommen ergibt und somit zeitvariabel ist. Allgemein lassen sich jedoch zunächst folgende Investitionen pro Systemeinheit (Geldwert 2008) am Flughafen Hamburg benennen (aus CBA mb+Partner):

- |   |            |                    |
|---|------------|--------------------|
| • <b>Anschaffungskosten des Primärsystems GroLaS:</b> | <b>211</b> | <b>Millionen €</b> |
| • <b>Installationskosten:</b>                         | <b>72</b>  | <b>Millionen €</b> |
| • <b>Anschaffungskosten <u>pro</u> Bodenfahrwerk:</b> | <b>5</b>   | <b>Millionen €</b> |

**Tabelle 31: Standardgruppen: Grobe Aufschlüsselung der Anschaffungskosten (Stand und Geldwert 2008) des Primärsystems GROLaS [Quelle: mb+partner / CBA]**

<b>GroLaS (Primärsystem)</b>		<b>211 Mio. €</b>
Energiesystem		75 Mio. €
Schlitten		125 Mio. €
Hauptantrieb		105 Mio. €
	Energieversorgung	65 Mio. €
	Motor	30 Mio. €
	Kühlung	10 Mio. €
Struktur		5 Mio. €
Führung		15 Mio. €
<b>Wagen</b>		<b>3 Mio. €</b>
Querantrieb		2,5 Mio. €
	Energieversorgung	2 Mio. €
	Motor	0,1 Mio. €
	Kühlung	0,1 Mio. €
Struktur		0,2 Mio. €
Führung		0,1 Mio. €
<b>Bahnfahrwerk</b>		<b>8 Mio. €</b>
Azimutantrieb		0,5 Mio. €
	Energieversorgung	0,2 Mio. €
	Motor	0,2 Mio. €
	Kühlung	0,1 Mio. €
Struktur		1,5 Mio. €
Führung		6 Mio. €

In Abstimmung mit dem Ingenieurbüro mb+Partner empfiehlt sich zur Einführung von GroLaS am Flughafen Hamburg das Jahr 2045, da zu diesem Zeitpunkt eine international starke Durchdringung von GroLaS mit insgesamt 49 Hauptflughäfen zugrunde gelegt wird, wobei in Deutschland als GroLaS-basierte Drehkreuze München und Frankfurt genannt werden. Dieser Zeitrahmen ist aus zwei Gesichtspunkten plausibel: Zum einen werden Spoke-Flughäfen, wie Hamburg, mit höchster Wahrscheinlichkeit erst nach der Installation von GroLaS an Hauptflughäfen priorisiert, zum anderen erübrigt sich die Einrichtung eines GroLaS unterstützenden Ausweichflughafens für Hamburg, was den Finanzierungsaufwand entspannt.

Zur Vervollständigung der Bewertung werden die Auswirkungen der Installation eines 2. GroLa Systems am Flughafen Hamburg betrachtet, d.h. die kreuzende Piste wird ebenfalls modifiziert. Grundsätzlich reduziert sich dabei die Investition um die Kosten der Energieversorgungseinheit, was der Annahme zugrunde liegt, dass bei voneinander

abhängigen Bahnen, GroLaS in der Regel nicht parallel betrieben wird, zumindest nicht unter Vollast. Es ergeben sich somit folgende Aufwendungen für ein Zweitsystem:

- **Anschaffungskosten des Sekundärsystems:** **135 Millionen €**
- **Installationskosten (Bahnmodifikation):** **45 Millionen €**
- **Kosten für die Installation des Kreuzungssystems:** **unbekannt**

Die Anzahl der Bodenfahrzeuge bleibt davon zunächst unberührt, da es sich bei der Modifikation der kreuzenden Piste weniger um eine kapazitätssteigernde Maßnahme als vielmehr um eine operative Befriedigung handelt, der 2. Hauptwindkomponente zu entsprechen. Allerdings wird von mb+Partner davon ausgegangen, dass die maximal zulässige Seitenwindkomponente eines GroLaS-Flugzeugs erhöht wird, weshalb ein 2. System höchstwahrscheinlich nicht notwendig wird.

Es ergeben sich zusammenfassend die in Tabelle 32 angegebenen Konstellationen der Investitionskosten ohne Phasenverschiebung (operativer Eintritt), die als Eingangswerte in die Applikation CBA<sub>airport</sub> überführt werden. Die operativen Kosten sind in der konzeptionellen Phase und insbesondere für ein System ohne Erfahrungswerte sehr schwer zu ermitteln. So werden überschlägig, auf der Grundlage der Angaben von mb+Partner (Abbildung 109), jährliche Instandhaltungskosten von etwa 3 % der Investitionssumme erwartet, die in Erweiterung zu Tabelle 32 in Tabelle 33 aufgeführt sind.

**Tabelle 32: Investitionskosten für das Primär- und Sekundärsystem parametrisiert nach der Anzahl an Bodenfahrzeugen**

<b>Primärsystem</b>	Mil. €	280		
Bodenfahrzeuge	Anzahl	10	20	30
	Mill. €	50	100	150
<b>Investition I</b>	<b>Mill. €</b>	<b>330</b>	<b>380</b>	<b>430</b>
<b>Optional mit Sekundärsystem (Piste 2)</b>				
mit Sekundärsystem	Mill. €	180		
<b>Investition II</b>	<b>Mill. €</b>	<b>510</b>	<b>560</b>	<b>610</b>

**Tabelle 33: Jährliche Instandhaltungskosten in Abhängigkeit der Investitionskosten und Anzahl an Bodenfahrzeugen**

<b>Instandhaltungskosten</b>	3% der Investitionskosten <b>pro JAHR</b>			
Bodenfahrzeuge	Anzahl	10	20	30
für Investition I	<b>Mill.€ / Jahr</b>	<b>9,9</b>	<b>11,4</b>	<b>12,9</b>
für Investition II	<b>Mill. € / Jahr</b>	<b>15,3</b>	<b>16,8</b>	<b>18,3</b>

GroLaS arbeitet mit einem rekuperativen Energiesystem, weshalb der Strombedarf nicht vollständig aus einer Fremdquelle bezogen wird. Bei einem angenommenen Wirkungsgrad von ca. 80% des Rekuperatorsystems sind somit etwa 20 % Fremdenergie einzuspeisen, was bei einer Stromaufnahme von 8700 kW pro Zyklus ungefähr 1740 kW entspricht. In der

Studie wird der Zyklus mit 5 Minuten angenommen und dadurch mit einem fremdbezogenen Stromverbrauch von **145 kWh pro Zyklus** gerechnet.

<b>Cost of Operation</b>	
<b>Maintenance</b>	<b>Percent of investment</b>
1. GroLaS (Schlitten, Wagen)	2,50%
2. Notfallsystem GroLaS	2,50%
3. Ausweichflughafen	4,00%
4. GroLas (Bodenfahrwerk)	5,50%
5. Wartung einmaliger Kosten (Energiesystem, Gebäude, Infrastruktur etc.)	0,75%

**Abbildung 109: Angaben von mb+Partner bzgl. der zu erwartenden Instandhaltungskosten pro Jahr in Abhängigkeit der Investitionskosten des GroLaSystems**

### II - 1.8.4.3 Monetäre Bewertung von GroLaS für den Flughafen Hamburg

GroLaS wird nun in den Referenzflughafen integriert und es werden entsprechende Auswirkungen auf die gesamt-ökonomische Entwicklung des Flughafens untersucht. Die Implementierung in die CBA<sub>airport</sub> und Ergebnisinterpretation erfolgt zunächst für das Basissystem (1 Piste + 10 Bodenfahrzeuge) ohne Ausweichflughafen; die ökonomischen Systemantworten für alle weiteren Installationsmöglichkeiten werden hier ausschließlich tabellarisch zusammengefasst und kurz bewertet. Die Systemanalyse wird für eine Betriebsaufnahme im Jahr 2045 vollzogen, was nach Gesprächen mit mb+Partner eher wahrscheinlich ist als 2030. Es wird der NPV zum Ende des Betrachtungszeitraums im Jahr 2070 herangezogen. Dazu sind als Ergänzungen zum Referenzflughafen in CBA<sub>airport</sub> zunächst die Investitionsmaßnahme und die Instandhaltungskosten zu definieren. Das System wurde dabei in der CBA<sub>airport</sub> der Standard Gruppe „Support facilities others“ zugeordnet (Abbildung 110).

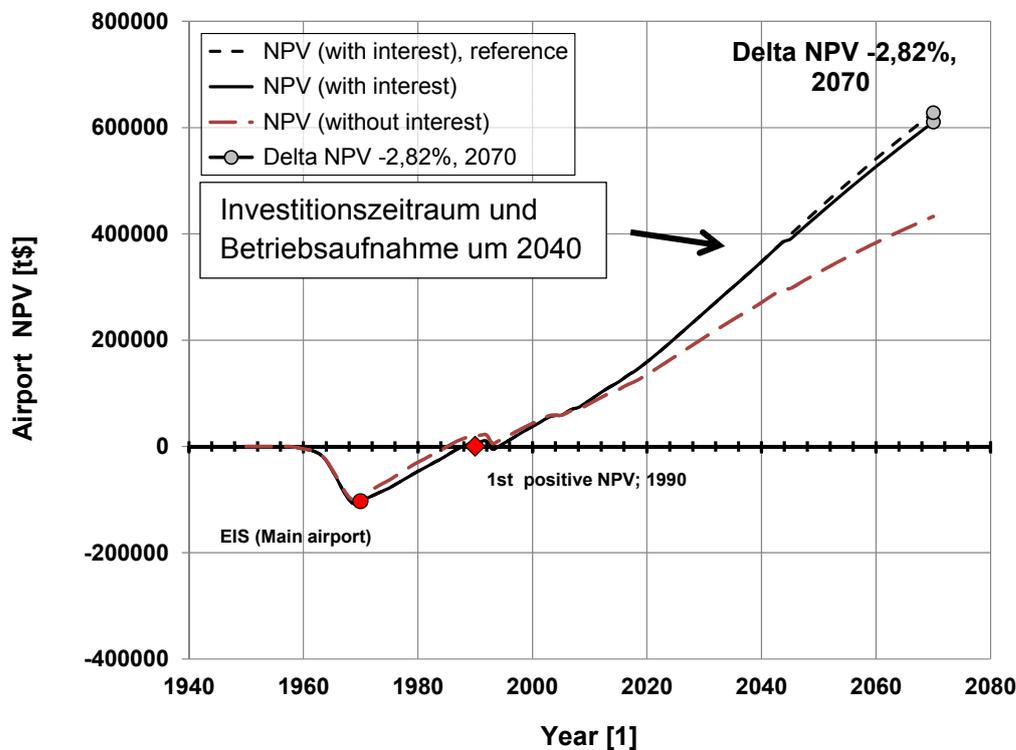
Studien von mb+Partner zeigen, dass der Einsatz von GroLaS keine erkennbaren Auswirkungen auf das Kapazitätsmuster des Flughafens haben wird, solange der Anteil der GroLaS-Flugzeuge unterhalb eines Durchdringungsgrades von 40 % der Gesamtflotte verbleibt. Davon wird in der vorliegenden Studie ausgegangen, weshalb keine Veränderung der Systemkapazitäten angenommen wird. Auch die restlichen Systemreferenzparameter bleiben durch die Installation unberührt, weshalb sie sich zu den Ausführungen in Kapitel II - 1.8.3.2 nicht unterscheiden. Die Berechnungen zeigen (Abbildung 111), dass die Basisinvestition (Primärsystem + 10 Bodenfahrzeuge) um 2045 zu einer Reduktion des Nettobarwerts nach 25 Jahren (2070) von 2,8 % führt; absolut handelt es sich um dessen Verringerung um 17,7 Mill. \$. In Tabelle 34 sind die NPV-Ergebnisse angegeben, die bei einer Veränderung der Gesamtinvestitionssumme nach Tabelle 32 und Tabelle 33 zu erwarten sind. Dieses stellt nur einen Auszug möglicher Investitionsszenarien dar, wobei insbesondere eine zeitliche Staffelung der Anschaffung der Bodenfahrzeuge, entsprechend der Nachfrage, erfolgen sollte.

Project description	Costs related to airport?	EIS [year]	EOL [year]	CAPEX [m\$]	Maintenance standard group	Investments distribution					
						-2	-1	EIS	1	2	OK?
GROLAS Primär	yes	2045	2070	280,0	Support facilities others	5%	20%	70%	5%	0%	✓
GROLAS Bodenfahrzeuge (10)	yes	2045	2070	50,0	Support facilities others	5%	20%	70%	5%	0%	✓

	Maintenance costs % of investment				
	Year 1-5	Year 6-10	Year 11-15	Year 16-20	Year 21-XX
Support facilities others [%]	3,00%	3,00%	3,00%	3,00%	3,00%

Abbildung 110: Erweiterte Angaben zur Implementierung von GroLaS (Primärsystem mit 10 Bodenfahrzeugen) in CBA<sub>airport</sub> [Quelle: Eigene Darstellung]



by CBA<sub>airport</sub>

Abbildung 111: Auswirkungen der Investition in GroLaS (Primärsystem mit 10 Bodenfahrzeugen) am Flughafen Hamburg im Jahr 2045 ohne Berücksichtigung von Einnahmen durch zusätzliche Landeentgelte [Quelle: Eigene Darstellung]

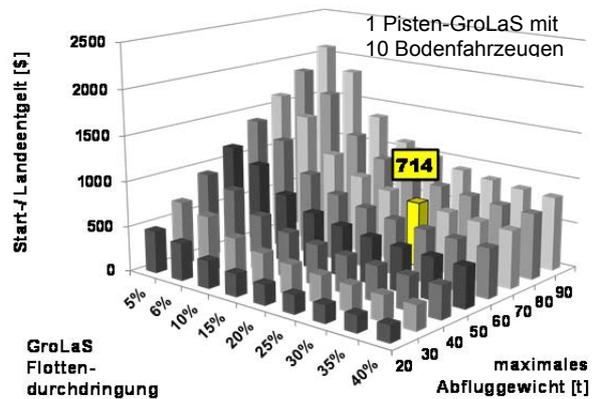
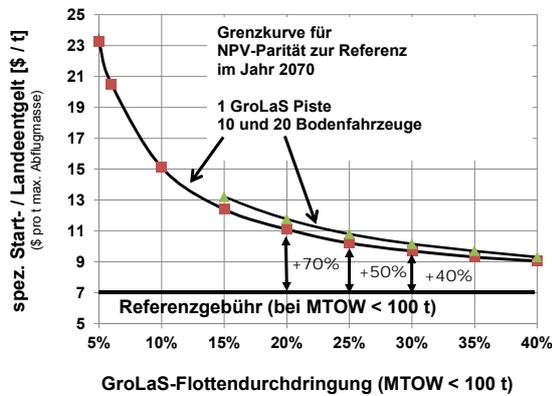
Tabelle 34: Auswirkungen auf den NPV im Jahr 2070, bei einer Investition in das Primär- und Sekundärsystem im Jahr 2045, parametrisiert nach der Anzahl an Bodenfahrzeugen und ohne Berücksichtigung von Einnahmen durch zusätzliche Landeentgelte [Quelle: Eigene Darstellung]

Primärsystem	ΔNPV (2070)	-2,4% (-15,0 Mill. \$)		
+ Bodenfahrzeuge	Anzahl	10	20	30
= Investition I	ΔNPV (2070) (absolut)	-2,8% (-17,7 Mill. \$)	-3,3% (-20,4 Mill. \$)	-3,7% (-23,1 Mill. \$)

Optional mit Sekundärsystem (Piste 2)				
= Investition II	$\Delta$ NPV (2070) (absolut)	-4,4% (-27,4 Mill. \$)	-4,8% (-30,1 Mill. \$)	-5,2% (-32,8 Mill. \$)

Diese Negativbilanz kann durch eine Erhöhung der Gebühren kompensiert werden: Dabei ist entweder eine typenübergreifende ( $\rightarrow$  Solidaritätsprinzip) oder typenspezifische (z.B. GroLaS-Flieger) Anhebung der Start- und Landeentgelte in Erwägung zu ziehen; letztere wird hier untersucht. Nach Absprache mit mb+Partner erweist sich als Einführungsszenario am Flughafen Hamburg jenes als sinnvoll, in dem die GroLaS-Technologie auf Kurz-/Mittelstrecken-Flugzeuge angewendet wird und ein hoher Durchdringungsgrad bereits zu erwarten ist – dieses wäre um 2045 möglich. Nachfolgend werden kurz, auf der Grundlage der prognostizierten Verkehrsentwicklung, die Auswirkungen der Flottendurchdringung dieser Maschinenklasse auf die erforderlichen Landeentgelte, mit Bezug auf Abbildung 112, besprochen: Es wurde mit Hilfe einer Parameteranalyse untersucht, welche Kombinationen aus Start-/Landeentgelten und Flottendurchdringung eine NPV-Parität nach 25 Jahren ermöglichen. Für das Basisszenario (Referenz) ergeben sich entsprechend Abbildung 112 Grenzkurven, die in Abhängigkeit der GroLaS-Flottendurchdringung, die minimalen gewichtsabhängigen Start-/ Landeentgelte (t MTOW) für diese Maschinen ausgibt. Die Berechnungen erfolgten mit dem Flugzeugtyp A320, A321 und mit den damit verbundenen flugzeugspezifischen Parametern zur Ermittlung der verbleibenden Gebühren (z.B. Emissionsgebühren etc.). Daraus folgt, dass die Gesamtbilanz nicht ausschließlich durch die Investitions- und Betriebskosten von GroLaS, sondern auch durch eine grundsätzlich sich verändernde Einnahmesituation infolge einer sich verändernden GroLaS-Flottendurchdringung getrieben wird. Dieses ist bei einer vertieften Analyse zu berücksichtigen, welche aber nicht Bestandteil der vorliegenden Abhandlung ist.

Grundsätzlich zeigt sich eine anfänglich deutliche Reduktion der flugzeugspezifischen Gebühren mit einer steigenden Flottendurchdringung, die zunehmend verflacht und sich theoretisch dem Grenzwert null annähert (Potenzfunktion). Der potenzielle Kurvenverlauf spiegelt dabei die hier zugrunde gelegte Wachstumskurve der Flugbewegungen wieder, was den Sachverhalt nur bedingt richtig wiedergibt: Eine Veränderung des Flottenmix steht in der Erwartung, dass sich die Anzahl der Flugbewegungen entsprechend den veränderten Kapazitäten der Maschinen erhöht bzw. verringert (bei einer unveränderten Passagiernachfrage); z.B. sind bei gleichbleibender Transportarbeit beim Einsatz großer Maschinen weniger Flugzeuge erforderlich. Unter diesen Voraussetzungen ist in Hamburg, bei einer Investition in ein 1-Pisten-GroLaS mit 10 Bodenfahrzeugen, die gewichtsabhängige Landegebühr für GroLaS-Kurzstreckenflugzeuge um 50 % zu erhöhen, wenn deren Flottendurchdringung bei 25 % liegt. Entsprechend den Diagrammen in Abbildung 112 wäre bei einer Flottendurchdringung von 20 % ein Anstieg der Entgelte um 70% und bei einem Anteil von 30 % ein Anstieg von 40 % zu erwarten. In absoluten Zahlen würde dies bei einer Flottendurchdringung von 25 % bedeuten, dass z.B. für ein Flugzeug mit einer maximalen Abflugmasse von 70 t das Start-/Landeentgelt bei 714 \$ (Geldwert 2010) liegt.



**Abbildung 112: Erforderliche Start-/Landeentgelte von GroLaS-Kurzstreckenmaschinen am Flughafen Hamburg, zur Refinanzierung von GroLaS über einen Zeitraum von 25 Jahren [Quelle: Eigene Darstellung]**

In Tabelle 35 sind beispielhaft die Landeentgelte für Kurzstreckenflugzeuge der A321-Kategorie ( $\approx 85$  t MTOW) zusammengetragen, die bei unterschiedlichen Investitionsszenarien das Zielkriterium eines Delta NPV von 0 nach 25 Jahren erfüllen. Die Investitionsszenarien betreffen sowohl die Anzahl der Bodenfahrzeuge als auch die Option der GroLaS-Installation auf der Sekundärpiste (späterer EIS: 2060!). Die resultierenden Landeentgelte liegen zwischen 800 \$ und 900 \$.

**Tabelle 35: Beispiel für die erforderlichen Landeentgelte eines A321GROLAS (Geldwert 2010) zur Kompensation der NPV-Reduktion infolge der GroLaS Investition bei einem Flottenanteil von 25 % [Quelle: Eigene Darstellung]**

Primärsystem	$\Delta$ NPV (2070)	Ziel $\rightarrow$ 0,0%		
+ Bodenfahrzeuge	Anzahl	10	20	30
<b>Erforderliches Landeentgelt</b>	A321GROLAS	$\approx 800$ \$	$\approx 825$ \$	$\approx 850$ \$
<b>+ optional mit Sekundärsystem (Piste 2) ab 2060 mit einem Investitionsvolumen von 180 Millionen \$</b>				
<b>Erforderliches Landeentgelt</b>	A321GROLAS	$\approx 850$ \$	$\approx 876$ \$	$\approx 902$ \$

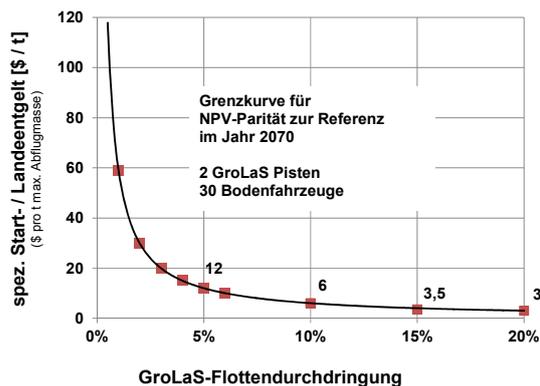
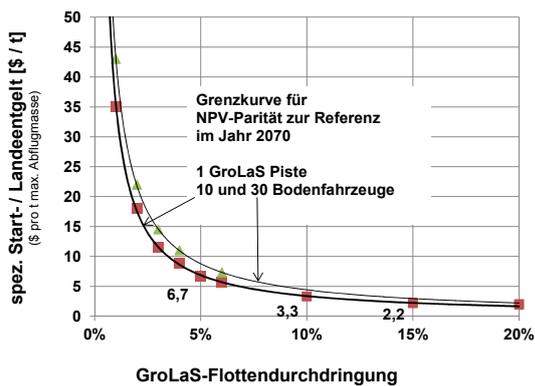
Als weiterer Untersuchungsfall wurden als GroLaS-Flieger ausschließlich alle in den vorliegenden Airport2030-Verkehrsszenarien ab 2030 genannten Großraumrumpflugzeuge berücksichtigt: Es handelt sich dabei um die Boeing B777 und den Airbus A380, deren Anteile an der Gesamtflotte bzw. den Flugbewegungen im Jahr 2030 mit 0,5 % bzw. 0,3 % prognostiziert werden; somit liegt der Anteil dieser Maschinen an der Gesamtflotte des Flughafens Hamburgs unter 1 %! In Tabelle 36 sind die potenziellen Landeentgelte für diese Flugzeuge aufgeführt, die in Abhängigkeit des Investitionsvorhabens (u.a. Zahl der Bodenfahrzeuge, Primär-/Sekundärsystem) über mindestens 25 Jahre entrichtet werden müssen, um die NPV-Parität zum Referenzsystem herzustellen. Ergänzend sind in Abbildung 113 die minimalen Start-/Landeentgelte bei einer veränderten Flottendurchdringung von Großraumrumpfflugzeugen, spezifiziert auf das maximale

Abfluggewicht, dargestellt. Der Referenz- bzw. Vergleichswert des Landeentgelts für konventionelle Maschinen gleichen Typs liegt bei 2 \$ pro Tonne.

**Tabelle 36: Erforderliches Landeentgelt (Geldwert 2010) zur Kompensation des NPV-Nachteils infolge der GroLaS Investition bei einem Flottenanteil von 0,3 % A380 und von 0,5 % B777 Flugzeugen als stellvertretende GroLaS-Flieger [Quelle: Eigene Darstellung]**

Primärsystem	$\Delta$ NPV (2070)	0,0%		
+ Bodenfahrzeuge	Anzahl	10	20	30
Erforderliches Landeentgelt	A380GROLAS	≈ 16800 \$	≈ 19000 \$	≈ 21200 \$
	B777GROLAS	≈ 7900 \$	≈ 8950 \$	≈ 10000 \$
Optional mit Sekundärsystem (Piste 2)				
Erforderliches Landeentgelt	A380GROLAS	≈ 25200 \$	≈ 27440 \$	≈ 29680 \$
	B777GROLAS	≈ 11840 \$	≈ 12890 \$	≈ 13980 \$

Eine Würdigung der Höhe dieser Entgelte kann in dieser Studie nicht vollzogen werden, da dazu die ökonomische Bilanz um den Luftfahrzeugbetreiber erweitert werden muss. Es ist somit der leistungsspezifische bzw. wirtschaftliche Vorteil von Luftfahrzeugen ohne Fahrwerk, dem Nachteil der höheren Landeentgelte gegenüberzustellen, um eine gesamtwirtschaftliche Empfehlung für oder gegen das System auszusprechen. Grundsätzlich ist jedoch festzuhalten, dass am Flughafen Hamburg nur ein kombinierter Verkehr aus GroLaS-Kurz- und Langstreckenflugzeugen sinnvoll erscheint bzw. das GroLaS-Langstreckenmaschinen das System in Hamburg nur ergänzend zu den Kurzstreckenmaschinen (siehe Ausführungen oben) nutzen. Dann würden die Landeentgelte auch für Großraumflugzeuge (Tabelle 36) merklich geringer ausfallen.



**Abbildung 113: Minimale Start-/ Landeentgelte für GroLaS-Langstreckenflugzeuge am Flughafen Hamburg zur Kompensation der Investitions- und Betriebskosten (Geldwert 2010), in Abhängigkeit von der Flottendurchdringung bei einer (links) und bei zwei (rechts) GroLaS-Pisten. Die Berechnungen erfolgt auf Basis der B777 Charakteristik! GroLaS-Kurzstreckenflugzeuge wurden in diesem Szenario nicht betrieben! [Quelle: Eigene Darstellung]**

#### II - 1.8.4.4 Monetäre Bewertung des Innenraum-Navigationssystems DigiBA

Im Airport 2030-Verbund wurden in den Projekten Effizienter Flughafen 2030 und DIBUS Systeme entwickelt, die das Bewegungsprofil der Passagiere durch das Flughafengebäude optimieren sollen, um einen effizienteren Passagierfluss zu erlangen. Bei einer erfolgreichen Umsetzung versprechen diese Systeme sowohl eine positive Auswirkung auf den Passagierkomfort (z.B. unnötige Wege werden vermieden, Wartezeiten reduziert etc.) als auch induzierte wirtschaftliche Effekte, die sich in bestimmten Fällen in einem erhöhten Umsatz in den Einzelhandelsgeschäften des Flughafens zeigen könnten. Letzteres basiert auf der Annahme, dass den Passagieren, durch eine optimierte Wegsteuerung und u.a. geringerer Prozesszeiten an den notwendigen Prozessstellen im Flughafenterminal (Check-In, Security etc.) eine erhöhte Verweildauer zum Konsumieren zur Verfügung steht. Bei diesem Szenario würde ein Umsatzanstieg bei einer unveränderten Anzahl an Passagieren generiert, der sich bei einer Umsatzmiete, wie sie in der vorliegenden Studie angenommen wird, für die Flughafengesellschaft positiv auswirkt. Induzierte wirtschaftliche Effekte zeichnen sich aber auch dadurch aus, dass mit solchen Systemen eventuelle kapazitive Engpässe durch eine optimierte Flusssteuerung entspannt werden könnten, ohne die primäre Infrastruktur anpassen zu müssen.

Im Bericht „Cost-Benefit Analyse des Einsatzes von Indoor-Navigationssystemen im Flughafen“ (DLR IB 126-2012/8) werden die wesentlichen Merkmale dieser Systeme sowohl technisch als auch operativ beschrieben. Der Bericht wird hier auszugsweise als Datengrundlage für die Integration in den Referenzflughafen verwendet. Dabei soll zunächst anhand des Beispiels der DigiBa als Innenraum-Navigationssystem aufgezeigt werden, wie sich die durch sie veränderten Prozesszeiten positiv auf den NPV des Flughafens auswirken. Umgekehrt wird der maximale Investitionsaufwand berechnet.

Der ökonomische Vorteil durch den Einsatz von Innenraum-Navigationsgeräten lässt sich schwer und theoretisch auch nur indirekt ermitteln. Die nachfolgende Analyse unterliegt hier der Hypothese, dass durch den Einsatz von Innenraum-Navigationssystemen die freie Verfügungszeit der Passagiere steigt und diese für zusätzliche Konsumaktivitäten genutzt wird.

Im Hauptarbeitspaket 2 wurden Simulationen zur Passagierflussentwicklung am Flughafen Hamburg durchgeführt, diese sollen hier einfließen. Die berechneten Änderungen der Prozesszeiten, ohne infrastrukturelle oder operative Anpassungen, sind in Tabelle 37 zusammengefasst. Sie adressieren die Weg- und Wartezeiten und werden ausschließlich durch Effekte höherer Entropie und Aufstauungen getrieben.  $CBA_{\text{airport}}$  verlangt die Eingabe der Prozesszeitenänderung in der 1., 2., 3. und 4. Dekade nach dem Referenzjahr, wie Abbildung 114 gezeigt; in Ermangelung von Daten für das Jahr 2040 wurden zum Jahr 2030 identische Werte angenommen.

Passenger process definition (TERMINAL)				Pre reference year			Post reference year		
				1980	1990	2000	2020	2030	2040
<b>2010</b>				0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Average duration of stay <b>scheduled</b> traffic	[min]		<b>87,0</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Average duration of stay <b>charter</b> traffic	[min]		<b>113,0</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Average <b>walking</b> time (Complex 1)	[min]		<b>11,1</b>	0,0%	0,0%	0,0%	4,7%	16,5%	16,5%
Average <b>walking</b> time (Complex 2)	[min]		<b>9,0</b>	0,0%	0,0%	0,0%	3,0%	17,0%	17,5%
Average <b>walking</b> time (Complex 3)	[min]		<b>0,0</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Average <b>security</b> time	[min]		<b>6,8</b>	0,0%	0,0%	0,0%	4,7%	16,5%	16,5%
Average <b>walking</b> time to gate	[min]		<b>7,4</b>	0,0%	0,0%	0,0%	4,7%	16,5%	16,5%
Average time <b>passport check</b> (international)	[min]		<b>5,0</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Average <b>waiting</b> time at gate	[min]		<b>0,0</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

**Prozesszeiten  
-änderung**

Abbildung 114: Eingabe der zum Referenzfall veränderten Prozesszeiten infolge von erhöhter Entropie und Aufstauwirkungen (vgl. Tabelle 37) in CBA<sub>airport</sub> [Quelle: Eigene Darstellung]

Tabelle 37: Berechnete Änderung der Prozesszeiten, bezogen auf das Referenzjahr 2010, infolge des Verkehrswachstums ohne Einsatz von Innenraum-Navigationssystemen und ohne infrastrukturelle Anpassungen (Datenquelle: DLR IB 126-2012/8)

Bezogen auf das Referenzjahr 2010 ohne DigiBa				
Jahr	Zeitänderung für Passagiere in Terminal 1		Zeitänderung für Passagiere in Terminal 2	
	Absolut	Relativ	Absolut [min]	Relativ
2015	1,0	+3,9%	0,6	+2,5%
2020	1,2	+4,7%	0,7	+3,0%
2030	4,2	+16,5%	4,1	+17,5%

Es ist grundsätzlich zu vermerken, dass bereits 2020 und noch deutlicher um 2030 ein deutlicher Anstieg der Prozesszeiten ermittelt wurde. Diese Zeitänderungen gehen, nach der o.g. Hypothese, für Konsumaktivitäten verloren und schlagen sich dadurch ökonomisch negativ in der Flughafenbilanz nieder. Die Berechnung mit CBA<sub>airport</sub> zeigt, dass die Verschlechterung der Prozesszeiten (entsprechend Tabelle 37) den Nettobarwert im Jahr 2030 um etwa 0,3 %, 2070 um ca. 0,6 % reduziert.

Innenraum-Navigationssysteme sollen durch eine intelligente Lenkung der Passagierflüsse aufkommende Engpässe entschärfen. Ob die Navigation dabei durch Applikationen auf einem Fremdgerät (im Projekt Effizienter Flughafen 2030 als DigiBa bezeichnet) oder im Projekt DIBUS auf einem Smartphone betrieben werden, ist aus der Sicht der Passagierlenkung unerheblich; dieses würde in erster Linie die Investition und eventuell eine zusätzliche Prozesszeit zum Erhalt und Erlernen der Applikation auf dem Fremdgerät betreffen. Nachfolgend werden ausschließlich die mit der DigiBa ermittelten Ergebnisse diskutiert.

Die erwarteten Auswirkungen auf die Prozesszeiten durch den Einsatz des Innenraum-Navigationsgeräts DigiBa am Flughafen Hamburg sind in Tabelle 38 zusammenfassend und in Tabelle 39 detailliert, exemplarisch für das Jahr 2030, angegeben. Sie ergeben sich aus dem direkten Vergleich der Prozesswerte in dem entsprechenden Jahr mit und ohne den Einsatz des Innenraum-Navigationssystems. Die in diesem Projekt durchgeführten Simulationen (HAP 2) zeigen einen potenziellen Zeitgewinn von bis zu 18 %, wobei die Potenziale mit zunehmenden Jahren abnehmen und mit knapp 14 % im Terminal 2 im Jahr

2030 den geringsten Wert aufweisen. Die Diskussion der Zeitwerte wird hier, mit Hinweis auf Kapitel II - 1.3 nicht weiter geführt!

**Tabelle 38: Berechneter Zeitgewinn durch den Einsatz des Innenraum-Navigationssystems DigiBa in den Jahren 2015, 2020 und 2030 (Datenquelle: DLR IB 126-2012/8)**

Jahr	Zeitgewinn für Passagiere in Terminal 1		Zeitgewinn für Passagiere in Terminal 2	
	Absolut	Relativ	Absolut [min]	Relativ
2015	-4,7	-17,7%	-3,9	-15,8%
2020	-4,9	-18,2%	-3,9	-16,2%
2030	-5,0	-16,8%	-3,8	-13,8%

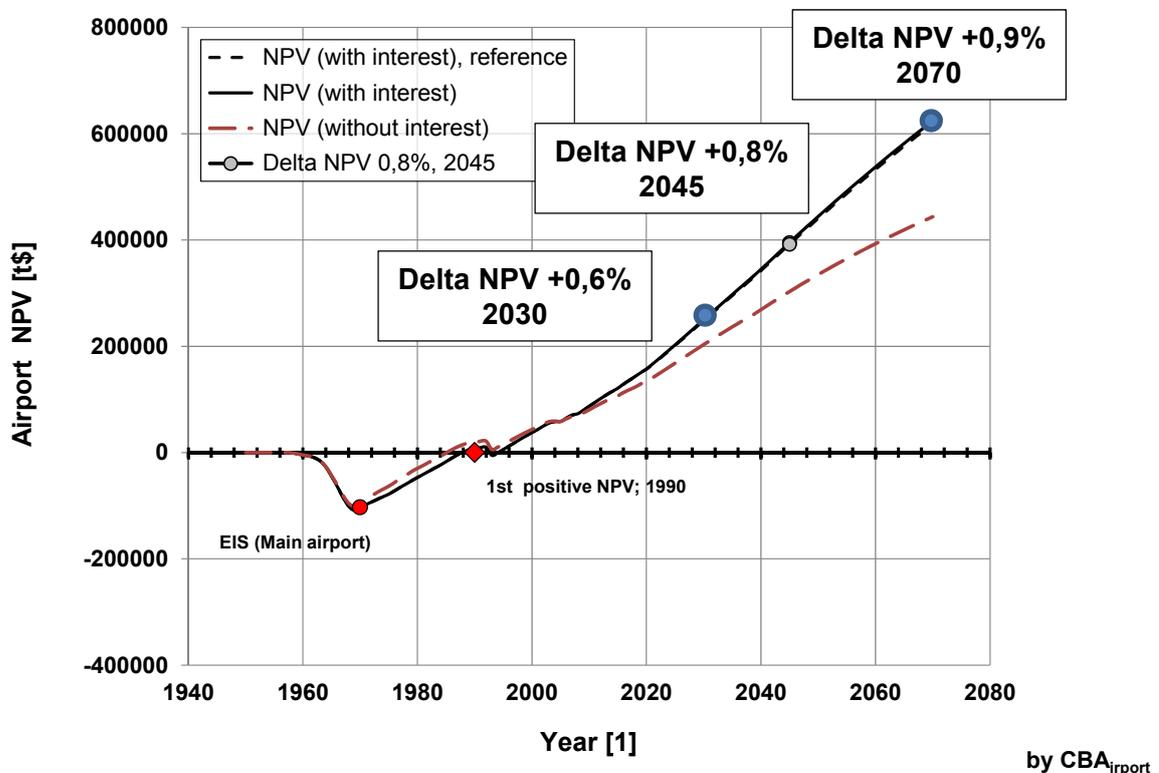
**Tabelle 39: Beispiel der Prozesszeiten ohne und mit dem Einsatz des Innenraum Navigationssystems DigiBa und ermittelter Zeitvorteil im Jahr 2030 (Datenquelle: DLR IB 126-2012/8)**

2030 <u>ohne</u> DigiBa (Referenzzeiten)		Wegezeit [min]	Wartezeit [min]	Prozesszeit [min]
	Terminal 1	9,7	0,9	1,4
	Terminal 2	7,1	1,3	1,4
	Airport-Plaza bis zur Sicherheitskontrolle	0,6	7,8	0,4
	Ausgang Sicherheitskontrolle bis zum Abfluggate	8,6	0,0	0,3
	<b>Summe für Passagiere aus Terminal 1</b>		<b>29,7</b>	
	<b>Summe für Passagiere aus Terminal 2</b>		<b>27,5</b>	
2030 <u>mit</u> DigiBa		Wegezeit [min]	Wartezeit [min]	Prozesszeit [min]
	Terminal 1	4,9	1,8	1,4
	Terminal 2	4,0	1,8	1,4
	Airport-Plaza bis zur Sicherheitskontrolle	0,4	7,4	0,4
	Ausgang Sicherheitskontrolle bis zum Abfluggate	8,0	0,0	0,3
	<b>Summe für Passagiere aus Terminal 1</b>		<b>24,7</b>	
	<b>Summe für Passagiere aus Terminal 2</b>		<b>23,7</b>	
	<b>Zeitvorteil in Terminal 1</b>		<b>-5,0 (-16,8%)</b>	
	<b>Zeitvorteil in Terminal 2</b>		<b>-3,9 (-13,8%)</b>	

Für die Eingabe in  $CBA_{\text{Airport}}$  sind die relativen Änderungen der Prozesszeiten zum Referenzjahr 2010 erforderlich. Dadurch werden auch die absoluten Verschlechterungen der Prozesszeiten infolge der simulierten Engpässe berücksichtigt, wie sie Tabelle 37 angegeben sind. In Tabelle 40 sind die entsprechenden Zeitänderungen angegeben: Dabei ist deutlich zu erkennen, dass die mit dem Innenraum-Navigationssystem erzielten Potenziale über den Zeitlauf nicht vollständig aufrechterhalten werden können. So tritt auch durchaus der Fall ein (Terminal 2 im Jahr 2030), dass die Prozesszeiten trotz des Einsatzes des Navigationssystems eine Verschlechterung zum Referenzjahr erfahren; die durch den zunehmenden Passagierfluss (Verkehrswachstum) entstehende bzw. simulierte Ineffizienz kann durch das Navigationssystem nicht vollständig kompensiert werden!

**Tabelle 40: Berechnete Änderung der Prozesszeiten, bezogen auf das Referenzjahr 2010, infolge des Verkehrswachstums mit Einsatz des Innenraum-Navigationssystems DigiBa und ohne infrastrukturelle Anpassungen (Datenquelle: DLR IB 126-2012/8)**

Bezogen auf das Referenzjahr 2010 mit DigiBa				
Jahr	Zeitänderung für Passagiere in Terminal 1		Zeitänderung für Passagiere in Terminal 2	
	Absolut	Relativ	Absolut [min]	Relativ
2015	-3,7	-14,5%	-3,2	-13,7%
2020	-3,7	-14,5%	-3,3	-14,1%
2030	-0,8	-3,1%	+0,3	+1,2%



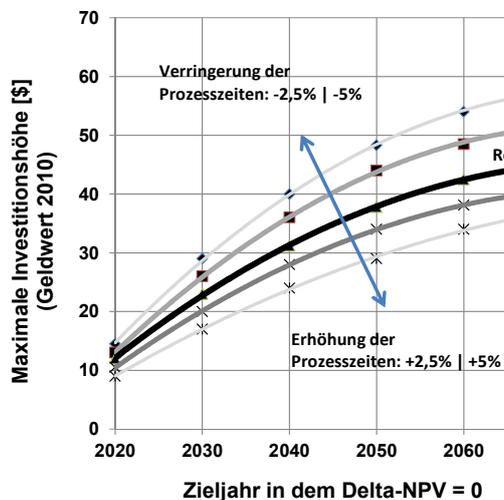
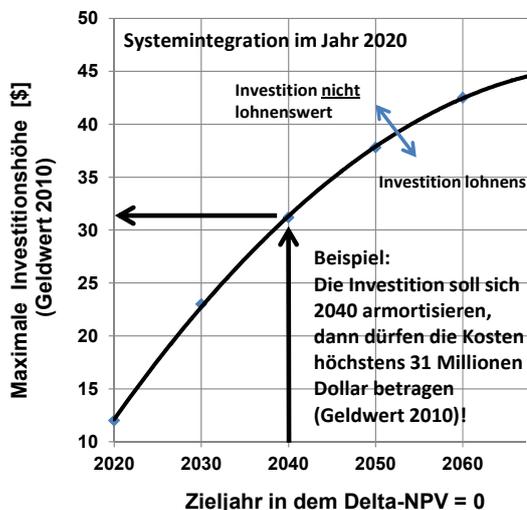
**Abbildung 115: Entwicklung des NPV und seiner Differenz zum Referenzsystem mit Berücksichtigung veränderter Prozesszeiten durch den Einsatz eines Innenraum-Navigationssystem ab 2020 [Quelle: Eigene Darstellung]**

Ohne Berücksichtigung der Investitionskosten (1. Analyseschritt), zeigt der Einsatz eines Innenraum-Navigationssystems und die damit verbundenen prognostizierten Verbesserungen der Prozesszeiten, die in Abbildung 115 dargestellten Erhöhungen des Nettobarwerts des Flughafens. Durch die Reduktion der nicht-konsumorientierten Prozesszeiten folgt aus dem zugrunde gelegten Modell, dass die nicht-luftfahrtinduzierten Umsätze derart erhöht werden, dass der Nettobarwert z.B. im Jahr 2030 um 0,6 %, 2045 um

0,8 % und 2070 um 0,9 % steigen könnte, wie erwähnt, wenn die Investitionskosten unerheblich wären.

Im Projekt HAP 2 dieses Projektes wurden die Kosten für solche Systeme nicht ermittelt. Folglich wurde hier eine invertierte Analyse vollzogen und die maximalen Kosten der Investitionen für das o.g. Szenario ermittelt; dieses erfolgte mit der Zielgröße des Delta-NPV von 0. Da es sich um eine dynamische Investitionsrechnung handelt, ist die Höhe der Investition davon abhängig, zu welchem Zeitpunkt die NPV-Parität (Referenz <> geändertes System) erzielt werden soll. In Abbildung 116 links ist dargestellt, welches Investitionsvolumen ein Innenraum-Navigationssystem, mit den in HAP 2 simulierten Prozessen, höchstens aufweisen darf, um mit den durch das System erzielten Mehreinnahmen keine ökonomischen Nachteile gegenüber der Referenz zu erzielen. Allgemein ist davon auszugehen, dass die Lebenszeit eines solchen elektronischen Systems nicht länger als 10 bis 20 Jahre betragen wird, weshalb ein Delta-NPV von 0 spätestens im Jahr 2040 erreicht werden sollte (bei Serviceeintritt 2020). Um einen im Jahr 2040 zum Referenzsystem gleichen wirtschaftlichen Abschluss zu erwirken, ist eine Investition in das Innenraum-Navigationssystem von maximal 31 Millionen Dollar möglich. Da dieses als Grenzwert zu verstehen ist, tritt die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit dann ein, wenn die Investitionskosten unter diesen liegen – so ist die gesamte Grenzkurve in Abbildung 116 links zu interpretieren.

In einer abschließenden Untersuchung wurde überprüft, wie sensibel die Investitionshöhe auf eine Veränderung der oben beschriebenen Prozesszeiten in Tabelle 40 reagiert. In Abbildung 116 rechts sind die Ergebnisse dieser Analyse als Kurvenschar dargestellt: So ist bei einer weiteren Reduktion der nicht-konsumorientierten Prozesszeiten von 2,5 % bzw. 5 % eine durchschnittliche Erhöhung der maximalen Investitionskosten in ein Innenraum-Navigationssystem von 14 % bzw. 25 % möglich. Gelingt es dagegen nicht, die in Tabelle 40 angegebenen Werte zu erzielen und liegen diese 2,5 % bzw. 5 % darunter, dann ist mit einer Reduktion der maximalen Investitionshöhe um 11 % bzw. 23 % zu rechnen.



**Abbildung 116: Maximale Investitionshöhe in Abhängigkeit des Zieljahres, in dem der Delta-NPV zu 0 werden soll (links) [Quelle: Eigene Darstellung]**

Ein abschließendes Urteil bzgl. der Entscheidung für oder gegen eine Investition in ein solches System ist schwierig und benötigt weitere Informationen hinsichtlich der Systemkosten und -eigenschaften. Die Bewertung wurde hier ausschließlich aus einer ökonomischen Sicht vollzogen. Ihre weiteren Vorteile, z.B. eines komfortablen und stressreduzierten Aufenthalts der Passagiere oder die Erhöhung der Barrierefreiheit, fließen in die Gesamtbewertung nicht ein. Grundsätzlich liegt jedoch ein erkennbares Potenzial vor, da die mögliche Investition in ein solches System verhältnismäßig hoch sein darf und gleichzeitig davon auszugehen ist, dass die erforderliche Infrastruktur, insbesondere beim Einsatz von Smartphones, einen solchen Investitionsbedarf nicht aufweist.

## II - 2 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das DLR nutzt die Ergebnisse aus dem Projekt „Effizienter Flughafen 2030“ für die weitere Forschung zu Flughäfen, Flugzeugen und zum Lufttransportsystem in DLR-internen Vorhaben und Projekten. Unter anderem sind hier die aktuell in der Definition befindlichen DLR-Leitkonzepte zu nennen, in denen integrierte, interdisziplinäre Konzepte für wesentliche Bereiche des Lufttransportsystems erarbeiten sollen. Die Ergebnisse dieses Projektes werden insbesondere in die Leitkonzepte Kurzstrecke, Langstrecke und Leistungsfähiger Luftverkehr Eingang finden.

Darüber hinaus bringt das DLR erlangte Erkenntnisse und Fähigkeiten in Drittmittelprojekte im Rahmen öffentlicher Förderprogramme auf regionaler, nationaler und europäischer Ebene ein. Unter anderem bringt sich das DLR im Rahmen des 1. Calls des EU-Forschungsrahmenprogramms Horizon 2020 mit einschlägigen Themen als Projektpartner ein.

Als Forschungseinrichtung sind die Verwertung in Form von Veröffentlichungen und die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses ein wesentlicher Aspekt der Verwertung für das DLR. Die im Projekt „Effizienter Flughafen 2030“ durch das DLR getätigten Veröffentlichungen sind im Kapitel II - 4 aufgeführt. Darüber hinaus wurden durch den inhaltlichen Bezug zur Projektarbeit drei Doktorarbeiten und eine Habilitation unterstützt, die voraussichtlich innerhalb der nächsten 1-2 Jahre abgeschlossen sein werden.

Aufgrund des Status des DLR als nicht gewinnorientierte, gemeinnützige Forschungseinrichtung sind die Möglichkeiten des DLR zur eigenen Vermarktung der Projektergebnisse begrenzt. Durch die Zusammenarbeit mit Industriepartnern oder im Rahmen von Technologieverträgen können jedoch Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet weitergeführt werden. Dies beinhaltet auch die Möglichkeit zur Lizenzierung von im DLR entwickelten Konzepten und deren prototypische Umsetzung an Industriepartner.

Im Folgenden werden die spezifischen Verwertungsmöglichkeiten für die einzelnen Projektergebnisse näher erläutert.

### HAP 1 Analyse, Integration und Bewertung

Im Rahmen des Projektes wurde unter Leitung des DLR ein Systems Engineering Ansatz verfolgt, angefangen von Szenarien und Anforderungen über Konzeptionierung und prototypische Implementierung bis hin zur Technologiebewertung. Es ist beabsichtigt, diesen Prozessansatz auch in zukünftige Projekte einzubringen. Die entwickelte Flughafen-Gesamtsimulationskette ermöglicht im Rahmen der Technologiebewertung eine Sensitivitätsanalyse unter Kopplung von Faktoren der Land- und Luftseite. Mit der CBAirport können Technologie- und Investitionsentscheidungen von Flughäfen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Luftverkehrsszenarien auf Ihre Wirtschaftlichkeit hin untersucht werden. Es ist geplant, diese Fähigkeiten in die Zusammenarbeit des DLR mit Flughäfen und in einschlägige Forschungsprojekte einzubringen.

## HAP 2 Effiziente Passagierflussteuerung

Im Rahmen der Forschungsarbeiten zur effizienten Passagierflussteuerung wurden alternative Prozessmodelle 2015 sowie Verfahren zur Simulation und Bewertung einer Digitalen Boarding Assistenz entworfen. Diese Erkenntnisse fließen in das DLR-interne Projekt OPTIMOD ein. Wissenstransfer findet in diesem Bereich aktuell zwischen dem DLR und der Bundespolizei statt, um künftige Infrastrukturen am Flughafen für die Sicherheitskontrolle besser auslegen zu können.

## HAP 3 Hochautomatisierung Prozessteuerung

### Fahrzeugmanagement (Groundhandling)

Mit der Entwicklung des Dispositionssystems konnte gezeigt werden, wie ein integriertes Display genutzt werden kann, um verteilte Systeme zusammenzuführen und durch neuartige Interaktionsfunktionen eine verbesserte Arbeitssituation erreicht wird. Es bleibt festzuhalten, dass das im Airport2030 entwickelte Dispositionssystem nicht ohne die anderen Komponenten eines Fahrzeugmanagementsystems betrachtet werden kann. Basierend auf den bisherigen Arbeiten des DLR gibt es neue Aktivitäten, Fahrzeuge am Flughafen zu koordinieren. Das DLR ist dazu in Kontakt mit Herstellern von Fahrzeugkomponenten, um zukünftige Entwicklungen zu erarbeiten. Hierbei geht es nicht nur um den zentralisierten Einsatz von Fahrzeugen sondern um intelligente Systeme, die Informationen miteinander austauschen. Die Entwicklungen im Bereich Fahrzeugmanagement haben einen Stand erreicht, auf dessen Basis ein Transfer der bisherigen Ergebnisse in industriennahe Entwicklungen bis hin zur vollen Industrialisierung angestrebt werden sollte. Weitere Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet sollten mit dem Einsatz entsprechender Systeme im operationellen Betrieb koordiniert werden, da operationelle Auswirkungen nur durch einen entsprechenden Einsatz nachgewiesen werden können.

### Vorfeldkontrolle

Das entwickelte integrierte Vorfelddisplay hat gezeigt, dass eine Zusammenführung mehrerer historisch gewachsener Informations- und Bediensysteme möglich ist und neue Arten der Arbeitsplatzgestaltung erlaubt. Die erarbeitete Lösung stellt dabei eine mögliche Umsetzung der konzeptionellen Überlegungen dar. Während der Versuchsreihen hat sich bereits gezeigt, dass weitere Anpassungen am bestehenden System vorstellbar sind. Diese beziehen sich nicht nur auf die Funktionalitäten und Darstellungen der aktuellen Arbeitsprozesse, sondern auch auf den Einsatz völlig neuer Technologien. Das integrierte Vorfeldlotsendisplay stellt somit eine erste Basis dar, die wesentliches Potenzial zur Weiterentwicklung darstellt. In Kombination mit der Airport Research and Innovation Facility Hamburg (ARIF) steht ein Basissystem für einen Vorfeldarbeitsplatz zur Verfügung, welches sukzessive mit neuen Elementen erweitert werden kann. Des Weiteren wurden zum Teil

bestehende Funktionalitäten verwendet, die durch im DLR bereits vorhandene Entwicklungen ersetzt werden können. Hierzu zählt zum Beispiel der Routingalgorithmus. Dieser ist als kürzeste Route implementiert, könnte aber durch komplexe 4D-Trajektorienberechnung ersetzt werden, an denen bereits gearbeitet wird.

Während die eDEP ursprünglich als Simulationssoftware entwickelt wurde, konnte das erste Mal gezeigt werden, dass ein Einsatz auch im realen Umfeld möglich ist. Damit steht für die ARIF ein Verkehrslagedisplay zur Verfügung, das nicht nur für den Vorfeldarbeitsplatz sondern als generelles System für weitere Forschungsaktivitäten genutzt werden kann. Für den großen Themenbereich der Lotsenunterstützungssysteme bieten sich hier umfangreiche Möglichkeiten für zukünftige Entwicklungen.

Die Implementierung des Flughafens Hamburg in die eDEP im Rahmen des Projektes Airport2030 hat dazu geführt, dass auch auf Seiten der Eurocontrol der Flughafen für Untersuchungen genutzt werden konnte. Verschiedene Exercises in SESAR, die bisher mit Paris Charles de Gaul durchgeführt wurden, liefen mit dem Hamburg Layout. Hierbei wurde deutlich, dass die Besonderheiten des gekreuzten Bahnsystems wesentliche Erkenntnisgewinne bei den Versuchen liefern konnten.

#### Flughafenleitstand

Das Thema Total Airport Management findet sich in allen relevanten Visionen und Forschungsausrichtungen im nationalen und internationalen Kontext. Mit der Errichtung eines prototypischen Leitstandes wurde erreicht, dass eine Infrastruktur zur Verfügung steht, die entsprechende Forschung im realen Umfeld zulässt. Die im Airport2030 durchgeführten Datenanalysen und die sich daraus ableitenden Erkenntnisse zu performancebasierten Ansätzen bei der Koordinierung des Flughafengeschehens bedeuten einen wichtigen Schritt in diesem Forschungsbereich. Sie haben jedoch auch gezeigt, dass ein weiteres großes Potenzial enthalten ist, das es in den nächsten Jahren auszuarbeiten gilt. Die im Projekt begonnenen Arbeiten fließen direkt in interne Forschungsprojekte des DLR ein. Zudem wurden bereits neue Ideen zu weiteren Forschungsaktivitäten generiert.

Im Rahmen der Demonstrationen und Vorführungen der entwickelten Systeme wurden die Vertreter der Airlines am Flughafen Hamburg angesprochen, die nicht im Projekt als Partner zur Verfügung standen. Da diese jedoch eine wesentliche Rolle im Gesamtkonzept spielen, gibt es Überlegungen, gemeinsame Untersuchungen über Airport2030 hinaus vorzunehmen.

Der im Airport2030 verwendete Total Operations Planer konnte erfolgreich weiterentwickelt und für den Einsatz im realen Umfeld angepasst werden. Dadurch sind Möglichkeiten geschaffen worden, Prognosesysteme zu testen, zu validieren und mit dem eingetretenen Geschehen abzugleichen. Konzeptionell wurden bereits die weiteren Schritte hin zu einem Total Airport Management erarbeitet. Vor allem die Entscheidungsprozesse und die Steuerung des Flughafengeschehens sind weitere Teilbereiche die in Zukunft betrachtet werden müssen. Da diese Punkte auf einer verlässlichen und möglichst genauen Prognose basieren, hat Airport 2030 die Grundlagen für die nächsten Aktivitäten gelegt.

Die ARIF und der prototypische Leitstand stehen als permanente Einrichtung am Flughafen Hamburg zur Verfügung. Die Datenanbindung kann weiterhin genutzt werden, um kontinuierlich an dem Thema weiter zu forschen. Damit ergeben sich vielfältige Möglichkeiten sowohl Weiterentwicklungen der bestehenden Systeme am Flughafen einzubringen und zu bewerten als auch neue Entwicklungsstufen zu implementieren. Die direkte Kooperation mit den Operateuren am Flughafen ist dabei von großem Vorteil.

#### **HAP 4 Flugzeugkonfigurationen für effiziente Bodenoperationen**

Die in dem Projekt entwickelten Analysemethoden sind wichtiger Ausgangspunkt für Flugzeug- und Flughafenentwurf im DLR. Es ist eine geweitete Sicht aus dem Blickwinkel beider Disziplinen entstanden, die insbesondere für Akteur-übergreifende Untersuchungen im Lufttransport (Flughafen, Fluggesellschaft, Flugzeughersteller) von großem Nutzen ist. Zudem können die entwickelten Module zum Entwurf revolutionärer Flugzeugkonfigurationen, zur Ableitung der Kabinen-Geometrie aus der Flugzeughülle und die Boarding-Simulation für spezifische Fragestellungen eingesetzt werden. Da in diesem Projekt mit dem BWB eine Flugzeugkonfiguration im Vordergrund stand, die vor allem bei langen Langstrecken-Missionen Vorteile aufweist, werden die Projektergebnisse zudem in das DLR-Leitkonzept Langstrecke Eingang finden.

## II - 3 Fortschritte anderer Stellen während des Vorhabens

Während der Laufzeit des Projektes „Effizienter Flughafen 2030“ 2008-2014 haben vielfältige Entwicklungen in Forschungsprojekten oder auch bereits in der wirtschaftlichen Nutzung stattgefunden.

Im der nationalen Förderung der Flughafenforschung von Seiten des Bundes lag der Schwerpunkt neben der Grundfinanzierung der Forschungsinstitute und außerhalb von Airport2030 vor allem auf dem großen Projekt TAMS (Total Airport Management Suite, 2008-2012).

Weitere Forschungsaktivitäten haben im fraglichen Zeitraum im Rahmen des 7. Forschungsrahmenprogramms (FP7) der EU stattgefunden:

- Im Projekt ASSET (Aeronautic Study on Seamless Transport, 2008-2011) wurden die landseitige Flughafenprozesskette untersucht und Vorschläge zu deren Verbesserung erarbeitet.
- Im Projekt Projekt Airport2050+ (2011-2014) wurden drei radikale, neue Flughafenkonzepte mit dem jeweiligen Fokus ultra-grün, zeit-effizient und kosten-effizient entwickelt.
- Im Projekt META-CDM (Multimodal, Efficient Transportation in Airports and Collaborative Decision Making, 2012-2014) wurden die Bedingungen untersucht, unter denen A-CDM den Akteuren im Lufttransport hilft größere Störungen zu bewältigen.

Neben den genannten Forschungsprojekten wurde bei den im Projekt „Effizienter Flughafen 2030“ untersuchten Einzel-Technologien folgende Entwicklung beobachtet und in der Projektarbeit berücksichtigt:

### HAP 2 Effiziente Passagierflusssteuerung

Die Entwicklung von Smartphones und deren Verbreitung hat sich im Zuge des Projektes extrem beschleunigt. Dies hat dazu geführt, dass das Konzept der Digitalen Boarding Assistenz (DigiBA) in Form eines eigenständigen Gerätes in Frage gestellt wurde. Andererseits können die identifizierten werthaltigen Funktionen der Digitalen Boarding Assistenz nun auf Smartphones umgesetzt werden. Daher wurde nach der Zwischen-Evaluierung des neue Projekt DIBUS (Digitale Boarding Assistenz auf Smartphones) gestartet. Die Forschungsarbeiten des DLR konzentrieren sich in beiden Projekten auf die Simulation und Bewertung der Funktionen dieser technischen Lösungen.

### HAP 3 Fahrzeugmanagementsystem

Die für das Fahrzeugmanagementsystem genutzten Kommunikationstechnologien (GPS, WLAN) wurden für das Projekt Airport2030 aus den Vorgängerprojekten übernommen und haben damit einen Stand von 2009. Gerade auf dem Gebiet der Kommunikation haben sich heutzutage neue Möglichkeiten wie UMTS oder LTE ergeben, die sich hinsichtlich der

technischen Möglichkeiten wesentlich weiterentwickelt haben. Die Kommunikation mit Bodenfahrzeugen hat sich im Flughafenbereich bereits durchgesetzt. Operationelle Systeme bieten bereits Teilfunktionen an, wobei die im Airport2030 vorgestellte Kombination von Flugzeug und Fahrzeugpositionen bisher nicht eingesetzt wird.

#### HAP 3 Leitstand

Auf dem Gebiet des Total Airport Management sind umfangreiche Forschungsaktivitäten zu verzeichnen. Abgesehen von einigen Flughäfen, die erste Schritte in diese Richtung gehen, ist vor allem das Joint Undertaking SESAR der EU auf diesem Gebiet aktiv.

## II - 4 Erfolgte/geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

### Veröffentlichungen zum Gesamtprojekt und zum Airport2030-Projektverbund

Lütjens, Klaus und Bießlich, Peter und Gollnick, Volker (2014)*Airport2030 - Flughafenforschung im Spitzencluster Luftfahrt*. Internationales Verkehrswesen ((66) 2), Seiten 84-87. DVV Media Group GmbH. ISSN 0020-9511.

Lütjens, Klaus (2013)*Airport2030 - Ergebnisse des Leuchtturm 3 der Hamburger Spitzenclusterförderung*. Hamburg Aviation Forum, 24.10.2013, Hamburg.

Lütjens, Klaus und Lau, Alexander und Pfeiffer, Till und Loth, Steffen und Gollnick, Volker und Klimek, Helge und Greßmann, Björn und Löwa, Sonja und Blank, Christian und Jan, Binnebesel (2012)*Airport2030 - Lösungen für den Lufttransport der Zukunft*. In: Deutsche Nationalbibliothek (urn:nb). DGLR (Netzpublikation). Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2012, 10.-12. Sep. 2012, Berlin, Deutschland.

Dambowsky, Falk (2014)*Airport 2030 – der Flughafen von morgen*. In: DLR-Magazin – Das Magazin des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, Nr. 141, S. 36-39, März 2014, Köln, Deutschland.

### Veröffentlichungen zu einzelnen Themen des Projektes

Jörn Jakobi, Karsten Straube, Steffen Loth, *Design and Testing of an integrated Ground Handler Working Position*, International Conference on Human-Computer Interaction in Aerospace, Silicon Valley 2014

Anne Papenfuß, Yves Günther, *Feasibility of traffic prognosis for an Airport Operation Centre. Results of an initial Field Study*, ICRAT 2014, Istanbul, Turkey

Hejar Gürlük, Meilin Schaper, Steffen Loth, Marcus Helms, *Concept Of An Integrated Apron Controller Working Position Implemented And Tested In Field Trials*, DASC 2014, Colorado Springs

Dzikus, N., Gollnick, V. *Modelling and Simulation of Vehicle Movements Using a SPPTW-Algorithm and the Application to Airport Surface Movement Analysis*, 7th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation, 2010, Prag.

### III Literaturverzeichnis

- [1] Lütjens, K.; Lau, A.; Loth, S.; Gollnick, V. et al. (2012) Airport2030 – Lösungen für den effizienten Lufttransport der Zukunft, DLRK 2012, Berlin, Deutsche Nationalbibliothek urn:nbn:de:101:1-201210269072.
- [2] Noack, C. (2009). Vorlesungsunterlagen „Betriebsaspekte von Transportflugzeugen“. TUHH Statistisches Bundesamt. (2008). *Private Haushalte in der Informationsgesellschaft – Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologien*. Wiesbaden. S. 11
- [3] Statistisches Bundesamt. (2011). *Private Haushalte in der Informationsgesellschaft – Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologien*. Wiesbaden. S. 31
- [4] ZigBee Alliance. (2010). *Expanding Communication Services: ZigBee Telecom Services enable value-added services for telecom*. Abgerufen am 31. 08 2012 von [www.zigbee.org](http://www.zigbee.org): <https://docs.zigbee.org/zigbee-docs/dcn/10-5590.pdf>, S. 6
- [5] Anders, C. A. (2010). *Wahrnehmungsdialektologie: Das Obersächsische im Alltagsverständnis von Laien*. Berlin, New York: Walter de Gruyter. S 184ff
- [6] Braaksma, J. P., & Cook, W. J. (1980). Human orientation in transportation terminals. *Journal of Transportation Engineering* , S. 106, S. 189-203
- [7] Caves, R. E., & Pickard, C. D. (2001). The satisfaction of human needs in airport passenger terminals. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport* , S. 9
- [8] Caves, R. E., & Pickard, C. D. (2001). The satisfaction of human needs in airport passenger terminals. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport* , S. 11
- [9] Churchill, A., Dada, E. S., de Barros, A. G., & Wirasinghe, S. C. (2008). Quantifying and validating measures of airport terminal wayfinding. *Journal of Air Transport Management* , S. 158
- [10] Correia, A. R., Wirasinghe, S. C., & de Barros, A. G. (2008). Overall level of service measures for airport passenger terminals. *Transportation Research Part A*
- [11] Dada, E. S. (1997). *Quantitative measures of orientation in airport terminals*. Calgary, Alberta, Kanada: National Library of Canada.
- [12] Dada, E. S. (1997). *Quantitative measures of orientation in airport terminals*. Calgary, Alberta, Kanada: National Library of Canada, S. 54
- [13] Dada, E. S. (1997). *Quantitative measures of orientation in airport terminals*. Calgary, Alberta, Kanada: National Library of Canada, S. 105ff
- [14] Dada, E. S. (1997). *Quantitative measures of orientation in airport terminals*. Calgary, Alberta, Kanada: National Library of Canada, S. 122

- [15] Fewings, R. (2001). Wayfinding and Airport Terminal Design. *The Journal of Navigation* , S. 178
- [16] Fodness, D., & Murray, B. (2007). Passenger's expectations of airport service quality. *Journal of Services Marketing*
- [17] Fodness, D., & Murray, B. (2007). Passenger's expectations of airport service quality. *Journal of Services Marketing* , S. 493
- [18] Fodness, D., & Murray, B. (2007). Passenger's expectations of airport service quality. *Journal of Services Marketing* , S. 497
- [19] International Air Transport Association. (1994). *Airport Development Reference Manual* (9th Edition Ausg.). Montreal, Quebec, Canada, S. 291
- [20] Lam, W., Tam, M. L., Wong, S. C., & Wirasinghe, S. C. (2003). Wayfinding in the passenger terminal of Hong Kong International Airport. *Journal of Air Transport Management* , S. 80
- [21] Passini, R. (1996). Wayfinding design: logic, application and some thoughts on universality. *Design Studies* , S. 332
- [22] Passini, R. (1984). Spatial representations: A wayfinding perspective. *Journal of Environmental Psychology* , S. 154
- [23] Pfaff, T. (2007). *Entwicklung eines PDA-basierten Indoor-Navigationssystems*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Fakultät Technik und Informatik, Hamburg.
- [24] Popp, M., & Kazig, R. (2011). Unterwegs in fremden Umgebungen: Ein praxeologischer Zugang zum "wayfinding" von Fußgängern. *Raumforschung und Raumordnung* , S. 1
- [25] Popp, M., & Kazig, R. (2011). Unterwegs in fremden Umgebungen: Ein praxeologischer Zugang zum "wayfinding" von Fußgängern. *Raumforschung und Raumordnung* , S. 4
- [26] Popp, M., & Kazig, R. (2011). Unterwegs in fremden Umgebungen: Ein praxeologischer Zugang zum "wayfinding" von Fußgängern. *Raumforschung und Raumordnung* , S. 11
- [27] Seidel, A. D. (1982). Way-finding in public spaces: The Dallas/Fort Worth, USA Airport. *20th International Congress of Applied Psychology* , S. 135
- [28] Raubal, M., & Egenhofer, M. (1998). Comparing the complexity of wayfinding tasks in built environments. *Environment & Planning B* , S. 895-913
- [29] Raubal, M., & Egenhofer, M. (1998). Comparing the complexity of wayfinding tasks in built environments. *Environment & Planning B* , S. 897
- [30] Raubal, M., & Egenhofer, M. (1998). Comparing the complexity of wayfinding tasks in built environments. *Environment & Planning B* , S. 911

- [31] Tam, M. L. (2011). An optimization model for wayfinding problems in terminal building. *Journal of Air Transport Management* , S. 76
- [32] Tam, M. L., & Lam, W. (2004). Determination of service levels for passenger orientation in Hong Kong International Airport. *Journal of Air Transport Management* , S. 186
- [33] Tasic, V., & Babic, O. (1984). Quantitative evaluation of passenger terminal orientation. *Journal of Advanced Transportation* , 18, 279-295.
- [34] Seneviratne, P. N., & Martel, N. (1994). Criteria for evaluating quality of service in air terminals. *Transportation Research Record* , 1461, 24-30.
- [35] EUROPEAN STANDARD EN 9100: Quality Management Systems, Requirements (based on ISO 9001:2000) and Quality Systems: Model for Quality Assurance in Design, Development, Production, Installation and Servicing (based on ISO 9001:1994), 2003
- [36] Ouertani, S., (2012), *Airport 2030 – Cost-Benefit Analyse von Indoor-Navigationssystemen im Flughafen*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Flughafenwesen und Luftverkehr.
- [37] [www.wirtschaftslexikon24.com](http://www.wirtschaftslexikon24.com).
- [38] Accenture. (2011). *Die Chancen der mobilen Evolution*. S. 7
- [39] Bernthaler, D. (2011). *Besonderheiten, Erfolgsfaktoren und Herausforderungen des Mobile Couponing* (Bd. 1). GRIN Verlag., S. 20
- [40] BITKOM. (2012). *Jeder dritte hat ein Smartphone*. Pressebericht, Berlin. S. 1
- [41] BITKOM. (2012). *Smartphone-Absatz steigt rasant*. Pressebericht, Berlin. S. 2
- [42] Deutsche Bank Research. (6. Juni 2011). Konvergenzmärkte - Smartphones und Triple Play öffnen Branchengrenzen weiter. 85 . (S. Heng, Hrsg.) Frankfurt am Main. S. 10
- [43] Greßmann, B., Klimek, H., & Turau, V. (2011). Supporting Intelligent Passenger Flows in Airport Terminals. Hamburg. S. 109
- [44] Kivi, A., Smura, T., & Töyli, J. (2009). Diffusion of Mobile Handset Features in Finland. *Proceedings of the Eighth International Conference on Mobile Business*, (S. 209-213). Dalian.
- [45] Krasteva, R., Boneva, A., Georchev, V., & Stoianov, I. (2005). Application of Wireless Protocols Bluetooth and ZigBee in Telemetry System Development. *Problems of Engineering Cybernetics and robotics* , S. 31.
- [46] Lee S. (2003). Konzeptionelle Untersuchung einer Flying Wing Zweideckkonfiguration. Airbus Deutschland GmbH

- [47] Airbus (2013). Aircraft Characteristics Airport and Maintenance Planning. URL: [http://www.airbus.com/fileadmin/media\\_gallery/files/tech\\_data/AC/Airbus-AC-A380-20131201.pdf](http://www.airbus.com/fileadmin/media_gallery/files/tech_data/AC/Airbus-AC-A380-20131201.pdf)
- [48] Clark, P. (2007). Buying the Big Jets. Ashgate Verlag
- [49] Schmid, J. (2013) Infrastrukturelle und wirtschaftliche Auswirkungen auf den Stakeholder Flughafen bei Einführung eines fahrwerklosen Blended Wing Body. Diplomarbeit TUHH