

KOORDINIERUNG VON ANFLUG- UND ABFLUGPLANUNGSSYSTEMEN MIT HILFE EINES FUZZY-REGEL BASIERTEM KOORDINIERUNGSSYSTEMS (ADCO)

L. Christoffels, M.-M. Temme, D. Böhme, R. Brucherseifer
 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
 Institut für Flugführung, Abteilung Lotsenassistenz
 Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig

ABKÜRZUNGEN

ADCO	Arrival-Departure-Coordinator
AMAN	Arrival Manager
ATM	Air Traffic Management
CFMU	Central Flow Management Unit
CLOU	Cooperative Local Ressource Planner
DMAN	Departure Manager
EOBT	Estimated Off-Block Time
LUFO III	3. Luftfahrtforschungsprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie
K-ATM	Kooperatives ATM
KOPLAN	Kooperative Planung
MTOT	Managed Take-off Time
TOP	Total Operations Planner

1. EINLEITUNG

In den vergangenen Jahren hat der zivile Flugverkehr nahezu kontinuierlich zugenommen. Die steigenden Passagier- und Frachtzahlen resultierten sowohl aus einer Erhöhung der Anzahl der Flugbewegungen als auch aus einer Vergrößerung der Flugzeuge. Zur Unterstützung der Fluglotsen bei der effizienten und sicheren Abwicklung des landenden und startenden Verkehrs wurden in den letzten Jahren Arrival- und Departure-Manager (AMAN und DMAN) entwickelt und an mehreren europäischen Flughäfen eingesetzt. Doch obwohl die Ressource „Runway“ von Arrivals und Departure in bestimmten Fällen gemeinsam genutzt wird¹, existieren noch keine Managementsysteme, die Arrival- und Departure-Sequenzen automatisch koordinieren. Dies hat zur Folge, dass ein gewisser Anteil der potentiellen Bahnkapazität ungenutzt bleibt. Zusätzlich steigt das Risiko, dass Departures, denen von der CFMU ein Startfenster zugewiesen wurde, dieses aufgrund dicht aufeinander folgender Landungen verpassen. Beim Mixed Mode Betrieb von Runways haben sich die Departures üblicherweise den Arrivals unterordnen. Dies hängt damit zusammen, dass Luftfahrzeuge auf den Taxiways anhalten und warten können, wohingegen sich eine Verzögerung von im Anflug befindlichen Flugzeugen deutlich schwieriger gestaltet.

Im Rahmen des LUFO III-Projektes K-ATM – KOPLAN wird am Institut für Flugführung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) das System ADCO entwi-

ckelt, das auf der Basis von geplanten Start- und Landesequenzen und anderer Zustandsinformationen die Unterstützungssysteme AMAN und DMAN koordiniert.

Der ADCO wurde hierfür als eigenständiges System entwickelt, um eine Kopplung beliebiger AMAN- oder DMAN-Systeme zu ermöglichen, sofern diese über entsprechende Schnittstellen verfügen. Der AMAN muss zudem in der Lage sein, Zeitintervalle für „Bahnsperrungen“ zu berücksichtigen.

Aus diesem Grund ist das erste Ziel der AMAN-DMAN-Koordination eine verbesserte Bahnnutzung und somit auch eine Erhöhung des Departure-Durchsatzes. Die Verbesserung der Runway-Nutzung wird dabei durch eine Verkleinerung ungenutzter zeitlicher Intervalle erreicht, wobei diese sowohl in der Anzahl als auch in der Größe reduziert werden. Ein weiteres Ziel ist die Schaffung von Lücken für dringende Departures, die ansonsten ihre CFMU-Slots verpassen würden.

Die vom DLR entwickelte AMAN-DMAN-Koordinierung basiert auf der frühzeitigen Reservierung von Departure-Intervallen. Diese werden durch gewisse Verzögerungen der Arrivals erzeugt. Mittels eines Fuzzy-Regel-Systems bestimmt dabei der ADCO dynamisch die Größe und Lage dieser Intervalle. Hier muss im allgemeinen zwischen einer verbesserten Ressourcen-Nutzung und dem erhöhten Kontrollaufwand für die Anflugkontrolle abgewogen werden. Darüber hinaus muss natürlich auch ein Absinken des Arrival-Durchsatzes über einen größeren Zeitraum vermieden werden. Da bei dieser Art der Koordinierung die Departure-Planung auf den Arrival-Manager zurückwirkt, wird diese auch als bidirektionale AMAN-DMAN-Kopplung bezeichnet.

2. AUSGANGSITUATION UND ZIELSTELLUNG

Es existieren Arrival- und Departure-Manager als Systeme, die Fluglotsen bei der Erfüllung ihrer Aufgaben unterstützen. Die Planung des anfliegenden Verkehrs berücksichtigt dabei nicht den abzufertigenden Abflugverkehr. Sofern der AMAN verlässliche Prognosen hinsichtlich der Landezzeitpunkte bereitstellt, kann jedoch der DMAN bei seiner Planung die Arrivals berücksichtigen. Im technischen Sinn dann die Systeme AMAN und DMAN unidirektional gekoppelt. In einem operationellen Sinn besteht ein Master-Slave-Verhältnis zwischen Arrival- und Departure Management.

2.1. Arrival-Manager

Das Institut für Flugführung des DLR in Braunschweig entwickelt bereits seit mehreren Jahren Anflugplanungssysteme. Zu den Ergebnissen dieser Forschungsarbeiten über Arrival Manager (AMAN) gehören COMPAS [1] und

¹ Wir betrachten hier insbesondere den so genannten Mixed-Mode-Betrieb, bei dem eine Startbahn für Starts und Landungen genutzt wird. Ähnliche Überlegungen gelten auch für den Single-Mode-Betrieb (getrennte Bahnen für Arrivals und Departures), falls aufgrund des Flughafen-Layouts diese nicht unabhängig voneinander betrieben werden können.

der 4d-Planer [2]. Der jüngste AMAN, 4D-CARMA (4-dimensional Arrival-Manager), plant Anflugreihenfolgen und zeitgenaue Trajektorien für anfliegende Luftfahrzeuge auf unterschiedlichen Landebahnen. Das System verwendet dazu die in fünf Sekunden Abständen von den Radar-datenverarbeitungssystemen übermittelte aktuelle Luftverkehrssituation. Anschließend berechnet es auf Basis dieser Daten sowie den Flugplänen eine optimierte Landereihenfolge für alle sich im Anflug auf einen Flughafen befindlichen Flugzeuge und generiert für jedes einzelne Luftfahrzeug eine 4d-Trajektorie mit Steuerkurs-, Geschwindigkeits- und Höhenvorgaben, die eine sekundengenaue Landezeitvorhersage und damit eine optimale Nutzung der Landebahnsysteme ermöglichen.

Neben der Maximierung des Durchsatzes, der aus der geplanten Sequenz resultiert, muss der AMAN als weitere Kriterien die Anflugtrajektorien hinsichtlich ihrer Flugdauer, ihrer Lärmwirkungen und anderer Faktoren berücksichtigen. In jedem Fall muss die Planung noch alle sicherheits-relevanten operationellen Nebenbedingungen, wie beispielsweise die geforderten Separationen zwischen den Flugzeugen, aber auch physikalischen Randbedingungen, beispielsweise die frühest mögliche Ankunftszeit, berücksichtigen.

Das Planungssystem 4D-CARMA ist darüber hinaus in der Lage, sich an jede von der Planung abweichende Verkehrslage entsprechend anzupassen. Da 4D-CARMA als Lotsenunterstützungssystem konzipiert ist (und zudem auch die Flugzeuge nicht vollautomatisch landen) muss eine gewisse Planstabilität gewährleistet werden. Dazu verfügt das System über ein integriertes Planstabilitätskriterium, das dafür sorgt, dass sich die Sequenzen nicht bereits bei kleineren Abweichungen der Luftfahrzeuge verändern und es so eventuell innerhalb kürzester Zeit zu widersprüchlichen Manöveranweisungen für Lotsen und Piloten kommt.

2.2. Departure-Manager

Der DLR-DMAN (Departure Manager) ist ein interaktives Lotsen-Unterstützungssystem, das auf Basis von Flugplandaten und weiterer Informationen Abflugsequenzen für jede einzelne Startbahn eines Flughafens plant. Dabei wird die aktuelle Verkehrssituation, der Abfertigungszustand sowie vielfältige Vorgaben der Fluglotsen berücksichtigt [3].

Potentielle Lücken im anfliegenden Verkehr werden vom DMAN bestmöglich für Departures genutzt. Dazu ermittelt der DMAN günstige Zeitpunkte für die jeweiligen Verfahren des Departure-Vorganges (Start-up, Push-back,...). Der abgehende Verkehrsfluss wird dabei in geeigneter Weise reguliert, sodass unnötige Verzögerungen im Roll-verkehr (Taxi-out Delays) vermieden werden.

Das Ziel ist eine optimale Planung der Starts, sodass der Departure-Durchsatz möglichst maximiert wird, dabei aber unnötige Taxiout-Delays vermieden werden. Auch dieses System muss – wie auch der AMAN – eine gewisse Planstabilität gewährleisten und alle operationellen und physikalischen Randbedingungen einhalten. Von besonderer Bedeutung in diesem Zusammenhang ist hier die Fähigkeit des DMAN, Vorhersagen (Planungen) der Landereignisse einzubeziehen.

Der DLR-DMAN generiert auf der Basis komplexer operationeller Abfertigungs- und Bewegungsmodelle auf die Startsequenz abgestimmte Planzeiten für alle operationel-

len Abfertigungsschritte, insbesondere für Push-back und Start-Up.

Über eine elektronische Flugstreifen- und Zeitleiterdarstellung werden Clearance Delivery Lotse, Apron Lotse und Runway Lotse über Start-up Zeiten, Push-Back Zeiten, Taxi Zeiten sowie die geplanten Take-off Zeiten informiert. Neben der Harmonisierung der Abfertigungsvorgänge entlastet der DMAN auch die Departure Lotsen. Die Reduzierung der Taxi-out Delays tragen in einem erheblichen Maß zur Kosteneinsparung und zur Verringerung der Umweltbelastungen bei, da unnötige Triebwerkslaufzeiten vermieden werden.

2.3. Zielstellung

Bei einer einfachen Koordination werden Arrival- und Departure-Manager im Master-Slave-Mode betrieben. Dabei plant der DMAN die Start-Sequenz zwischen die vom AMAN geplanten Landungen. Die Kommunikation verläuft hierbei unidirektional vom AMAN über eine Kopplungskomponente zum DMAN.

Die einfache unidirektionale Koordination hat einige systembedingte Nachteile. So gibt es keinerlei Rückwirkung auf Landereignisse, selbst nicht für dringende Starts, die Gefahr laufen, ihren zugewiesenen CFMU-Slot nicht einzuhalten zu können. Aber auch geringere Korrekturen der Landezeitpunkte zur besseren Ausnutzung der Bahn sind nicht möglich.

Abb. 1 zeigt anhand eines fiktiven Beispiels das Verbesserungspotential einer nach dem Master-Slave-Prinzip geplanten Bahnnutzung. Die linke Seite zeigt eine Sequenz ① mit ungenutzten zeitlichen Lücken und potentiellen Verschiebungsmöglichkeiten von Arrivals und Departures. Auf der rechten Seite ist die mithilfe eines Fuzzy-Regelsystems ② koordinierte Sequenz dargestellt, bei der im betrachteten Zeitintervall ein zusätzliches Departure abgefertigt werden kann ③.

Durch die Koordination von Arrival- und Departure-Manager sollen folgende Ziele erreicht werden [4]:

- Eine effizientere Nutzung der Star- und Landebahn(en), die für Arrivals und Departures gemeinsam im Mixed-Mode betrieben werden.
- Der Durchsatz der Departures soll gegenüber einer unkordinierten Kopplung erhöht werden.
- Verletzungen von CFMU-Slots sollen soweit wie möglich vermieden werden.
- Der Durchsatz der Arrivals soll – über einen längeren Zeitraum betrachtet – nicht sinken.
- Der aus der Einführung von Departure-Intervallen resultierende Kontrollaufwand soll für den Approach Lotsen ein tolerierbares Maß nicht überschreiten

Diese Ziele werden durch folgende Maßnahmen erreicht:

- Einführung von Departure-Intervallen, in denen keine Landung stattfindet.
- Die Departure-Intervalle sollen in ihrer Größe so bemessen sein, dass
- Lücken, zwischen den Arrivals beziehungsweise einem Departure und einem nachfolgenden Arrival, die nicht genutzt werden können, vermieden werden.
- Es sollen insbesondere für dringende Departures, bei denen beispielsweise eine CFMU-Slot Verletzung droht, Departure-Intervalle geschaffen werden.

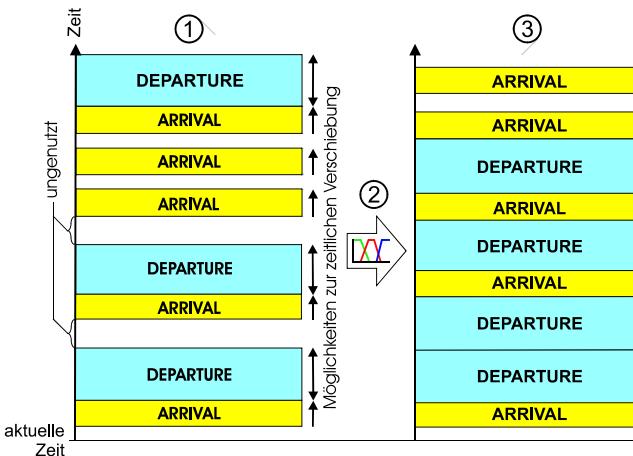


FIG. 1: Sequenz ohne ① und mit bidirektonaler Koordinierung ③

Bei der Realisierung der Ziele müssen folgende Randbedingungen eingehalten werden:

- Geplante Landungen können nur verzögert werden.
- Starts können unter Umständen auch früher stattfinden, wodurch sich gegebenenfalls aber eine andere Sequenz ergibt.
- Die Einführung der Koordination soll die bestehenden operationellen Verfahren so wenig wie möglich beeinflussen.
- Bei Einführung der Koordination sollte die Anpassung bestehender Systeme möglichst gering sein.
- Die Koordinierung soll mit allen Arrival- und Departure-Managern zusammenarbeiten können, die definierte Voraussetzungen erfüllen.

Aus den drei letzten Bedingungen ergibt sich, dass die verwendeten AMAN und DMAN modulare Komponenten bleiben können. Das Koordinierungssystem ADCO wird daher als eigenständige Komponente realisiert.

3. KOORDINIERUNG

Bei der Koordinierung von AMAN und DMAN müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein, um das Koordinierungsprinzip zur Departure-Intervall-Bestimmung anwenden zu können.

3.1. Voraussetzungen

Für eine Koordination müssen Arrival- und Departure-Manager bestimmte Voraussetzungen erfüllen. So ist es notwendig, dass zeitgenaue Landungen vom Arrival-Manager unterstützt werden. Der Departure-Manager muss in der Lage sein, die geplanten Landezzeiten des AMAN bei der Planung der Departures zu berücksichtigen.

Für die bidirektionale Koordination wird vom Arrival-Manager erwartet, dass geblockte Zeitintervalle bei der Planung berücksichtigt werden. Der Departure-Manager muss zusätzlich zur geplanten Sequenz auch eine idealisierte Sequenz ohne Berücksichtigung von Arrivals planen können.

3.2. Koordinierungsprinzip

Bei einer bidirektionalen Koordination mittels eines zusätzlichen Koordinationssystems können die Nachteile einer unidirektionalen Kopplung vermieden werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, die durch einen TOP geplanten, dynamischen Flusswerte für Arrivals und Depar-

tures auch bei dem taktischen Management zu berücksichtigen.

Die Koordination beruht auf der geeigneten Einfügung von so genannten Departure-Intervallen, wobei dieser Begriff Zeitintervalle bezeichnet, die für Departures auf einer Runway reserviert sind. Entsprechend stehen diese Intervalle für Landungen nicht zur Verfügung.

Prinzipiell erfolgt die bidirektionale Koordination in den nachstehend beschriebenen Schritten:

- 1) Arrival- und Departure-Manager senden jeweils ihre geplanten Sequenzen an den ADCO. Dadurch bekommt der ADCO eine Übersicht der aktuellen Verkehrslage.
- 2) Der ADCO bestimmt nun auf Basis der Planungen von Arrival- und Departure-Manager, ob beziehungsweise wie ein Departure-Intervall in die Landesequenz eingefügt werden kann. Das gegebenenfalls ermittelte Departure-Intervall wird zur Reservierung vom ADCO an den AMAN gesendet.
- 3) Aufgabe des Arrival-Managers ist es nun, die Sequenz so zu planen, dass keine Landungen im reservierten Departure-Intervall vorgesehen werden. Die aktualisierte Arrival-Sequenz (beziehungsweise die aktualisierten Landezzeiten) wird nun wiederum an den ADCO gesendet.
- 4) Der ADCO leitet die aktualisierte Arrival-Sequenz an den Departure-Manager weiter.
- 5) Der Departure-Manager kann die Lücken in der Arrival-Sequenz für die Planung von Departures nutzen.
- 6) Die aktualisierte Departure-Sequenz wird an den ADCO gesendet.

Die Departure-Intervall-Bestimmung (Schritt 2) ist hierbei für die Qualität der Koordination von entscheidender Bedeutung. Schritt 6 ist notwendig, um dem ADCO wiederum eine Übersicht über die aktuelle Verkehrssituation zu geben.

3.3. Departure-Intervall-Bestimmung

Zunächst werden Zeitpunkte bestimmt, die potentiell als Anfang eines Departure-Intervalls geeignet sein könnten. So sind beispielsweise die Zeitpunkte nach geplanten Landungen aussichtsreiche Kandidaten. Zeitpunkte dicht an der aktuellen Zeit sind nicht geeignet, da kein Spielraum mehr für Umplanungen gegeben ist. Wegen Unsicherheiten in der Planung sind Zeitpunkte, die zu weit in der Zukunft liegen, ebenfalls weniger geeignet.

Für die potentiellen Departure-Intervalle werden die relevanten Daten (Arrivals, Departures, Constraints, ...) der aktuellen Verkehrslage ermittelt. Aus diesen Daten werden Merkmale zur Charakterisierung der Situation abgeleitet. Ein Merkmal ist beispielsweise die Flexibilität der geplanten Landezzeiten von Arrivals, welches ein Maß für die verbleibenden Kapazitäten für Verzögerungen kennzeichnet. Auch das Ausmaß der Verzögerungen, welche sich durch ein potentielles Departure-Intervall ergeben, ist ein Merkmal. Weitere Kennzeichen sind die (erwartete) Nutzung eines potentiellen Departure-Intervall von einem Departure, sowie die Vermeidung von CFMU-Slot-Verletzungen durch Departures. Die entsprechenden Merkmalswerte werden über Funktionen bestimmt.

Die Eignung eines Zeitpunktes für ein Departure-Intervall wird durch ein Fuzzy-Inferenzsystem (FIG. 2) nach Mamdani [5] bestimmt. Der Einsatz eines solchen Fuzzy-Regelsystems erlaubt eine Modellierung der Koordinationsregeln anhand des Expertenwissens.

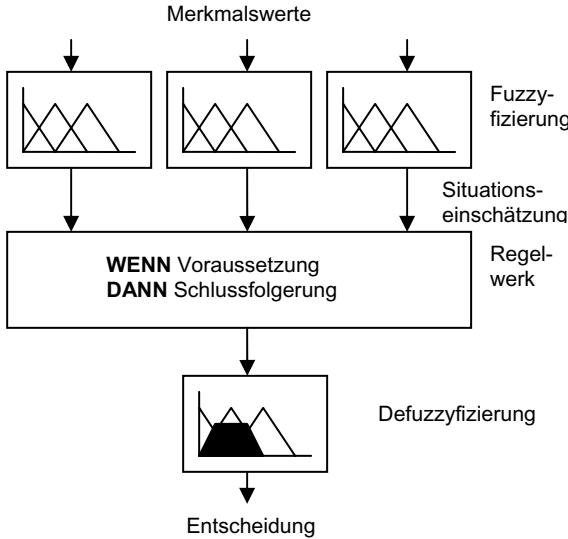


FIG. 2: Schema eines Fuzzy-Inferenzsystems

Für alle Merkmale sind entsprechende Eigenschaften (gut, schlecht, niedrig, hoch, kritisch, ...) definiert, auf die die scharfen Merkmalswerte durch Zugehörigkeitsfunktionen abgebildet werden, sodass für ein potentielles Departure-Intervall fest steht, zu welchem Grad die jeweiligen Eigenschaften der Merkmale zutreffen. Die Eignung eines Departure-Intervalls unter Berücksichtigung der aktuellen Verkehrslage ist damit in eine natürlichsprachliche Situationsbeschreibung überführt worden (Fuzzifizierung).

In einem Regelwerk (FIG. 3) sind die „Experten-Regeln“, die Eigenschaften der Merkmale, zu ebenso natürlich sprachlichen Schlussfolgerungen verknüpft.

Beispiel einer Regel:

WENN die Arrival-Verzögerungen gering sind
UND die Intervall-Nutzung sehr wahrscheinlich ist
DANN sollte ein Departure-Intervall eingefügt werden.

Im Fuzzy-Inferenzsystem sind mehrere derartige Regeln formuliert. Die Schlussfolgerungen werden schließlich defuzzifiziert. Überschreitet das Resultat der Inferenz einen vorgegebenen Schwellwert, wird vom ADCO ein Departure-Intervall zum betrachteten Zeitpunkt reserviert.

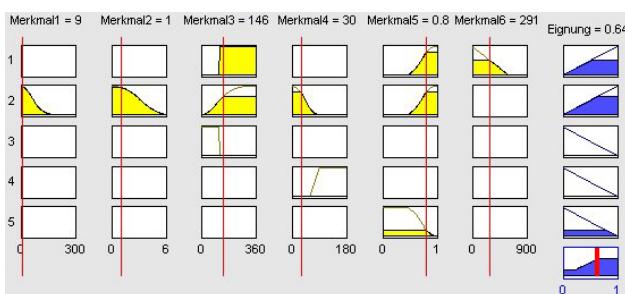


FIG. 3: Grafische Darstellung eines Regelwerks

Auf diese Weise werden sukzessive weiterer Zeitpunkte auf Eignung für die Reservierung eines Departure-Intervalls evaluiert.

4. RESULTATE

In der aktuellen Version des ADCO werden im Fuzzy-Inferenz-System nur wenige Merkmale ausgewertet und in einigen Regeln verarbeitet. Die reservierten Departure-Intervalle sind zurzeit noch statisch. Veränderungen in der Planung des AMAN und DMAN im Umfeld der bereits etablierten Departure-Intervalle haben momentan keinen Einfluss auf die bereits reservierten Intervalle. Durch Simulationen mit dem 4D-CARMA als Arrival-Manager und dem DLR-DMAN als Departure-Manager auf einem Flughafen mit einem Zwei-Bahnen-System konnte jedoch bereits jetzt eine Steigerung der Performanz nachgewiesen werden, die anhand eines Beispiels illustriert werden soll.

In FIG. 4 ist eine Simulation ohne Koordination durch den ADCO dargestellt. Die Messwerte (in Sekunden) sind über die Departures (laufende Nummer) aufgetragen.

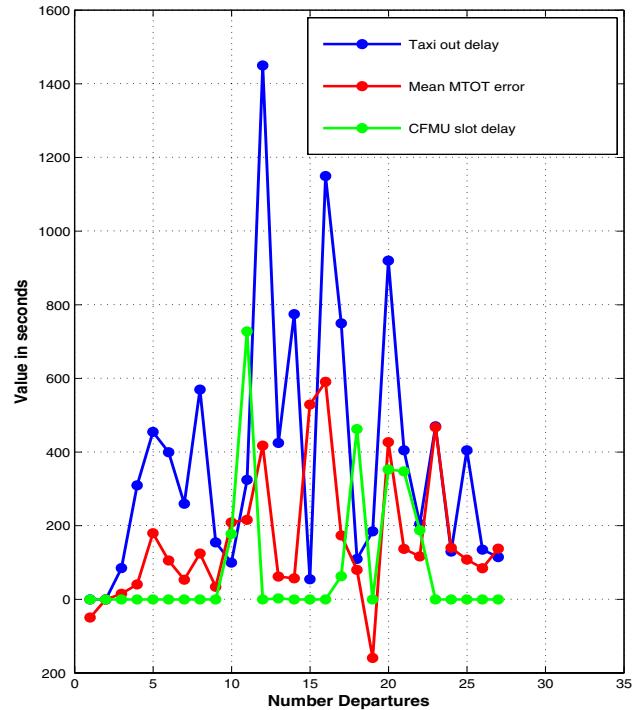


FIG. 4: Simulation ohne ADCO-Koordination

Folgende Werte wurden während der Simulation gemessen:

- Durchschnittliche Verzögerung beim Rollen (Mean Taxi-out Delay): 385 Sekunden
- Durchschnittliche Abweichung von der geplanten Startzeit (Mean MTOT Error): 175 Sekunden
- Durchschnittliche CFMU-Slot-Verletzung (Mean CFMU Slot Delay): 290 Sekunden
- Anzahl der CFMU-Slot-Verletzungen: 8
- Anzahl der Starts: 27
- Anzahl der Landungen: 58

FIG. 5 zeigt die Messwerte einer bidirektional koordinierten Simulation mit AMAN, DMAN und ADCO.

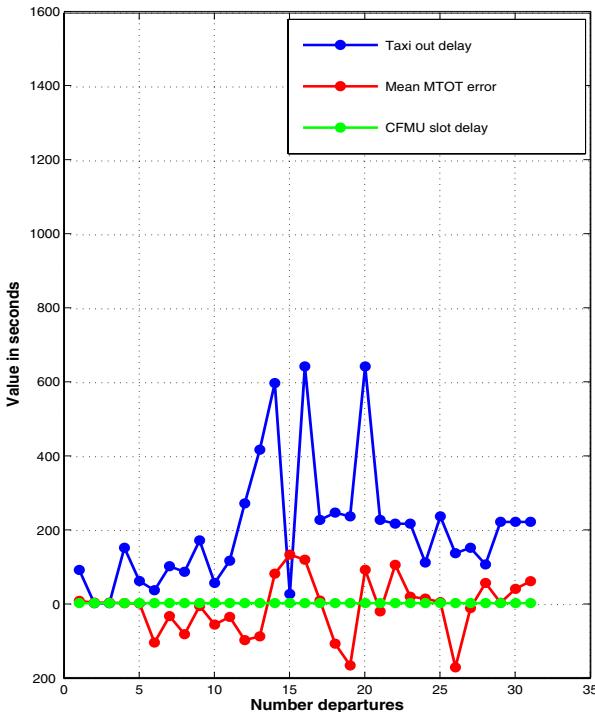


FIG. 5: Simulation mit ADCO-Koordination

Messwerte der Simulation mit ADCO-Koordination:

- Mean Taxi-out Delay: 199 Sekunden
- Mean MTOT Error: 56 Sekunden
- Mean CFMU Slot Delay: 0 Sekunden
- Anzahl der CFMU-Slot-Verletzungen: 0
- Anzahl der Starts: 31
- Anzahl der Landungen: 57

Ein Vergleich der beiden Simulationen ergibt folgende Verbesserungen der Messwerte durch Koordination mit ADCO:

- Mean Taxi-out Delay um 48%
- Mean MTOT Error um 68%
- Mean CFMU Slot Delay um 100%
- CFMU-Slot-Verletzungen um 100%
- Anzahl der Starts um 14,8%
- Anzahl der Landungen um -1,7% reduziert

Hier fällt insbesondere auf, dass mit Arrival-Departure-Koordination keine CFMU-Slot-Verletzungen aufgetreten sind. Eine derart optimale Verbesserung funktioniert allerdings nur solange die Arrivals noch Möglichkeiten zur Verzögerung der Landzeiten haben. Auffällig ist auch, dass die durchschnittliche Abweichung der Startzeit von der Planung (Mean MTOT Error) ohne Koordination im Wesentlichen aus Verspätungen und mit Koordination überwiegend aus Verfrühungen besteht. Die Simulationen erstreckten sich jeweils über einen Zeitraum von knapp zwei Stunden. In dieser Zeit verringerte sich der Durchsatz der Arrival um eine Landung. Dafür konnten aber vier Departures zusätzlich starten, sodass sich insgesamt die Anzahl der Bewegungen um ca. 1.5 Luftfahrzeuge pro Stunde erhöht hat. Um wirklich repräsentative Ergebnisse zu erhalten, müssen allerdings noch weitere Simulationen mit unterschiedlichen Verkehrsszenarien durchgeführt werden.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Am Institut für Flugführung des DLR in Braunschweig wurde ein erster Prototyp einer bidirektionalen Koordinierung von An- und Abflugsystemen (ADCO) entwickelt. Die Koordination erfolgt durch vom ADCO reservierte zeitliche Departure-Intervalle, in denen auf den betreffenden Bahnen keine Landungen erlaubt sind. Der ADCO wird vom AMAN und DMAN mit Sequenzinformationen versorgt. Aus der aktuellen Verkehrssituation werden die relevanten Merkmale bestimmt, sodass der ADCO mittels eines Fuzzy-Inferenzsystems eine Entscheidung für einen geeigneten Zeitpunkt zur Reservierung eines Departure-Intervalls treffen kann. Informationen über Aktualisierungen von Sequenzen und Reservierungen von Departure-Intervallen werden vom ADCO an AMAN und DMAN verteilt.

Der ADCO wurde mit dem Arrival-Manager 4D-CARMA und dem Departure-Manager DLR-DMAN zu einem Gesamtsystem verknüpft. Erste Simulationen ergaben, dass mit dem bereits implementierten Regelwerk des Fuzzy-Inferenzsystems ein höherer Durchsatz, eine Verringerung der Planabweichungen sowie eine Reduzierung der Verzögerungen bei den Departures erreicht werden können, obwohl die Arrivals nur wenig beeinträchtigt wurden.

Die weitere Arbeit wird sich auf die Simulation mit weiteren Verkehrsszenarien, die Verbesserung des Fuzzy-Inferenzsystems und die Dynamisierung der Departure-Intervalle konzentrieren.

6. LITERATUR

- [1] Völckers, U. (1990) Arrival Planning and Sequencing with COMPAS-OP at the Frankfurt ATC-Center. in The 1990 American Control Conference, San Diego, California.
- [2] Gerling, W. und D. Seidel (2002) Project 4D-Planner. in Scientific Seminar 2002 "The Challenges of Integration". Braunschweig, Germany: Institute of Flight Guidance, German Aerospace Center (DLR).
- [3] Böhme, D. (2005): Tactical Departure Management with the Eurocontrol/DLR DMAN. 6. FAA/Eurocontrol ATM R&D Seminar, Baltimore (USA), June 2005
- [4] Böhme, D. (2005): Airport CDM: The Contribution of the XMAN Approach. In: DLR [Hrsg.]: Airport - Bottleneck or Booster for Future ATM, 5th ATM R&D Symposium, Braunschweig (Germany), 2005-10-11 - 2005-10-13
- [5] Mamdani, E. H., Assilian, S. (1975): An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, International Journal of Man-Machine Studies, Vol. 7, No. 1, pp. 1-13.