

# INTEGRATION VON KONVENTIONELLEN UND CDA-ANFLÜGEN MITHILFE EINER ZEITBASIERTEN GHOSTING-FUNKTIONALITÄT

L. Christoffels, M.-M. Temme, H. Oberheid

Institut für Flugführung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)  
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig

## Zusammenfassung

Die Sensibilisierung der Bevölkerung hinsichtlich einer zunehmenden Lärm- und Umweltbelastung durch ein erhöhtes Flugverkehrsaufkommen ist in den letzten Jahren deutlich gestiegen. Zusätzlich sind durch die Verteuerung von Kerosin Forderungen nach effizienteren Flugverfahren von Seiten der Airlines lauter geworden. Unter dem Begriff Continuous Descent Approach (CDA) werden seit mehreren Jahren Anflugverfahren entwickelt, die sowohl eine maximale Lärmreduzierung, als auch eine deutliche Ersparnis beim Treibstoffverbrauch gegenüber anderen Anflügen ermöglicht. Versuche haben jedoch gezeigt, dass dabei die reduzierte Kontrollierbarkeit durch den Anfluglotsen als auch die unterschiedlichen Geschwindigkeitsprofile der jeweiligen Luftfahrzeuge eine Erhöhung der Sicherheitsabstände erforderlich machen und sich negativ auf die Kapazität auswirken, weshalb CDAs bislang begrenzt zum Einsatz kommen. Im Projekt Future Air-Ground Integration (FAGI) wird ein Konzept entwickelt, dass durch eine modifizierte Routenstruktur und das späte Zusammenführen (Late Merging) räumlich getrennter Anflugrouten, entsprechend ausgerüsteten Luftfahrzeugen einen idealen CDA bis zur Schwelle ermöglicht. Der verbleibende Verkehr wird über eine konventionelle Trombone-Struktur von den Anfluglotsen in die Sequenz integriert, Kapazitätseinbußen werden vermieden. Für eine visuelle Unterstützung der Zusammeführung der Verkehrsströme wird in diesem Beitrag ein neu entwickeltes Ghostingverfahren als Erweiterung des Radardisplays vorgestellt. Dabei werden synthetische Ghostlabel der CDA-Anflüge auf Basis der zeitbasierten Planung und einem speziellen Two-Segment System in den Endanflug der konventionellen Routen projiziert. Der Beitrag beschreibt den konzeptionellen und technischen Hintergrund der entwickelten Ghosting-Lösung und berichtet Ergebnisse und Erfahrungen aus durchgeführten Simulationsstudien.

## 1. EINLEITUNG

Der weltweite Luftverkehr hat über die letzten Jahrzehnte stetig zugenommen und trotz ökonomischer bedingter Schwankungen ist ein weiteres Wachstum von 3-5% mitelfristig zu erwarten [1]. Viele größere Flughäfen stoßen bereits heute an ihr Kapazitätsslimit und die Aufnahmefähigkeit des Luftraums hat an vielen Stellen ihre Grenzen erreicht. Während versucht wird, die Systemkapazitäten zu erweitern, wird gleichzeitig die Nachfrage nach umweltfreundlicheren und kostengünstigeren Flugführungsverfahren immer drängender. Um das Ziel zu erreichen, den potentiell konkurrierenden Ansprüchen ausreichend gerecht zu werden, müssen bestehende Flugführungstechniken und Verfahren ständig verbessert und optimiert werden. Neue Luftverkehrskonzepte und Flugführungstechniken sollten darüber hinaus im Rahmen von SESAR und NEXTGEN [2] [3] entwickelt und implementiert werden. Bei der Einführung dieser Konzepte und dem sicheren Betrieb neuer technischer Verfahren kommt der Entwicklung effektiver Assistenzsysteme zur Unterstützung menschlicher Operatoren in dem System eine besondere Rolle zu.

Im Rahmen des Projekts „Future Air-Ground Integration“ (FAGI) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt werden neuartige Anflugverfahren zur Treibstoff sparenden und Lärm reduzierenden Anflugführung entwickelt [4]. Ein zentrales Element des FAGI-Konzepts ist eine Modifikation der heute üblicher Luftraum- und Routenstrukturen. Die in FAGI neu vorgeschlagene Struktur sieht ein deutlich späteres Zusammenführen der verschiedenen Anflugrouten vor. Dabei wird der Anflugverkehr in 6-10 Meilen Ab-

stand von der Landebahnshwelle an einem zentralen „Late Merging Point“ (LMP) zusammengeführt. Im Gegensatz dazu ist das Zusammenführen von Anflugrouten in 25-30 Nautischen Meilen Abstand von der Landebahnshwelle heute Praxis.

Der konzeptionelle Vorteil der in FAGI vorgeschlagenen Late-Merging Struktur ist, dass sie Luftfahrzeuge ermöglicht, so lange wie möglich auf vielen unabhängigen Routen ihr präferiertes Anflugprofil (Geschwindigkeiten und Sinkraten) zu fliegen. Dabei variieren die optimalen Anflugprofile erheblich zwischen unterschiedlichen Luftfahrzeugmustern und Beladungen. Heute üblich ist es dagegen, den Verkehr frühzeitig auf wenige Anflugrouten zusammenzuführen. Auf diesen werden dann stattdessen standardisierte (und damit im Allgemeinen suboptimale) Anflugprofile geflogen, um die Komplexität der Planungs- und Führungsaufgabe zu beschränken. Damit verbundene Abweichungen vom ‚user-preferred profile‘ führen jedoch zu erheblichen Nachteilen in Bezug auf Treibstoffverbrauch und Lärmbelastung. Vor allem aktuelle Luftfahrzeuge mit modernen 4D-fähigen Flight Management Systemen (4D-FMS) könnten deshalb von dem in FAGI vorgeschlagenen Konzept profitieren. Sie würden so in die Lage versetzt werden, aus großer Höhe hocheffiziente Continuous Descent Approaches (CDA) bis hinunter zum Late Merging Point zu fliegen [5].

Die Herausforderung der Late Merging Prozedur ist jedoch ihre Komplexität und die Präzisionsanforderungen bei der Führung des Luftverkehrs. Luftfahrzeuge von verschiedenen Routen müssen innerhalb hinreichend enger Zeitfenster am Late Merging Point eintreffen. Abweichungen von den Planzeiten müssen sich innerhalb enger Grenzen

halten (Größenordnung von 10s), um einerseits den Landebahndurchsatz zu erhalten und andererseits eine sichere Separation des Verkehrs jederzeit zu gewährleisten. Nur moderne 4D-fähige Luftfahrzeuge (im Folgenden als „ausgerüstete“ Luftfahrzeuge bezeichnet) sind in der Lage, eine Zielzeit am LMP mit hinreichender Genauigkeit weitgehend selbstständig zu erreichen. Nicht 4D-fähige („unausgerüstete“) Luftfahrzeuge, benötigen passende externe Führungsanweisungen durch die Fluglotsen, welche u. A. die unausgerüsteten Luftfahrzeuge in die geplanten Lücken zwischen den ausgerüsteten Luftfahrzeugen platzieren müssen. Durch diese Aufgabe stellt das Konzept ohne geeignete Unterstützungssysteme potentiell hohe Anforderungen an die menschliche Leistung des Fluglotsen. Eine weitere Herausforderung bei der Merging-Prozedur ist dabei die im Vergleich zum heutigen System höhere Bandbreite der Anfluggeschwindigkeiten auf den Late Merging Punkt. Als Konsequenz daraus wird ein manuelles Monitoring der relativen Luftfahrzeugbewegungen anspruchsvoller. Geeignete Assistenzkonzepte zur Unterstützung dieser Aufgabe könnten hier besonders benötigt werden.

Um das operationelle und technische Potential des Late Merging Konzepts zu nutzen und gleichzeitig den Anforderungen an Komplexitätsbegrenzung und Präzision gerecht zu werden, schlägt das in FAGI entwickelte Konzept eine Lösung vor, bei der ausgerüstete und unausgerüstete Luftfahrzeuge entsprechend der im folgenden beschriebenen Verfahren behandelt werden. Die Durchführung der beiden Verfahren wird dann durch ein Anflugplanungssystem (DLR's Arrival Manager 4D-CARMA) mit einer Reihe spezieller Assistenzfunktionen unterstützt:

1. Das Verfahren für ausgerüstete Luftfahrzeuge sieht eine direkte laterale Route auf den LMP vor. Für die Annäherung an den LMP ist standardmäßig kein weiterer Path-Stretching Bereich vorgesehen, über den größere Abweichungen von der Planzeit kompensiert werden könnten. Dies erfordert hochgenaue On-board Navigationstechnik, die durch ein 4D-FMS realisiert wird. Ausgerüstete Luftfahrzeuge erhalten so früh wie möglich einen Zeitconstraint für den LMP, welcher vor dem Start des Final-Descents bestätigt wird. Jede Änderung der Zielzeit würde die Effizienz der bereits optimierten Trajektorie verringern.
2. Das Verfahren für unausgerüstete Luftfahrzeuge sieht eine Annäherung an den LMP über einen klassischen Trombonenanflug vor. Unausgerüstete Luftfahrzeuge wären nicht in der Lage eine gegebene Zielzeit selbstständig mit ausreichender Präzision abzufliegen. Aus diesem Grund erlaubt die Trombone dem Lotsen in einer späten Flugphase die Ankunftszeit des Luftfahrzeugs entsprechend anzupassen. Durch die Verkürzung des Gegenanflugs kann eine frühere Zielzeit erreicht werden. Durch eine Verlängerung des Gegenanflugs kann die Ankunft entsprechend verzögert werden.



BILD 1: Screenshot aus einer FAGI-Simulation mit Late Merging Routenstruktur.

Nach dem operationellen Konzept von FAGI werden beide Verfahren simultan betrieben [6]. Die entstehende Anflugsequenz ist ein Mix aus ausgerüsteten und nicht ausgerüsteten Luftfahrzeugen.

Um die Anflugsequenz zu planen und die Durchführung zu ermöglichen, wurde der DLR Arrival Manager 4D-CARMA entsprechend erweitert und auf die Routenstruktur angepasst. Dabei stellt 4D-CARMA Sequenzplanung, Zielzeiten, Routenuweisungen, Advisories (konkrete Vorschläge für bestimmte Clearances zur Umsetzung der Planung) und andere Planungsinformationen bereit. Eine neu entwickelte Assistenzfunktion, die den Lotsen speziell bei der Zusammenführung des Verkehrs am LMP unterstützen soll, ist die Two-Segment Ghostingfunktion. Diese wird im Rahmen dieses Beitrags näher beschrieben. Mithilfe des Ghostings soll die Führungsaufgabe der Lotsen, Luftfahrzeuge über verschiedene Routen mit deutlich unterschiedlichen Geschwindigkeiten zu mergen, unterstützt werden.

Im weiteren Verlauf des Beitrags werden in Abschnitt 2 zunächst die unterschiedlichen Anflugprofile von ausgerüsteten und unausgerüsteten Luftfahrzeugen diskutiert, die am Late Merging Point zusammengeführt werden sollen. Dies bildet die Grundlage für die Anforderungen an die Entwicklung der in FAGI untersuchten Ghostingfunktionen, die in Abschnitt 3 genauer beschrieben werden. Abschnitt 4 fasst Ergebnisse und Erfahrungen aus in FAGI durchgeföhrten Simulationen und Workshops mit Fluglotsen und Piloten zusammen.

## 2. DER CONTINUOUS DESCENT APPROACH IN DER ANFLUGPLANUNG

Nachdem Anfang der siebziger Jahre des Low Drag-Low Power-Anflugverfahren von der Deutschen Lufthansa entwickelt und erprobt wurde, konnte es sich bereits wenige Jahre später international durchsetzen, da es gegenüber dem Standardanflugverfahren ein deutliche Lärmreduzierung ermöglicht. Doch erst mit der Entwicklung des Continuous Descent Approaches (CDA) ging ein Anflugverfahren in den Betrieb, dass das Fluglärmreduktionspotential bei gleichzeitiger Reduzierung des Treibstoffverbrauchs richtig ausnutzt. Mithilfe von Tailored Arrivals wurde in den letzten Jahren auch versucht, CDAs mit konventionellen Anflügen zu kombinieren. Doch bisher stellen Continuous Descent Approaches aus Sicht der

Flugführung noch eine hohe Anforderung dar und sind auch bei Tailored Arrivals mit einer deutlichen Kapazitäts-einbuße beim anfliegenden Verkehr verbunden.

## 2.1. Das Low Drag-Low Power Anflugverfahren

Das heute bereits sehr häufig eingesetzte Low Drag - Low Power Anflugverfahren (LDLP, manchmal auch als „Frankfurter Standardanflug“ bezeichnet) wurde von der Deutschen Lufthansa Anfang der siebziger Jahre entwickelt und basiert auf der Idee, die Endanflugkonfiguration bedeutend später als beim Standardanflugverfahren einzunehmen [7]. Durch einen verringerten Luftwiderstand wird eine entsprechend geringere Antriebsleistung benötigt [8]. Eine spätere Endanflugkonfiguration bedeutet allerdings auch, dass sich ab dem Outer Marker in einer Flughöhe von nur noch 1000 ft. der Arbeitsaufwand für den Piloten erhöht, da er innerhalb kurzer Zeit Schub, Geschwindigkeit und Trimmung stabilisieren muss. Die reduzierte Schall-emission in Kombination mit der verringerten Schalleinwirkungszeit wird durch die widerstandsarme Flugkonfiguration (Clean Configuration) und die etwas erhöhte Fluggeschwindigkeit erreicht. Das LDLP-Verfahren besitzt trotz mehrerer Level-Segmente gegenüber einem Standardanflug seinen größten Lärm mindernden Einfluss in den Anflugsegmenten Initial- und Intermediate Approach. Das LDLP-Anflugverfahren hat sich seit vielen Jahren international durchgesetzt und wird bei günstigen technischen und meteorologischen Randbedingungen weltweit ange-wandt.

## 2.2. Continuous Descent Approaches zur Lärm- und Treibstoffreduzierung

Die grundsätzliche Idee hinter dem Continuous Descent Approach (CDA) ist ein kontinuierlicher Landeanflug, der ohne Unterbrechungen durch Level-Abschnitte von der Reiseflughöhe bis zur Landebahnswelle im Gleitflug durchgeführt wird [7]. Die Triebwerksleistung wird dabei entweder auf idle oder nur geringen Schub eingestellt, wodurch sich zum einen der Kerosinverbrauch gegenüber einem Standard- oder auch einem Low-Drag-Low-Power Anflug reduziert, und zum anderen gleichzeitig der Fluglärm verringert wird. Die Reduzierung des abgestrahlten Schalldruckpegels kommt beim CDA einerseits durch die verringerte Triebwerksleistung, und andererseits durch den nahezu kompletten Wegfall der Levelsegmente, die üblicherweise in Lärmrelevanten Flughöhen zwischen 2000 und 5000 Fuß geflogen werden. Der Geschwindigkeitsabbau erfolgte dabei ursprünglich in einem eingeschobenen 1 NM langen Zwischenanflugsegment, das heute jedoch häufig im Sinkflug mit einem reduzierten Anflugwinkel von weniger als 3° durchgeführt wird. Die Folge davon ist, dass sich zwar die Strecke zum Geschwindigkeitsabbau verlängert, die Lärmbelastung in diesem Abschnitt aber gleichzeitig etwas weiter verringert. So hat die damalige BFS den CDA bereits im Jahr 1984 als Treibstoff sparendes und Lärm reduzierendes Anflug-verfahren empfohlen [8].

Aus Sicht der Flugführung stellt ein CDA jedoch eine deutlich erhöhte Anforderungen: Sobald sich ein Luftfahrzeug im CDA-Sinkflug befindet, führen Anpassungen des Flugprofils durch Lotsenanweisungen zu einer Effizienzverrin-gerung, da eine nachträgliche Veränderung der Flugstrecke unmittelbar den positiven Einfluss bezüglich Treib-

stoffverbrauch und Lärmemission verringert. Darüber hinaus erfordert das Führen unterschiedlicher Luftfahrzeugtypen mit jeweils unterschiedlichen Sink- und Ge-schwindigkeitsprofilen auf einer gemeinsamen Anflugstrecke eine Erhöhung der Separation über die Mindestseparation hinaus, um die Wirbelschleppenabstände auf dem gesamten gemeinsamen Weg zu gewährleisten. Dies verringert den potentiellen Durchsatz eines Flughafens, so dass lärmarme CDA-Anflugverfahren zurzeit mit wenigen Ausnahmen nur während verkehrsarmer Tageszeiten angewendet werden können [10]. Operationelle Versuche am Flughafen Schiphol/Amsterdam zeigten bei einer konsequenter Anwendung des CDA durch die Verdopplung der erforderlichen Separation eine Halbierung der Landebahnkapazität [11]. Die anschließende Auswertung der Flugspuren ergab, dass sich sowohl die vertikale als auch die horizontale Streuung der Anflugtrajektorien um die Idealroute beim CDA gegenüber den Standardanflügen deutlich erhöht hatte. Dies wurde insbesondere auf fehlende Piloten- und Lotsenunterstützungssysteme für die speziellen Anforderungen eines CDA zurückgeführt [12]. Heute gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher CDA-Anflugverfahren, die sich in einzelnen Aspekten der Flugzeugkonfigurationen oder der Anflugwinkel in einzelnen Flugabschnitten unterscheiden.

## 2.3. Tailored Arrival – CDA mit verhandelter Zielzeit

Erste umfangreichere Versuche, um das Problem der unterschiedlichen Geschwindigkeitsprofile zwischen Standardanflügen und CDAs zu umgehen, wurden mit den sogenannten Tailored Arrivals gemacht. Beim Tailored Arrival sollen Luftfahrzeuge zeit- und punktgenau zu einem beziehungsweise mehreren Punkten (Metering Fix, Merging Points und Schwelle) geführt werden. In Kombination mit einem CDA, beginnend nach Möglichkeiten in der Reiseflughöhe, wird bereits deutlich vor dem Top of Descent (TOD) begonnen, eine zwischen Cockpit und Bodenstelle ausgehandelte Trajektorie abzufliegen. Dies kann jedoch nur durch eine verbesserte kontinuierliche Koordinierung zwischen Bord und Boden erreicht werden, die in einer sehr einfachen Form bereits heute von vielen Luftfahrzeugen beherrscht wird [11].

In Australien hatte sich ein Konsortium aus Air Traffic Alliance (EADS, Airbus, Thales), Boeing, Airservices Australia sowie der Fluggesellschaft Quantas Airways zusammengetan, um 2004 in Sydney und Melbourne gemeinsam Tailored Arrival Flugversuche durchzuführen [14]. Das besondere an diesen Versuchen, an denen auf unterschiedlichen Routen mehrere Airbus 330 und Boeing 747-400 von Quantas beteiligt waren, war die ausschließliche Verwendung vorhandener technischer Ausrüstung für die Data Link Kommunikation. Darüber hinaus erfolgten die Anflüge entsprechend der lokalen Standardprozeduren und ohne ein zusätzliches Training der Crews. Über die Data Link Verbindung wurde den Luftfahrzeugen bereits 140 NM vor der Schwelle die Freigabe für den kontinuierlichen Sinkflug des CDA erteilt. In einer Phase von April bis September 2004 hat das Konsortium insgesamt 70 Anflüge auf diese Weise durchgeführt. Bei einem Vorhersagezeitraum von 40 Minuten lag die höchste zeitliche Genauigkeit für die Ankunft beziehungsweise den Überflug an einem signifikanten Punkt bei zwei Sekunden, die anderen Abweichungen betrugen immer unter 30 Sekunden. Mit

modernen 4D-FMS, die bisher nur im begrenzten umfang im Einsatz sind, könnte diese Abweichung noch deutlich nach unten verschoben werden. Der Sprechfunkaufwand ging für diese Anflüge fast auf Null zurück, so dass die Arbeitsbelastung der verantwortlichen Anfluglotsen hier deutlich reduziert werden konnte.

In der folgenden Zeit wurden weitere Tailored Arrival Versuche in den USA (San Francisco) und Europa (Amsterdam) erfolgreich abgeschlossen, doch konnten sie alle nur zu verkehrsarmen Tageszeiten durchgeführt werden [15]. Dies lag unter anderem auch daran, dass die Lotsen keine Hilfsmittel zur Verfügung hatten, die die zeitbasierte Führung der CDA-Anflüge in eine abstandsbasierte Anflugführung integriert.

### **3. GHOSTING-TECHNOLOGIE ZUR LOTSENUNTERSTÜTZUNG**

#### **3.1. Ghosting**

Im Projekt FAGI ist es die Aufgabe des Lotsen, Standard- und LDLP-Anflüge der Luftfahrzeuge ohne 4D-FMS in die Sequenz der nur sehr eingeschränkt kontrollierbaren CDA-Anflüge zu integrieren. Dabei müssen die erforderlichen Separationen auf dem Final zwischen LMP und Schwelle sichergestellt werden. Wegen der unterschiedlichen Geschwindigkeitsprofile auf getrennten Routen bedarf es dafür einer besonderen Hilfestellung, da es Anfluglotsen gewohnt sind, abstandsbasiert zu führen. Zur präzisen Einhaltung von Zielzeiten ist jedoch eine zeitbasierte Anflugführung nötig. Die Two-Segment-Ghost-Label helfen nun, eine zeitbasierte in die gewohnte abstandsbasierte Führung zu übertragen. Dabei wird ein zusätzliches Ghost-Label auf Basis der CDA-Luftfahrzeuge auf das Final projiziert. Relativ zu dem gezeigten Ghost wird der konventionell ausgestattete Verkehr nun abstandsorientiert auf dem Final etabliert.

Von der MITRE Corporation wurde bereits in den 1980er Jahren das Converging Runway Display Aid (CRDA) entwickelt, bei dem das Konzept des Ghostings verwendet wurde, um Anflugströme auf konvergierenden Landebahnen zu koordinieren [16]. Ein Prototyp des CRDA wurde seit 1992 am Lambert-St. Louis International Airport (STL) zur Evaluierung eingesetzt. Mit CRDA waren erstmals IMC-Anflüge auf konvergierende Landebahnen möglich. Wegen der Vorteile wurde CRDA in das Anflugkontrollsyste ARTS der FAA implementiert [17] und erfolgreich u. A. auch für Arrival-Operationen in Norfolk (ORF), Memphis (MEM), Philadelphia (PHL) und Pittsburgh (PIT) eingesetzt [18]. Eine umfangreiche Simulationsanalyse wurde für den Boston Logan International Airport (BOS) durchgeführt [19]. Auch für die Einführung am Amsterdam Airport Schiphol (AAS) wurde das CRDA vom NLR zusammen mit LVNL evaluiert [11] [20]. Auf der Basis von CRDA entwickelte NAV CANADA das Visual Aircraft Spacing Tool (VAST) welches später in das Radardisplaysystem WINRAD integriert wurde.

Bei der Betrachtung einer Ghostingfunktion ist neben den projezierten Informationen selber jedoch die Abbildungsfunktion des Realobjekts auf den Ghost von entscheidender Bedeutung, und muss auf den jeweiligen Anwendungszweck abgestimmt sein. Im CRDA wird ein rein distanzbasiertes Ghosting verwendet. Dafür wird die noch

zu fliegende Distanz des Flugzeugs bis zum Merging Point bestimmt. Vom Merging Point ausgehend wird anschließend der errechnete Abstand auf der Grundlinie des konvergierenden Anfluges aufgetragen, um die Position der Anzeige für den Ghost zu ermitteln. In CARTS und STARS der FAA ist die Projektion auf ein lineares Segment beschränkt [21] [22]. Hilfreicher ist allerdings eine Darstellung des Ghosts auf die konvergierende Route, wie es im RPI des CAASD propagiert und von NAV CANADA implementiert wurde, um auch bei komplexeren Luftraumstrukturen mit kurviger Streckenführung gerecht zu werden [18] [23]. Sowohl bei der Projektion auf das konvergierende Final, als auch auf die konvergierende Anflugroute sind jeweils die Entfernung vom Merging Point und die Geschwindigkeit des Luftfahrzeugs identisch mit denen des zugehörigen Ghosts. Das Verfahren des distanzbasierten Ghostings ist geeignet für Routen mit gleichem Anflugprofil. Bei unterschiedlichen Geschwindigkeitsprofilen der Anflugrouten tritt der Effekt auf, dass die Separationen zwischen Ghost und den benachbarten Flugzeugen schwanken, was eine erhöhte Aufmerksamkeit beim Lotsen erfordert und beim abstandsbasierten Separieren eher hinderlich ist.

Eine in FAGI untersuchte Alternative zur distanzbasierten Projektion ist ein zeitbasiertes Ghosting auf Basis einer bestehenden 4D-Trajektorien- und Sequenzplanung. Für die Bestimmung der Position des Ghosts wird ein synthetisches Geschwindigkeitsprofil der Ghost-Route und die Restflugzeit des Realobjekts zum LMP herangezogen. Die Anzeige des Ghosts kann sich mit einer anderen Geschwindigkeit fortbewegen als das Label des zugehörigen Flugzeugs. Beide werden aber schließlich zeitgleich den Merging Point erreichen. Für die Lotsen ergibt sich somit der Vorteil, dass die Separierung der realen Flugzeuge zum Ghost in gewohnter Arbeitsweise erfolgen kann. Ein weiterer positiver Effekt des zeitbasierten Ghostings ist die Unempfindlichkeit gegenüber Störungen durch Wind. Während für den Ghost im distanzbasierten Verfahren die Winddrift von dessen Flugzeug eingeht, wird beim zeitbasiertem Ghosting der Einfluss des Windes an der projizierten Stelle berücksichtigt [11].

#### **3.2. Two-Segment-Ghosting**

Das Two-Segment Ghosting Verfahren ist eine Variante eines zeitbasierten Ghostings. Es wurde speziell für die Anforderungen an die Luftraumstruktur und die technischen Voraussetzungen des Projektes FAGI konzipiert, bei dem konventionell geführte und mit einem 4D-FMS ausgerüstete zielzeitverhandelte CDA-Anflüge erst ca. 7 Meilen vor der Schwelle am Late Merging Point (LMP) auf dem Final zusammengeführt werden.

Das Verfahren geht von einem kombinierten Geschwindigkeitsprofil für die Berechnung der Ghost-Label Positionen aus, so dass ein „Two Segment Ghosting“-Verfahren für den Anflugbereich vor dem LMP entsteht. Dabei werden die Positionen der Ghost-Label auf einem ersten Abschnitt der Centerline zunächst mit einer konstanten Geschwindigkeit berechnet, mit der auch die Anfluglotsen die konventionell geführten Luftfahrzeuge im gleichen Abschnitt führen sollten, um die einmal geführten Abstände zwischen den Luftfahrzeugen zu halten. Unabhängig von ihrer tatsächlichen Geschwindigkeit werden die Ghost-Luftfahrzeuge anschließend mit der gleichen Geschwin-

digkeitsreduktionsrate abgebremst, wie es die konventionell geführten Luftfahrzeuge im gleichen Abschnitt beim LDLP machen. Dabei wird der Zeitpunkt, ab dem die Ghost-Label ihre Fluggeschwindigkeit reduzieren in Abhängigkeit von ihrer individuellen Zielzeit am LMP berechnet, jedoch unabhängig davon, wo sich das dem Ghost-Label assoziierte Luftfahrzeug tatsächlich gerade befindet. Insgesamt wird also eine Fallunterscheidung zwischen einem Abschnitt mit konstanter und einem mit sich kontinuierlich eduzierender Fluggeschwindigkeit eingeführt, die nur auf der ausgehandelten Zielzeit für das CDA-Luftfahrzeug an einem bestimmten Punkt basiert.

Auf diese Weise werden im ersten Abschnitt des Finals - im Bereich der Intercepts - Ghost-Label projiziert, die sich mit konstanter Geschwindigkeit auf den LMP zu bewegen. Diese ermöglichen dem Lotsen eine gute räumliche Orientierung wann die A-FMS-Luftfahrzeuge den LMP im Verhältnis zu den handgeföhrten Luftfahrzeugen erreichen werden. Darüber hinaus wird so der Geschwindigkeitsübergang im Bereich des LMP, an dem Ghost und reales Label der 4D-FMS-Luftfahrzeuge zusammentreffen, ohne Sprünge oder signifikante Geschwindigkeitsverschiebungen und damit realistisch abgebildet.

Voraussetzung für die Einsatzfähigkeit dieses Verfahrens ist jedoch, dass sich Lotsen beim Führen der Luftfahrzeuge auf dem Final an die für die 4D-FMS ausgerüsteten Luftfahrzeuge angenommenen Fluggeschwindigkeiten halten und zuvor diese angenommenen Geschwindigkeiten entsprechend realitätsnah ausgewählt werden. Damit sollte diese als konstant angenommene Geschwindigkeit der Anfluggeschwindigkeit entsprechen, die ein Luftfahrzeug im Bereich des Downwinds, des Base Legs und im ersten Abschnitt der Centerline - und damit auf dem letzten Levelsegment - erreicht. Das Geschwindigkeitsreduzierungsprofil von einem 4D-FMS-Luftfahrzeug und damit einem CDA-Anflug unterscheidet sich im letzten Abschnitt zwischen LMP und Schwelle nur unwesentlich von dem eines Standardanfluges, da beide Luftfahrzeuge letztendlich mit nahezu der gleichen Geschwindigkeit aufsetzen.

Ein Problem bleibt trotzdem der Bereich des LMP, da die einen CDA fliegenden Luftfahrzeuge dort meistens eine höhere Geschwindigkeit haben als die LDLP-Anfälle. Dies ist jedoch unabhängig von der Verwendung von Ghost-Labels und muss durch etwas größere Abstände, die konventionell geföhrte Luftfahrzeuge vor den CDAs einzuhalten haben, durch den Lotsen kompensiert werden.

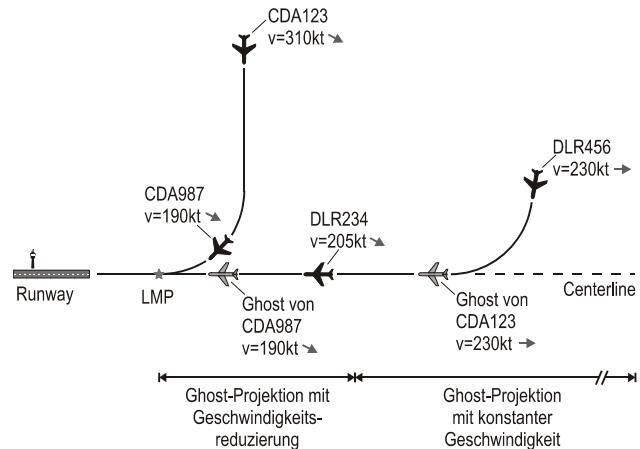


BILD 2: Schematische Darstellung von Ghost-Labels auf der Centerline. Der Pfeil an den Labels stellt eine Geschwindigkeitstendenzanzeige dar (nicht maßstabsgerecht).

Ein mit einem 4D-FMS ausgerüstetes Luftfahrzeug im CDA auf einer individuellen Anflugroute wird also zunächst in Abhängigkeit von seiner Restflugzeit und einer angenommenen Fluggeschwindigkeit von beispielsweise 230 kt auf das Final projiziert (BILD 2). In diesem Abschnitt des Finals werden nun die konventionell geföhrten Luftfahrzeuge (DLR234 und DLR456) über das Base Leg ebenfalls mit 230 kt auf die Centerline geföhrt, so dass die Ghost-Label und die Label der konventionellen Luftfahrzeuge die geforderten Abstände auch auf dem Bildschirm des Radargerätes untereinander einhalten. Ab einer bestimmten Entfernung zur Schwelle, die bei einem 3°-Final grob 25 NM beträgt, reduzieren diese konventionellen Luftfahrzeuge nahezu kontinuierlich ihre Geschwindigkeit bis zur Landegeschwindigkeit. Das Geschwindigkeitsprofil von CDA-Anflügen sieht in diesem Abschnitt zwar sehr ähnlich aus, doch Reduzieren sie deutlich verzögert und überfliegen den LMP mit einer ca. 20 kt höheren Geschwindigkeit als die LDLP-Anfälle. Die dargestellte Reduktionsrate der CDA-Ghost-Label kann für jedes Luftfahrzeug individuell angepasst werden, so dass sie beim Verschmelzen von Luftfahrzeug- und Ghost-Label am LMP immer die Geschwindigkeit des realen Labels erreichen. Dafür muss die voraussichtliche Überfluggeschwindigkeit des CDA am LMP zuvor via Datalink mitgeteilt werden. Ist dies nicht möglich, hat sich die Annahme von 185 kt als sehr gut erwiesen.

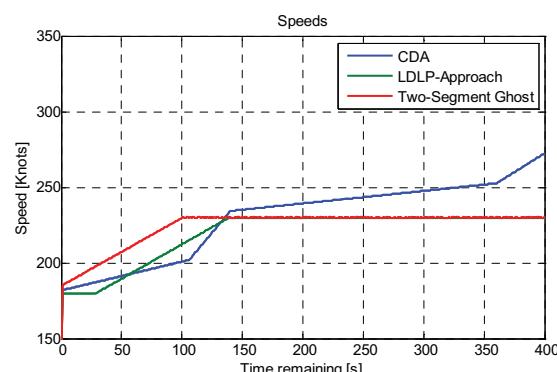


BILD 3: Vergleich typischer Geschwindigkeitsprofile unterschiedlicher Anflugverfahren.

In BILD 3 ist ein Vergleich typischer Geschwindigkeitspro-

file von CDA-Anflügen, LDLP-Anflügen und den Geschwindigkeiten (jeweils Groundspeeds ohne Wind) des projizierten Two-Segment Ghost-Labels in Abhängigkeit von der Restflugzeit bis zum LMP dargestellt. Es wird deutlich, dass bei einem CDA die Geschwindigkeit deutlich später reduziert wird als bei einem LDLP-Anflug. Ungefähr 130 Sekunden vor Überflug des LMP haben alle Anflüge ungefähr die gleiche Geschwindigkeit bevor sich die unterschiedlichen Verzögerungsraten wieder bemerkbar machen. Würde als Basis für die Berechnung des CDA-Ghost-Labels die reale Geschwindigkeit des Luftfahrzeugs herangezogen werden, so würde sich dadurch der Abstand zwischen Ghost und einem tatsächlichen Luftfahrzeug auf dem Radardisplay kontinuierlich vergrößern und verkleinern, je nach dem, ob die Geschwindigkeit des CDAs gerade größer oder kleiner als des voraus fliegenden oder nachfolgenden LDLP-Anfluges ist.

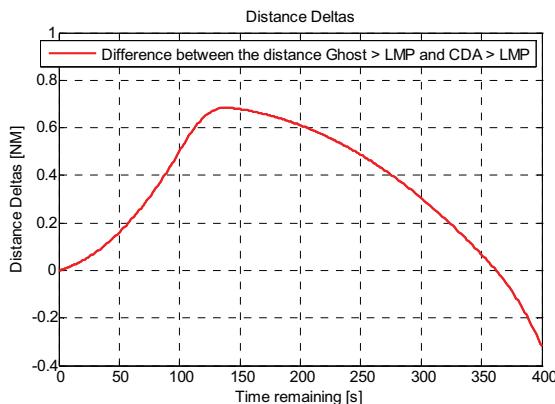


BILD 4: Die Differenz der Abstände vom Ghost-Label und dem assoziierten CDA zum LMP in Abhängigkeit von der Zeit.

BILD 4 stellt noch einmal die zeitliche Abhängigkeit der Abstands differenz von einem CDA-Ghost-Label und seinem zugehörigen Luftfahrzeug-Label auf einem Radardisplay dar. Bis ungefähr 6 Minuten vor Erreichen des LMP ist die Restflugstrecke des Luftfahrzeugs noch größer als vom Ghost-Label dargestellt. Anschließend ist die Differenz positiv, das Ghost-Label hat (aufgrund seiner kleineren angenommenen Geschwindigkeit) noch eine größere Distanz bis zum LMP zurückzulegen. Die Umkehrung erfolgt ungefähr 130 Sekunden vor dem LMP-Überflug, wenn CDA- und sein assoziierter Ghost die gleiche Geschwindigkeit aufweisen. Anschließend reduziert der CDA deutlicher als sein Ghost und die Differenz wird wieder abgebaut bis sie schließlich beide gleichzeitig am LMP ankommen.

Eine Voraussetzung für den Einsatz von zeitbasierten Ghost-Labeln ist allerdings, dass das CDA-Luftfahrzeug die Zielzeit am LMP immer mit lediglich einer kleinen zeitlichen Abweichung einhält. Durch ein Anflugplanungssystem am Boden sollte dazu ein Conformance Monitoring der CDA-Anflüge durchgeführt werden, damit eine mögliche Abweichung von der verhandelten Zielzeit früh erkannt und die Position des Ghost-Labels entsprechend schnell angepasst werden kann.

## 4. ERGEBNISSE

Im Rahmen des Projekts FAGI wurden verschiedene Simulationsmaßnahmen durchgeführt, um zentrale Elemente des operationellen Konzepts sowie mögliche Unterstützungssysteme der vorgeschlagenen Verfahren empirisch zu untersuchen. Einige der Ergebnisse sind im Folgenden zusammengefasst. Zusätzliche umfangreiche Versuche sind für den weiteren Projektverlauf vorgesehen.

In einer explorativen Simulationsstudie im Jahr 2008 wurden erste praktische Versuche mit der entwickelten Routenstruktur und Verfahren durchgeführt, die zuvor im Rahmen eines Expertenworkshops mit Lotsen und Piloten erörtert und weiterentwickelt worden waren. In der Studie wurden als unabhängige Variablen Verkehrsmischung (Verhältnis aus ausgerüsteten und unausgerüsteten Luftfahrzeugen) und schon bestehende Unterstützungsfunctionen des Arrival Managers variiert. Dabei wurden u. A. die Automatisierungsstufen „keine Unterstützung“, „automatisierte Sequenzplanung und Timeline“ sowie „automatisierte Sequenzplanung, Timeline und Advisories“ (Advisories entsprechen Vorschlägen des Arrival Managers für konkrete Clearances zur Umsetzung der Planung) getestet. Feedback aus den Interviews, Debriefings und Fragbögen zeigte eine allgemein gute Akzeptanz des operationellen Konzepts und der Routenstruktur. Deutlich wurde, dass die zeitgenaue Integration von ausgerüsteten und unausgerüsteten Luftfahrzeugen am LMP eine Schlüsselstellung einnimmt. Dabei ist das richtige Timing des Eindrehmanövers vom Gegenanflug auf das Final für unausgerüstete Luftfahrzeuge manuell nur schwierig zu bestimmen, insbesondere wenn sich ein davor geplantes ausgerüstetes Luftfahrzeug aus einer anderen Richtung und mit deutlich abweichendem Geschwindigkeitsprofil nähert und der genutzte Gegenanflug auf dem Downwind lang wird. Die Advisories als Vorschlag des Arrival Managers für einen geeigneten Turnzeitpunkt wurden hier als potentielle Hilfestellung bewertet. Diese allein boten jedoch nicht immer hinreichend Flexibilität im Zusammenspiel mit den eigenen Entscheidungen der Lotsen und waren außerdem an einigen Stellen nicht ausreichend schnell durch die Lotsen zu verifizieren.

Die gesammelten Erkenntnisse und Diskussion möglicher Ergänzungen führte zur Entwicklung und Untersuchung von Ghosting-Funktionen (Abschnitt 3) mit dem Ziel Staffelung und Zusammenführung der LFZ am LMP direkt visuell im Radardisplay zu unterstützen. In einer Voruntersuchung mit einem reduzierten Simulatorsetup wurden zwei Varianten eines distanztreuen Ghostings sowie eines rein zeitbasierten Ghostings mit konstanter Geschwindigkeit und eine Führung ohne Ghosting verglichen. Beide Ghosting-Varianten führten zu deutlich besserer Leistung der Versuchspersonen (Staffelung, Separationsverletzungen) sowie verminderter subjektiver Arbeitsbelastung im Vergleich zu einer Führung ohne Ghosting. Leistungsdifferenzen und Bewertungsunterschiede zwischen den beiden Ghosting-Varianten (zeitbasiert vs. distanzbasiert) waren geringer und teilweise nicht einheitlich über verschiedene Teilkriterien. Die in Abschnitt 3 beschriebene Variante des Two-Segment Ghosting greift Erfahrungen beim Umgang mit beiden Varianten aus diesen Versuchen auf und zielt darauf ab, die Vorteile beider Verfahren zu kombinieren.

In einer weiteren Simulationsstudie DLR-Radarsimulator ATMOS wurden in 2009 das neu entwickelte Two-Segment Ghosting in Kombination mit anderen Assistenzfunktionen intensiv getestet. Dabei wurden unter anderem Versuchsläufe unter den Bedingungen „keine Automatisierung (0)“, „Two-Segment Ghosting (1)“, „Advisories (2)“ und „Two-Segment Ghosting mit Advisories (3)“ durchgeführt und verglichen. Die angebotene Ghosting-Funktion wurde dabei von den Lotsen durchweg als hilfreich bewertet, sowohl im Sinne einer erleichterten Verkehrsführung, als auch eines subjektiv besser bewerteten Situationsbewusstseins. Über alle vier Versuchsbedingungen ergab sich ein sehr konsistentes Präferenzmuster angeführt von „Two-Segment Ghosting mit Advisories (3)“ vor „Two-Segment Ghosting (1)“ vor „Advisories (2)“ vor „keine Automatisierung (0)“. Als besonderer Vorteil des Ghostings im Vergleich zu Advisories wurde die höhere Flexibilität aus Sicht der Lotsen hervorgehoben, da das Ghosting in übersichtlicher Art und Weise die nicht nutzbaren Zeitbereiche räumlich auf der Centerline visualisiert, bei der aktive Führung des unausgerüsteten Verkehrs aber den Lotsen alle wichtige Gestaltungsmöglichkeiten lässt. Die im weiteren Projektverlauf von FAGI geplanten Simulationen werden u. A. darauf abzielen, diese vielversprechende Bewertung durch umfangreichere objektive Daten weiter zu quantifizieren und die untersuchten Assistenzsysteme den neuen Ergebnissen entsprechend zu optimieren.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG

Im Projekt Future Air-Ground Integration (FAGI) des DLR werden neue Verfahren zur Umsetzung von Treibstoffsparenden und Lärm reduzierenden Anflugverfahren untersucht. Zentrale Elemente des entwickelten operationellen Konzepts sind eine modifizierte Routenstruktur zur späten Zusammenführung (Late Merging) von Anflugrouten und damit die Unterstützung von “user-preferred trajectories”, insbesondere Continuous Descent Approaches. Zur Ausführung der Verfahren werden dabei bord- und bodenseitig neue Automatisierungslösungen entwickelt und integriert, um eine verbesserte Bord-Boden Kommunikation zu erreichen. Als Schlüsselement für die Verwirklichung des operationellen Konzepts hat sich in Simulationsversuchen eine geeignete Unterstützung der Lotsen beim Late Merging Verfahrens herausgestellt. Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit einer entwickelten Ghosting-Funktionalität als visuelle Hilfe im Radardisplay. Ausgehend von einer vom Arrival Manager berechneten Zielzeitplanung für den Late Merging Point werden synthetische Ghost-Labels von CDAs auf den Final Approach des konventionellen Verkehrs projiziert. Für die Bestimmung der Ghost-Position kommt ein spezielles Two-Segment Profil zum Einsatz. In Bezug auf die angezeigten Ghost-Labels kann anschließend durch den Lotsen relativ und distanzbasiert gestaffelt werden. Der Beitrag beschreibt technische und konzeptionelle Grundlagen der Ghosting-Funktion und berichtet Ergebnisse und Lotsen-Feedback aus durchgeführten Echtzeit-Flugführungssimulationen.

## 6. ABKÜRZUNGEN

4D-CARMA	4 Dimensional Cooperative Arrival Manager
ARTS	Automated Radar Terminal System
ATMOS	Air Traffic Management and Operations Simulator

BFS	Bundesanstalt für Flugsicherung (heute DFS)
CAASD	Center for Advanced Aviation System Development
CARTS	Common Automated Radar Tracking System
CDA	Continuous Descent Approach
CRDA	Converging Runway Display Aid
FAA	Federal Aviation Administration
FAGI	Future Air Ground Integration
FMS	Flight Management System
IMC	Instrument Meteorological Conditions
LDLP	Low Drag Low Power
LMP	Late Merging Point
LVNL	Luchtverkeersleiding Nederland
MITRE	Massachusetts Institute of Technology Research
NextGen	Next Generation Air Transportation System
NLR	Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium (National Aerospace Laboratory)
SESAR	Single European Sky ATM Research Programme
STARS	Standard Terminal Automation Replacement System
RPI	Relative Position Indicator
VAST	Visual Aircraft Spacing Tool

## 7. LITERATUR

- [1] Keimel, H. (2007). Luftverkehrsbericht 2007 - Daten und Kommentierungen des deutschen und weltweiten Luftverkehrs. Verkehrsbericht. IB 326-2007/2. Porz-Wahnheide/Köln, Flughafenwesen und Luftverkehr, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., November 2007. 85 pages.
- [2] SESAR Consortium. (2006). D3 - The ATM Target Concept - SESAR Definition Phase - Deliverable 3.
- [3] FAA – Federal Aviation Administration (2009). FAA's NextGen Implementation Plan 2009: Federal Aviation Administration.
- [4] Oberheid, H., Temme, M.-M., Kuenz, A., Mollwitz, V., & Helmke, H. (2008a). Fuel Efficient And Noise-Reduced Approach Procedures Using Late Merging of Arrival Routes. Paper presented at the German Aerospace Congress 2008, Darmstadt.
- [5] Kuenz, A., Mollwitz, V., & Korn, B. (2007). Green Trajectories in High Traffic TMAS. Paper presented at the 26th Digital Avionics Systems Conference, Dallas, TX (USA).
- [6] Oberheid, H., Helmke, H., Kuenz, A., Mollwitz, V., & Stump, R. (2008b). FAGI Operational Concept. Braunschweig, Germany: German Aerospace Center (DLR), Institute of Flight Guidance.
- [7] Rottmann, U. (1988). Minderung des Fluglärm durch Optimierung der Streckenführung und der Start- und Landeverfahren im zivilen Luftverkehr. ILR-Mitteilungen Nr. 200 Forschungsbericht 88 - 105 05 501, Institut für Luft- und Raumfahrt, TU Berlin. 225 S.
- [8] Mensen, H. (1993). Moderne Flugsicherung: Organisation, Verfahren, Technik. Berlin, Springer-Verlag. 371 S.
- [9] BFS (1984). Lärmminderndes und treibstoffsparendes ILS Anflugverfahren, in: Nachrichten für Luftfahrer I-172/84, Bundesanstalt für Flugsicherung
- [10] Kuhn, M. (2008). Delta to perform continuous descent approaches in San Diego. Flight International Magazine. Dec. 2008.

- [11] Offermann, H. A. J. M. and M. Bakker, M. W. P. (1998). Growing pains of major European airports - Case study: Amsterdam Airport Schiphol. 2<sup>nd</sup> USA/EUROPE Air Traffic Management R&D Seminar, Orlando, Florida, 1.-4. December 1998, National Aerospace Laboratory NLR. 17 S.
- [12] Erkelens, L. J. J. (2000). Research on Noise Abatement Procedures. Aviation-2000 Prospects, Zhukovsky, Russia, National Aerospace Laboratory NLR, Flight Division, Amsterdam, The Netherlands: 10 S.
- [13] Mead, R. (2007). Tailored Arrivals, Boeing Phantom Works. Presentation. 9<sup>th</sup> January 2007
- [14] Fischer, S., S. Perez, D. Stephenson and C. Dorange (2005). Flight trials show that Tailored Arrivals boost efficiency, cut noise and emissions. ATC Maastricht, The Netherlands, Air Traffic Alliance and Boeing. Press Release. 31st January 2005
- [15] Evans, B. (2005). Tailored Arrivals: Idling Down to the Final Approach, Avionics Magazine, 1. May 2005
- [16] Mundra, A. D. and Levin, K. M. (1990). Developing Automation for Terminal Air Traffic Control: Case Study of the Imaging Aid, Conference Paper, Inst. of Canada, Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Volumes 1 and 2, 1990, Engineering Inst. of Canada
- [17] FAA (1995). Dependent Converging Instrument Approaches (DCIA) with Converging Runway Display Aid (CRDA), Federal Aviation Administration Order 7110.110, Department of Transportation, Washington DC
- [18] Sheplay, J. (2009). Near-Term Terminal Area Automation for Arrival Coordination, ATM2009, MITRE Corporation, McLean, Virginia
- [19] Simmons, B., Boan, L. and Massimini, Dr. P. (2000). Simulation Analysis of Dual CRDA Arrival Streams to Runways 27 and 33L at Boston Logan International Airport, MITRE Corporation, McLean, Virginia
- [20] Beers, C. S. (2005). Sourdine II, D 6.6 Concept of operation for Schiphol airport simulations, NLR, European Commission
- [21] FAA (2007). Common ARTS Computer Program Functional Specification (CPFS): Display Output Processing and Converging Runway Display Aid (CRDA), NAS-MD\_639, A6.05/A2-09, April 2007, Federal Aviation Administration
- [22] Raytheon Company (2006). STARS FLS TCW/TDW Operator's Manual, Revision 9, TI 6191.409, Raytheon Company
- [23] MacWilliams P., and Porter, D. (2007). An Assessment of a Controller Aid for Merging and Sequencing Traffic on Performance-Bases Arrival Routes, MITRE Corporation, McLean, Virginia

## 8. AUTOREN

Dipl.-Inform. Lothar Christoffels studierte Informatik mit Nebenfach Verkehrstechnik an der Technischen Universität in Braunschweig. Seit 1996 ist er am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) als Wissenschaftler tätig. Seine Schwerpunkte sind die Entwicklung von Arrival-Management-Systemen (4D-Planner, 4D-CARMA), die Integration eines Wirbelschleppen-Beobachtungs- und -Vorhersage-Systems in 4D-CARMA und die Entwicklung eines koordinierten Arrival-Departure-Management-Systems (ADCO).

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

Dipl.-Ing. Hendrik Oberheid studierte Mechatronik an der Universität Duisburg-Essen und der Universität Valencia, Spanien. Seit 2005 ist er in als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Flugführung am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt tätig. Sein Interesse gilt besonders Human Factors Aspekten im Luftverkehr (z.B. im Anwendungsbereich von Anflugplanungssystemen) und der Gestaltung und Bewertung von Mensch-Maschine Interaktion im Umgang mit komplexer Automatisierung.