

# MODELLIERUNG UND SIMULATION EINER ANFLUGPLANUNG FÜR DIE LANDEBAHN NORDWEST IN FRANKFURT

D. Troegner, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.,  
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig, Deutschland

## Zusammenfassung

Am 20. Januar 2009 haben die Arbeiten zum Bau der neuen Landebahn Nordwest am Flughafen Frankfurt begonnen. Mit dem Winterflugplan 2011/12 soll die neue Landebahn in Betrieb gehen.<sup>[1]</sup> Sie ergänzt damit ein bestehendes abhängiges Parallelbahnsystem um eine weitere parallele, jedoch unabhängig nutzbare Landebahn. Dies stellt eine neue Herausforderung an die Anflugplanung und die Verfahren der Landebahnzuweisung. Mithilfe der Modellierungssprache AMAN-ML (Arrival Management Modeling Language) wurde ein bestehendes Flughafenmodell um die Landebahn Nordwest erweitert und das Landebahnsystem einer Abhängigkeitsanalyse unterzogen. Anhand der Ergebnisse wurden exemplarisch mögliche Anflugrouten modelliert und mögliche Landebahnnutzungsstrategien validiert. Für das resultierende Anflugplanungssystem wurden verschiedene Simulationsläufe mit unterschiedlichen Verkehrsszenarien durchgeführt und deren Ergebnisse einander gegenübergestellt.

## 1. EINLEITUNG

Der Flughafen Frankfurt (IATA-Code: FRA) gehört mit 485.783 Flugbewegungen pro Jahr zu den größten Verkehrsflughäfen weltweit [3]. Prognosen des Forschungsinstituts Intraplan zufolge soll hier der Bedarf an Flugbewegungen bis zum Jahr 2020 um weitere 44% zunehmen [2]. Dieses prognostizierte Wachstum setzt jedoch eine Bereitstellung ausreichender Kapazitäten durch den Flughafen Frankfurt voraus. Die mögliche Kapazität eines Flughafens wird maßgeblich von der Anzahl verfügbarer Landebahnen beeinflusst. Kapazitätsengpässe und damit verbundene Wartezeiten entstehen durch ein Ungleichgewicht zwischen wachsender Verkehrsnachfrage und den verfügbaren Start- und Landebahnpkapazitäten. Der Ausbau des Flughafens Frankfurt um eine neue Landebahn ist daher als Ansatz zu sehen, den steigenden Anforderungen des Luftverkehrs nachzukommen.

Die Landebahn Nordwest stellt neue Herausforderungen an die Planung und Koordinierung des anliegenden Luftverkehrs. Fluglotsen werden bei dieser Aufgabe durch bodenbasierte Planungssysteme unterstützt, zu denen auch Anflugplanungssysteme gehören. Diese müssen um neue Konzepte erweiterbar sein, um neue Situationen planen und abbilden zu können. Anhand einer im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Braunschweig entwickelten Modellierungssprache können Anflugplanungssysteme an flughafenspezifische Anforderungen angepasst werden. Eine neue Anflugroute zur Landebahn Nordwest wurde modelliert und das Flughafenlayout erweitert. Eine Anflugplanung wurde in 3 unterschiedlichen Szenarien für verschiedenen Landebahn- Zuweisungstrategien simuliert.

In Kapitel 2 wird zunächst die Modellierungssprache AMAN-ML in Aufbau und Funktionsweise vorgestellt. Im darauf folgenden Kapitel werden die notwendigen Anpassungen des Flughafenmodells für die neue Landebahn dargestellt und das neue Landebahnlayout analysiert. In Kapitel 4 wird das Simulationsumfeld beschrieben und die verschiedenen Szenarien dargestellt. Die Ergebnisse werden abschließend (Kapitel 5) gegenübergestellt und mit den vorher formulierten Erwartungen verglichen.

## 2. DIE MODELLIERUNGSSPRACHE AMAN-ML

Die domänenspezifische Modellierungssprache AMAN-ML dient der Konfiguration und Implementierung eines generischen Anflugplanungssystems. Zielsetzung bei der Entwicklung war die möglichst intuitive Anpassung eines Planungssystems an neue Flughäfen bzw. an neue Anforderungen bestehender Flughafensysteme, z.B. durch den Neubau einer Landebahn. Die Modellierungssprache wird derzeit zur Modellierung von Flughäfen innerhalb des am Institut für Flugführung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) entwickelten Anflugplanungssystems 4D-CARMA (4-Dimensional Cooperative Arrival Manager) eingesetzt.

AMAN-ML besteht aus mehreren hierarchisch miteinander verbundenen Komponenten. Jede dieser Komponenten folgt ihrer eigenen Syntax und Semantik und lässt sich graphisch als *AirportFamily*, *RunwayConfiguration*, *AssignmentStrategy* und *AirspaceStructure* modellieren[4].

Auf der höchsten Ebene befindet sich der Graph *AirportFamily*. Dieser enthält die notwendigen Basisdaten eines Flughafens (u.a. IATA-Code, Referenzkoordinaten) und ermöglicht eine individuelle Anpassung des zu generierenden Systems hinsichtlich zu verwendender Zuweisungsstrategie, Luftraumstruktur, Landebahnkonfiguration und möglicher Anwenderpräferenzen. Diese Elemente beziehen sich auf eigenständige Komponenten, die dem Flughafenmodell per Dekomposition zugeordnet werden.

Die Komponente *AirspaceStructure* beinhaltet die Luftraumstruktur eines Flughafens. Der Flughafennahbereich kann in dieser Modellkomponente dargestellt werden und umfasst Wegpunkte und Flugrouten von den Einflugpunkten zu den Landebahnen mit ihren zugeordneten Vorgaben bezüglich Geschwindigkeit und Flughöhe.

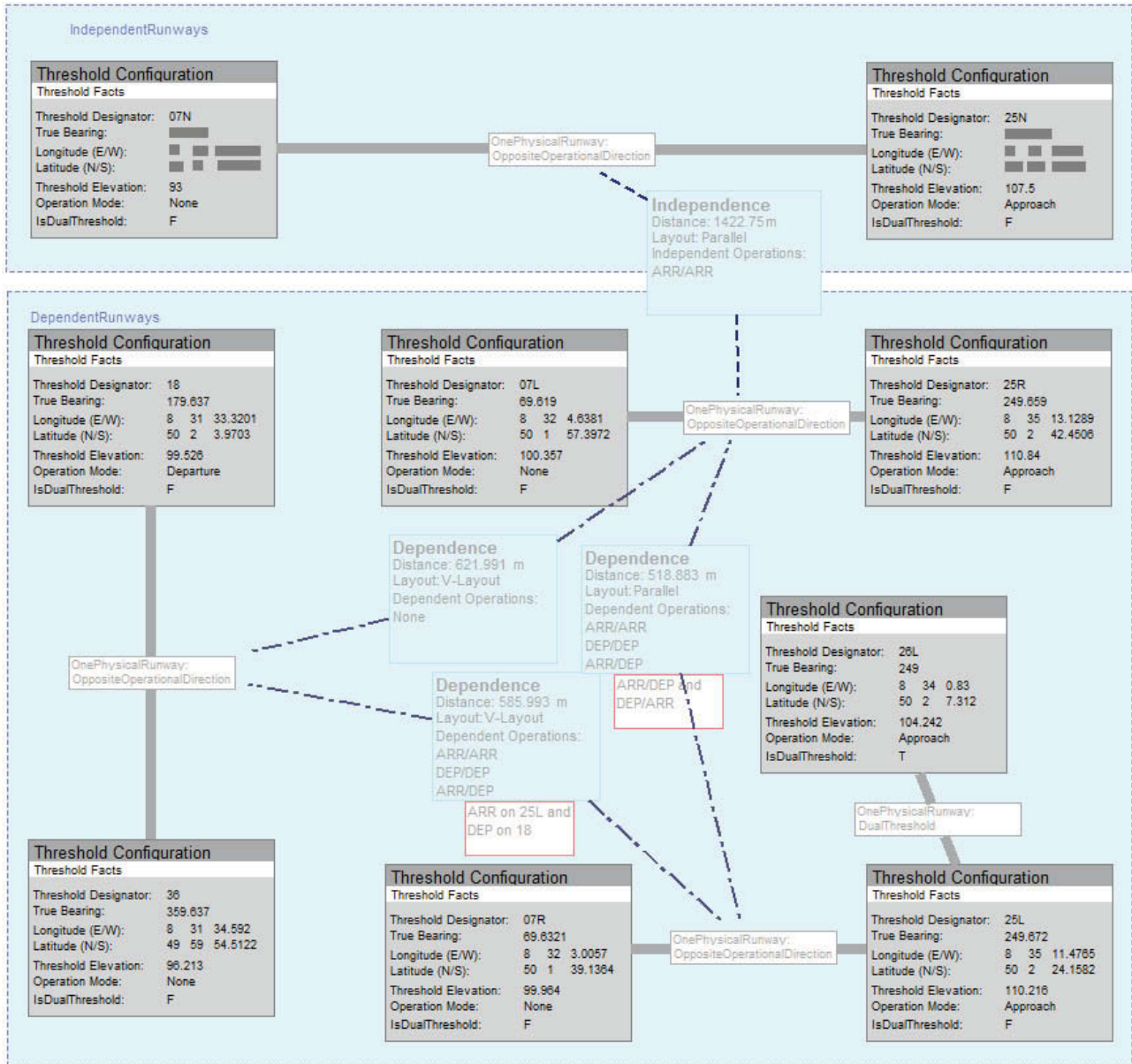


BILD 1 Modellierung der Landebahnkonfiguration für Frankfurt

Eine weitere Komponente von AMAN-ML, die *AssignmentStrategy*, dient der Erstellung von Strategien für die Landebahnzuweisung. Bekannte heuristische Verfahren wie bspw. *Staggered*, *Displaced*, *TypeSplitting* oder Varianten des *JoinTheLeastLoad* können für ein Flughafenmodell ausgewählt werden. Die Strategie *Staggered* bezieht sich auf eine streng alternierende Zuweisung zwischen den verfügbaren Landebahnen, während *Displaced* eine Zuweisung unter Verwendung einer oder mehrerer versetzter Schwellen unter Beachtung von Wirbelschleppenkategorien und Landebahnzuweisung von aktuellem und voraus fliegendem Flugzeug vornimmt.

$$\delta_{Staggered} = \begin{cases} I, & \text{falls } l(i)=II \\ II, & \text{falls } l(i)=I \end{cases}$$

(1.1) Strategie *Staggered*

In (1.1) ist die Strategie *Staggered* dargestellt, wobei  $I$

und  $II$  die verfügbaren Landebahnen bezeichnen, und  $l(i)$  die dem Vorgänger der Anflugsequenz ( $i$ ) zugewiesene Landebahn. Beim *TypeSplitting* können Zuweisungen in Abhängigkeit von der Gewichtsklasse eines Flugzeuges vorgenommen werden. Eine weitere Option ist das *JoinTheLeastLoad*, ein Optimierungsverfahren aus der Warteschlangentheorie. Bei diesem Verfahren wird der aktuelle Zustand jeder verfügbaren Landebahn betrachtet und daraus eine Arbeitslast berechnet. Der Zustand einer Landebahn besteht aus der verbleibenden Wartezeit, berechnet aus der Summe der Separationen der, für diese Bahn geplanten Flugzeuge, und der Gewichtsklasse des LFZ am Ende der Warteschlange. Die Landebahn mit der geringsten Arbeitslast wird dem nächsten LFZ zugewiesen [4]. Gemäß der Formel (1.2), weist die Strategie ( $\delta_{JLL}$ ) das ankommende Flugzeug ( $k$ ) der Landebahn (hier:  $I$  oder  $II$ ) zu, auf der es die geringste Wartezeit zu erwarten hat. Hierzu werden die bestehenden

Arbeitslasten ( $u$ ) mit der notwendigen Separation ( $b(i,k)$ ) zwischen letztem Flugzeug auf der Landebahn ( $i$ ) und dem aktuellen Flugzeug ( $k$ ) addiert. Die so entstehende Arbeitslast wird mit der Wartezeit verglichen, die entstehen würde wenn das aktuelle Flugzeug auf eine andere Landebahn geplant werden würde ( $v + b(j,k)$ ).

$$\delta_{JLL}((u, i, v, j; k)) = \begin{cases} I, \text{falls } [u + b(i, k)]^+ \leq [v + b(j, k)]^+ \\ II, \text{falls } [u + b(i, k)]^+ > [v + b(j, k)]^+ \end{cases}$$

### (1.2) Strategie *JoinTheLeastLoad*

Die beschriebenen Strategien können an die individuellen Gegebenheiten und Richtlinien des Flughafens angepasst werden und ermöglichen demnach eine optimierte Landereihenfolge.

Die Kernkomponente der Modellierungssprache ist die *RunwayConfiguration*, welches das Landebahnsystem eines Flughafens abbildet. Als Elemente sind hier insbesondere die Landebahnschwellen enthalten. Sie enthalten als Attribute Schwellenbezeichnung, Ausrichtung, geografische Koordinaten, Betriebsart und weitere, für spätere Berechnungen notwendige Daten. Die modellierten Schwellen können über verschiedene Beziehungstypen miteinander verbunden werden, um den Informationsgrad für den Modellierer und folglich für die spätere Erstellung von Komponenten für das Anflugplanungssystem (Codegeneration) zu erhöhen. Zwei gegenüberliegende Schwellen einer Landebahn können über die Beziehung *OnePhysicalRunway* mit der Kategorie *OppositeOperationalDirections* gekennzeichnet werden. Die Verwendung dieser Beziehung in der Kategorie *DualThreshold* ermöglicht die Erstellung einer versetzten Schwelle zu einer regulären Landebahnschwelle. Des Weiteren können Landebahnkreuzungen mit Angabe von Schnittpunktkoordinaten und Abhängigkeitsgrade zwischen parallel verlaufenden Landebahnen über Beziehungen dargestellt werden. Abgebildet werden in diesem Modell neben der Struktur auch die Abhängigkeitsbeziehungen zwischen den Landebahnen. Bei parallelen bzw. im V-Layout verlaufenden Landebahnen wird in Abhängigkeit ihrer Distanz eine Beziehung vom Typ *Dependence* mit Angabe des jeweiligen Abstandes und den abhängigen Betriebsarten modelliert. Dem Modell sind umfangreiche Model-Checking und Analyseverfahren hinterlegt, die dieses insbesondere hinsichtlich der Einhaltung rechtlicher Rahmenbedingungen überprüfen.

Nachdem der Modellierer bei einem Modell die Landebahnschwellen-Objekte erstellt hat, kann die Modellanalyse durchgeführt werden, die die fehlenden Informationen hinsichtlich vorhandener Abhängigkeitsbeziehungen automatisch im Modell vervollständigt. So können z.B. für das Modell Landebahnenabstände, -layout, Winkel zwischen Landebahnen, Kreuzungspunkte und daraus folgende Abhängigkeiten für verschiedene Betriebsarten berechnet und hinzugefügt werden. Ebenfalls können resultierende Separationsanforderungen für Anflüge und Abflüge für verschiedene Landebahnkombinationen abgefragt werden.

## 3. ERWEITERUNG UND ANALYSE DES FLUGHAFENMODELLS FRANKFURT

Das Landebahnsystem von Frankfurt besteht derzeit aus einem abhängigen Parallelbahnsystem, welches für Landeanflüge sowie Abflüge in beiden Betriebsrichtungen genutzt werden kann. Der Abstand zwischen den Mittellinien der Parallelbahnen 25L/07R und 25R/07L wird im betrachteten Modell als 518.88 m, basierend auf den gegebenen Koordinaten, berechnet. Gemäß Vorgaben der International Civil Aviation Organization (ICAO) gelten gleichzeitige Operationen (An – und Abflüge) auf parallelen Landebahnen mit weniger als 760m Abstand als abhängig. Dies bedeutet eine vorgeschriebene Staffelung von Luftfahrzeugen (LFZ) nach Wirbelschleppen-separation [5]. Die parallelen Landebahnen werden dabei als eine physikalische Landebahn betrachtet. Weiterhin existiert westlich des Parallelbahnsystems eine weitere abhängige Bahn, die ausschließlich für Abflüge eingesetzt wird. Hier ist die Betriebsrichtung ausschließlich in südlicher Richtung (Landebahnkennung 18). An – und Abflüge auf den Parallelbahnen werden generell als unabhängig zu den Abflügen auf der Startbahn 18 angesehen. Bei Anflügen auf die 25L ist jedoch zu beachten, dass zu den startenden Flugzeugen auf der 18 eine ausreichende Separation eingehalten wird, um die Sicherheit auch im Fall eines Durchstartens (Go-Around) zu gewährleisten.

Das bestehende Layout in der Modellkomponente *RunwayConfiguration* wurde im Modell um die Landebahn Nordwest, hier 25N genannt, erweitert (siehe BILD 1). Diese befindet sich parallel zu den beiden vorhandenen parallelen Bahnen, in einem Achsenabstand von ca. 1400m, nordwestlich von der heutigen nördlichen Landebahn (25R/07L) und wird eine voraussichtliche Länge von 2800m haben [1]. Das neue Landebahnmodell wurde einer integrierten Modellanalyse unterzogen, welche Daten hinsichtlich der Bahnabstände und mögliche Abhängigkeiten gemäß rechtlicher Bestimmungen liefert. Die daraus resultierenden Daten und Beziehungen wurden dem Modell hinzugefügt und gehen direkt in die Berechnungen des Anflugplanungssystems ein. Die Modellanalyse ergab einen Schwellenversatz in Betriebsrichtung 25 von 3561.94m und eine Parallelitätsabweichung von 0.468°. Der Abstand der Mittellinien von 25N und 25R wurde als 1422.75m berechnet, der Abstand zur 25L als 1939.7m. Gemäß dem durch die ICAO vorgegebenen Mindestabstand von 1035m für unabhängige Anflüge auf Parallelbahnen, können anfliegende LFZ auf die Landebahn Nordwest dementsprechend als unabhängig von dem bestehenden Parallelbahnsystem betrachtet werden (siehe *Independence*-Beziehung in BILD 1).

Eine Anflugplanung benötigt neben den vorgegebenen Separationsabständen Informationen über die Flugrouten, über die ein LFZ zu der neuen Landebahn gelangen kann. Die Luftraumstruktur für den Flughafen Frankfurt wurde im *AirspaceStructure*-Modell erweitert. In BILD 2 wird eine neue mögliche Anflugroute zur Landebahn Nordwest für die Betriebsrichtung 25 dargestellt. Diese vereinfachte Anflugroute wurde gewählt, um die bisherige Luftraumstruktur möglichst unverändert zu lassen und die Übersichtlichkeit des Luftraumes für die Fluglotsen zu gewährleisten. Die anfliegenden LFZ werden hier bis Wegpunkt DF021 (siehe AIP [10]) für die drei Landebahnen gemeinsam geführt.



BILD 2 Exemplarische Anflugroute für die Landebahn Nordwest

Nach diesem Wegpunkt trennen sich die Flugrouten in Richtung des Gates der ihnen zugewiesenen Landebahn. Die Koordinaten von Gate und Outer Marker (Voreinflugszeichen) für die Landebahn Nordwest wurden gemäß den Vorgaben des ICAO Annex 10 berechnet und als Wegpunkte dem Modell hinzugefügt [6]. Demnach wurden die Koordinaten des Outer Markers in 7200m Abstand von der Landebahnschwelle auf der verlängerten Anfluggrundlinie der 25N gesetzt. Vorgaben bezüglich Höhe und Geschwindigkeit für die neuen Wegpunkte wurden analog zu Gate und Outer Marker des vorhandenen Parallelbahnsystems übernommen.

Aufgrund der Lage der Landebahn Nordwest ist es denkbar, dass verschiedene heuristische Verfahrensweisen für Anflüge zur Anwendung kommen. Denkbar wäre beispielsweise eine Einschränkung, dass LFZ der Gewichtsklasse Heavy bevorzugt auf dem bestehenden Parallelbahnsystem 25R/25L landen. Dementsprechend wurde dem *AssignmentStrategy*-Modell eine optionale heuristische Regel zur Routen- und Landebahnenpräferenz für ausgewählte Gewichtsklassen hinzugefügt.

#### 4. SIMULATIONSUMGEBUNG

In diesem Kapitel werden die für die Simulationen der Anflüge verwendeten Komponenten und deren Interaktion vorgestellt (BILD 3). Daraufhin werden die Simulationsszenarien und Versuchsparameter beschrieben und abschließend werden die erwarteten Ergebnisse der Simulationen skizziert.

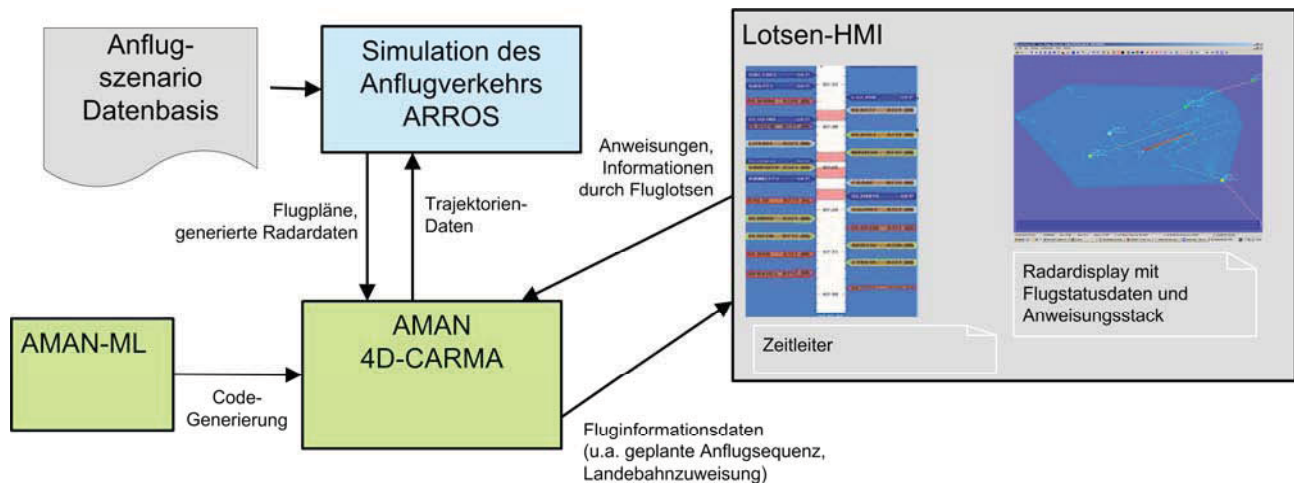
##### 4.1 Simulationsarchitektur

Die Modellierungssprache AMAN-ML ermöglicht eine flughafenspezifische Erstellung von Modellen für eine generische Anflugplanung. Für eine Anpassung des Anflugplanungssystems an neue Anforderungen werden in AMAN-ML die entsprechenden Modelle neu erstellt oder modifiziert und in lauffähigen Code transformiert, der als eigenständige Komponente in das Anflugplanungssystem 4D-CARMA integriert wird.

Zu den Aufgaben der Anflugplanung für einen Flughafennahbereich gehören die Bildung einer Anflugsequenz, die Zuteilung einer Landebahn, eines Landezeitpunkts, die Vorausberechnung eines horizontalen und vertikalen Anflugweges (4D-Trajektorie) sowie die Umsetzung dieser Vorgaben in entsprechende Führungsanweisungen. Das Anflugplanungssystem 4D-CARMA unterstützt Fluglotsen bei diesen Aufgaben, in dem es zunächst unter Berücksichtigung der aktuellen Luftraumstruktur die möglichen verschiedenen Anflugwege von der aktuellen Position der Luftfahrzeuge (LFZ) bis zur Landebahnschwelle berechnet. Die zu überfliegenden Wegpunkte unterliegen Beschränkungen bezüglich Höhe und Geschwindigkeit, die für jedes LFZ einzuhalten sind [4]. Anhand der festgelegten Flugwege, der Wetterdaten und der Leistungsdaten der einzelnen Flugzeuge (BADA) kann ein Zeitintervall für das Erreichen der Landebahnschwelle berechnet werden. Das Intervall aus frühest- und spätmöglicher Landezeit (Earliest/ Latest Estimated Time of Arrival) wird unter Berücksichtigung des kürzesten und längsten verfügbaren Flugweges aufgespannt [7]. Anschließend folgt eine Sequenzplanung, bei der verschiedene mögliche Landereihenfolgen bezüglich statischer und dynamischer Bewertungskriterien miteinander verglichen und eine optimale Landesequenz gebildet wird. Hierfür werden zunächst für jedes Luftfahrzeug einer betrachteten Landereihenfolge eine Landebahnzuordnung und eine Zielzeit (Estimate) ermittelt.

Eine effiziente Auslastung der Landebahnkapazität wird über die Zuweisung einer Landebahn nach verschiedenen heuristischen Strategien realisiert, die über AMAN-ML in die Berechnungen eingehen. Der Vergleich der Bewertungsergebnisse führt dann zur Etablierung einer Sequenz, die hinsichtlich der Kapazitätsauslastung des Flughafens optimiert ist. Mit diesen Daten kann dann eine 4D-Anflugtrajektorie berechnet werden, die ein zeitabhängiges horizontales und vertikales Flugprofil mit Angabe einzuhaltender Geschwindigkeiten für jedes Flugzeug enthält. Für jedes Flugzeug werden damit genaue Anweisungen generiert, wie von der aktuellen Position zur Landebahnschwelle geflogen werden sollte, um die von Reihenfolgeplanung und Bahnzuweisung bestimmte Landezeit einzuhalten.





**BILD 3** Architektur der Planungsunterstützung für die Simulation von Anflügen

Der anfliegende Verkehr wird durch den Radarsimulator ARROS (Arrival Operations Simulator) des Institutes für Flugführung simuliert. Der ARROS sendet initiale Flugplan- und Radarinformation, die aus einer Datei ausgelesen werden, an das Anflugplanungssystem. Aus diesen Informationen berechnet der 4D-CARMA Trajektorien für jedes einzelne Flugzeug. Diese Trajektorien werden im Folgenden vom ARROS als Grundlage für die Berechnung weiterer Positionsdaten herangezogen und dem AMAN wiederum als Eingangsdaten zur Verfügung gestellt. In der Simulationsumgebung können dementsprechend geplante Trajektorien durch die anfliegenden LFZ möglichst genau abgefliegen werden.

Die durch das Planungssystem generierten Fluginformationsdaten enthalten die geplante Anflugsequenz, Landebahnzuweisungen, Zielzeiten, Anweisungsvorschläge und 4D-Trajektorien für die einzelnen Flugzeuge. Diese werden an ein Lotsendisplay gesendet, welches neben Radardaten und dem Flugstatus auch eine Zeitleiter mit den geplanten Landezeiten der Flugzeuge anzeigt. Mögliche von einer Planung abweichende Anweisungen und Informationen durch Fluglotsen werden an das Planungssystem übermittelt und die die Planung integriert.

#### 4.2 Simulationsszenarien

Das um die neue Landebahn erweiterte Flughafenmodell wurde für verschiedene Simulationen konfiguriert und hinsichtlich der Betriebsart der Landebahnen (Anflug, Abflug, Mixed Mode Operationen), der Verkehrsdichte (geringe, mittlere, starke Landebahnauslastung), ausgewählten Strategien der Landebahnzuweisung sowie möglichen heuristischen bzw. rechtlichen Rahmenbedingungen angepasst. Das resultierende Anflugplanungssystem wurde anschließend in die Simulationsumgebung integriert. Diese Arbeit beschränkt sich auf die Darstellung der Versuchsergebnisse reiner Anflugsszenarien (Mixed Mode und Abflüge werden zunächst nicht betrachtet).

In den Simulationsversuchen wurden drei verschiedene Anflugsszenarien verwendet, die sich hauptsächlich in Bezug auf die Verkehrsdichte (Anzahl Flugzeuge innerhalb des betrachteten Zeitraums) unterscheiden. In TAB 1 sind die Basisdaten der einzelnen Szenarien gegenübergestellt. Die Simulationsdauer ist für alle Verkehrsszenarien auf ca. 1.5 Stunden festgelegt. Es wurde versucht die einzelnen Luftfahrzeuge gleichmäßig auf die Einflugpunkte der TMA in Frankfurt zu verteilen. Demnach ergeben sich für GEDERN (GED), SPESSART (PSA), OSMAX und ROLIS jeweils ein Anteil von 0.25 der Luftfahrzeuganzahl. Die Verteilung der Gewichtsklassen ist ebenfalls in der TAB 1 dargestellt. Während Flugzeuge der Gewichtsklasse Heavy und Light einen vergleichbar geringen Anteil einnehmen, bilden Flugzeuge der Gewichtsklasse Medium jeweils einen Anteil von 50%.

Die drei beschriebenen Verkehrsszenarien dienen als Grundlage um verschiedene Landebahnzuweisungsstrategien miteinander zu vergleichen und die Auswirkungen einer zusätzlichen Landebahn auf die Anzahl möglicher Flugbewegungen im Modellierungsszenario zu bestimmen. Hierfür wurden jeweils 4 Simulationen mit verschiedenen Versuchsparametern für die einzelnen Verkehrsszenarien durchgeführt. Die einzelnen Simulationen beschränken sich auf das Folgende:

In der ersten Simulation werden Anflüge ausschließlich auf das bestehende Parallelbahnsystem durchgeführt. Als Zuweisungsstrategie wird hier *Staggered* verwendet, d.h. die ankommenden Flugzeuge werden alternierend auf die 25L und 25R geplant. Diese Simulation dient als Grundlage zur Bewertung der Effizienz der getesteten Versuchsparameter der weiteren Simulationen.

Bei der zweiten Simulation werden Anflüge auf das abhängige Parallelbahnsystem und die neue Landebahn Nordwest betrachtet. Als Zuweisungsstrategie wird hier ebenfalls *Staggered* verwendet.

Szenario	Anzahl LFZ	Gewichtsklassen-Verteilung (H/M/L)	EntryPoint-Verteilung (GED/PSA/OSMAX/ROLIS)	Startzeit/Endzeit (Szenariendauer)
kleines Verkehrs-szenario	8	2/4/2 (0.25/0.5/0.25)	2/2/2/2 (0.25, 0.25, 0.25, 0.25)	1253800339/125380700 0 (6661)
mittleres Ver-kehrsszenario	34	9/17/8 (0.265/0.5/0.235)	9/9/8/8 (0.25, 0.25, 0.25, 0.25)	1253800339/125380700 0 (6661)
großes Verkehrs-szenario	48	12/24/12 (0.25/0.5/0.25)	12/12/12/12 (0.25, 0.25, 0.25, 0.25)	1253800339/125380700 0 (6661)

TAB 1 Simulationsszenarien

Die dritte Simulation verwendet *JoinTheLeastLoad* als Zuweisungsstrategie. Es werden hier, wie auch in der zweiten Simulation, Anflüge auf alle drei Landebahnen durchgeführt.

Als Basis für die vierte Simulation wird ebenfalls *JoinTheLeastLoad* eingesetzt, jedoch werden hier bei der Zuweisungsstrategie kleine Änderungen in Form einer heuristischen Regel vorgenommen. Die Bestimmung der Landebahn für ein Flugzeug ist hier zusätzlich für einige Gewichtsklassen eingeschränkt. Während LFZ der Gewichtsklassen Light und Medium auf den Landebahnen 25L, 25R und 25N landen dürfen, werden die verfügbaren Landebahnen für Heavies auf das bestehende Parallelbahnsystem eingeschränkt.

Für die Simulationsdurchführung wurden folgende Separationsannahmen für den Endanflug getroffen:

- Betrachtetes Flugzeug landet auf dem abhängigen Parallelbahnsystem (25L/25R): Einhaltung der Wirbelschleppenseparation zu Vorgänger auf 25L und 25R (keine Separation zu Vorgängern auf der 25N).
- Betrachtetes Flugzeug landet auf der Nordbahn: Nur Einhaltung der Wirbelschleppenseparation zu Vorgänger auf der gleichen Bahn. Keine Separation zu Parallelbahnsystem 25L/25R erforderlich.

Die Wirbelschleppenseparation erfolgt gemäß den Vorschriften der ICAO, wie in TAB 2 dargestellt.

Führendes LFZ	Nachfolgendes LFZ			
		HEAVY	MEDIUM	LIGHT
	HEAVY	4	5	6
	MEDIUM	3	3	5
	LIGHT	3	3	3

TAB 2 Wirbelschleppenseparation nach ICAO [9]

Für die einzelnen Simulationsläufe wurden die folgenden Daten erhoben:

- Durchschnittliche Flugstrecke (in nautischen Meilen): Die Gesamtflugstrecke aller Flugzeuge des Szenarios wird aus der geflogenen Distanz zwischen Einflugpunkt in die TMA und Landbahnschwelle berechnet und durch die Anzahl Flugzeuge dividiert.
- Durchschnittliche Flugzeit (in Sekunden): Die Gesamtflugzeit aller Flugzeuge wird aus der Zeitspanne zwischen Überfliegen des Einflugpunktes in die TMA und dem Landezeitpunkt berechnet und durch die Anzahl Flugzeuge dividiert.
- Durchschnittliche Separationszeit (in Sekunden): Die durchschnittliche Separationszeit im Endanflug ergibt sich aus der Differenz der Zeitpunkte der letzten und ersten Landung, dividiert durch die Anzahl Flugzeuge.
- Anzahl Holdings: Anzahl der Flugzeuge innerhalb des Versuchsszenarios mit mindestens einer zugewiesenen Holdingrunde.
- Durchschnittliche Holdingdauer (in Sekunden): Die Gesamtsumme der in Holdings verbrachten Flugzeit dividiert durch die Anzahl Holdings.

Generell werden bei den Versuchsergebnissen deutliche Verbesserungen der erhobenen Daten im Vergleich zwischen der 2-Bahnen-Simulation und den 3-Bahnen-Simulationen erwartet. Des Weiteren kann eine deutliche Verbesserung bei Verwendung von *JoinTheLeastLoad* im Gegensatz zu *Staggered* angenommen werden, da hier eine Optimierung hinsichtlich der aktuellen Landebahnauslastung vorgenommen wird. Inwiefern die modellierte Anflugroute zur 25N durch ihren vergleichsweise längeren Anflugweg die Ergebnisse hinsichtlich der Effizienz, gemessen an der durchschnittlichen Flugzeit und Flugstrecke beeinflussen, lässt sich hingegen nur schwer einschätzen.

Strategie Landebahnen Szenario	Staggered 25L, 25R klein	Staggered 25L, 25R, 25N klein	JLL 25L, 25R, 25N klein	JLL (H left) 25L, 25R, 25N klein
Anzahl Flugzeuge	8	8	8	8
Durchschnittliche Flugstrecke	112	103	99	99
Durchschnittliche Flugzeit	1461	1424	1349	1352
Durchschnittliche Separationszeit	150,625 125380160	138,75	123,125	122,5
t(erste Landung)	3 125380273	1253801573	1253801583	1253801583
t(letzte Landung)	3	1253802608	1253802493	1253802488
Anzahl LFZ mit Holdings	0	0	0	0
Durchschnittliche Holdingdauer	0	0	0	0

**TAB 3** Simulationsergebnisse für das Verkehrsszenario mit 8 LFZ

Strategie Landebahnen Szenario	Staggered 25L, 25R mittel	Staggered 25L, 25R, 25N mittel	JLL 25L, 25R, 25N mittel	JLL (H left) 25L, 25R, 25N mittel
Anzahl Flugzeuge	34	34	34	34
Durchschnittliche Flugstrecke	158	127	100	101
Durchschnittliche Flugzeit	1899	1835	1393	1401
Durchschnittliche Separationszeit	125,882353 125380160	115,8823529	84,55882353	84,41176471
t(erste Landung)	3 125380580	1253801573	1253801583	1253801583
t(letzte Landung)	8	1253805438	1253804383	1253804378
Anzahl LFZ mit Holdings	16	5	0	0
Durchschnittliche Holdingdauer	320	240	0	0

**TAB 4** Simulationsergebnisse für das Verkehrsszenario mit 34 LFZ

Strategie Landebahnen Szenario	Staggered 25L, 25R groß	Staggered 25L, 25R, 25N groß	JLL 25L, 25R, 25N groß	JLL (H left) 25L, 25R, 25N groß
Anzahl Flugzeuge	48	48	48	48
Durchschnittliche Flugstrecke	177	132	101	101
Durchschnittliche Flugzeit	2282	1915	1410	1418
Durchschnittliche Separationszeit	106,145833 125380160	90,20833333	85,20833333	85,20833333
t(erste Landung)	3 125380662	1253801573	1253801583	1253801583
t(letzte Landung)	3	1253805828	1253805598	1253805598
Anzahl LFZ mit Holdings	31	9	0	0
Durchschnittliche Holdingdauer	395	240	0	0

**TAB 5** Simulationsergebnisse für das Verkehrsszenario mit 48 LFZ

Die durchschnittliche Separationszeit eines Flugzeuges sollte sich bei den 3-Bahnen- Simulationen deutlich verringern, da unabhängige Staffeln bei Anflügen auf die Landebahn Nordwest hinzukommen. Der gemeinsame Anflugweg bis zum Wegpunkt DF021 ermöglicht hingegen eine relativ späte Aufteilung der anfliegenden LFZ auf abhängig und unabhängig zu betrachtende Flugwege. Es lässt sich daher schwer vorab einschätzen, ob diese Wegstrecke ausreichend ist, das Potenzial einer weiteren unabhängigen Landebahn vollständig auszuschöpfen.

## 5. GEGENÜBERSTELLUNG DER ERGEBNISSE

Die Ergebnisse aus den Simulationsläufen werden in diesem Kapitel dargestellt. Die Auswirkungen auf die Anzahl möglicher Flugbewegungen im Modellierungsszenario je nach Konfiguration des Landebahnmodells werden gegenübergestellt und hinsichtlich ihrer Effizienz und Sicherheit analysiert.

In TAB 3 sind die Ergebnisse der Simulationen für das kleine Verkehrsszenario gegenübergestellt. Bereits bei einem Verkehrsaufkommen von 8 Flugzeugen kann man anhand der Daten bereits erkennen, dass sich die Flugzeit und die Flugstrecke eines Flugzeuges bei Verwendung der neuen Landebahn bereits in kleinen Ausmaßen verringern. Bei einer Landebahnzuweisung über das *Staggered*-Verfahren können pro Flugzeug im Modellierungsszenario 6NM eingespart werden. Dies resultiert daraus, dass frühere Eindrehpunkte auf die Centerline gewählt werden können und die einzelnen Flugzeuge ihre Flugwege durch die gewonnenen Landebahnkapazitäten weniger stark ausweiten müssen. Auch die durchschnittliche Separationszeit über alle Flugzeuge verringert sich, welches in der nun auftretenden unabhängigen Separation zu Flugzeugen auf der Nordbahn begründet ist.

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse für die Simulationen mit mittlerem Verkehrsaufkommen (siehe TAB 4) verdeutlicht den in der ersten Versuchsreihe aufgezeigten Trend. Die Flugstrecke in einem 2-Bahnen-System verringert sich beispielsweise um 20% im Vergleich zu einem 3-Bahnen-System mit einer *Staggered*- Zuweisung. Bei Verwendung von *JoinTheLeastLoad* kann eine Verringerung von 27% erreicht werden. Leichte Verschlechterungen von *JoinTheLeastLoad* (*H left*) im Vergleich zur originalen *JoinTheLeastLoad*- Zuweisung lassen sich darüber begründen, dass eine optimale Landereihenfolge durch das Zuweisen von Heavies auf das abhängige Parallelbahnsystem nicht immer erreicht werden kann. Hohe Separationsanforderungen für nachfolgende Flugzeuge resultieren für Zuweisungen auf 25L wie auch 25R. Deutliche Verbesserungen durch die Verwendung der Nordwest-Bahn sind insbesondere bei der Anzahl der Holdings ersichtlich. Während bei der *Staggered*-Zuweisung im 2-Bahnsystem noch 16 Flugzeuge Warterunden mit einer durchschnittlichen Dauer von 320 Sekunden fliegen mussten, konnten diese Werte im 3-bahnsystem auf 5 Holdings mit einer durchschnittlichen Dauer von 240 Sekunden reduziert werden. In beiden Varianten von *JoinTheLeastLoad* konnte sogar ganz auf Holdings verzichtet werden.

Ein Vergleich des kleinen und mittleren Szenarios mit den erhobenen Daten für die großen Verkehrsszenarien zeigt, dass eine Steigerung des Verkehrsaufkommens mit einer Erhöhung von durchschnittlicher Flugzeit und Flugstrecke

verbunden ist. Die Anflugwege werden für die einzelnen Flugzeuge ausgeweitet, um möglichst viele LFZ gleichzeitig innerhalb der TMA zu bedienen und Wartezeiten in Holdings zu vermeiden. Die Separationszeiten werden weiter verringert, da weniger Pufferzeiten zwischen den Flugzeugen zur Verfügung stehen. Auch im großen Verkehrsszenario sind wieder deutliche Verbesserungen durch Anflüge auf die Nordwest-Bahn erkennbar. Bei *JoinTheLeastLoad* können Verringerungen der Flugstrecke von über 43% erzielt werden, während die Flugzeit um 38% reduziert werden konnte. Auch hier können über die optimierte Zuweisungsstrategie Holdings vermieden werden. Die Ergebnisse des großen Verkehrsszenarios sind in TAB 5 dargestellt.

Die Ergebnisse der Simulationsversuche zeigen, dass die Möglichkeit zusätzlicher Anflüge auf die Landebahn Nordwest die Anzahl möglicher Flugbewegungen im Modellierungsszenario, wie erwartet positiv beeinflusst hat. Flugzeiten und Flugstrecken pro Flugzeug konnten deutlich reduziert werden, sodass innerhalb eines Zeitraumes mehr Flugzeuge in Frankfurt landen konnten. Dies wird bereits bei den Simulationen für reine *Staggered*- Verfahren deutlich, zeigt sich jedoch insbesondere im Vergleich mit *JoinTheLeastLoad*. Teure und umweltbelastende Wartezeiten konnten reduziert oder sogar ganz vermieden werden. Auch die durchschnittlichen Separationszeiten verringerten sich, welches eine erhöhte Anzahl an Flugbewegungen ermöglichte. Dies zeigt dass die längeren Anflugwege auf die Nordbahn durch den Vorteil einer unabhängigen Staffeln kompensiert werden konnten. Auch die erst späte Trennung der Anflugwege nach dem Wegpunkt DF021 reichte bereits aus, um Staffelvorteile zum bestehenden Parallelbahnsystem im Ansatz zu verdeutlichen.

## 6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dieser Arbeit wurde die Modellierung von Anflugrouten, Landebahnssystem und Zuweisungsstrategien für die Landebahn Nordwest in Frankfurt vorgestellt. Das neue Flughafensystem wurde analysiert, gemäß verschiedener Versuchsparameter konfiguriert und in die Anflugplanung integriert. Anhand verschiedener Anflugszenarien sollten die modellierten Komponenten in AMAN-ML validiert und die Auswirkungen auf verschiedene Effizienzparameter prognostiziert werden.

Die Simulationen haben gezeigt, dass unabhängig von der verwendeten Zuweisungsstrategie Verminderungen der durchschnittlichen Flugstrecke und Flugzeit pro Flugzeug erreicht werden können. Der vergleichsweise längere Anflugweg auf die 25N im Modellierungsszenario konnte durch die entstehenden Separationseinsparungen kompensiert werden. Deutliche Effizienzsteigerungen konnten im Übergang von einem *Staggered*- auf ein *JoinTheLeastLoad*- Zuweisungsverfahren verzeichnet werden. Eine zusätzliche Einschränkung der Optimierung der Landesequenz über *JoinTheLeastLoad* durch präferierte Landebahnen für bestimmte Gewichtsklassen, hat zu relativ geringen Verschlechterungen von durchschnittlicher Flugzeit und Flugstrecke eines Flugzeuges geführt. Die erwarteten Ergebnisse konnten demnach über eine Modellierung und Simulation anhand von AMAN-ML bestätigt werden.



Die vorgestellten Ergebnisse gelten jedoch zunächst nur für die durchgeführten Simulationsversuche, die unter vereinfachten Bedingungen abliefen und somit nicht mit einem operationellen Einsatz gleichgesetzt werden dürfen.

Mit weiteren Simulationsversuchen könnten zusätzliche Anflugrouten zur Landebahn Nordwest validiert werden. Denkbar wären mögliche frühere Eindrehpunkte auf die Centerline aus dem Norden für die Anflugrouten aus OSMAX, ROLIS und GEDERN. Dies könnte bereits zu einer weiteren Steigerung der Effizienz durch verkürzte Anflugwege führen. Eine weitere Möglichkeit wäre die Modellierung von zwei vollständig getrennt verlaufenden Centerlines, die eine unabhängige Separation ab einem früheren Zeitpunkt für alle Flugzeuge ermöglichen würden. In diesem Modellierungsszenario würden die Flugzeuge einen gemeinsamen Gegenanflug nutzen, sich dann jedoch bereits ab dem Eindrehpunkt in unabhängige Endanflüge aufteilen lassen. Dies könnte mit vergleichsweise geringem Aufwand in AMAN-ML modelliert und in ein Anflugplanungssystem integriert werden.

In Bezug auf die Zuweisungsstrategien könnten verschiedene Schwellenwerte für Wartezeiten implementiert werden, die eine Nutzung der Landebahn Nordwest nur planen, wenn die Arbeitslast des abhängigen Parallelbahnsystems einen vorher bestimmbaren Grenzwert überschreitet. Bei einem geringen Verkehrsaufkommen könnte die Anflugplanung damit Zuweisungen auf die 25L/25R priorisieren und damit längere Anflug- und Rollwege vermeiden.

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

4D-CARMA	4-Dimensional Cooperative Arrival Manager
AIP	Aeronautical Information Publication
AMAN	Arrival Manager
AMAN-ML	Arrival Management Modeling Language
ATM	Air Traffic Management
ARROS	Arrival Operations Simulator
BADA	Base of Aircraft Data
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DSM	Domain Specific Modeling
DSL	Domain Specific Modeling Language
IATA	International Air Transport Association
ICAO	International Civil Aviation Organization
JLL	JoinTheLeastLoad

LFZ	Luftfahrzeug
NM	Nautische Meilen

## LITERATURVERZEICHNIS

- [1] FRAPORT AG, Neue Landebahn Nordwest, [http://www.ausbau.fraport.de/cms/default/rubrik/5/5856.neue\\_landebahn\\_nordwest.htm](http://www.ausbau.fraport.de/cms/default/rubrik/5/5856.neue_landebahn_nordwest.htm), 06.04.2010
- [2] FRAPORT AG, Prognose Luftverkehr, [http://www.fraport.de/cms/entwicklung\\_frankfurt\\_airport/rubrik/2/2399.prognose\\_luftverkehr.htm](http://www.fraport.de/cms/entwicklung_frankfurt_airport/rubrik/2/2399.prognose_luftverkehr.htm), 20.04.2010
- [3] Airports Council International, [http://www.airports.org/cda/aci\\_common/display/main/aci\\_content07\\_c.jsp?zn=aci&cp=1-5-54-57\\_666\\_2](http://www.airports.org/cda/aci_common/display/main/aci_content07_c.jsp?zn=aci&cp=1-5-54-57_666_2), 20.04.2010
- [4] D. Troegner, Entwicklung einer domänen-spezifischen Modellierungssprache zur Konfiguration und Implementierung eines generischen Landebahnzuweisungssystems, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2009, Aachen, Deutschland, 08. - 10. September
- [5] ICAO, Annex 14, Volume I to the Convention on International Civil Aviation: Aerodrome Design and Operations, International Standards and Recommended Practices, International Civil Aviation Organization (ICAO), 2004
- [6] ICAO, Annex 10, Volume I to the Convention on International Civil Aviation: Aerodrome Design and Operations, International Standards and Recommended Practices, International Civil Aviation Organization (ICAO), 2004
- [7] R. Hann, L. Christoffels, K. Muth, M.-M. Temme, M. Uebbing-Rumke, Zeitbasiertes Anflugmanagement mit 4D-CARMA zur Unterstützung von Dual Threshold Operations, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2008, Darmstadt, Deutschland, 23. – 25. September
- [8] N. Bäuerle, O. Engelhardt-Funke, M. Kolonko, On the Waiting Time of Arriving Aircrafts and the Capacity of Airports with One or Two Runways, European Journal of Operational Research, 2007, Vol. 177, S. 1180-1196
- [9] ICAO Doc4444, Procedures for Air Navigation Services: Rules of the Air and Air Traffic Services, Fifteenth Edition, 2007
- [10] DFS Deutsche Flugsicherung, DFS Luftfahrthandbuch Deutschland (Aeronautical Information Publication), 2010