

# ZEITBASIERTES ANFLUGMANAGEMENT MIT 4D-CARMA ZUR UNTERSTÜTZUNG VON DUAL THRESHOLD OPERATIONS

R. Hann, L. Christoffels, K. Muth, M.-M. Temme, M. Uebbing-Rumke  
Institut für Flugführung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)  
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig, Deutschland

## Zusammenfassung

Im Rahmen des EU-Projektes *Optimised Procedures and Techniques for Improvement of Approach and Landing* (OPTIMAL) wurde das Anflugplanungssystem 4-Dimensional Cooperative Arrival Manager (4D-CARMA) des Instituts für Flugführung des DLR für die Unterstützung von Dual Threshold Operations (DTOP) erweitert. Dieses Verfahren ist für hoch belastete Verkehrsflughäfen ein Anflugkonzept zur Kapazitätserhöhung. Jene kann durch Nutzung einer versetzten Landebahnschwelle und die damit unter bestimmten Umständen einhergehende Verringerung der horizontalen Staffelungsabstände erzielt werden. Vorangegangene Untersuchungen und Simulationen ergaben für das Parallelbahnsystem des Frankfurter Flughafens eine signifikante Erhöhung der Anflugkapazität [1]. Allerdings reduzierte sich die Abflugkapazität drastisch, wenn die Bahnen im Mixed-Mode genutzt wurden. Im Dezember 2007 und Januar 2008 wurden 4D-CARMA, der DLR-DMAN und die im Institut für Flugführung entwickelte Koordinationskomponente AMAN-DMAN Coordinator (ADCO) drei Wochen lang im Rahmen von OPTIMAL erfolgreich validiert. Die Auswertungen der Versuche zeigen, dass die Arbeitsbelastung der Lotsen mit zunehmendem Automatisierungsgrad verringert werden kann und dass sich die Vorhersagegenauigkeit des Lande-, aber insbesondere auch des Startzeitpunktes der Luftfahrzeuge deutlich verbessert. Durch die vom ADCO koordinierten Planungssysteme wurden bei Bedarf Zeitintervalle für Abflüge in der Anflugsequenz freigehalten, wodurch die Anzahl der Abflüge ohne deutliche Kapazitätseinbußen auf der Anflugseite den heute in Frankfurt üblichen Wert erreichte.

## 1. EINLEITUNG

Das Wachstum des Luftverkehrs in Europa wird stark beeinträchtigt durch Kapazitätsengpässe an den großen Hub-Flughäfen und die dadurch entstehenden Verspätungen. Daher liegt der Schwerpunkt der ATM-Forschung auf neuen Konzepten der Planung und Führung des Luftverkehrs. Teil aller dieser neuen Konzepte sind bodengebundene Planungswerkzeuge zur Unterstützung der Lotsen, so genannte bodenbasierte Entscheidungsunterstützungssysteme. Hierbei spielt die zeitbasierte Führung auf Grundlage von Trajektorieninformationen eine immer größere Rolle, sowohl im europäischen Forschungsumfeld von SESAR (Single European Sky ATM Research [2]) als auch im amerikanischen Raum mit dem Programm NextGen [3], das von der FAA aufgelegt wurde.

Ein wichtiges Werkzeug am Boden ist der Arrival Manager (AMAN), der für die Planung und Koordinierung des anfliegenden Verkehrs im Flughafennahbereich (ca. 100–150 nautische Meilen bis zur Landung) verwendet werden kann. Seine Hauptaufgaben sind:

- Reihenfolgeplanung
- Generierung von Trajektorien
- Generierung von Führungsanweisungen

Die Reihenfolgeplanung erstellt eine Anflugsequenz mit Zielzeitvorgabe für spezifische Punkte (z. B. Metering-Fix und Landebahnschwelle) der Anflugstrecken, um den Lotsen Vorschläge unterbreiten zu können, in welcher Reihenfolge und auf welcher Landebahn diese Flugzeuge

landen sollten. Je statischer die Sequenzbildung ist, desto geringer ist die Unterstützung für den Lotsen in kurzfristigen ungeplanten Situationen. Die Trajektoriengenerierung berechnet eine Anflugtrajektorie, die den Flug eines Luftfahrzeugs von seiner gegenwärtigen Position bis zur Landebahnschwelle beschreibt. Weiterhin ist die Generierung von Trajektorien die Basis für eine Erkennung und Vermeidung von Konflikten. Aus den berechneten Trajektorien können unmittelbar Führungsanweisungen für die Lotsen abgeleitet werden.

Im Folgenden werden verschiedene Anflugplanungssysteme vorgestellt, die seit Anfang der 80er Jahre entwickelt werden.

Das Anfang der 80er Jahre im DLR entwickelte COMPAS gilt heute als der „Vater“ aller Anflugplanungssysteme. Die Vorschläge für die Landereihenfolge inklusive der Bahnzuordnung wurden über den Metering Fixen eingefroren und konnten dann nur noch durch manuellen Lotseneingriff angepasst werden. [4]

Das von der DFS und dem DLR gemeinsam entwickelte Nachfolgesystem „4D-Planer“ ist derzeit am Flughafen Frankfurt/Main im operationellen Betrieb [5]. Es ermöglicht die Zuflussteuerung in die TMA durch „time to lose“- und „time to gain“-Anzeigen für die Sektorlotsen. Die Reihenfolge wird adaptiert, sobald die verarbeiteten Radardaten eine gegenüber der Ursprungsplanung veränderte Absicht des Lotsen erkennen lassen.

Fast parallel zu COMPAS wurde in Frankreich das MAESTRO-System entwickelt [6]. In seiner heutigen Ausbaustufe kann es auch mit einem Abflugplanungssystem gekoppelt werden, das die Vorgaben der Anflugplanung im Master/Slave-Verfahren berücksichtigt, wobei die Anflüge naturgemäß Vorrang haben. Entsprechend den vorher genannten Systemen kann auch bei MAESTRO der Lotse manuell die Sequenz beeinflussen [7]. Eine Besonderheit des Systems ist die Kopplung flughafenübergreifender Sektoren.

In den USA sind die im Auftrag der FAA entwickelten CTAS-Unterstützungssysteme zu nennen [8]. Das für die Lotsen im Anflugbereich entwickelte aFAST, ein Tool, das die Separation auf dem Final berechnet und daraus Anweisungen für die Lotsen generiert, wurde nach einer Testphase auf dem Flughafen Dallas/Fort Worth wieder außer Betrieb genommen, da es nach Ansicht der Lotsen zu ungenau gearbeitet hat [9][10].

Ein weiteres operationelles ATM-System ist OSYRIS von Barco Orthogon [11]. OSYRIS generiert Anflugsequenzen auf der Basis von gewünschten Ankunftszeiten. Separationsminima und Anflugprozeduren werden dabei beachtet. Es stellt Führungshinweise für den Sektorlotsen zur Verfügung, die zur Erreichung der gewünschten Ankunftszeit hilfreich sind. Der Verkehr wird kontinuierlich überwacht und die vorgeschlagene Sequenz wird dynamisch angepasst [12].

Der derzeit im DLR am Institut für Flugführung entwickelte AMAN-Prototyp 4D-CARMA hat sich die zeitbasierte Führung auf Grundlage von Trajektorieninformationen zum Ziel gesetzt. Er ist deswegen in der Lage, auch die Anforderungen Überwachung der Einhaltung von geplanten Trajektorien, Konflikterkennung und -lösung und Berücksichtigung des abfliegenden Verkehrs zu erfüllen. Eine tiefer führende Beschreibung des Anflugplanungssystems erfolgt im Kapitel 2. Die vom 4D-CARMA zeitgenau generierten Führungsanweisungen können den Lotsen bei mental besonders komplexen und kapazitätssteigernden Anflugprozeduren, wie z. B. die im Kapitel 3 beschriebene DTOP, unterstützen. In den Kapiteln 4 und 5 werden die Simulationsläufe zur Validierung und ihre Ergebnisse vorgestellt. Abschließend erfolgt im letzten Kapitel ein Ausblick auf ein innovatives DLR-internes Projekt zum Thema zeitbasierte Planung und Führung in bord- bodenseitiger Kooperation.

## 2. DAS ANFLUGPLANUNGSSYSTEM 4D-CARMA

Im Folgenden wird dieser Anflugplaner genauer beschrieben. Zur Unterstützung der Beschreibung sind die Interaktionen der einzelnen Komponenten in BILD 1 dargestellt. Ausgehend von der aktuellen Position der Luftfahrzeuge werden unter Berücksichtigung von Wetterbedingungen und Leistungsdaten der Flugzeuge (BADA) Trajektorien bis zur Landebahnschwelle berechnet, die ein Intervall aus frühest und spätest möglicher Ankunftszeit aufspannen (Earliest/Latest Estimated Time of Arrival – EETA/LETA). Dabei werden jeweils das schnellste Flugprofil (in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Flughöhe) für den kürzesten und das langsamste Profil für den längsten Flugweg verwendet. Aus diesen generierten Trajektorien lassen

sich die Zeitintervalle auch für beliebige signifikante Wegpunkte (beispielsweise Metering Fix) eines Luftfahrzeugs bestimmen.

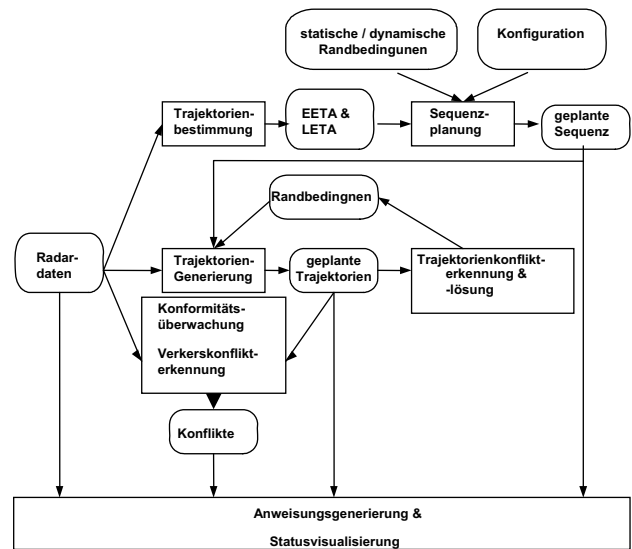


BILD 1. 4D-CARMA-Funktionseinheiten und Datenfluss

Bei der Sequenzplanung werden im Sinne eines hohen Durchsatzes möglichst frühe Landezeiten angestrebt. Allerdings geben neben den ermittelten Zeitintervallen weitere dynamische und statische Restriktionen die Randbedingungen für die Sequenzplanung vor. So ist beispielsweise innerhalb bestimmter Zeitintervalle keine Landung erlaubt (anflugfreies Intervall – AFI) oder möglich (Bahnsperre). Auch kann unter anderem ein Vergleich der potentiellen Sequenzen unter Berücksichtigung ihrer Lärmprofile innerhalb der TMA einen konträren Einfluss ausüben. Im Ergebnis sind die geplante Sequenz und die daraus resultierenden Landezeiten bezüglich unterschiedlicher teils widersprüchlicher Kriterien optimiert. Die ermittelten Landezeiten können zusammen mit den Positionen in der Sequenz und den Zustandsdaten der Luftfahrzeuge visualisiert werden.

Die geplanten Landezeiten dienen als Grundlage der Trajektoriengenerierung. Die resultierenden Trajektorien werden auf Konfliktfreiheit untersucht. Im Konfliktfall werden iterativ entsprechende Randbedingungen vorgegeben, um neue Trajektorien für die gleichen Zielzeiten zu generieren. Weichen Flugzeuge von ihrer zuvor geplanten Trajektorie ab, beispielsweise auf Grund von Lotsenanweisungen, wird eine Neuplanung der betreffenden Luftfahrzeuge initiiert. Dadurch ist 4D-CARMA in der Lage, sich jederzeit an die aktuelle Verkehrslage zu adaptieren.

Aus den geplanten Trajektorien werden konkrete Föhrungsanweisungen abgeleitet und dem Lotsen mit einem zeitlichen Vorlauf von einigen Sekunden angezeigt. Diese Anweisungen, die auch via Data-Link direkt übertragen werden könnten, umfassen die Eindrehanweisung für den Übergang vom Gegen- in den Queranflug, Geschwindigkeitsreduktions- und Sinkkommandos.

Ebenfalls am Institut für Flugführung des DLR wurde das System „AMAN-DMAN-Coordinator“ (ADCO [13][14]) entwickelt, mit dessen Hilfe eine Zusammenarbeit zwischen einem AMAN und einem Departure Manager (DMAN) erfolgen kann. Die Intention ist die Ressource Landebahn im Mixed-Mode-Betrieb effizient zu nutzen, indem im anfliegenden Verkehr optimale AFI's für Abflüge eingeplant und gleichzeitig die Anflüge so gering wie möglich beeinträchtigt werden.

Das Zusammenwirken von AMAN, DMAN und ADCO wird im Folgenden vereinfacht beschrieben. AMAN und DMAN leiten kontinuierlich ihre geplanten Sequenzen an den ADCO weiter, so dass dieser jederzeit über die Verkehrslage informiert ist. Periodisch analysiert der ADCO die Verkehrssituation und fügt wenn nötig und sinnvoll, ein AFI in die Anflugsequenz ein. Anflüge innerhalb eines AFI werden nun vom AMAN umgeplant. Die aktualisierte Planung wird wiederum an den ADCO gesendet, welcher die Informationen an den DMAN weiterleitet. Die entstandene Lücke in der Anflugsequenz kann nun für Abflüge genutzt werden. Vom DMAN wird die aktualisierte Abflugsequenz wiederum an den ADCO übertragen.

### 3. DUAL-THRESHOLD OPERATIONS IN FRANKFURT/MAIN

Die Entwicklung und die Erprobung einer zweiten, zur physikalischen Schwelle versetzten, Landebahnschwelle wurden an keinem internationalen Flughafen so weit vorangetrieben wie in Frankfurt am Main. Das vorhandene Parallelbahnsystem mit einem Abstand von 518 Metern erlaubt sowohl bei Starts als auch bei Landungen nur eine von einander abhängige Nutzung der Bahnen. Auf der Südbahn wurde für die Verwendung einer versetzten Schwelle in Landerichtung 25 eine 1500 Meter hinter der normalen Landebahnschwelle liegende neue Schwelle eingerichtet und mit dem Namen 26L gekennzeichnet. Diese

versetzte Schwelle wurde nur auf der Südbahn und nur für die Betriebsrichtung 25 installiert. Aufgrund der auf 2500 Meter verkürzten Landebahn waren nur Luftfahrzeuge der Gewichtsklassen Medium und Light zur Landung auf 26L zugelassen [15]. Als weitere Einschränkung durfte die versetzte Schwelle nur bei trockener Oberfläche und festgelegten Wetterminima angeflogen werden. Dazu gehörten Einschränkungen bei der Bodensichtweite, den Hauptwolkenuntergrenzen und der maximalen Rückenwindkomponente.

Für die Anflüge auf die versetzte Schwelle wurde eine neue, gegenüber der Standardbeleuchtung leicht abgewandelte, Bahnbeleuchtung entwickelt, installiert und sowohl im Simulator als auch im operationellen Betrieb getestet [16]. Zusätzlich wurden ein zweites Instrument Landing System (ILS) und ein zweiter Precision Approach Path Indicator (PAPI) aufgebaut.

Für Anflüge auf die versetzte Schwelle 26L wurden die Anflugverfahren gegenüber den Standardanflügen auf die physikalische Schwelle 25L leicht verändert. Gegenüber Landungen auf 25L wurde bei Landungen auf 26L das Final in 5000 Fuß statt in 4000 Fuß angeschnitten, der Top of Descent auf die Schwelle 26L verlagerte sich damit gegen die Flugrichtung. Durch den identischen Anflugwinkel von 3 Grad ergab sich so eine zusätzliche Höhenseparation von knapp 300 Fuß (ca. 90 Meter) auf dem Final (BILD 2). Dieses Verfahren wurde High Approach Landing System (HALS) genannt. Mit HALS war es ab 1999 möglich, die von der ICAO im Annex 14 [17] vorgeschriebenen Stafflungsabstände für abhängige Bahnsysteme für Flugzeug-Gewichtsklassenkombinationen von einem voraus fliegenden Heavy und einem direkt nachfolgenden Medium von 5 nautischen Meilen auf Radarstaffelung (2,5 nautische Meilen) zu reduzieren. Andere Gewichtsklassenkombinationen konnten aufgrund der Sicherheitsvorschriften nicht von dem zusätzlichen Separationsabstand profitieren.

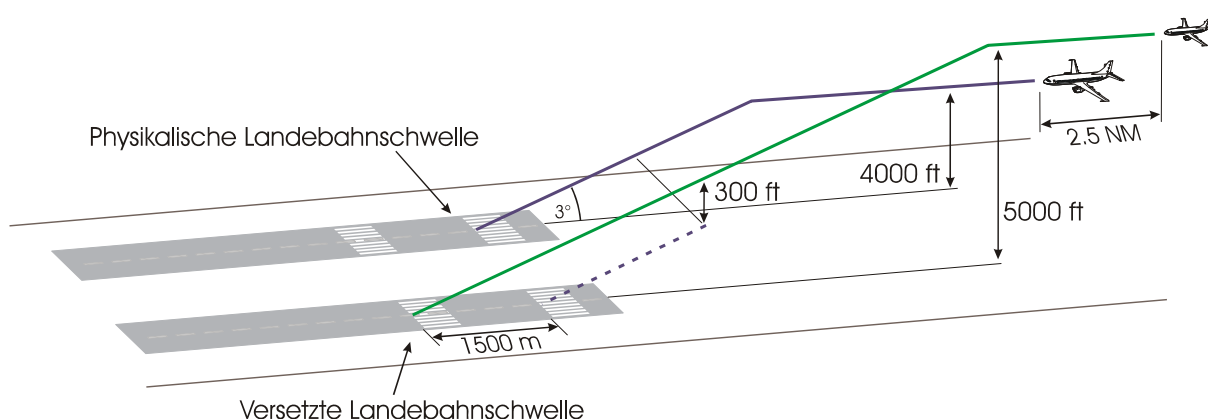


BILD 2. Schematische Darstellung von Anflügen mit versetzten Landebahnschwellen auf das Parallelbahnsystem in Frankfurt/Main

Im HALS-Betrieb durfte nur jeweils eine Schwelle pro Landebahn verwendet werden.

Eine deutlich kapazitätssteigernde Wirkung durch den Betrieb der versetzten Landebahnschwelle lässt sich beim HALS jedoch nur erreichen, wenn sich der anfliegende Verkehr entsprechend aus Luftfahrzeugen der Gewichtsklassen Heavy und Medium zusammensetzt, die darüber hinaus auch eine möglichst gleichmäßige Verteilung im Anflugstrom aufweisen müssen. Um bei dieser Einschränkung mehr Flexibilität zu erreichen, wurde das Verfahren Dual Threshold Operation (DTOP) entwickelt. Bei diesem Anflugverfahren sollten alle drei Schwellen (die physikalischen Schwellen 25R und 25L auf der Nord- beziehungsweise auf der Südbahn sowie die versetzte Schwelle 26L) gleichzeitig angefliegen werden können. Die Idee war, dass bei einer entsprechenden Gewichtsklassenkombination das einem Heavy folgende Medium auf der 26L landet und bei allen anderen Kombinationen Landebahnbefeuerung, ILS und PAPI auf die 25L umgeschaltet werden. Technische Einschränkungen sowie Zulassungsschwierigkeiten sorgten jedoch dafür, dass DTOP nicht in die Erprobungsphase ging.

Ein weiterer Grund für die Beendigung der Entwicklung war auch die Beobachtung, dass sich in Abhängigkeit vom Verkehrs-Mix durch die engere Staffelung des Anflugverkehrs die Anzahl der Abflüge so weit verringerte, dass sich die Gesamtzahl der Flugbewegungen auf dem Parallelbahnsystem kaum oder gar nicht verbesserte [1]. Zusätzlich kam es bei den Abflügen zu einer deutlichen Verlängerung der Taxi-out-Zeiten [16].

In Realzeitversuchen zeigten die Lotsen gegenüber DTOP eine hohe Akzeptanz, doch wünschten sie sich Systeme zur Unterstützung, insbesondere bei der Koordination zwischen den unterschiedlichen Lotsenarbeitsplatzpositionen [1]. Untersuchungen in Flugsimulatoren zeigten darüber hinaus, dass aus Sicht der Piloten keine größeren Belastungen beim Anflug auf zwei beleuchtungstechnisch voneinander getrennte Landebahnschwellen auf einer physikalischen Landebahn zu erwarten sind [18].

Bei der Sanierung der Südbahn wurden 2006/2007 in Frankfurt alle Markierungen und Unterflurfeuer entfernt, sodass der Anflug auf die versetzte Landebahnschwelle 26L heute nicht mehr unterstützt wird.

#### 4. SIMULATIONSLÄUFE

In diesem Kapitel werden die zur Simulation verwendeten Komponenten und deren Zusammenspiel vorgestellt (BILD 3). Daraufhin werden die Versuchsparameter beschrieben und abschließend wird ein Überblick über die Versuchsdurchführungen gegeben.

Zur Simulation des abfliegenden Verkehrs wurde der DLR-DMAN eingesetzt, der zyklisch optimierte Abflugsequenzen plant. Hierfür wurde ein bestimmtes Verkehrsszenario mit Zielkriterien vorgegeben. Des Weiteren wurde die aktuelle Anflugsequenz durch den ADCO an den DMAN übertragen. Mit diesen Informationen und weiteren Nebenbedingungen wird eine optimale Sequenz von Abflugzeiten mit den vorgeschalteten Abflugprozessen berechnet [19].

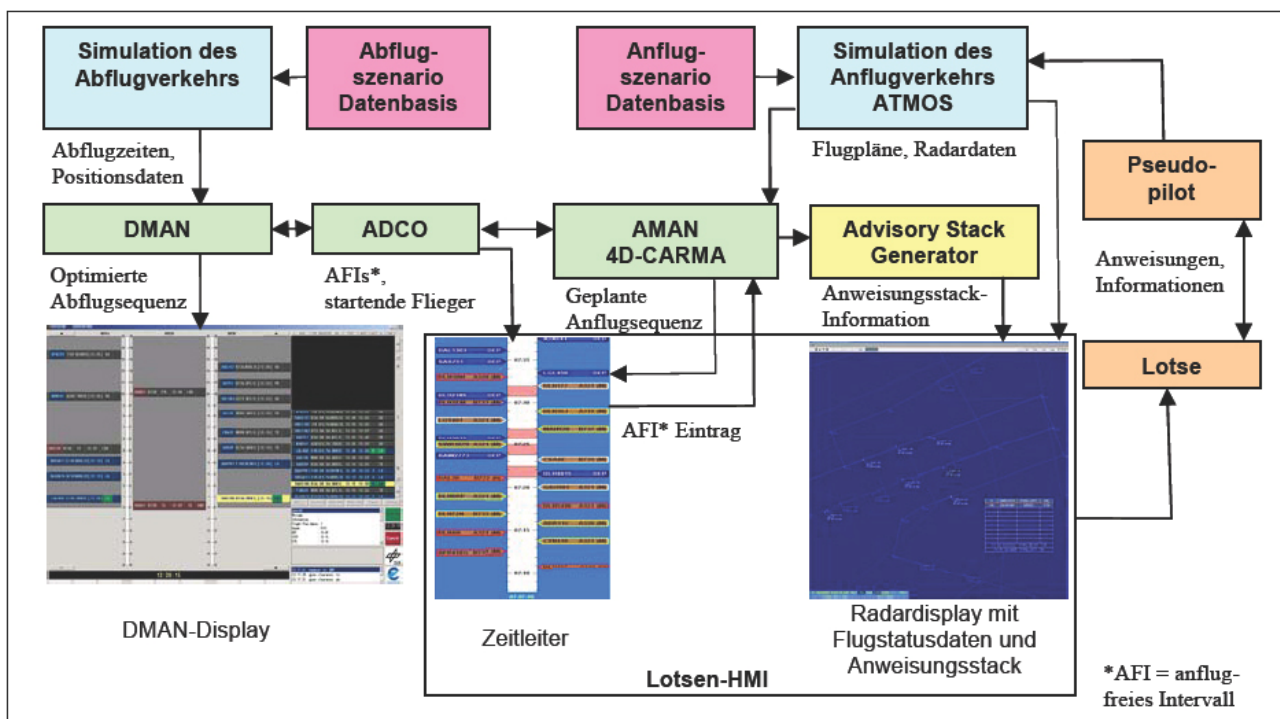


BILD 3. Architektur der Planungsunterstützung für An- und Abflug (nach [20])

Der anfliegende Verkehr wurde durch den Radar- und Flugsicherungssimulator ATMOS des Institutes für Flugführung simuliert. Der ATMOS sendet die Flugpläne und Radarinformation sowohl an das Radardisplay als auch an 4D-CARMA

4D-CARMA berechnet mit Hilfe dieser Daten und den vom ADCO generierten AFIs eine Landesequenz und schickt diese an ein Lotsendisplay in Form einer Zeitleiter. Aus den berechneten Trajektorien für den anfliegenden Verkehr werden Anweisungen abgeleitet und an einen Prozess weitergegeben, der diese so aufbereitet, dass sie dem Lotsen in geeigneter Weise dargestellt werden können (Advisory Stack Generator).

Die Zeitleiter, grafisch in BILD 3 aufgeführt, ist eine Anzeige für den Fluglotsen, auf der pfeilähnlich links und rechts einer zeitlich ablaufenden Leiste der an- und abfliegende Verkehr, abhängig von der zugewiesenen Landebahn, zu den jeweiligen Planzeiten dargestellt wird. Die AFIs werden auf der Zeitleiter farblich hervorgehoben.

Die Koordinationskomponente ADCO verbindet die Systeme AMAN und DMAN miteinander zum Austausch von Informationen und kann in verschiedenen Unterstützungsstufen betrieben werden. Darüber hinaus leitet der ADCO neben den AFIs auch Informationen über die startenden Luftfahrzeuge an die Zeitleiter. Die AFIs können über die Zeitleiter auch manuell vom Lotsen eingefügt werden.

Ein Radardisplay stellt die empfangenen Radar- und Flugplaninformationen sowie die Führungsanweisungen in Echtzeit und für die Lotsenpositionen Pick-Up und Feeder getrennt grafisch dar. Der Lotse hat die Möglichkeit, ein Luftfahrzeug über den Radarbildschirm zu einer anderen Lotsenposition zu übergeben.

Die vom Lotsen angewiesenen Geschwindigkeiten und Höhen können im Label der Luftfahrzeuge hinterlegt werden, sodass die angewiesenen und die tatsächlichen Werte zum schnellen Vergleich nebeneinander im Label angezeigt werden.

Nr.	4D-CARMA Modus	Landebahn	An-/Abflug-Koordinierung	Abflüge	Heavy-%
1	Passiv	25R/25L	Master/Slave	15	20%
2	Passiv	25R/25L	Master/Slave	15	40%
3	Passiv	25L/25R/26L	Master/Slave	15	20%
4	Passiv	25L/25R/26L	Auf Zuruf	15	20%
5	Zeitleiter	25L/25R/26L	Master/Slave	15	20%
6	Zeitleiter	25L/25R/26L	Master/Slave	15	40%
6-Ex	Zeitleiter	25L/25R/26L	ADCO	15	20%
7	Anweisungsliste	25L/25R/26L	Master/Slave	15	20%
8	Anweisungsliste	25L/25R/26L	ADCO	8	20%
9	Anweisungsliste	25L/25R/26L	ADCO	15	20%
10	Anweisungsliste	25L/25R/26L	Master/Slave	15	40%
11	Anweisungsliste	25L/25R/26L	ADCO	15	40%

BILD 4. Schematische Darstellung der Anweisungsliste vom 4D-CARMA

Der Advisory Stack Generator baut aus allen empfangenen Anweisungen, die aus den Trajektorien abgeleitet wurden, eine Liste der vom Lotsen als nächstes zu gebenden Führungsanweisungen auf (siehe BILD 4) und leitet diese an das Radardisplay weiter. Ein Eintrag in dieser Liste beinhaltet die Zeit, wann die Anweisung umgesetzt sein sollte, das Rufzeichen des Luftfahrzeugs, die Art der Anweisung und den Zielwert. Der Generator sorgt für den permanenten Neuaufbau der Liste in Echtzeit. Somit verringert sich der Zeitzähler für die Anweisung kontinuierlich und die auf dem Radardisplay bestätigten Anweisungen werden gelöscht.

Der Lotse kann die in der Anweisungsliste vorgeschlagenen Kommandos zur Führung der einzelnen Flugzeuge nutzen und während der Simulationen an Pseudopiloten weitergeben. Durch Bestätigung der Anweisung wird der Zielwert in das Label des Luftfahrzeugs übertragen. Abweichend von den Vorschlägen kann der Lotse auch andere Kommandos im Label hinterlegen. Die per Sprechfunk übermittelten Kommandos werden von Pseudopiloten über die Tastatur eingegeben und dienen der Steuerung des ATMOS.

Als Teil des Projektes OPTIMAL wurde 4D-CARMA für den Betrieb von DTOP erweitert. Zur Validierung jener Erweiterung haben drei Lotsenteams mit verschiedenen Kombinationen von Simulationsparametern jeweils für die Dauer einer Woche Versuche durchgeführt. Die Kombinationen der Simulationsparameter sind so gewählt worden, dass es immer zwei Versuchsläufe gibt, die sich nur in einem Parameterwert unterscheiden.

Nr.	4D-CARMA Modus	Landebahn	An-/Abflug-Koordinierung	Abflüge	Heavy-%
1	Passiv	25R/25L	Master/Slave	15	20%
2	Passiv	25R/25L	Master/Slave	15	40%
3	Passiv	25L/25R/26L	Master/Slave	15	20%
4	Passiv	25L/25R/26L	Auf Zuruf	15	20%
5	Zeitleiter	25L/25R/26L	Master/Slave	15	20%
6	Zeitleiter	25L/25R/26L	Master/Slave	15	40%
6-Ex	Zeitleiter	25L/25R/26L	ADCO	15	20%
7	Anweisungsliste	25L/25R/26L	Master/Slave	15	20%
8	Anweisungsliste	25L/25R/26L	ADCO	8	20%
9	Anweisungsliste	25L/25R/26L	ADCO	15	20%
10	Anweisungsliste	25L/25R/26L	Master/Slave	15	40%
11	Anweisungsliste	25L/25R/26L	ADCO	15	40%

TAB 1. Kombinationen der Simulationsparameter

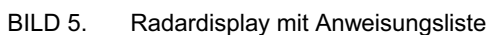
Die Variationen der Läufe, dargestellt in TAB 1 ergeben sich durch die Wahl des 4D-CARMA-Modus (passiv, mit Zeitleiter oder zusätzlich mit Anweisungsliste), das Hinzufügen der versetzten Schwelle, die Art der An- und Abflugkoordinierung (Master/Slave, auf Zuruf oder mit ADCO), die Anzahl der startenden Luftfahrzeuge (8, 15) und den Luftfahrzeuganteil der Gewichtsklasse Heavy des landenden Verkehrs (20%, 40%). Diese Variationen bedingen neben der steigenden Belastung auch unterschiedliche Unterstützungsgrade der Lotsen-Tools.

Die unterste Stufe zur Entscheidungsunterstützung war ein passiver AMAN, d. h. dieser läuft nur mit, um die vom DMAN benötigten Daten weiterzuleiten, und zur Erhebung



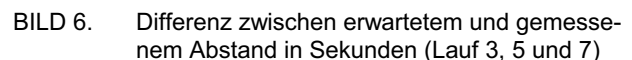
die Transitions erfolgen. Die Trajektorien des startenden Verkehrs wurden nicht simuliert. Ferner wurden Wettereinflüsse, mögliche Holdings und spezielle Operationen, wie zum Beispiel ein Go-Around, in der Simulation nicht betrachtet.

Die objektiv erhobenen Daten jedes Anflugs waren u. a. Landezeitpunkt und -schwelle, zurückgelegte Wegstrecke und Flugdauer und zeitlicher Abstand eines nachfolgenden Luftfahrzeugs zum gelandeten Luftfahrzeug. Abflugseitig wurden u. a. die Anzahl der Ablüge und die Dauer der Wartezeit vor der Startbahn festgehalten. Ferner wurde die Kommunikation der Lotsen mit den Pseudopiloten für Auswertungen protokolliert.



Die subjektiven Daten wurden mit Hilfe von Versuchsfragebögen und NASA-TLX nach jedem Lauf und einem Fragebogen nach jeder Simulationswoche ermittelt.

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der zuvor beschriebenen Simulationsläufe mit drei voneinander unabhängigen Lotsenteams vorgestellt. Die dazu gezeigten Grafiken und Tabellen zeigen immer die Ergebnisse aller Teams gemittelt bzw. akkumuliert auf. Anhand von Einzelbeispielen wird nachgewiesen, dass mit Hilfe interagierender Tools und unter Berücksichtigung der beschriebenen Randbedingungen eine bessere Handhabbarkeit einer versetzten Schwelle erreicht und eine damit einhergehende Kapazitätssteigerung erzielt werden kann.



In der Versuchsreihe, bestehend aus den Läufen 3, 5 und 7, wurde der Parameter 4D-CARMA-Modus von ‚Passiv‘, über ‚Zeitleiter‘ hin zur zusätzlichen ‚Anweisungsliste‘ variiert. Die anderen Parameter blieben konstant: Anflug auf die versetzte Schwelle, keine AFIs und 20% Heavy-Anteil im Anflugstrom. Somit wiesen die 3 Simulationsläufe einen unterschiedlichen AMAN-Unterstützungsgrad bei der Planung auf.

In BILD 6 sind die Unter- und Überstaffelungen der genannten Läufe aufgeführt. Hierzu wurde die akkumulierte Anzahl der Luftfahrzeuge über die Differenz zwischen

erwartetem und gemessenem zeitlichen Abstand in Sekunden aufgetragen. Die unterschiedlichen Simulationsläufe sind farblich hervorgehoben. Aus der Betrachtung der nahen Intervallgrenzen um den zeitlichen Abstand 0, d. h. wo die erwartete Separation der gemessenen entsprach, geht deutlich die Verminderung der Unter- und Überstaffelungen mit steigender AMAN-Unterstützung hervor.

Simulationslauf	Landezeit Summe	Letzte Landing	Letzter Start	Durchschnittl. Gesamtfluglänge [km]	Durchschnittl. Flugzeit [s]	Staffelungs-unterschreitung > 10s	Staffelungs-überschreitung > 10s
3	2139	08:01:35	08:17:17	160	1270	6	17
5	2058	08:00:20	08:13:52	152	1190	6	16
7	2063	08:01:47	08:14:15	152	1200	5	13

TAB 2. Durchschnittliche AMAN-Ergebnisse (Lauf 3, 5 und 7).

Weitere statistisch ermittelte und in TAB 2 zusammengefasste Ergebnisse zeigen, dass die Unterstützung der Lotsen durch 4D-CARMA auch über die Unter- und Überstaffelung hinaus positive Auswirkungen hat. Anflugseitig verringern sich die Summe der Landezeiten, die durchschnittliche Gesamtflugstrecke und die Flugzeit. Trotz einer einfachen Master/Slave-Koordinierung zwischen AMAN und DMAN wirken sich die Unterstützungstools positiv auf die Abflüge aus.

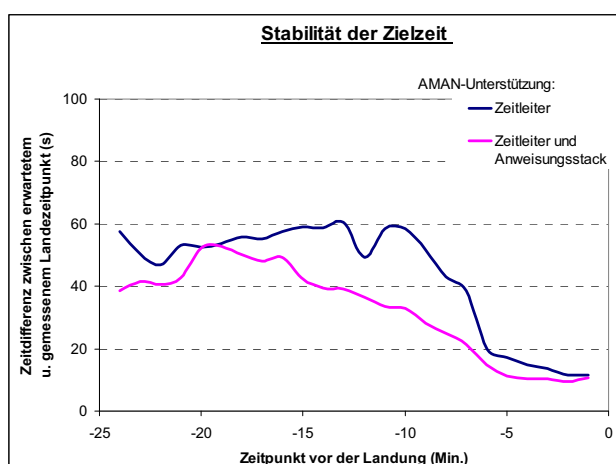


BILD 7. Zeitdifferenz zwischen erwartetem und gemessenem Landezeitpunkt in Sekunden (Lauf 6 und 10)

In den Simulationsläufen 6 und 10 ist der variierende Parameter wieder der 4D-CARMA-Modus – mit Zeitleiter und einer Anweisungsliste. Der einzige Unterschied in den konstanten Parametern zu der Versuchsreihe zuvor ist der von 20% auf 40% ansteigende Heavy-Anteil im Anflugstrom.

Anhand der in BILD 7 aufgetragenen Versuchsreihen lässt sich der Einfluss eines zunehmenden Grades an Lotsenunterstützung auf die Stabilität der Zielzeit nachweisen. Es

wurde die durchschnittliche Zeitdifferenz zwischen dem erwarteten und dem tatsächlich eingetretenen Landezeitpunkt in Sekunden über die letzten 25 Minuten vor der Landung aufgetragen. Um dem Auslöschungseffekt von negativen und positiven Zeitdifferenzen durch Mittelwertbildung entgegenzuwirken, wurden die Absolutbeträge der Differenzen abgebildet. Die Grafik in BILD 7 zeigt sehr deutlich die geringeren Differenzen bei der Unterstützung mit Zeitleiter und Anweisungsliste gegenüber nur der Zeitleiterunterstützung. Durch die Führung der Luftfahrzeuge nach vorgegebenen Kommandos entstehen weniger Abweichungen von den generierten Trajektorien, wodurch die Anzahl der Neuplanungen reduziert wird und damit die Zielzeiten konstanter bleiben.

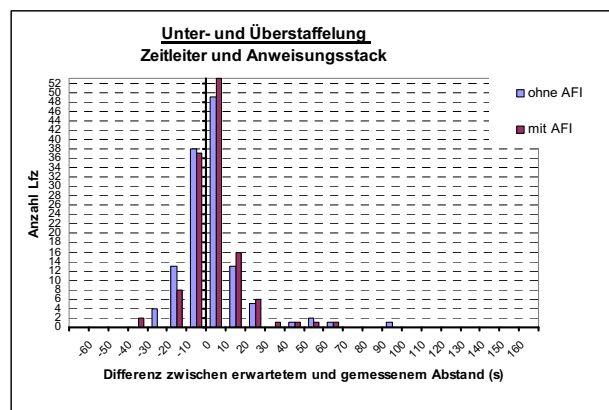


BILD 8. Differenz zwischen erwartetem und gemessenem Abstand in Sekunden (Lauf 10 und 11)

Die nächste Versuchsreihe setzte sich aus den Läufen 10 und 11 zusammen. Diese dienten der Untersuchung des Einflusses des ADCOs auf den an- und abfliegenden Verkehr bei hohem anflugseitigem Heavy-Anteil. Die 4D-CARMA-Unterstützungstools waren bei beiden Simulationen die Zeitleiter und die Anweisungsliste.

In BILD 8 sind analog zur Darstellung in BILD 6 die Differenzen zwischen erwartetem und gemessenem Abstand zwischen zwei Luftfahrzeugen aufgetragen. Bei Berücksichtigung von AFIs ist die Aufgabe des Lotsen ungleich schwieriger zu lösen. Er kann sich nicht mehr an den üblichen ICAO-Staffelungswerten von 3, 4 und 5 nautischen Meilen (bzw. deren Entsprechungen in Sekunden) orientieren, sondern bekommt vom ADCO z. B. die Vorgabe, eine Lücke von 118 Sekunden zum Vorgänger zu lassen. Trotz dieser ungleich anspruchsvolleren Aufgabe gibt es keine signifikanten Änderungen bei den Staffelungsverletzungen, wenn der Lotse durch Führungsanweisungen unterstützt wird.

Simulationslauf	Abflüge in % (bis zum letzten Anflug)	Mittlerer TTOT Error [s]	Mittleres Taxi-Out Delay [s]	Mittlere Wartezeit an der Startbahn [s]
10	71	214	463	377
11	100	133	268	217

TAB 3. Durchschnittliche DMAN-Ergebnisse (Lauf 10 und 11)

Ein gegensätzliches Bild ergibt sich bei der Betrachtung des abfliegenden Verkehrs (TAB 3). Erwartungsgemäß ist auch hier der positive Einfluss des ADCOs erkennbar. Die Anzahl der Abflüge innerhalb des Anflugstroms steigt durchschnittlich von 10,7 auf 15. Der Mittelwert aller Abweichungen zwischen vorhergesagter und eingetretener Startzeit sinkt von 214 auf 133 Sekunden. Die mittlere Taxi-out-Verzögerung, die Differenz zwischen der berechneten frühesten Startzeit zum Zeitpunkt des Start-Ups und der tatsächlichen Startzeit, reduziert sich um beeindruckende drei Minuten von 463 auf 268 Sekunden. Die mittlere Wartezeit an der Startbahn geht dabei um 160 Sekunden zurück. Zusammenfassend werden bei einer automatischen An- und Abflugkoordinierung die Effizienz und die Vorhersagbarkeit von Abflugoperationen deutlich gesteigert.

Simulationslauf	Landezeit Summe	Letzte Landung	Letzter Start	Durchschnittl. Gesamtfluglänge [km]	Durchschnittl. Flugzeit [s]	Staffelungsunterschreitung >10s	Staffelungsüberschreitung >10s
7	2063	08:01:47	08:14:15	151	1197	5	13
8	2085	08:01:09	07:54:33	157	1240	5	12
9	2097	08:02:06	08:00:12	154	1231	6	8

TAB 4. Durchschnittliche AMAN-Ergebnisse (Lauf 7, 8 und 9)

Die letzte hier vorgestellte Versuchsreihe umfasst die Simulationsläufe 7, 8 und 9. Der geänderte Parameter dieser Reihe war der Anteil des zu koordinierenden abfliegenden Verkehrs. Da im Master/Slave-Verfahren die Abflüge im Anflugstrom nicht explizit berücksichtigt werden, liegt deren Anteil an Gesamtbewegungen hier bei null Abflügen. Dieser steigert sich über 16% auf 26%. Die Unterstützungstools umfassen in allen drei Läufen Zeitleiter und Anweisungsliste. Der Heavy-Anteil im Anflugverkehr beträgt 20%.

In TAB 4 sind die gemittelten AMAN-Ergebnisse zusammengefasst. Diese lassen weder einen positiven noch einen negativen Trend erkennen. Die Werte in der Spalte, die die Zeit des letzten Starts protokolliert, bestätigt die allgemeine Hypothese, dass ohne AFIs die landenden Luftfahrzeuge so dicht gestaffelt werden, dass nur wenige Abflüge dazwischen ihre Freigabe erhalten. Sobald 4D-CARMA jedoch Informationen über AFIs erhält, verschieben sich die Startzeitpunkte nach vorne in Abhängigkeit von der Anzahl der Starts und dem erstellten Szenario.

Simulationslauf	Abflüge in % (bis zum letzten Anflug)	Mittlerer TTOT Error [s]	Mittleres Taxi-Out Delay [s]	Mittlere Wartezeit an der Startbahn [s]
07	51	304	586	408
08	100	139	391	287
09	95	122	207	153

TAB 5. Durchschnittliche DMAN-Ergebnisse (Lauf 7, 8 und 9)

Die gemittelten Ergebnisse des DMAN zu der Versuchsreihe mit den Läufen 7, 8 und 9 sind in TAB 5 zusammengetragen. Beim Vergleich der Läufe 8 mit 7 und 9 mit 7 wird die Verbesserung mit Hilfe des ADCOs durch die Planung von AFIs deutlich. Die 8 Abflüge im Lauf 8 können zu 100% starten. Im neunten Lauf starten noch 14 von 15 Luftfahrzeuge. Die aufgeführten Mittelwerte der Abflugkennzahlen in TAB 5 verbessern sich um 30% bis 63%.

Der Auszug der in diesem Kapitel vorgestellten Versuchsreihen zeigt exemplarisch die Einflüsse der verschiedenen bodenbasierten Entscheidungsunterstützungssysteme bei Variation eines Parameters in einer ansonsten konstanten Umgebung. Durch die Nutzung erweiterter 4D-CARMA-Funktionalitäten werden genauere Staffellungen und höhere Stabilität bezüglich der Zielkriterien erreicht. Darüber hinaus verkürzen sich die durchschnittliche Gesamtflugstrecke und damit auch die Flugzeit eines jeden Luftfahrzeugs. Die alleinige Verwendung des AMAN führt zu einem negativen Einfluss auf die Abflüge. Durch die Integration der Koppelungskomponente ADCO und der daraus resultierenden Generierung von Abflugintervallen kann diesem Effekt entgegengewirkt werden. Trotz des maßgeblich positiven Einflusses des DMAN auf den abfliegenden Verkehr wird der Landedurchsatz kaum verringert. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass dieser positive Trend auch anhält, wenn die Anzahl der Abflüge fast verdoppelt wird und somit der Anteil des abfliegenden Verkehrs an Gesamtbewegungen auf 26% steigt. Ein weiterer hier nicht direkt herausgestellter Aspekt ist, dass der Anteil an Anflügen der Gewichtsklasse Heavy bei einer Erhöhung von 20% auf 40% kaum Einfluss auf die Anzahl der Abflüge hatte. In den Simulationsläufen 9 und 11 wurde jener Parameter entsprechend variiert und die Ergebnisse in TAB 3 und TAB 5 zusammengefasst. Diese stellen deutlich bei ähnlicher Anzahl der Abflüge die Erhöhung sowohl der mittleren Verzögerungen bei den Taxi-out-Zeiten (um 30%) als auch der mittleren Wartezeit an der Startbahn (um 42%) heraus.

Neben den an- und abflugbezogenen Daten wurde auch die Arbeitsbelastung der Lotsen ausgewertet. Hierbei wurden die Auswirkungen der zusätzlichen versetzten Landebahnschwelle 26L und das Unterstützungspotential des Planungssystems ermittelt. Für detailliertere Informationen zur Erhebung und Auswertung der Daten wird auf [20] verwiesen. Im Folgenden werden Ergebnisse aus diesem Dokument vorgestellt.

Ohne Planungssystem nahm die Belastung der Lotsen beim Hinzufügen der dritten Schwelle um gut 11% beim Pick-Up und um 4% beim Feeder zu. Dieser Anstieg erklärt sich aus der gestiegenen Verkehrsdichte. Wurde beim Wechsel auf die versetzte Schwelle das Planungssystem in die Simulationsanordnung integriert, sank die Belastung beim Pick-Up um 9,5% und beim Feeder um 0,8% im Vergleich zu zwei Landebahnschwellen und ohne Unterstützungskomponenten. Im Weiteren ist der Einfluss der verschiedenen Unterstützungsstufen des Planungssystems mit der versetzten Landebahnschwelle 26L aufgeführt. Mit den Systemen der zweiten Unterstützungsstufe sank die Arbeitslast im Vergleich zur ersten beim Pick-Up um 18,4% wohingegen sie beim Feeder gleichzeitig um 0,3% anstieg. Die Anzahl der an die Pseudopiloten gegebenen Anweisungen reduzierte sich um durchschnittlich



2,6%. Bei Nutzung der Systeme der nächst höheren Stufe reduzierte sich die Belastung der Pick-Ups um gut 21% und der Feeder um gut 8% im Vergleich zur ersten Stufe. Die Anzahl der Anweisungen reduzierten sich um knapp 8% im Vergleich zur ersten Unterstützungsstufe. Bei diesen Werten muss der Trainingseffekt berücksichtigt werden. Der NASA-TLX stellte zwei Auffälligkeiten heraus. Zum einen über die Belastung der Lotsenarbeitsplätze, wobei der Feeder eine höhere Beanspruchung angab als der Pick-Up, und zum anderen über die gefühlte geringere Arbeitsbelastung mit Unterstützungssystemen. [20]

## 6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Ein Ergebnis dieser OPTIMAL-Validierung ist, dass ein potentiell kapazitätssteigerndes Anflugverfahren nicht gleichzeitig eine damit verbundene Erhöhung der Arbeitsplatzbelastung der verantwortlichen Lotsen bedeutet, sofern geeignete Planungs- und Entscheidungsunterstützungssysteme diesen Lotsen zur Verfügung stehen. Ferner konnte gezeigt werden, dass das in den Simulationen angewandte Anflugverfahren DTOP, welches in Simulationen der DFS einen negativen Einfluss auf den abfliegenden Verkehr gezeigt hatte, mit entsprechenden Unterstützungssystemen nicht zwangsläufig zu Behinderungen auf der Abflugseite führen muss. Die vorgestellten Ergebnisse gelten jedoch zunächst nur für die durchgeführten Echtzeitsimulationen, die unter vereinfachten Bedingungen abliefen und somit nicht mit einem operationellen Einsatz gleichgesetzt werden dürfen.

Ein weiterer Aspekt, der durch diese Simulationsläufe wieder deutlich wurde, ist die fehlende Information über die Absichten des Lotsen. Daher sind zwischen Läufen ohne und mit Anweisungsliste, bei denen die anderen Parameter konstant blieben, die Ergebnisse nicht immer deutlich besser geworden. Ohne die Absichten zu kennen, kann ein Anflugplanungssystem bestimmten Aktionen des Lotsen nur gewisse Wahrscheinlichkeiten einer möglichen Absicht zuordnen. Um diese Intentionen auf Grund bewusst herbeigeführter Abweichungen durch den Lotsen nicht voraussagen zu müssen, wird man im DLR-Projekt Future Air Ground Integration (FAGI) dazu übergehen, jene an das Planungssystem zu übergeben. Zwei dieser Interaktionsmöglichkeiten werden das Einfrieren einer bestimmten Teilsequenz und das Tauschen von Luftfahrzeugen in der Sequenz sein. Das Ziel des Projektes FAGI ist es, durch Einführung eines Late-Merging-Punktes in einem erweiterten Flughafennahbereich den Luftfahrzeugen den Anflug mit von der Fluglinie bevorzugten Flugprofilen auf jenen Punkt anzubieten, sofern die Luftfahrzeuge mit einem 4D-fähigen FMS ausgestattet sind. Ein bevorzugtes Flugprofil könnte z. B. einen CDA beinhalten, welches im Gegensatz zum Standardanflug Treibstoff sparender und lärmärmer ist. Zwischen den ausgerüsteten Luftfahrzeugen, deren geplante Landezeitpunkte vom 4D-CARMA im Prinzip wie anflugfreie Intervalle behandelt werden könnten, müssen die nicht ausgerüsteten geführt werden. Eine derartige Führung von Luftfahrzeugen setzt eine zeitbasierte Planung voraus. [21]

## 7. ABKÜRZUNGEN

4D-CARMA	<i>4-Dimensional Cooperative Arrival Manager</i>
ADCO	<i>AMAN-DMAN Coordinator</i>
aFAST	<i>Active Final Approach Spacing Tool</i>
AFI	<i>Arrival Free Interval</i>
AMAN	<i>Arrival Manager</i>
ATM	<i>Air Traffic Management</i>
ATMOS	<i>Air Traffic Management and Operations Simulator</i>
BADA	<i>Base of Aircraft Data</i>
CDA	<i>Continuous Descent Approach</i>
COMPAS	<i>Computer Oriented Metering Planning and Advisory System</i>
CTAS	<i>Center/TRACON Automation System</i>
DFS	<i>Deutschen Flugsicherung GmbH</i>
DLR	<i>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.</i>
DMAN	<i>Departure Manager</i>
DTOP	<i>Dual Threshold Operation</i>
EETA/LETA	<i>Earliest/Latest Estimated Time of Arrival</i>
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FAGI	<i>Future Air Ground Integration</i>
FMS	<i>Flight Management Systems</i>
HALS	<i>High Approach Landing System</i>
HMI	<i>Human Machine Interface</i>
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
ILS	<i>Instrument Landing System</i>
MAESTRO	<i>Means to Aid Expedition and Sequencing of Traffic with Research and Optimisation</i>
NASA-TLX	<i>NASA Task Load Index</i>
NextGen	<i>Next Generation Air Transportation System</i>

OPTIMAL	<i>Optimised Procedures and Techniques for Improvement of Approach and Landing</i>
OSYRIS	<i>Barco Orthogon's System for Realtime Inbound Sequencing</i>
PAPI	<i>Precision Approach Path Indicator</i>
SESAR	<i>Single European Sky ATM Research</i>
TMA	<i>Terminal Maneuvering Area</i>
TRACON	<i>Terminal Radar Approach Control (US)</i>

## 8. REFERENZEN

- [1] M. Huhnold, A. Kulikow, E. Haugg, O. Haßa, J. Reichenbach, S. Kind und E. Schubert, Real-Time Simulation Studies Concerning the Operational Aspects of Two Landing Thresholds on One Runway at Frankfurt/Main, 25th International Congress of the Aeronautical Science (ICAS), Hamburg, Germany, 3. - 8. September 2006
- [2] SESAR consortium, Eurocontrol, The ATM Target Concept, Definition Phase - Deliverable 3. Toulouse/France, September 2007, S. 106
- [3] U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration (FAA), [http://www.faa.gov/regulations\\_policies/reauthorization/](http://www.faa.gov/regulations_policies/reauthorization/), Next Generation Air Transportation System (NextGen), 6. Februar 2008
- [4] U. Völckers, Arrival Planning and Sequencing with COMPAS-OP at the Frankfurt ATC-Center, The 1990 American Control Conference, San Diego, California, 1990, S. 496-501
- [5] W. Gerling, D. Seidel, Project 4-D Planner, Institute of Flight Guidance, Scientific Seminar, Braunschweig, Germany, 2002
- [6] J.-L. Garcia, MAESTRO - A metering and spacing tool, 1990 American Control Conference, 9th, San Diego, California, 23. - 25. Mai 1990, S. 502-507.
- [7] L. Boursier, B. Favennec, E. Hoffman, L. Rognin, F. Vergne und K. Zeghal, Combining Sequencing Tool and Spacing Instructions to Enhance the Management of Arrival Flows of Aircraft. AIAA 5th Aviation, Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO), Arlington, Virginia, Published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 26. - 28. September 2005
- [8] R. Bach, W. Chan, J. Walton, Improving and Validating CTAS Performance Models, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Denver, Colorado, August 2000
- [9] J. E. Robinson, D. R. Isaacson, A Concurrent Sequencing and Deconfliction Algorithm for Terminal Area Air Traffic Control, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Denver, Colorado, August 2000
- [10] J. D. Welch, J. W. Andrews, J. E. Robinson, Assessing Delay Benefits of the Final Approach Spacing Tool (FAST), AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Montreal, Quebec, August 2001
- [11] Barco Orthogon GmbH, OSYRIS, <http://www.barco.com>, 2006
- [12] Orthogon AG Bremen, EVP WP4 AMAN Operational Functions, Juni 2002
- [13] L. Christoffels, D. Böhme, R. Brucherseifer, M.-M. Temme, Koordinierung von Anflug- und Abflugplanungssystem mit Hilfe eines Fuzzy-Regel basiertem Koordinierungssystems (ADCO) Paper DGLR-2006-177, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2006, Braunschweig
- [14] D. Böhme, R. Brucherseifer, L. Christoffels, Coordinated Arrival Departure Management, Paper No 102, 7th USA - Europe ATM R&D Seminar 2007, Barcelona
- [15] DFS, High Approach Landing System (HALS) Dual Threshold Operation (DTOP) Stufe 2 am Flughafen Frankfurt Main, Nachrichten für Luftfahrer, AIC IFR 9, Langen, DFS Deutsche Flugsicherung GmbH (German Air Navigation Services), 17. Mai 2001.
- [16] A. Kulikow, HALS - An innovative tool for increasing airport capacity, Scientific Seminar 2002, The Challenge of Integration, German Aerospace Center (DLR), Braunschweig, 30. - 31. Oktober 2002
- [17] 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
- [18] E. Schubert, J. Reichenbach, B. Küpper and O. Lehmann, Untersuchung der Fliegbarkeit sowie der Arbeitsbelastung von Piloten beim Betrieb zweier Landebahnschwellen auf einer Piste, DGLR Symposium, Bremen, Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt (DGLR), 25. - 27. Oktober 2004
- [19] M. Schaper, D. Böhme, Improved Departure Management through Integration of DMAN and A-SMGCS, Institut für Flugführung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), 2008
- [20] E. Klostermann, S. Hobein, B. Keck, M. Biella, B. Korn, Result of Frankfurt DT simulations, OPTIMAL, April 2008
- [21] H. Oberheid et al, Fuel Efficient and Noise-Reduced Approach Procedures using Late Merging of Arrival Routes, Institut für Flugführung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), 2008