

# MANUELLE ANFLUGROUTENANPASSUNG MIT UNTERSTÜTZUNG EINES LOTSENASSISTENZSYSTEMS ZUR IMPLEMENTIERUNG EINER ZEITBASIERTEN ANFLUGFÜHRUNG

F. Förster, O. Ohneiser, M.-M. Temme  
Institut für Flugführung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) Lilienthal-  
platz 7, 38108 Braunschweig, Deutschland

## Zusammenfassung

Mit der geplanten Einführung der Business-Trajektorie im Rahmen von SESAR (Single European Sky Air Traffic Management Research) werden sich neben der allgemeinen Planung und Koordination auch die Führungsaufgaben der Anfluglotsen in einer Terminal Maneuvering Area deutlich verändern. Wird heute mithilfe des Maßstabes auf einem Radardisplay (Human-Machine Interface, HMI) der anfliegende Verkehr abstands-  
basiert gestaffelt, so wird in Zukunft nicht nur die Einhaltung der Wirbelschleppenseparation essentiell, sondern auch die präzise Einhaltung von Zielzeiten an Wegpunkten und Landebahnschwellen. Durch die Entwicklung der optischen HMI-Funktion „Elastic Route“ (ERoute) bekommen Sektor- und Pick-up Lotsen ein AMAN-gestütztes Assistenzsystem in die Hand, mit deren Hilfe sie manuell in die AMAN-Planung eingreifen können und trotzdem eine unmittelbare Unterstützung bei der Übertragung der zeitbasierten in die gewohnte abstands-basierte Anflugführung erhalten.

## 1. EINLEITUNG

Da der Luftverkehr in den letzten Jahrzehnten immer weiter gewachsen ist und auch ein weiteres Wachstum vorhergesagt wird, werden die Kapazitätsgrenzen vieler Flughäfen, und dabei insbesondere die Grenzen großer Hubs, jetzt schon erreicht [1]. Ein Ansatz, dem steigenden Luftverkehr und den Forderungen nach weniger Kerosinverbrauch bei gleichzeitiger Fluglärmsreduzierung gerecht zu werden, ist die Entwicklung und Erprobung neuer Luftraumstrukturen. Im Enroute werden heute nach Möglichkeiten Direktflüge durchgeführt, doch im Flughafennahbereich nutzen insbesondere große Zivilflughäfen bis heute sogenannte Path Stretching Areas (PSA), die es den Anfluglotsen erlauben, den anfliegenden Verkehr sicher und gleichzeitig sehr präzise auf dem oder den Finals entsprechend der Wirbelschleppenvorschriften zu staffeln. Diese PSAs erschweren aber die generelle Implementierung von Kerosin sparenden und Fluglärm reduzierenden Anflugverfahren wie dem Continuous Descent Approach (CDA), da deren optimale Durchführung davon abhängt, in welcher Flughöhe sie beginnen und mit welchen Freiheitsgraden sie durchgeführt werden können. Werden die individuellen Geschwindigkeitsprofile auf Anflugrouten geflogen, die sich die CDAs mit konventionellen Anflügen teilen müssen, kann das zu einer deutlichen Herabsetzung der Anflugkapazität eines Flughafens führen [2].

Im DLR-internen Projekt Future Air Ground Integration (FAGI, 2007 bis 2009) wurde eine Luftraumstruktur entwickelt, innerhalb derer mit einem entsprechenden 4D-Flight Management System (4D-FMS) ausgerüstete Luftfahrzeuge räumlich diskrete Optimized Profile Descents (OPD) durchführen können [3]. Dazu gehören auch Continuous Descent Approaches, die neben unterschiedlichen Positionen für einen Top of Descent (ToD) auch die Möglichkeiten zum Abfliegen eines individuellen Geschwindigkeitsprofils benötigen.

Gleichzeitig erlaubt es die Luftraumstruktur, konventionell geführte Luftfahrzeuge über PSAs auf die Centerline und das Final zu führen. Dazu wurde auf dem Final gut fünf Nautische Meilen vor der Landebahnschwelle ein Late Merging Point (LMP) eingerichtet, an dem die 4D-FMS gesteuerten und die konventionellen Anflüge zusammengeführt werden. Alle 4D-FMS ausgerüsteten Luftfahrzeuge verhandeln bereits vor dem Erreichen ihres ToD über eine Bord-Boden-Datenlinkkommunikation eine Zielzeit für den LMP, die diese möglichst präzise einzuhalten haben. Dafür dürfen diese Luftfahrzeuge den LMP dann auf einer nahezu direkten Route anfliegen (BILD 1). Ein Anflugplanungssystem, im Projekt FAGI der Arrival Manager 4D-CARMA, koordiniert und sequenziert alle ankommenden Luftfahrzeuge so, dass es am LMP und der Schwelle zu keinen Konflikten zwischen den direkt anfliegenden und den konventionell geführten Luftfahrzeugen kommt.

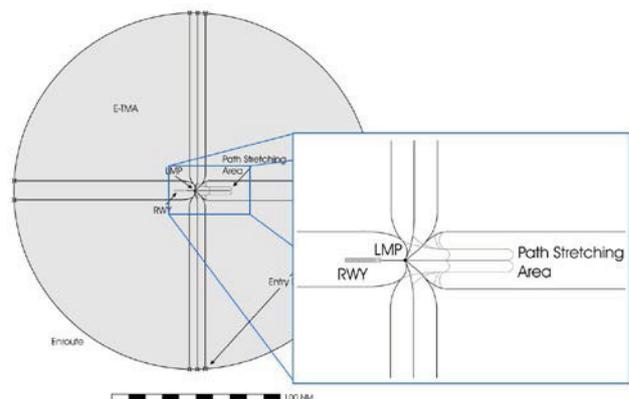


BILD 1. Aufbau der FAGI-Luftraumstruktur mit E-TMA, Late Merging Point (LMP) und Path Stretching Area.

Die Anfluglotsen stehen nun aber vor der neuen Herausforderung, Luftfahrzeuge nicht nur abstands-basiert, son-

den zusätzlich auch noch zeitbasiert zu führen. Ist es bisher ihre Aufgabe, die vorgeschriebenen Abstände zwischen den Luftfahrzeugen in der TMA beziehungsweise in der PSA und auf dem Final einzuhalten, so müssen sie bei einer zeitbasierten Führung zusätzlich noch darauf achten, dass die Luftfahrzeuge zu vorgegebenen Zeiten Wegpunkte überfliegen beziehungsweise zu bestimmten Zeiten Wegpunkte wie dem LMP frei zu halten.

Im Projekt FAGI wurden dazu Move- und Freeze-Funktionen für die Zeitleiter entwickelt und getestet, die es dem Lotsen erlauben, eine vom Arrival Manager (AMAN) vorgeschlagene Anflugsequenz durch einfache Drag and Drop Funktionen zu verändern. Der AMAN generiert dann auf der Basis dieser Eingaben eine neue angepasste Arrival Sequenz und bietet zu deren Implementierung durch den verantwortlichen Lotsen die volle Unterstützung durch Advisories und weiteren Führungshilfen. Die Freeze-Funktion hingegen erlaubt es dem Lotsen, die Adaptivität von 4D-CARMA (siehe Kapitel 3) temporär zu deaktivieren.

Zum Abschluss des Projektes FAGI wurden die Luftraumstruktur, das Anflugplanungssystem sowie neue optische Führungshilfen im Radardisplay bei mehrwöchigen Tests in Human-in-the-Loop Simulationen durch mehrere internationale Lotsenteams validiert.

## 2. ZEITBASIERTE ANFLUGFÜHRUNG

Die Lotsen haben im heutigen Luftraum des Area Control Center (ACC) und bedingt auch in der Terminal Maneuvering Area (TMA) die Möglichkeit, mithilfe von Geschwindigkeitsanweisungen steuernd in den Luftverkehr einzugreifen. Durch frühzeitiges oder spätes Verzögern der Luftfahrzeuge können Abstände vergrößert oder verkleinert werden. Bei größeren Veränderungen der Zielzeit an Wegpunkten oder der Schwelle weichen die Lotsen von den Standard Arrival Routes (STAR) ab und weisen den Luftfahrzeugen auch individuelle Ausweichrouten an, bei denen es sich um große Kreise oder Ellipsen (Warteschleifen oder Holdings) oder um kleinere Ausweichrouten handeln kann, um ein paar Sekunden abzubauen (Delay) oder aufzuholen (Shortcut).

Bei der zeitbasierten Anflugführung müssen Lotsen zusätzlich an bestimmten Merge-Punkten jedoch auch noch eine festgelegte Zielzeit einhalten, da diese Wegpunkte zu anderen (verhandelten) Zielzeiten von ausgerüsteten Luftfahrzeugen überflogen werden. Zu diesen verhandelten und damit festgelegten Zielzeiten dürfen keine anderen Luftfahrzeuge über die entsprechenden Wegpunkte geführt werden. Dies gilt in der FAGI-Luftraumstruktur insbesondere für den LMP, denn eine Höhenseparation ist dort aufgrund der Nähe zur Landebahnschwelle nicht mehr möglich. Beim Übergang von der heute üblichen abstands-basierten zu einer zeitbasierten Anflugführung benötigen Lotsen deshalb neben einer planerischen Unterstützung auch visuelle Führungshilfen am Radardisplay, die eine intuitive Umsetzung von einzuhaltenden Zielzeiten in eine räumliche Dimension ermöglichen sollten [2]. Routenverlängerungen können Lotsen mithilfe von geeigneten, im Display eingeblendeten Maßstäben recht genau abschätzen, ihre Auswirkungen auf die Zielzeit eines Luftfahrzeugs sind für sie jedoch insbesondere beim Durchfliegen von Kurven kaum vorhersagbar. Neben den in den letzten Jahren entwickelten und teilweise be-

reits im Einsatz befindlichen Führungshilfen wie der dynamischen Zeitleiter, kontextabhängigen Flugführungsanweisungshilfen (Advisories), Ghost- und Target-Labels, fehlen jedoch noch Systeme für den operationellen Einsatz, die es den Lotsen ermöglichen, direkten Einfluss auf die Anflugplanung zu nehmen und von deren Vorgaben abzuweichen, ohne auf die Planungsunterstützung durch einen AMAN verzichten zu müssen.

Die dynamische Zeitleiter gibt dem verantwortlichen Lotsen bereits heute eine Vorstellung davon, wie die geplante Sequenz aussieht und welche Zielzeiten die Luftfahrzeuge an der Schwelle einzuhalten haben. Eine weitere Unterstützung zur zeitbasierten Anflugführung stellen die 4D-CARMA-generierten Führungsanweisungen (Advisories) dar, welche den Lotsen zeitgenaue Führungshinweise geben, wann und an welchen Stellen sie „Turn-to-Base“- , Höhen- und Geschwindigkeitsanweisungen geben sollten, um ein Luftfahrzeug entlang einer bodengestützten Anflugtrajektorie präzise zu führen. Die Projektion von Luftfahrzeug-Labels auf dem Radardisplay in Form von Ghosts und Targets auf unterschiedliche STARs erlauben es den Lotsen, sich bereits im Voraus ein präzises räumliches Bild von der AMAN-Planung zu machen und so zu erkennen, wie das Ergebnis der AMAN-unterstützten Führung aussehen wird [5]. Doch im Verlauf der FAGI-Validierungskampagnen stellte sich heraus, dass Lotsen weitere und dedizierender zu steuernde Einflussmöglichkeiten auf die AMAN-gestützte Planung benötigen, um eine zeitbasierte Führung zu implementieren. Während der Versuche und in den anschließenden Nachbesprechungen wurde angemerkt, dass die Lotsen keine unmittelbare Unterstützung durch den AMAN erhalten, wenn sie Luftfahrzeuge von den Standardanflugrouten gezielt herunternehmen, um den Abstand zwischen zwei Anflügen manuell zu verändern. Die ERoutes-Funktion erfüllt nun in gewissen Grenzen die Anforderung, neben einer räumlichen auch eine direkte zeitliche Abschätzung einer Ausweichroute am Radardisplay zu erhalten.

## 3. DIE ANFLUGPLANUNG

In den 80er Jahren entwickelte das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) den sogenannten „Vater“ aller Anflugplanungssysteme, das COMPAS-System [6]. Aus einer Gemeinschaftsentwicklung des DLR und der Deutschen Flugsicherung GmbH (DFS) wurde das Nachfolgesystem 4D-Planer entwickelt. Dieses System wurde im September 2003 in den operativen Betrieb am Flughafen Frankfurt am Main genommen [7].

Das System 4 Dimensional Cooperativ Arrival Manager (4D-CARMA) ist eine Weiterentwicklung des 4D-Planer und ist eine Entwicklung der Abteilung für Lotsenassistenz im Institut für Flugführung des DLR. Es dient als Basis für Forschungsarbeiten im Air Traffic Management Bereich [8].

Die Anflugplanung wird vom System in mehrere Aufgaben unterteilt, welche von verschiedenen Modulen bearbeitet werden. BILD 2 stellt eine vereinfachte Übersicht über die Module des 4D-CARMA dar. Das Modul zur Wegpunktfindung (Lateral Path Prediction, LPP) ist für diese Arbeit von besonderer Bedeutung.

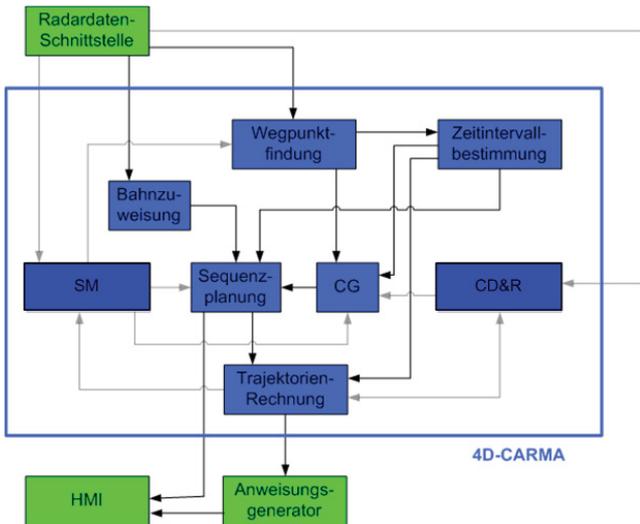


BILD 2. Module des 4D-CARMA-Systems [9] Das Modul Wegpunktfindung (Lateral Path Predictor, LPP) befindet sich oben in der Mitte.

### 3.1. Arbeitsweise des LPP

Das Lateral Path Prediction Modul besitzt die Aufgabe, für jedes konventionelle Luftfahrzeug, in Anlehnung an die zugrunde liegende Luftraumstruktur, die kürzeste sowie die längste STAR zu finden, welche von der aktuellen Position des Luftfahrzeugs zu allen verfügbaren Landebahnen führen. Eine STAR ist definiert durch eine Menge an Wegpunkten, wobei jeweils zwei Wegpunkte durch einen sogenannten Link verbunden sind. Mehrere Links ergeben dann die Route zur Landebahn.

Das Modul berechnet die kürzeste, erlaubte STAR unter Berücksichtigung des jeweiligen Path Stretch Verfahrens. Die gefundene STAR enthält somit u.a. die flexiblen Wegpunkte über die ein Path Stretching Verfahren ausgeführt werden kann. Über diese und andere Punkte kann dann die längste Route abgeleitet werden.

Um für ein Luftfahrzeug die kürzeste beziehungsweise längste Route zu finden wird zunächst, ausgehend von der aktuellen Position des Luftfahrzeugs, der nächstgelegene Link gesucht. Dies erfolgt unter Einsatz dreier Formeln [11]:

- (1) Messung der räumlichen Distanz zum Link:

$$d_{k,dist}(x_{k,1}, x_{k,2}, x) = \frac{\|x - x_{k,1}\| + \|x - x_{k,2}\|}{\|x_{k,1} - x_{k,2}\|} - 1$$

Mit

- $x_{k,1}, x_{k,2}$ : Start- und Endpunkt von Link  $k$
- $x$ : Position des Luftfahrzeugs

- (2) Messung der Einhaltung der Link- und Flug-Richtung:

$$d_{k,dir}(x_{k,1}, x_{k,2}, v) = \frac{2}{1 + \vec{v}^T(x_{k,1} - x_{k,2})} - 1$$

Mit

- $v$ : Richtung des Luftfahrzeugs

- (3) Messung der generalisierten Distanz vom einem Luftfahrzeug zu einen bestimmten Link  $k$ :

$$d_k(\alpha, x_{k,1}, x_{k,2}, x, v) = \alpha \cdot d_{k,dist}(x_{k,1}, x_{k,2}, x) + (1 - \alpha) \cdot d_{k,dir}(x_{k,1}, x_{k,2}, v)$$

Mit

- $0 \leq \alpha \leq 1$ : Gewichtungsfaktor

Nachdem der erste Link für ein Luftfahrzeug gefunden wurde, wird überprüft, zu welchen STARs dieser Link gehört. Im Anschluss wird aus diesen Routen die kürzeste ermittelt. Die längste Route ergibt sich dann aus der Anwendung des zur Verfügung stehenden Path Stretching Verfahrens.

Auf dem vom LPP ermittelten Ergebnis bauen die Berechnungen der nachfolgenden Module des 4D-CARMA auf, so dass am Ende eines Planungsdurchlaufs eine Trajektorie für die ermittelte Route berechnet wird.

### 3.2. Die ERoute-Funktion

Der Name ERoute setzt sich zusammen aus den Begriffen „Elastic“ und „Route“. Es wird dem Lotsen damit eine Möglichkeit zur Verfügung gestellt, mit der er in den operativen Betrieb eingreifen kann und bereits während der Einflussnahme über die resultierenden Auswirkungen informiert wird. Da die Anflugführung zeitbasiert erfolgen soll, erhält der Lotse eine Abschätzung, wie sich sein Eingriff auf den zeitlichen Verlauf insbesondere am LMP und an der Landebahnschwelle auswirken wird. Eine detailliertere Darstellung erfolgt in Kapitel 4. Die Funktionalität der ERoutes sieht es vor, eine Umplanung des Lotsen direkt in die Planung des 4D-CARMA einfließen zu lassen. Somit wird die gesamte Anflugplanung aller im Luftraum befindlichen Luftfahrzeuge an die neue Situation angepasst und dem Lotsen als neue Planungsgrundlage direkt zur Verfügung gestellt.

### 3.3. Die zeitliche Abschätzung der ERoute-Wegverlängerung

Eine sekundengenaue Ankunftszeit am Late Merging Point beziehungsweise der Landebahnschwelle kann erst nach der Trajektorienrechnung des AMAN erfolgen. Um dem Lotsen seine Auswirkungen auf die Ankunftszeit jedoch bereits während der Routenänderung zu verdeutlichen, wird ihm eine zeitliche Abschätzung der Veränderungen in der Ankunftszeit am HMI eingeblendet. Für diese Abschätzungen werden auf Basis von BILD 3 zunächst folgende Annahmen gemacht:

1. Das Luftfahrzeug fliegt zunächst mit der Geschwindigkeit, die aufgrund der AMAN-Planung an Punkt A erwartet wird, weiter:  $v_A$
2. Das Luftfahrzeug erreicht an Punkt D seine ursprünglich geplante Geschwindigkeit:  $v_D$
3. Zur Reduzierung der Geschwindigkeit wird auf der neuen Route die gleiche Strecke benötigt wie

auf der Ursprungsrouten.

Der Wegpunkt E ist für die zeitliche Abschätzung nicht von Bedeutung. Aus den oben genannten Annahmen ergeben sich die folgenden Berechnungsschritte:

- (4) Länge der ursprünglichen Strecke:

$$d_{alt} = \overline{AD}$$

- (5) Länge der ergänzten Strecke:

$$d_{neu} = \overline{ABCD}$$

- (6) Wegverlängerung durch den Umweg:

$$d_{diff} = d_{neu} - d_{alt}$$

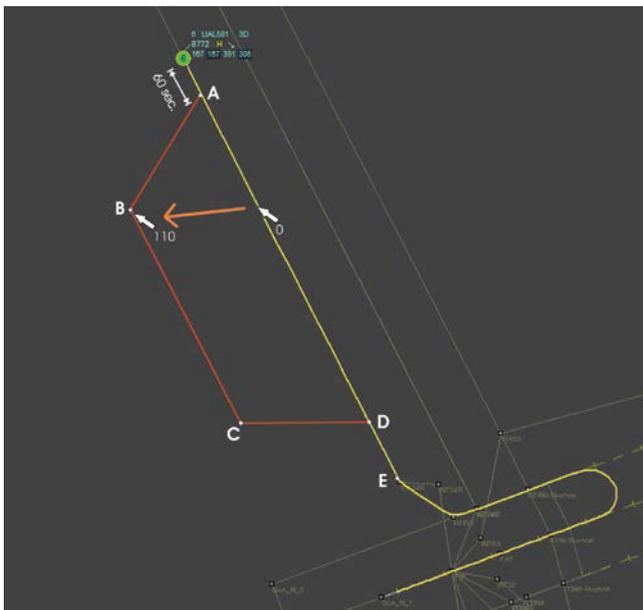


BILD 3. Darstellung der Anwendung einer ERouten mit zeitlicher Abschätzung von 110 Sekunden auf die Ankunftszeit am LMP. Der Lotse hat die Möglichkeit, sich die geplante Trajektorie eines Luftfahrzeugs anzuzeigen. Anschließend kann er diese mit dem Mauszeiger anfassen und zur Seite schieben. Dabei wird direkt am Mauszeiger die geschätzte zeitliche Verzögerung des Umweges angezeigt. Es werden dann die neuen Wegpunkte A, B, C, D und E eingefügt.

Die zeitliche Abschätzung ergibt sich dann aus dem Zusammenhang zwischen Strecke, Geschwindigkeit und Zeit und der folgenden Umformung:

$$(7) \quad s = v \cdot t \Rightarrow t = \frac{s}{v}$$

- (8) Zeitliche Abschätzung der Veränderung der Ankunftszeit:

$$t_{diff} = \frac{d_{diff}}{v_A}$$

Die Abschätzung stellt eine untere Schranke der möglichen zeitlichen Verlängerung der Strecke dar. Der AMAN führt auf die neue Situation nach der Änderung durch den Lotsen eine Optimierung unter Berücksichtigung von Wirbelschleppenseparationen durch, so dass es letztendlich zu leichten zeitlichen Verschiebungen nach hinten kommen kann.

### 3.4. Anpassungen des LPP für die Berechnung von ERouten

Eine ERouten wird von einem Lotsen über das Lotsendisplay für ein bestimmtes Luftfahrzeug erzeugt (siehe Kapitel 4). Liegt eine ERouten für ein Luftfahrzeug vor, so wird zunächst der nächste Link aus dieser Route zu dem Luftfahrzeug ermittelt. Anschließend erfolgt ähnlich wie bei den herkömmlichen STARs eine Zuordnung des ermittelten Links zu der entsprechenden Route, in diesem Fall zu der entsprechenden ERouten. Nachdem die ERouten eindeutig ermittelt ist, wird, wie bereits in Abschnitt 3.1 beschrieben, die kürzeste und damit auch die längste STAR ermittelt. In einem weiteren Schritt werden die STARs durch die Punkte der ERouten ergänzt.

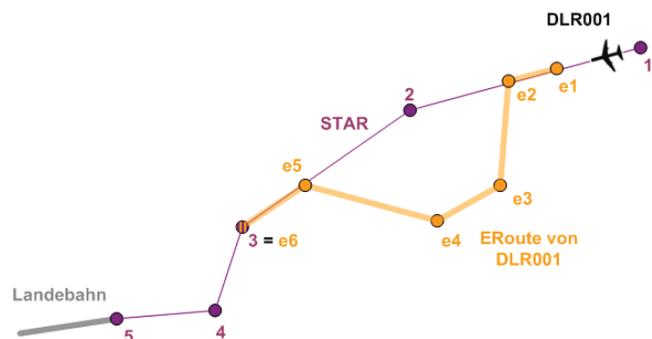


BILD 4. Skizze einer STAR und einer ERouten des Luftfahrzeugs DLR001.

BILD 4 stellt eine Skizze einer STAR sowie einer ERouten für das Luftfahrzeug DLR001 dar. Die abgebildete STAR besteht aus den Wegpunkten: {1, 2, 3, 4, 5}. Die ERouten erzeugt einen Umweg, so dass Punkt 2 und die mit diesem Punkt verbundenen Links nicht weiter berücksichtigt werden. Nach Ergänzung durch die ERouten ergibt sich für die DLR001 eine Route mit den Punkten: {e1, e2, e3, e4, e5, 3, 4, 5}. Bei Punkt 3 und Punkt e6 handelt es sich um denselben Wegpunkt, welcher als Übergang von der ERouten zur herkömmlichen Route dient.

Die neu entstandene Route wird in eine luftfahrzeugspezifischen Luftraumstruktur übernommen. Sie steht in Abhängigkeit zum Luftfahrzeug DLR001 und wird von diesem als STAR betrachtet. Wurde für ein Luftfahrzeug von einem Lotsen eine ERouten erzeugt, so sollte das Luftfahrzeug die neu generierte Route nicht verlassen. In weiteren Planungsschritten steht dem LPP für das entsprechende Luftfahrzeug demnach ausschließlich die neu generierte Route zur Verfügung. Eine Ausnahme besteht, wenn der Lotse die neue Route zurück nimmt. In diesem Fall existiert die ERouten nicht mehr und das Luftfahrzeug wird wieder auf konventionelle Weise durch den LPP be-

arbeitet.

### 3.5. Weitere Anpassungen

Neben den Anpassungen am LPP mussten weitere fundamentale Adaptionen am 4D-CARMA durchgeführt werden, um die Funktionalität der ERoutes zu gewährleisten.

Die Luftraumstruktur wurde bisher durch ein statisches Airspace-Model beschrieben. Für einen Flughafen gibt es eine Luftraumstruktur, welche dem Anflugplanungssystem als Grundlage dient und statisch zur Verfügung gestellt wird. Bei der Implementierung der ERoutes wurde es notwendig, das Airspace-Model während des Betriebes um die neuen Routen zu ergänzen und damit dynamisch zu gestalten. Die Routen müssen durch eine Abhängigkeit zu einem Luftfahrzeug sowie einem Gültigkeitszeitraum ergänzt werden. Wenn zuvor das Airspace-Model einmal erzeugt wurde und sich nicht weiter verändert hat, so muss jetzt, nachdem eine neue Route entstanden ist beziehungsweise wieder zurückgenommen wurde, das Airspace-Model während des Betriebs aktualisiert werden.

## 4. MANUELLES ANPASSEN VON GEPLANTEN TRAJEKTORIEN

Nach den beschriebenen Erweiterungen der Module des Planungssystems 4D-CARMA muss die neue Funktion ERoutes für einen Sektor- oder Pick-up Lotsen möglichst einfach und schnell ausführbar sein. Dazu wird sie als optische HMI-Funktion in ein bestehendes Radardisplay integriert.

Bislang kann, wie in BILD 5 dargestellt, für jedes Luftfahrzeug die geplante 4D-Trajektorie als 2D-Wegstrecke (gelb) bis zur Landung am Zielflughafen angezeigt werden. Dieser vom AMAN berechnete Flugweg stellt eine mögliche Lösung zur Führung des Flugzeugs dar, die vom Lotsen gewählt werden kann. Möchte er dennoch auf die vorberechnete Trajektorie zugreifen, kann er nun eine interaktive Modifikation vornehmen, indem er mit der Maus auf die Trajektorie klickt und mit gedrückter Taste diese seitlich verschiebt. Durch einen Auszug der Trajektorie kann die Flugdauer zeitlich verlängert oder verkürzt werden.

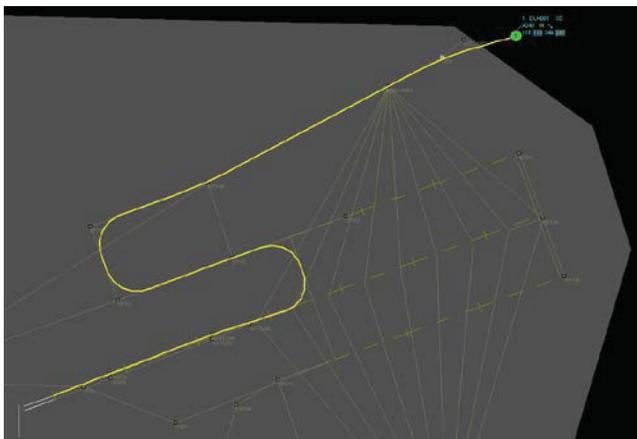


BILD 5. 4D-Trajektorie für ein Luftfahrzeug in der Luftraumstruktur des Flughafens Frankfurt am Main.

Intern wird das AMAN-gestützte Assistenzsystem „ERoutes“ aufgerufen und die approximierten zeitliche Veränderung gegenüber der momentanen Trajektorie berechnet. Daraufhin wird dem Fluglotsen die ermittelte Sekundenanzahl am Trajektorienauszug angezeigt (BILD 3).

Durch Ziehen der Maus bei gedrückter Taste kann der Lotse die Größenordnung des Umweges gegenüber der aktuellen Trajektorie modifizieren. Der Auszug ist eine trapezförmige ausgezogene parallel zur aktuellen Route verlaufende Strecke, die einer 2-dimensionalen Version des neu geplanten Anflugweges, wie in BILD 6 dargestellt, entspricht. Das Trapez wird dabei entsprechend in Richtung der Mausbewegung aufgespannt.

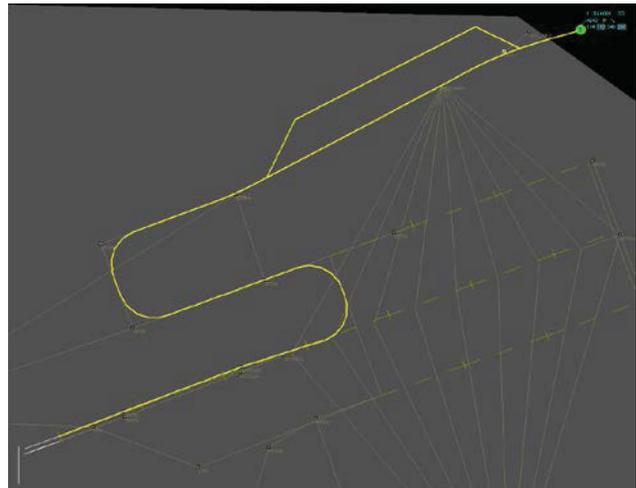


BILD 6. Gewünschte Elastische Route als trapezförmiger Trajektorienauszug.

Synchron dazu kann der Lotse in Echtzeit die resultierende zeitliche Veränderung ablesen und somit den geeigneten Auszug bestimmen. Die zeitliche Abweichung entspricht der Anzahl an Sekunden, um die sich die Zielzeit an der Schwelle durch den Umweg oder die Abkürzung nach der Abschätzung durch 4D-CARMA verändern wird. Diese Abschätzung basiert zunächst auf der aktuellen Geschwindigkeit des Luftfahrzeuges sowie der Position der trapezförmigen Route und dient somit nur zur Abschätzung. Darüber hinaus kann es vorkommen, dass die Landesequenz auf Grund der veränderten Zeit angepasst werden muss. Zur konfliktfreien Führung aller Luftfahrzeuge besteht folglich auch die Möglichkeit einer Planungsänderung des AMAN an einem späteren Routenpunkt. Durch den Auszug oder die Verkürzung einer Trombone könnte der Umweg zeitlich wieder kompensiert oder noch verstärkt werden. Die genaue zeitliche Abweichung wird schließlich bei der nächsten Planung von 4D-CARMA, die alle fünf Sekunden vorgenommen wird, exakt ermittelt. Anhand der vollständig bis zur Schwelle berechneten neuen Trajektorie, die den elastischen Auszug miteinbezieht, ist die Zeitdifferenz zu bestimmen.

Durch Loslassen der Maustaste wird der zuletzt aktiv dargestellte Auszug für die Zuweisung zum zugehörigen Flugzeug freigegeben. Dem AMAN werden die sechs ERoute-Punkte entsprechend BILD 4, das betreffende Flugzeug und dessen aktuelle Position übermittelt. In der folgenden 4D-CARMA-Planung wird der gewünschte Trajektorienauszug in die neu zu berechnende Trajektorie

integriert. Die daraus generierte Trajektorie beinhaltet dann, wie in BILD 7 dargestellt, die gewünschte Routenänderung. Damit die ermittelte neue Trajektorie mit ihren vier „Trapezpunkten“ abgeflogen werden kann, wären vier Richtungsänderungen des Flugzeugs nötig. Die Berechnung von Vorschlägen für Heading-Anweisungen, die der Lotse geben sollte, können vom AMAN durchgeführt werden. Allerdings hat sich in Evaluierungen von FAGI durch Lotsen herausgestellt, dass diese häufig nur sehr eingeschränkte Anweisungsvorschläge wünschen. Die Turn-beziehungsweise Heading-Anweisungen sollten demnach lediglich für das Eindrehen auf das Final angezeigt werden. Richtungsänderungen, die wie bei den ERoutes weiter außerhalb in der TMA stattfinden, werden durch die Lotsen manuell durchgeführt.

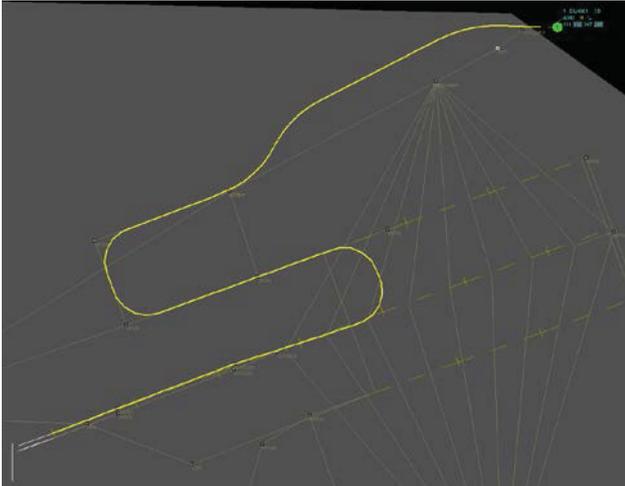


BILD 7. Resultierende Route nach Einberechnung der „ERoute“.

Nach der Berechnung der neuen Route steht dem Lotsen im Kontextmenü des Flugzeuglabels eine Funktion zur Verfügung, mit der die „ERoute“ bei Bedarf wieder aufgehoben werden kann. Bei Nutzung dieser „Undo“-Funktion werden die zusätzlichen Routenpunkte deaktiviert. In der nächsten Planung von 4D-CARMA erfolgt die Sequenzierung anhand der vorigen Routenpunktsituation. In den meisten Fällen wird der dann geplante Trajektorienverlauf nach der Rückführung auf die alte Route mit dem ursprünglich geplanten Flugweg übereinstimmen. In Abhängigkeit vom Aufbau der Luftraumstruktur kann es jedoch passieren, dass das betrachtete Luftfahrzeug auf eine benachbarte STAR geführt wird. Befindet sich das Luftfahrzeug beim Abfliegen der ausgezogenen Trajektorie momentan weiter von der ursprünglichen STAR entfernt und näher an einer alternativen STAR, wird letztere als neue Anflugroute zur Landung ausgewählt.

Durch die „ERoute“ und die zugehörige „Undo“-Funktion kann der Lotse manuell in die AMAN-Planung eingreifen und nach seinen Bedürfnissen anpassen. Nichtsdestotrotz bleibt die unmittelbare Unterstützung des Planungssystems auch mit den modifizierten Anflugwegen erhalten.

## 5. AUSBLICK

Die zeitbasierte Anflugführung, bei der die Lotsen nicht nur die Verantwortung über die Einhaltung vorgeschriebener Separationen zu erfüllen haben, sondern zusätzlich auch die Einhaltung von Zielzeiten an definierten Weg-

punkten, erfordert insbesondere im Flughafennahbereich zusätzliche Unterstützungssysteme. Diese sollten in das Radardisplay integriert werden, ohne andere Informationen dabei zu überdecken. Das DLR-Projekt Future Air Ground Integration (FAGI) hat Visualisierungssysteme wie das Ghosting und Targeting zur Anfluglotsenunterstützung weiterentwickelt und im Rahmen von Validierungskampagnen in Human-in-the-Loop Simulationen validiert.

Im Rahmen der Zusammenarbeit mit den Lotsen stellte sich jedoch heraus, dass für eine zeitbasierte Anflugführung nicht nur passive optische Anzeigen benötigt werden, sondern auch Möglichkeiten für die Lotsen geschaffen werden müssen, die bei einer räumlichen Veränderung der geführten Strecke ein direktes zeitliches Feedback auf die zeitbasierte Anflugplanung geben kann

Im 2011 gestarteten DLR-Projekt *flexiGuide* wurde nun die Funktionen *ERoutes* entwickelt, die es erlaubt, mit einem Mauszeiger auf dem Radardisplay eine AMAN-geplante Anflugtrajektorie im zweidimensionalen Raum ähnlich einem Gummiband auszuziehen. Dabei erhält der ausführende Lotse neben dem visuellen räumlichen Eindruck der Wegverlängerung auch eine zeitliche Abschätzung, wie sich die Wegveränderung auf die geplante Zielzeit des betrachteten Luftfahrzeugs auswirken wird. Zusätzlich werden signifikante Wegpunkte des Umweges vom Anflugplanungssystem und damit in die nächste Anflugplanung für das Luftfahrzeug übernommen. Die Sequenz- und Zielzeitenplanung des AMAN berücksichtigt diese neuen Wegpunkte solange, bis das betrachtete Luftfahrzeug seinen individuellen Routenabschnitt wieder verlassen hat und auf die STAR zurückgekehrt ist. Ändert sich die Verkehrssituation kurzfristig, kann der verantwortliche Lotse die ERoute selbstverständlich wieder deaktivieren, worauf hin das betroffene Luftfahrzeug zurück auf eine STAR geplant wird.

Die ERoute-Funktion wird im Rahmen des Projektes *flexiGuide* einem mehrstufigen Validierungsverfahren unterzogen, bei dem das Lotsenfeedback direkt in die weitere Entwicklung einfließen wird. So ist noch nicht abschließend festgelegt, in wie weit eine Anweisungsunterstützung durch das Planungssystem für den Lotsen erfolgen sollte und welche Anweisungen für die reibungslose Abwicklung einer ERoute benötigt werden. Es stehen Turn- und Heading-Anweisungen zur Verfügung sowie die Sprachübermittlung der Positionen der signifikanten Wegpunkte. Eine weitere Variante stellt die Kombination aus einer Richtungs- und Streckenanweisung dar.

Beim Übergang von der abstands-basierten zur zeitbasierten Anflugführung stellt die optische HMI-Funktion „ERoutes“ somit ein geeignetes Mittel dar, um individuelle Anpassungen entlang einer Business-Trajektorie sicher, detailliert und analog zur gewohnten Arbeitsweise vorzunehmen. Außerdem unterstützen elastische Routen die Handhabung von Mixed Traffic, also Flugverkehr mit Luftfahrzeugen, die nur teilweise 4D-FMS ausgerüstet sind. Durch das Ausziehen einer Trajektorie in den Bereich der Flugrouten anderer Luftfahrzeuge existiert die potentielle Gefahr von Konflikten. Wie bei allen Entscheidungen, die ein Fluglotse treffen muss, ist er auch bei der Nutzung der ERoutes dafür verantwortlich, diese Konflikte zu vermeiden oder entsprechend zu lösen.

## 6. LITERATUR

- [1] Keimel, H. (2007) Luftverkehrsbericht 2007 - Daten und Kommentierungen des deutschen und weltweiten Luftverkehrs, Verkehrsbericht DLR IB 326-2007/2, Flughafenwesen und Luftverkehr
- [2] Erkelens, L. J. J. (1999). Development of noise abatement procedures in the Netherlands. NLR-TP-99386, Amsterdam, The Netherlands, National Aerospace Laboratory NLR
- [3] Kuenz, A. und B. Korn (2009). Enabling Green Profiles for Today's Traffic Mixture in High Density. Integrated Communications Navigation and Surveillance (ICNS) Conference: The Integrated Trajectory, Arlington, VA, USA, ICNS.
- [4] Hann, R., L. Christoffels, K. Muth, M.-M. Temme und M. Uebbing-Rumke (2008). Zeitbasiertes Anflugmanagement mit 4D-CARMA zur Unterstützung von Dual Threshold Operations. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Darmstadt, Deutschland, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Braunschweig.
- [5] Oberheid, H., B. Weber, M.-M. Temme und A. Kuenz (2009). Visual Assistance to Support Late Merging Operations in 4D Trajectory-Based Arrival Management. 28<sup>th</sup> Digital Avionics Systems Conference, Orlando, Florida, USA, Institute of Flight Guidance, German Aerospace Center (DLR).
- [6] Völckers, U. (1990), Arrival Planning and Sequencing with COMPAS-OP at the Frankfurt ATC-Center. Proc. of the 1990 American Control Conference, San Diego, California. Seite 496-501.
- [7] Helmke, H., R. Hann, M. Übbing-Rumke, D. Müller und D. Wittkowski (2009). Time-Based Arrival Management for Dual Threshold Operation and Continuous Descent Approaches. Eighth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM 2009), Napa, California, USA, German Aerospace Center DLR, Institute of Flight Guidance, Braunschweig, Germany and Deutsche Flugsicherung GmbH, DFS, Langen, Germany.
- [8] Sievert, H. (2004) Erweiterung eines Anflugplanungssystem-Prototyps. Diplomarbeit, Berufsakademie Mannheim
- [9] Uebbing-Rumke, M. und M.-M. Temme (2011). Controller Aids for Integrating Negotiated Continuous Descent Approaches into Conventional Landing Traffic. Ninth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM 011), Berlin, Germany, German Aerospace Center (DLR).
- [10] Mill, F. (2010) Untersuchung und Implementierung heuristischer Optimierungsverfahren für die An- und Abflugplanung. Masterarbeit, Universität Hildesheim
- [11] Hann, R., Böhme, D. (2008) Lateral Path Prediction Module. Power Point Präsentation, DLR Braunschweig

## 7. ABKÜRZUNGEN

4D-CARMA	4 Dimensional Cooperative Arrival Manager
4D-FMS	4 Dimensional Flight Management System
ACC	Area Control Centre
AMAN	Arrival Manager
ATC	Air Traffic Control
ATM	Air Traffic Management

ATMOS	Air Traffic Management and Operations Simulator
ATTAS	Advanced Technologies Testing Aircraft System
CDA	Continuous Descent Approach
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
DSF	Deutsche Flugsicherung
ERoute	Elastic Route
E-TMA	Extended Terminal Maneuvering Area
FAGI	Future Air Ground Integration
FMS	Flight Management System
HMI	Human Machine Interface
LDLP	Low Drag Low Power
LMP	Late Merging Point
NASA-TLX	NASA Task Load Index
N-CDA	Negotiated Continuous Descent Approach
OPD	Optimized Profile Descent
RWY	Runway
SAGAT	Situation Awareness Global Assessment Technique
SESAR	Single European Sky ATM Research Programme
STAR	Standard Arrival Route
TMA	Terminal Maneuvering Area
ToD	Top of Descent

## 8. AUTOREN

Franziska Förster (M. Sc. in Informationsmanagement/-technologie) arbeitete seit 2010 als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Flugführung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Braunschweig. Frau Försters Forschungsschwerpunkte sind die Entwicklung von Optimierungsstrategien für Anflugplanungssysteme und die Integration von optischen Führungshilfen in Lotsenunterstützungssysteme.

Oliver Ohneiser (B. Eng. in Ingenieurinformatik) ist seit dem Jahr 2010 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Flugführung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Braunschweig angestellt. Herr Ohneiser ist Entwickler von Mensch-Maschine-Schnittstellen und Softwareanwendungen im Bereich von Fluglotsenassistenzsystemen.

Dr. rer. nat. Marco Temme, seit 1999 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Flugführung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V., beschäftigte sich in den vergangenen Jahren mit der Berechnung und Simulation von Fluglärm und verschiedenen Aspekten der softwaregestützten Anflugplanung.