

- Eine anwendungsorientierte Einführung in ATM-Simulationen
- Funkspruchzuordnung bei Weitbereichssprachkommunikation in einem sektorlosen Luftraum
- Modifiziertes Air Situation Window für sektorlose Flugverkehrskontrolle
- AirMAGIC – Traffic Forecast based on Fast-time Simulation
- Aircraft profile study for optimised descent procedures and recommendations to today's ATC procedures



Inhaltsverzeichnis

Übersicht der Artikel in diesem Heft	4
Eine anwendungsorientierte Einführung in ATM-Simulationen.....	5
Oliver Haßa	
Funkspruchzuordnung bei Weitbereichssprachkommunikation in einem sektorlosen Luftraum. 17	
Wiebke Drop, Dr. Jens Konopka	
Modifiziertes Air Situation Window für sektorlose Flugverkehrskontrolle	29
Tobias Hereth, Stefan Fladerer, Christoph Schmand, Oliver Haßa, Dr. Jens Konopka	
AirMAGIC – Traffic Forecast based on Fast-time Simulation	37
Wolfgang Theeck und Björn Paul	
Aircraft profile study for optimised descent procedures and recommendations to today's ATC procedures.....	42
Valentin Reinhardt (Deutsche Lufthansa AG), İlhan Akin	
Impressum	47

Die Autoren sind, soweit nicht anders gekennzeichnet, Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der DFS. Die Rechte an den Artikeln liegen bei den jeweiligen Autoren.

Übersicht der Artikel in diesem Heft

Oliver Haßa: Eine anwendungsorientierte Einführung in ATM-Simulationen – Anhand einer Taxonomie für Simulationen im Bereich des Flugverkehrsmanagements bietet der Artikel eine Einführung in die verschiedenen Simulationsarten. Ihre Einsatzmöglichkeiten werden mit Bezug zum Entwicklungsprozess nach der European Operational Concept Validation Methodology (E-OCVM) praxisnah erläutert. Kennzeichnende Eigenschaften von Simulationen werden beschrieben und Referenzen für eine weiterführende Vertiefung zur Verfügung gestellt.

Wiebke Drop, Jens Konopka: Funkspruchzuordnung bei Weitbereichssprachkommunikation in einem sektorlosen Luftraum – Die Konzept des sektorlosen ATM sieht vor, dass sich mehrere Lotsen einen großen Luftraum teilen und zusammen bearbeiten. Fliegt ein Luftfahrzeug in diesen Luftraum ein, wird es einem Lotsen zugeteilt, der es bis zum Austritt aus dem Luftraum kontrolliert. Eine wesentliche technische Hürde ist dabei die Sprachkommunikation zwischen Bord und Boden, da die von einem Lotsen kontrollierten Luftfahrzeuge über ganz Deutschland verteilt sind und somit nicht mehr von einer Sendestelle alleine bedient werden können. Als Möglichkeit zur Lösung wird in diesem Artikel die Funkspruchzuordnung durch Peiler beschrieben und die Ergebnisse verschiedener Simulationen zum Vergleich von zwei Peilernetzwerken vorgestellt.

Tobias Hereth, Stefan Fladerer, Christoph Schmand, Oliver Haßa, Jens Konopka: Modifiziertes Air Situation Window für sektorlose Flugverkehrskontrolle – Eine andere Problemstellung des sektorlosen ATM betrifft die Darstellung einer großen Dichte an Flugzielen auf dem Radarschirm, für die der heutige Lotsenarbeitsplatz nicht ausgelegt ist. Durch eine signifikant höhere Anzahl von dargestellten Luftfahrzeugen und die damit einhergehende größere Menge an darzustellenden Informationen ist die Übersichtlichkeit der Luftlagedarstellung erheblich schlechter geworden. Um diese zu optimieren, wurden zwei Filter entwickelt, um die für den Lotsen relevanten Luftfahrzeuge hervorzuheben. Die beiden Ansätze werden vorgestellt und deren Validierungen im Rahmen von Echtzeitsimulationen beschrieben.

Wolfgang Theeck und Björn Paul: AirMAGIC – Traffic Forecast based on Fast-time Simulation – AirMAGIC ist ein auf Schnellzeitsimulation basierendes Verkehrsprognosetool, welches in Zusammenarbeit zwischen Airtopsoft und den Schnellzeitsimulationsexperten am DFS Forschungszentrum in Langen entwickelt und getestet wurde. In Form eines Plugins für den Schnellzeitsimulator AirTOP ermöglicht es die Integration von Livedaten und die Darstellung in einem vereinfachten User Interface. Während es komplett unabhängig vom aktuell in Verwendung stehenden Luftverkehrskontrollsystem laufen kann, liegen seine Vorteile insbesondere in der Integration von Verkehrsdaten aus zusätzlichen externen Quellen und der erweiterten Vorhersagefähigkeit durch Simulation.

Valentin Reinhardt und Ilhan Akin: Aircraft profile study for optimised descent procedures and recommendations to today's ATC procedures – Im Rahmen eines SESAR Projekts wurden optimierte Anflugprofile aus Sicht von Luftraumnutzern und Herstellern bestimmt. Die Ergebnisse werden vorgestellt und davon abgeleitet Empfehlungen für Verfahrensplaner formuliert. Des Weiteren wurden erste Demonstrationen mit Projektpartner durchgeführt, um entsprechende Anflugrouten im realen Umfeld zu untersuchen. Erste Ergebnisse werden berichtet.

Eine anwendungsorientierte Einführung in ATM-Simulationen

Oliver Haßa

Einleitung

Der Luftverkehr ist global vernetzt, er hat eine sehr hohe Anzahl an Systemelementen und diese stehen in einer intensiven Wechselwirkung zueinander. Darüber hinaus weisen manche Systemelemente, wie zum Beispiel das Wetter, chaotische Eigenschaften auf. Luftverkehr ist damit ein ausgesprochen komplexes System¹ das sich an veränderte Rahmenbedingung anpassen kann. Vorhersagen für die Reaktion dieses komplexen adaptiven Systems² bei einer Veränderung sind daher nicht-trivial. Für Untersuchungen und Entwicklungsarbeiten in dieser Domäne werden daher spezielle Experimente oder Werkzeuge in Form von Simulatoren benötigt.

Im Bereich des Air Traffic Managements³ (ATM) ist es nur in den seltensten Fällen möglich "echte Experimente" durchzuführen. Unter anderem sprechen Sicherheitsaspekte und auch Aspekte der praktischen Umsetzung und des Aufwandes dagegen. Um zum Beispiel Varianten eines neu gestalteten Luftraum durch Experimente evaluieren zu können, müssten die damit verbundenen Routen zunächst an alle Luftraumnutzer zeitlich eingeschränkt veröffentlicht werden, die Flight-Management-Systeme und die Systeme der Flugsicherung müssten entsprechend angepasst und alle Beteiligten geschult werden. Auch die Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit der Experimente wäre schwierig, da sich die Rahmenbedingungen wie Wetter und Verkehrsmix nicht beeinflussen lassen. Daher werden im ATM-Bereich in sehr hohem Maße „virtuelle“ Experimente, nämlich Simulationen genutzt. Die VDI-Richtlinie 3633 "Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen" [6] definiert Simulation wie folgt: „Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“

Trotz des teilweise sehr hohen Realitäts- und Detaillierungsgrades der beschriebenen Simulationsarten sollte der Nutzer immer bedenken, dass

Simulationen nur ein eingeschränktes Abbild der realen Welt darstellen. Dies muss daher immer bei der Interpretation der Simulationsergebnisse und der Übertragung der Erkenntnisse in die reale Welt berücksichtigt werden.

In vielen Teilen der Wissenschaft und Industrie hat sich die Nutzung von Simulationen als eine weitere Säule des Erkenntnisgewinns etabliert. Waren früher Experimente oder theoretisch-analytische Untersuchungen für das Verständnis oder die Weiterentwicklung von komplexen Systemen erforderlich, wird heute vielfach vom "Experiment mit dem Computer" Gebrauch gemacht. Der Begriff Simulationen umfasst dabei ein sehr breites Spektrum an Anwendungsgebieten und eine große Vielzahl an unterschiedlichen Methodenapparaten - analytisch, stochastisch, ereignisorientiert usw. Die Simulationsdomäne des Flugverkehrsmanagements bildet dabei keine Ausnahme. Diese Einführung in die Thematik soll einen anwendungsorientierten Überblick über den Einsatz von Simulationen im ATM-Bereich geben. Um dem Leser Anknüpfungsmöglichkeiten zur Vertiefung zu geben, werden bei jeder Simulationsart entsprechende Referenzen vorgestellt. Mit dieser Gliederung richtet sich die vorliegende Einführung in erster Linie an potenzielle Nutzer von Simulation. Diesen soll die Einführung die zielgerichtete Auswahl von Simulationsmethoden für den jeweiligen Untersuchungszweck vereinfachen.

Taxonomie der Simulationen im ATM-Bereich

Um zielgerichtet eine bestimmte Simulationsart für eine Fragestellung aussuchen zu können, erscheint die Nutzung einer entsprechenden Taxonomie sinnvoll. Daher wird diese zunächst auf Basis kennzeichnender Eigenschaften entwickelt, bevor in den folgenden Kapiteln die entsprechenden Simulationsarten vorgestellt werden. Als Ordnungskriterien wurden dabei die Detaillierungs- und Realitätsgrade zu Grunde gelegt. Die Strukturierung erfolgt damit nach dem zeitlich gestaffelten Einsatz der Simulationsart während eines Entwicklungsprozesses (Werkzeugkette, siehe

¹ Zum Themenkomplex Komplexität siehe Dittes 2012 [1]

² "Komplexe adaptive Systeme" wie sie Holland [2] beschreibt

³ Als Einführungen in diesen Bereich seien dem Leser die Werke von Mensen [3], Nolan [4] und Flühr [5] empfohlen.

Abbildung 2). In den folgenden Kapiteln erhöht sich damit schrittweise der Realitäts- und Detaillierungsgrad der vorgestellten Simulationsarten. Die Unterteilung erfolgt nach den zugrunde liegenden Simulationsprinzipien.

Die in den Simulatoren genutzten Methodenapparate aus der Mathematik oder der Informatik werden im Folgenden nur oberflächlich behandelt. Bungartz et al. [7] bietet eine gute Einführung in diesen Methodenapparat und stellt die Modellbildung und Simulation als Methodik der Mathematik und Informatik ausführlich vor. Den Simulationsbegriff an sich und seine technikhistorische Entwicklung stellte Spath 2009 dar [8].

In vielen Anwendungsbereichen außerhalb des ATM-Bereiches erfolgen Simulationen ausschließlich rechnergestützt und der Begriff Simulation wird synonym mit dem der Computersimulationen genutzt. In der betrachteten Einsatzdomäne kommen jedoch nicht nur rein computerbasierte Simulationen zur Anwendung. Der hier genutzte Simulationsbegriff umfasst daher nicht nur die klassische Computersimulation sondern dehnt den Begriff auch auf analytische Methoden und interaktive Simulationen aus.

Die in Abbildung 1 dargestellte Taxonomie gliedert sich in vier Hauptgruppen von Simulationen. Diese nehmen von links nach rechts im Detaillierungsgrad zu. Gleichzeitig steigt der für eine Simulation notwendige Zeit- und Kostenaufwand. Die mögliche Ausdehnung einer Simulation (z. B. die Größe eines zu simulierenden Luftraums oder der zeitliche Umfang) ist in der Regel gegenläufig und nimmt dabei von links nach rechts ab.

Die erste Gruppe der Taxonomie bilden die analytische Lösung von Fragestellungen und makroskopische Simulationen. Beide verfügen über einen großen Abstraktionsgrad und sind damit im Detaillierungsgrad vergleichbar.

Alle drei folgenden Gruppen beinhalten ausschließlich mikroskopische Simulationen. Dabei beinhaltet die zweite Gruppe die größte Anzahl unterschiedlicher Simulationsarten mit ähnlichem Abstraktionsniveau. Die einzelnen Simulationen dieser Kategorie werden im Kapitel 4 genauer beschrieben.

Im Bereich des Flugverkehrsmanagements und der Flugsicherung werden vor allem die sogenannte Schnellzeit- und die Echtzeitsimulation eingesetzt. Diese bilden die dritte und vierte Gruppe der Taxonomie und werden in den Kapiteln 5 und 6 näher vorgestellt.

Die vorgestellte Einteilung der Taxonomie ist nicht immer trennscharf. So gibt es z. B. zwischen Schnellzeit- und Echtzeitsimulationen Überschneidungen. Auf diese wird jeweils in den entsprechenden Kapiteln eingegangen.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die vorgestellten Simulationsarten und ihre kennzeichnenden Eigenschaften. Diese können im Rahmen dieser Einführung nicht detailliert beschrieben werden. Die Definitionen dieser zugrundeliegenden Prinzipien können Zeigler et al. [9] und Law [10] entnommen werden.

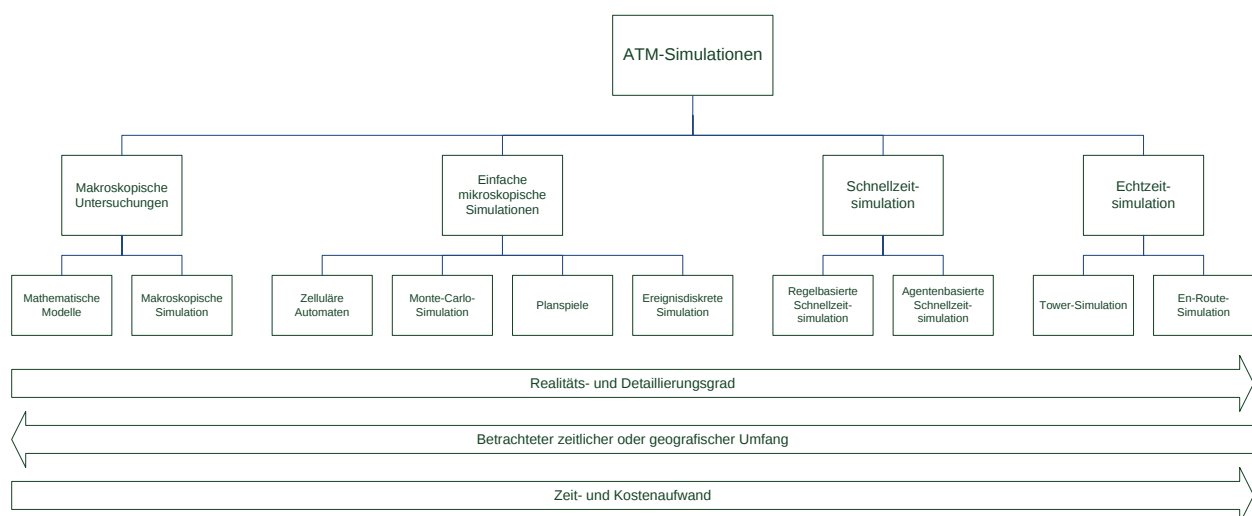


Abbildung 1: Taxonomie der Simulationen im Bereich des Flugverkehrsmanagements

Tabelle 1: Kennzeichnende Eigenschaften der Simulationsarten

						hybrid									
						kontinuierlich	diskret								
		statisch	dynamisch	makroskopisch	mikroskopisch			deterministisch	stochastisch	modellbasiert	interaktiv	zentral	verteilt		
Makroskopische Untersuchungen	Mathematische Modelle	(X)	X	X		X		X		X		X			
	Makroskopische Simulation		X	X			X	X		X		X			
Einfache mikroskopische Simulationen	Zelluläre Automaten		X		X		X	X		X		X			
	Monte-Carlo-Simulation	X	(X)		X		X		X	X		X			
	Planspiele		X		X		X	-	-		X			X	
	Ereignisdiskrete Simulation		X		X		X	X		X		X			
Schnellzeitsimulation	Regelbasierte Schnellzeitsimulation		X		X		X	X	(X)	X		X			
	Agentenbasierte Schnellzeitsimulation		X		X		X	X	(X)	X				X	
Echtzeitsimulation	Tower-Simulation		X		X		X	-	-		X			X	
	En-Route-Simulation		X		X		X	-	-		X			X	

Die in den folgenden Kapiteln vorgestellten Beispiele für Simulation aus dem ATM-Bereich sollen zur Vertiefung der beschriebenen Taxonomie dienen und gleichzeitig dem Leser Anknüpfungspunkte für eine eigenständige Vertiefung des jeweiligen Themas geben.

Mathematische Modelle und makroskopische Simulationen

Die erste Gruppe der vorgestellten Simulationsarten beinhaltet zwei Vorgehensweisen vergleichbaren Abstraktionsgrades, die analytische Lösung einer Fragestellung und damit die Nutzung eines rein mathematischen Modells sowie makroskopische Computersimulationen. Beide werden in den folgenden Unterkapiteln mit Beispielen beschrieben.

Bei einer Modellierung unter makroskopischen Gesichtspunkten interessiert weniger das einzelne Teilchen als vielmehr ganze Ströme. Mit einer solchen Simulation lassen sich Engpässe und Überkapazitäten in Flughäfen, Sektoren oder auf bestimmten Routen analysieren. Makroskopische Modelle betrachten damit den Verkehrsfluss in Analogie zu einer strömenden Flüssigkeit oder einem Gas. Daher wird dieser Art der Simulation gelegentlich auch als hydrodynamische Simulation bzw. Modellierung bezeichnet.

Die dabei verwendeten dynamischen Parameter sind lokal aggregierte Größen wie Luftfahrzeugdichte, Fluss, mittlere Fluggeschwindigkeit oder Fluggeschwindigkeitsvarianz. Da die Aggregation nur lokal (z. B. auf einen Sektor oder Flughafen bezogen) erfolgt, sind diese Größen räumlich und zeitlich veränderlich. Daher können Staus und Ausbreitungsgeschwindigkeiten von

Störungen im Verkehrsfluss mit Makromodellen gut beschrieben werden.

Mikroskopische Simulationen hingegen haben eine Betrachtung des Verhaltens von abgegrenzten, einzelnen Elementen oder Teilchen als Grundlage. Mikroskopische Modelle gehen damit von den einzelnen Teilchen aus, die wiederum als Kollektiv den Verkehrsstrom ausmachen. Solche Modelle beschreiben die Reaktion eines jeden einzelnen Teilchens durch die Größen Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung. Als mikroskopische Einheiten werden in der Domäne der ATM-Simulation in der Regel einzelne Luftfahrzeuge verwendet. Bei Simulationen des Vorfeldes kommen neben den Luftfahrzeugen weitere Fahrzeuge (u. a. Schlepper, Tank-, Catering-, Gepäck-, Follow-Me-Fahrzeuge etc.) als kleinste Elemente hinzu.

Nur in Ausnahmefällen werden kleinere Einheiten wie z. B. Funksprüche genutzt (siehe Kapitel 4.4). In den angrenzenden Bereichen der Flughafensimulation kann es durchaus sinnvoll sein, kleinere Elemente zu verwenden. So werden bei der Auslegung von Flughafengebäuden häufig einzelne Passagiere, Gepäckstücke oder Frachtcontainer als mikroskopische Elemente verwendet, um Terminalgebäude oder Gepäckbänder zu simulieren und auszulegen. Aus Sicht der Flugverkehrssimulation würde es sich dabei dann um eine submikroskopische Simulation handeln.

Grundsätzlich ist auch im Bereich des Flugverkehrsmanagements der Einsatz von mesoskopischen Simulationen denkbar. Diese kombinieren makroskopische und mikroskopische Modellierungen in einer Simulation. So kann z. B. in weniger interessanten Randbereichen einer Simulation

ein makroskopisches Modell verwendet werden, das für den im Fokus der Untersuchung befindlichen Zentralbereich an Übergangspunkten Einzelemente generiert bzw. aufnimmt. Im Zentralbereich würde dann ein mikroskopisches Modell Verwendung finden. In der in Abbildung 1 dargestellten Taxonomie läge eine mesoskopische Simulation theoretisch zwischen der ersten und zweiten Gruppe. Aufgrund der hohen Leistungsfähigkeit moderner Computer, werden allerdings aktuell keine mesoskopischen Simulatoren genutzt. Aktuelle kommerzielle Simulatoren im ATM-Bereich verwenden ausschließlich mikroskopische Modelle.

Mathematische Modelle

Bei der Herleitung und Nutzung einer analytischen Lösung und damit eines mathematischen Modells handelt es sich streng genommen nicht um eine klassische (Computer-)simulation. Dennoch kann es sich für einfache Fragestellungen anbieten diesen Weg zu beschreiten. Daher wird auch diese Methode in der vorgestellten Taxonomie berücksichtigt.

Bei einer analytischen Lösung wird das System zunächst durch eine Reihe von Gleichungen beschrieben. Die Kenndaten des Systems entsprechen dabei den Variablen dieser Gleichungen. Statt einer klassischen Simulation werden die Werte der Variablen dabei mathematisch berechnet. Dies ist jedoch in der Regel nur für einfache Fragestellungen oder mit stark einschränkenden Annahmen und Vereinfachungen möglich. Der Abstraktionsgrad dieser Methode ist entsprechend hoch.

Aufgrund der sehr hohen Leistungsfähigkeit moderner Computer werden heutzutage nur sehr wenige analytische Lösungen im ATM-Bereich genutzt. Die im Folgenden aufgeführten Beispiele sind daher aus dem Bereich der sechziger und siebziger Jahre des 20. Jahrhunderts.

Porter und Athans [11] leiteten die Auswirkungen unterschiedlicher Flugwege innerhalb eines Anflughabebereichs analytisch her. Die dafür genutzten Trajektorien verfolgen dabei unterschiedlichen Strategien zur Flugwegverlängerung (z.B. Warteschleifen, Kreise und verschiedene Steuerkurse), um eine möglichst nahe am Ideal liegende Landereihenfolge zu

erreichen. Erzberger und Lee [12] verfolgen einen ähnlichen Ansatz und modellierten unterschiedliche Scharen von Trajektorien mathematisch. In beiden Fällen sollten die analytischen Herleitungen als eine Basis für Planungssysteme für Fluglotsen dienen.

Die von Porter, Athans, Erzberger und Lee [11 bis 13] untersuchte ideale Landereihenfolge bei unterschiedlichen Mindestabständen entwickelte sich im Laufe der Zeit zu einem eigenständigen kombinatorischen Optimierungsproblem in der Unternehmensforschung und der theoretischen Informatik [14]. Dort wird das *Aircraft Sequencing Problem*⁴ weiterhin untersucht [15] und es werden mit verschiedenen Optimierungsmethoden möglichst gute Landereihenfolgen berechnet. Bennel, Mesgarpour und Potts [16] geben einen guten Überblick über die aktuell angewandten Optimierungsmethoden. Diese Optimierungen sind allerdings häufig generischer Natur und teilweise nur bedingt in die reale Welt übertragbar. Ein gutes Beispiel für den aktuellen Stand in diesem Bereich bieten Farhadi, Ghomien und Al-Salem [17], die zwei der Optimierungsmethoden auf ein existierendes Start- und Landebahnsystem anwandten und die Ergebnisse mit realen Daten verglichen.

Makroskopische Modelle

Makroskopische Modelle beschreiben keine einzelnen Luftfahrzeuge, sondern arbeiten mit Dichte und dem Fluss von Luftfahrzeugen. Aufgrund der zunehmenden Leistungsfähigkeit moderner Computer werden makroskopische Simulationen weniger häufig genutzt. Die aktuelle Entwicklung auf diesem Gebiet zeigen Timer, Hunter und Post [18]. Diese nutzten makroskopische Modelle um die Auswirkungen der Einführung neuer Navigationstechniken (in diesem Fall die *Performance Based Navigation*, PBN) zu untersuchen.

Makroskopische Modelle können sehr gut für einen Vergleich zwischen großräumigen Lufträumen und Verfahren genutzt werden. So wurde z. B. das von Donohue an der George Mason University (GMU) entwickelte makroskopische Kapazitätsmodell (GMU *Macroscopic Capacity Model*, MCM [19]) für einen Vergleich der Flughafenkapazitäten zwischen den Vereinigten Staaten und Europa genutzt [20]. Gwiggner und Nagoaka überprüften die Unterschiede zwischen den hier vorgestellten makroskopischen Modellen und

⁴ Manchmal wird dies auch als *Aircraft Scheduling Problem* bezeichnet. Es handelt es sich um ein ähnliches

Untersuchungsobjekt wie das bekannte Problem des Handlungsreisenden (*Traveling Salesman Problem*).

den im nächsten Kapitel beschriebenen einfachen mikroskopischen Modellen [21]. Anschließend setzten sie diese Modellierung für Untersuchungen im Bereich der Verkehrsflussregelung ein. Damit bieten ihre Arbeiten einen guten Einstiegspunkt, falls in einem Projekt Modelle für große Lufträume zur Anwendung kommen sollen.

Einfache mikroskopische Simulationen

Zelluläre Automaten

Bei Zellulären Automaten handelt es sich um eine dynamische, deterministische, diskrete und mikroskopische Simulationsart. Dabei sind Zelluläre Simulationen sowohl zeitlich als auch räumlich und mit Bezug auf die Systemzustände diskret aufgebaut. Sie stellen damit die einfachste Art mikroskopischer Simulationen dar. Zellularautomaten wurden um 1940 von Stanislaw Ulam entwickelt und später von John von Neumann zu einem universellen Modell weiterentwickelt [22]. Allgemeine Bekanntheit erlangten Simulationen mit Zellulären Automaten durch das "Game of Life", das 1968 vom Mathematiker John Horton Conway entwickelt wurde und insbesondere in den siebziger und achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts sehr populär war⁵. Dieses Modell simuliert den Überlebenskampf einzelner Zellen (einen guten Überblick darüber bietet [24]). Wolfram gibt in seinem 2002 erschienenen Werk *A New Kind of Science* einen umfassenden Überblick über die allgemeine Nutzung von Zellulären Automaten [22].

Zelluläre Automaten bilden die Basis vieler Simulation in der Verkehrsdynamik. So beruht auch das Nagel-Schreckenberg-Modell⁶ zur Simulation des Verkehrs auf Autobahnen auf diesem Prinzip [25]. Mit Hilfe dieser Modelle gelang es erstmals den „Stau aus dem Nichts“ zu erklären. Mori nutzte dieses Modell zur Untersuchung des Rollverkehrs auf Flughäfen [26]. Nutzt man dreidimensionale Gitter zur Modellierung mit Zellulären Automaten, so kann man diese auch im ATM-Bereich anwenden. So untersuchten Kim, Abubakar und Obah damit die Effekte von sich selbstseparierenden Luftfahrzeugen im En-Route- und Anflughnabereich [27]. Durch Hinzufügen von stochastischen Elementen zu Zellulären Automaten erhielten Amor, Tran und Bui ein

Modell mit dem Phasenübergänge zwischen lokalem und globalem Systemverhalten im Luftraum untersucht werden können [28]. Auch das im Kapitel 3.1 kurz vorgestellte *Aircraft Sequencing Problem* kann mit Hilfe von Zellulären Automaten untersucht und optimiert werden [29].

Monte-Carlo-Simulation

Bei der von Stanislaw Ulam entwickelten Monte-Carlo-Methode handelt es sich ursprünglich um eine statische, stochastische Simulation [10]. Diese beruht auf der Berechnung einer sehr großen Zahl gleichartiger Zufallsexperimente. Inzwischen wird der Begriff auf eine Vielzahl von stochastischen Methoden angewandt und er ist heute fast synonym mit dem der stochastischen Simulation.

Eine der Hauptanwendungen der Monte-Carlo-Simulation im ATM-Bereich ist die Modellierung und Aggregation von Eintrittswahrscheinlichkeiten bei der Risikoanalyse bei Sicherheitsbewertungen [30, 31]. Weitere Anwendungsgebiete sind die Optimierung und der Test von Algorithmen zur Konfliktlösung, die Analyse von Engpässen, die Auslegung von Systemen [32] und die Modellierung von Anflug- und Warteverfahren [33]. Auch die zeitliche Variation von Flugplänen im Rahmen einer Schnellzeitsimulation (siehe Kapitel 5) kann im weiteren Sinne als eine Art der Monte-Carlo-Simulation angesehen werden. Da es sich, entgegen der ursprünglichen Definition, dabei um eine dynamische Simulation handelt, wurde dies mit einem (X) in Abbildung 1 entsprechend gekennzeichnet.

Planspiele (Gaming Simulation)

Planspiele sind eine Form der sogenannten *Serious Games*. Der Begriff *Serious Games* wurde erstmals 1970 von Clark C. Abt in seinem gleichnamigen Buch zur Definition von Simulations-, Rechen- und Planspielen verwendet [34]. *Serious Games* zeichnen sich durch ihren Zweck und Gebrauch aus. Ihr "Ernst" besteht darin, dass durch sie und mit ihnen etwas erreicht, trainiert oder gelernt werden soll. Bei Planspielen handelt es sich im Prinzip um diskrete, ereignisorientierte (rundenbasierte), interaktive Simulationen. Diese können zwar mit der Unterstützung von Computern durchgeführt

⁵ Bekannt wurde die Simulation insbesondere durch eine Veröffentlichung von Martin Gardner in seiner Kolumne "Mathematical Games" im *Scientific American* im Oktober 1970 [23]

⁶ Benannt wurde das Modell nach den beiden Entwicklern Kai Nagel und Michael Schreckenberg [25]

werden, die meisten Planspiele kommen jedoch ohne solche Hilfen aus⁷.

Im Bereich des Flugverkehrsmanagements werden Planspiele vor allem zur Konzept- und Prozessentwicklung genutzt. Insbesondere bei Domänen übergreifenden Konzeptänderungen kamen bisher Planspiele zum Einsatz [35]. So wurde z. B. von Phillips und Ballin für Untersuchungen im Bereich der Nahtstelle zwischen der Planung einer Fluglinie und der Flugsicherung ein Planspiel entwickelt [36]. Auch die aktuellen Konzeptentwicklungen des Einheitlichen Europäischen Luftraums nutzen Planspiele [37, 38]. Das Ergebnis einer solchen Entwicklung und Bewertung sind abgestimmte Prozesse, die mit den im folgenden Kapitel beschriebenen Prozesssimulationen weiter untersucht und verfeinert werden können. Ein Beispiel für ein computerbasiertes Planspiel in diesem Kontext zeigt die Validierung des SESAR-Konzeptes für *Airport Operations Centres* [39].

Ereignisdiskrete Simulation und Prozesssimulationen

Prozesssimulationen sind in der Regel ereignisorientierte Simulationen von Prozessketten. Diese werden üblicherweise in einer Prozessmodellierungssprache beschrieben, vom Simulator als Petri-Netze abgebildet und anschließend in zwei Schritten evaluiert [40]. Der erste Schritt besteht aus der statischen Analyse, die das Prozessmodell auf Konsistenz und Vollständigkeit prüft. In der nachfolgenden dynamischen Analyse erfolgt die eigentliche Simulation. Da Prozessketten in der Regel verzweigt sind und dadurch Prozesselemente nebenläufig sein können, werden dabei häufig auch stochastische Algorithmen in die Prozesssimulationen integriert, um alle Prozesswege und -elemente abzudecken. Als Ergebnis einer solchen Simulation erhält man z. B. Aussagen zu Wartezeiten an Prozessschritten und zur Kapazität einzelner Prozesselemente.

Im Bereich des Flugverkehrsmanagements werden Prozesssimulationen zur Bewertung von neuen Konzepten und zur Engpassanalyse bestehender Konzepte genutzt. So wurde im Rahmen des TORCH-Projektes z. B. ein ATM-Prozessmodell entwickelt und mit Hilfe von Prozesssimulationen analysiert [41]. Ein gutes Beispiel einer ereignisdiskreten ATM-Simulation

ohne vorhergehende Prozessmodellierung sind Funkfeldsimulationen zur Evaluierung der Belastung flugsicherungsrelevanter Frequenzbereiche [42].

Schnellzeitsimulation

Bei Schnellzeitsimulationen handelt es sich um dynamische, quasikontinuierliche, mikroskopische Simulationen speziell für den ATM-Bereich. Die eigentliche Implementierung folgt dabei in der Regel einem hybriden Ansatz. Der Begriff Schnellzeitsimulation wurde Ende der Fünfzigerjahre geprägt. Die damals verfügbaren Rechner erlaubten erstmals reine Computersimulationen die schneller als Echtzeit abliefen [43]. Mit dem Begriff wurde diese neue Simulationsart zur bereits bestehenden Echtzeitsimulation abgegrenzt. Im englischen Sprachraum setzt sich für diese Simulationsart immer mehr der Begriff *modell-based Simulation* durch, da moderne Schnellzeitsimulatoren auch in Echtzeit laufen können. Diese Eigenschaft wird z.B. zum Testen von prätaktischen Anflugplanungssystemen mit sehr großem Zeithorizont genutzt [44]. Damit überschneiden sich die Einsatzgebiete der Schnellzeit- und der Echtzeitsimulation.

Frühere Schnellzeitsimulatoren erlaubten lediglich das Einstellen globaler Parameter. Es handelte sich dabei um regelbasierte Schnellzeitsimulationen. Moderne Simulatoren verfolgen einen agentenbasierten Ansatz. Dieser erlaubt die Nutzung sehr feiner lokaler Parameter und dadurch die Modellierung einzelner Rollen (z. B. Radarlotse, Planungslotse, Anfluglotse etc.). Aufbauend auf diesen Rollenbeschreibungen der einzelnen Software-Agenten können sehr detaillierte Arbeitslastmodelle genutzt werden [45]. Diese erlauben z. B. auch in der Schnellzeitsimulation erste Aussagen über die durch Luftraumänderungen zu erwartenden Arbeitslasten.

Mit Schnellzeitsimulationen lassen sich bestehende Lufträume optimieren und Alternativen in kurzer Zeit zuverlässig bewerten. Dabei arbeiten moderne Schnellzeitsimulatoren von *Gate* zu *Gate* und umfassen auch den Rollverkehr am Flughafen. Über den klassischen Einsatz im Rahmen von Luftraumentwicklungen werden Schnellzeitsimulationen inzwischen auch zur Vorausplanung im Rahmen der Verkehrsflussregelung eingesetzt [46].

⁷ Häufig werden diese dann auch als *Paper and Pencil* Simulationen bezeichnet

In der Regel sind Schnellzeitsimulationen deterministisch. Allerdings erlauben manche Schnellzeitsimulationen die Startzeiten der simulierten Luftfahrzeuge durch Zufallszahlen zu variieren und damit ein Rauschen aufzuprägen. Daher können Schnellzeitsimulationen auch stochastische Eigenschaften aufweisen und sind in Abbildung 1 mit einem entsprechenden „(X)“ gekennzeichnet. Da dadurch in die zeitliche Entwicklung des simulierten Verkehrsbeispiels zufällige Störgrößen eingehen, handelt es sich um eine Art von dynamischer Monte-Carlo-Simulation, auch wenn diese Simulationsart ursprünglich als statisch definiert war.

Echtzeitsimulation

Echtzeitsimulatoren sind interaktive, dynamische, quasikontinuierliche Simulatoren spezifisch für den ATM-Bereich. Die Echtzeitsimulation bindet den Menschen in die Bewertung neuer Konzepte, Verfahren und Systeme mit ein. Dabei arbeitet der Fluglotse in einer künstlich erzeugten, aber realitätsgetreuen Arbeitsumgebung, ähnlich wie ein Pilot in einem Flugsimulator. Aufgrund der experimentellen Rahmenbedingungen lässt sich die gesamte Mensch-Maschine-Schnittstelle bestmöglich beurteilen und bis ins Detail untersuchen, um notwendige Verbesserungen identifizieren zu können.

Der bei weitem größte Anwendungsbereich der Echtzeitsimulation ist die Ausbildung und das Training von Flugsicherungspersonal. Darüber hinaus bilden Echtzeitsimulatoren eine sehr gute Basis für die Entwicklung neuer Lufträume und Verfahren, das iterative Entwickeln und Evaluieren neuer Systeme und die Validierung neuer Konzepte. Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Simulationsarten erfordern Echtzeitsimulationen einen sehr hohen personellen und technischen Aufwand. Dafür bieten sie als einzige Simulationsart die Möglichkeit Fluglotsen und andere Akteure in die Evaluierung mit einzubeziehen. Echtzeitsimulationen haben dadurch den höchsten Detaillierungs- und Realitätsgrad aller ATM-Simulationen. Damit bilden Echtzeitsimulationen eine sehr gute Ergänzung zu vorhergehenden Schnellzeitsimulationen. Schnellzeitsimulationen decken im Vergleich zur Echtzeitsimulation sehr große Lufträume und auch große Zeitbereiche sehr gut ab. Die in diesem Rahmen gefundenen Detailfragen werden anschließend in Echtzeitsimulationen genauer untersucht.

Die Arbeitsplätze von Fluglotsen unterscheiden sich sehr deutlich zwischen dem En-route- und Flughafennahbereich (Strecken- und An-/Abflugkontrolle) sowie dem Tower. Daher existieren für beide Einsatzbereiche

spezifische Simulatoren. So werden für den Tower-Bereich u. a. eine Außensicht benötigt, die in der Strecken- und Anflugkontrolle entfallen. Immer öfter werden Tower-Simulatoren im Verbund mit En-Route-Simulatoren und operationellen Flugsicherungssystemen genutzt, um die Zusammenwirkung aller Systeme, besonders im Hinblick auf zukünftige Anforderungen, frühzeitig zu beurteilen [47]. Derart gekoppelt bilden Echtzeitsimulatoren den gesamten ATM-Prozess eines Fluges vom Start- zum Zielflughafen, von *Gate* zu *Gate* sehr detailliert ab. Den vielfältigen Einsatz der Echtzeitsimulation bei der Entwicklung und Validierung von Konzepten, Systemen sowie Lufträumen und Verfahren zeigt Haßa in [48].

Bei interaktiven Simulationen stehen häufig Untersuchungen der sogenannten Menschlichen Faktoren (Human Factors) im Mittelpunkt. Dabei werden u.a. die Belastung und Beanspruchung sowie das Situationsbewusstsein der Teilnehmer untersucht. Einen guten Überblick über die dabei genutzten Methoden geben das SESAR *Human Performance Repository* [49] und das Methodenkompendium für den Forschungssimulator (*Advanced Function Simulator*, AFS) [50]. Das Projekt *Stress Reduction, Safety and Efficiency in Future ATM through Flight Progress Information* (SRATM, [51]) ist ein gutes Beispiel für den Einsatz umfangreicher physiologischer und psychologischer Messmethoden zur Ermittlung von Belastung und Beanspruchung in Echtzeitsimulationen.

Die aus Simulationen gewonnenen Erkenntnisse sollten weitgehend auf die Wirklichkeit übertragbar sein. Daher ist die Auswahl einer geeigneten Modellierung von entscheidender Bedeutung. Im Falle der Echtzeitsimulation sollten daher die Modellierung der Luftfahrzeugleistung verifiziert und die simulierten Flugspuren validiert werden. Die bei der DFS dabei genutzten Werkzeuge und Prozesse sowie die unterschiedlichen Modellierungsklassen der Luftfahrzeugleistung beschreibt Haßa in [52].

Echtzeitsimulatoren bieten vielfältige Möglichkeiten der Kopplung. Um den Realitätsgrad zu erhöhen, können diese z. B. mit operationellen ATM-Systemen verbunden werden. Diese Stimulation operativer Systeme oder Teilsysteme wird u. a. zur hochrealistischen Schulung beim Umstieg auf neue ATM-Systeme [53] und zum Testen neuer Versionen solcher Systeme genutzt. Für länderübergreifende Simulationen können Simulatoren auch über große Entfernungen gekoppelt werden. Diese Kopplungen schließen die Verbindung von En-Route- mit anderen En-Route-Simulatoren [54], die Kopplung von En-Route- mit Tower-Simulatoren [47] und die Kopplung von

ATM- mit Flugsimulatoren [55] ein. Auch eine Kopplung von Schnellzeit- und Echtzeitsimulationen ist möglich. So beschrieb Dorado 2003 eine solch hybride Simulation, bei der ein Schnellzeitsimulator den umgebenden Luftraum in einer Echtzeitsimulation kontrollierte [56].

Die Auswahl einer Simulationsart für eine Untersuchung erfolgt in der Regel nach dem erforderlichen Realitätsgrad. Dabei kann die vorgestellte Taxonomie (Abbildung 1) und die Werkzeugkette (Abbildung 2) eine erste Hilfestellung bieten. Allerdings zeigen diese nur

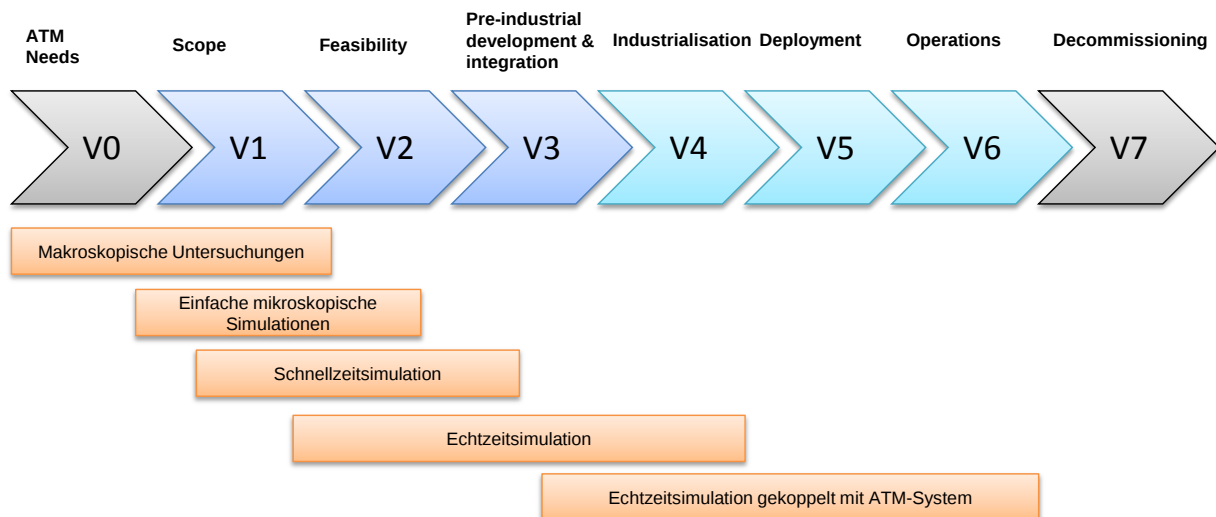


Abbildung 2: Entwicklungsprozess nach E-OCVM [60] und typische Einsatzbereiche der Simulationsarten (Werkzeugkette)

Die Basis der örtlich verteilten Simulation bilden in der Regel aus dem militärischen Bereich abgeleitete Datenaustauschstandards. Die beiden wichtigsten Standards sind *Distributed Interactive Simulation* (DIS, IEEE 1278 [57]) und *High-Level Architecture* (HLA, IEEE 1516 [58]). Im ATM-Bereich hat sich HLA als Datenaustauschstandard weitgehend durchgesetzt. So beruhen die aktuellen Implementierungen der Norm zur Kopplung von Validierungsplattformen im ATM-Bereich [59] auf HLA.

Entwicklungsprozesse im Flugverkehrsmanagement

Bei der Entwicklung von neuen Konzepten, System und Verfahren werden die vorgestellten Simulationsarten häufig zeitlich gestaffelt eingesetzt. In der Regel steigt der dabei benötigte Realitätsgrad im Verlauf des Entwicklungsprozesses an. Abbildung 2 zeigt den typischen Einsatzbereich der Simulationsarten im Rahmen des im ATM-Bereich am häufigsten genutzten Entwicklungsprozesses. Dieser orientiert sich an der *European Operational Concept Validation Methodology* [60]. Die Simulationsarten bilden dabei die Glieder einer im Detaillierungsgrad aufeinander abgestimmten Werkzeugkette aus Simulatoren [61]. Diese Werkzeugkette bildet die Basis für alle erforderlichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im ATM-Bereich.

den typischen Einsatzbereich. Sollte z. B. in einer frühen Phase (V0) die Untersuchung von Menschlichen Faktoren erforderlich sein, so könnte auch dort eine Echtzeitsimulation genutzt werden, da diese Simulationsart interaktiv ist und eine solche Untersuchung erlaubt. Die Werkzeugkette legt daher den Einsatzbereich nicht fest.

Fazit

Aufbauend auf den kennzeichnenden Eigenschaften von Simulationen wurde in den vorangegangenen Kapiteln eine Taxonomie der Simulationsarten im Bereich des Luftverkehrsmanagements entwickelt. Anschließend wurde jedes Element der Taxonomie vorgestellt und Anknüpfungspunkte für eigene Recherchen wurden gegeben.

Viele Aspekte von ATM-Simulationen konnten aufgrund der gebotenen Kürze dieser Einführung leider keine Berücksichtigung finden. Daher muss der Leser an dieser Stelle auf die bei jeder Simulationsart aufgeführten Referenzen und die damit verbundene, weiterführende Literatur verwiesen werden.

Obwohl es für die meisten der vorgestellten Simulationsarten kommerzielle Produkte gibt, wurde auf eine Nennung und ein Vergleich dieser Simulatoren bewusst verzichtet. In der Regel muss der Simulationskern nicht

selbst modelliert werden; lediglich das Problem muss in den bestehenden Simulator adaptiert/konfiguriert werden. Beim Aufbau eines Simulators bzw. einer eigener Modellierung sollte eine möglichst homomorphe, strukturerhaltende Modellierung und Architektur gewählt werden. Auf den ersten Blick erhöht die weitgehende Erhaltung der Strukturen häufig den Aufwand der Modellbildung und der Simulationsvorbereitung. Allerdings belohnen homomorphe Simulatoren den Nutzer mit einer deutlich höheren Diagnostizierbarkeit und damit einer vereinfachten Übertragung der Erkenntnisse in die reale Welt. So können z. B. Effekte, die sich aus Unterschieden zwischen Bord- und Bodendaten ergeben, in einer Simulation nur aufgezeigt werden, wenn beide Ebenen auch modelliert wurden und sich damit diese Struktur auch in der Simulation wiederfindet.

Bei der Wahl der für eine bestimmte Fragestellung geeigneten Simulation, sind neben der gewünschten Genauigkeit der Ergebnisse auch die verfügbaren Ressourcen, Zeit und finanzielle Mittel einschränkende Faktoren, die es abzuwägen gilt.

Die Verbesserung der Gesamteffizienz des Flugverkehrs in Europa einschließlich der Kostensenkung und Kapazitätssteigerung durch die Schaffung eines Einheitlichen Europäischen Luftraums erfordern ein neues Konzept sowie eine Modernisierung und Harmonisierung der europäischen Flugsicherungssysteme. Damit verbunden sind eine engere Vernetzung aller Akteure und damit auch neue Herausforderungen für zukünftige Simulationen und Untersuchungsmethoden. Neue Teilnehmer im Luftverkehr wie z. B. Drohnen (*Remotely Piloted Aircraft Systems*, RPAS) werden die Komplexität des Systems weiter erhöhen. Auch dies wird neue Anforderungen an die vorgestellten Simulationsmethoden stellen und eine Weiterentwicklung auslösen.

Referenzen

[1]	Dittes, F.-M.: Komplexität. Warum die Bahn nie pünktlich ist. Technik im Fokus. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2012
[2]	Holland, J. H.: Studying Complex Adaptive Systems. Journal of Systems Science and Complexity 19 (2006) 1, S. 1–8
[3]	Mensen, H.: Moderne Flugsicherung. Organisation, Verfahren, Technik. VDI-Buch. Berlin: Springer Vieweg 2014

[4]	Nolan, M. S.: Fundamentals of air traffic control. Clifton Park NY: Delmar 2011
[5]	Flühr, H.: Avionik und Flugsicherungstechnik. Einführung in Kommunikationstechnik, Navigation, Surveillance. Berlin, Heidelberg: Springer 2012
[6]	VDI-Richtlinie 3633; 2014. VDI 3633 Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen
[7]	Bungartz, H.-J., Buchholz, M., Pflüger, D. u. Zimmer, S.: Modellbildung und Simulation. Eine anwendungsorientierte Einführung. eXamen.press. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2009
[8]	Spath, C.: Simulationen. Begriffsgeschichte, Abgrenzung und Darstellung in der wissenschafts- und technikhistorischen Forschungsliteratur, Universität Stuttgart Magisterarbeit. Stuttgart 2009
[9]	Zeigler, B. P., Praehofer, H. u. Kim, T. G.: Theory of modeling and simulation. Integrating discrete event and continuous complex dynamic systems. San Diego: Academic Press 2000
[10]	Law, A. M.: Simulation modeling and analysis. McGraw-Hill series in industrial engineering and management science. New York, NY: McGraw-Hill Education 2014
[11]	Athans, M. u. Porter, L. W.: An Approach to Semiautomated Optimal Scheduling and Holding Strategies for Air Traffic Control. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institut of Technology 1971
[12]	Erzberger, H. u. Lee, H. Q.: Terminal-Area Guidance Algorithms for Automated Air-Traffic Control. NASA Technical Note. Washington, D. C.: National Aeronautics and Space Administration 1972
[13]	Porter, L. W.: On Optimal Scheduling and Holding Strategies for the Air Traffic Control Problem. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institut of Technology 1969
[14]	Psaraftis, H. N.: A Dynamic Programming Approach to the Aircraft Sequencing Problem. FTL Report R78-4. Cambridge, Massachusetts:

	Massachusetts Institut of Technology 1978
[15]	Fahle, T., Feldmann, R., Götz, S., Grothklops, S. u. Monien, B.: The Aircraft Sequencing Problem. In: Klein, R., Six, H.-W. u. Wegner, L. (Hrsg.): Computer Science in Perspective. Essays Dedicated to Thomas Ottmann. Lecture Notes in Computer Science, Bd. 2598. Berlin, Heidelberg: Springer 2003, S. 152–166
[16]	Bennell, J. A., Mesgarpour, M. u. Potts, C. N.: Airport runway scheduling. Annals of Operations Research 204 (2013) 1, S. 249–270
[17]	Farhadi, F., Ghoniem, A. u. Al-Salem, M.: Runway capacity management. An empirical study with application to Doha International Airport. Transportation Research (2014), S. 53–63
[18]	Timer, S., Hunter, G. u. Post, J.: Assessing the Benefits of NextGen Performance Based Navigation. Air Traffic Control Quarterly 21 (2013) 3, S. 211–232
[19]	Donohue, G. L.: A Simplified Air Transport System Capacity Model. Journal of Air Traffic Control (1999) April-June, S. 8–15
[20]	Donohue, G. L. u. Laska, W. D.: United States and European Airport Capacity Assessment using the GMU Macroscopic Capacity Model (MCM). In: 3rd USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar. 2000
[21]	Gwiggner, C. u. Nagaoka, S.: Recent Models in the Analysis of Air Traffic Flow. In: The Japan Society for Aeronautical and Space Science (Hrsg.): JSASS 46th Aircraft Symposium. Tokyo: The Japan Society for Aeronautical and Space Science 2008
[22]	Wolfram, S.: A new kind of science. Champaign, Ill.: Wolfram Media 2002
[23]	Gardner, M.: The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game „life“. Scientific American (1970) 223, S. 120–123
[24]	Adamatzky, A.: Game of Life Cellular Automata. London: Springer-Verlag London Limited 2010

[25]	Nagel, K. u. Schreckenberg, M.: A cellular automaton model for freeway traffic. Journal de Physique I 2 (1992) 12, S. 2221–2229
[26]	Mori, R.: Aircraft Ground-Taxiing Model for Congested Airport Using Cellular Automata. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 14 (2013) 1, S. 180–188
[27]	Kim, C., Abubakar, K. u. Obah, O.: Cellular Automata Modeling of En Route and Arrival Self-Spacing for Autonomous Aircraft. In: Air Traffic Control Association (Hrsg.): 50th Annual Meeting of the Air Traffic Controllers Association. Alexandria, Virginia: Air Traffic Control Association 2005, S. 127–134
[28]	Amor, S. B., Tran, D.-H. u. Bui, M.: Investigating Air Traffic Control Dynamics Using Random Cellular Automata. In: Eurocontrol Experimental Centre (Hrsg.): 5th EUROCONTROL Innovative Research Workshop 2006. Disseminating ATM Innovative Research. Brétigny sur Orge: Eurocontrol Experimental Centre 2006, S. 145–149
[29]	Yu, S., Cao, X., Hu, M., Du, W. u. Zhang, J.: A Real-time Schedule Method for Aircraft Landing Scheduling Problem Based on Cellular Automaton. In: Xu, L. (Hrsg.): Proceedings of the first ACMSIGEVO Summit on Genetic and Evolutionary Computation. New York, NY: ACM 2009, S. 717–723
[30]	Blom, H., Bakker, G. J., Blom, H., Daams, J., Everdij, M. u. Klompstra, M. B.: Accident risk assessment for advanced ATM. NLR-TP-1999-015. Amsterdam: National Aerospace Laboratory NLR 1999
[31]	Stroeve, S. H., Blom, H. A. u. Bakker, G. J.: Systemic accident risk assessment in air traffic by Monte Carlo simulation. Safety Science 47 (2009) 2, S. 238–249
[32]	Drop, W. u. Konopka, J.: Funksprachzuordnung bei Weitbereichssprachkommunikation in einem sektorlosen Luftraum. Innovation im Fokus 2016 (2016) 1
[33]	Brokof, U.: Modelle zur Beschreibung von Warteverfahren im Luftverkehr als

	Hilfsmittel einer Optimierung hinsichtlich Sicherheit und Wirtschaftlichkeit. In: Winter, H. u. Beyer, R. (Hrsg.): Modellierung von Systemen im Bereich von Flugführung und Flugsicherung für Forschung, Entwicklung und Bewertung. DFVLR-Mitt.86-24. Braunschweig: Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt e. V. 1986, S. 105–131
[34]	Abt, C. C.: Serious Games. Lanham, MD: University Press of America 1987
[35]	Haugg, E. u. Leemüller, R.: Gaming – a new validation technique in ATM Research. TE im Fokus (2010) 1, S. 34–38
[36]	Phillips, C. T. u. Ballin, M. G.: A Cooperative Human-Adaptive Traffic Simulation (CHATS). Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit. 1999
[37]	Faber, E., Aalmoes, R., Groot, de, T., Hryniewicz, R. u. Nieuwenhuisen, D.: Serious Gaming for Change in Air Traffic Management. NLR-TP-2015-368. Amsterdam: National Aerospace Laboratory NLR 2015
[38]	Garcia, R.: Gaming on Queue, Trajectory and Separation Management Report 1. Episode 3 D4.3.3-02. Brüssel: EPISODE 3 Single European Sky Implementation support through Validation 2009
[39]	Airport Research Center: Trial and Error. Comprehensive simulation of airport management enables cost-efficient tests of future concepts within SESAR. Passenger Terminal World (2013) 9, S. 50–51
[40]	Strobel, M.: Optimierung betrieblicher Systeme auf der Basis von Geschäftsprozeßmodellen. Forschungsbeiträge zur Wirtschaftsinformatik / Advanced Studies in Information Systems. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag 1998
[41]	Suarez, N.: Simulation Report: TORCH Operational Concept Feasibility Studies. TORCH Deliverable D4.2. Brüssel: Europäische Kommission DG-TREN 2000
[42]	Walberer, A., Marquard, S., Herber, A. u. Fischer, H.: SSR Radio Field Simulation

	and Monitoring. Motivation, Methods and Results. In: Rohling, H. (Hrsg.): 14th International Radar Symposium (IRS), 2013. 19 - 21 May 2013, Dresden, Germany. Piscataway, NJ: IEEE 2013
[43]	Cornell Aeronautical Laboratory: Air traffic control simulation studies. Final progress report. CAL Report No. BC-1371-G-5. Washington D. C.: Federal Aviation Agency 1960
[44]	Schwentek, K.: Kopplung zwischen einem Schnellzeitsimulationstool und betrieblichen Planungssystemen. Erkenntnisse aus der automatisierten Simulation im Rahmen von iPort. TE im Fokus 2012 (2012) 2, S. 38–43
[45]	Leemüller, R., Tenoort, S. u. Emsbach, T.: Kalibrierung und Validierung eines taskbasierten Arbeitslastmodells für Flugsicherungssysteme der DFS. TE im Fokus 2011 (2011) 2, S. 26–40
[46]	Theeck, W. u. Paul, B.: AirMAGIC - Traffic Forecast based on Fast-Time Simulation. Innovation im Fokus 2016 (2016) 1
[47]	Seidel, D. u. Kaufhold, R.: Kopplung von Arrival- und Departure-Manager im Rahmen des Projektes K-ATM. TE im Fokus 2006 (2006) 2, S. 10–17
[48]	Haßa, O.: Der Einsatz von Echtzeitsimulationen zur Konzeptvalidierung und Systemgestaltung im Bereich des Flugverkehrsmanagements am Beispiel des Flughafennahbereichs Frankfurt/M. In: Grandt, M. u. Bauch, A. (Hrsg.): Simulationsgestützte Systemgestaltung. 49. Fachausschusssitzung Anthropotechnik der DGLR. DGLR-Bericht 2007-4. Bonn: Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal - Oberth e.V. 2007, S. 223–259
[49]	SESAR: DEL 16 04 02-D03 Text version of HP repository v00 01 00. Brüssel: SESAR Joint Undertaking 2012
[50]	Tenoort, S. u. Udovic, A.: Verhaltensstrategien am Lotsenarbeitsplatz Methodenkompendium. Forschungsmethoden und -konzepte für den Advanced Function Simulator. Langen: DFS Deutsche Flugsicherung 2000

[51]	Tautz, A.: SRATM Project Final Report. Brüssel: European Commission 1999
[52]	Haßa, O.: Modellierung, Verifikation und Validierung der Flugleistung am Beispiel der Echtzeitsimulation. TE im Fokus 2004 (2004) 1, S. 24–34
[53]	Bierwagen, T., Leemüller, R. u. Jekl, W.: Prototyping für ein P1 Simulationssystem. TE im Fokus 2001 (2001) 1, S. 19–22
[54]	Herber, A.: Kopplung des AFS der DFS mit der AVENUE Plattform. TE im Fokus (2001) 1, S. 7–11
[55]	DFS: Training Connection. Lufthansa und DFS vernetzen Simulatoren. Transmission 1997 (1997) 3, S. 24–25
[56]	Dorado, M. M.: PITOT: A platform approaching multi-validation tools. In: FAA/Eurocontrol AP5 (Hrsg.): Action 5 & Action Plan 9 Technical Interchange Meeting. Paris 2003
[57]	IEEE: 1278.2-2015 - IEEE Standard for Distributed Interactive Simulation (DIS). Piscataway, NJ: IEEE Standards Association 2015
[58]	IEEE: 1516-2010 - IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA). Piscataway, NJ: IEEE Standards Association 2010
[59]	EUROCAE: ED-147 - ATM Validation Platforms Interoperability Specification. Malakoff: European Organisation for Civil Aviation Equipment
[60]	Eurocontrol: European Operational Concept Validation Methodology Version 3. Brüssel: European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL) 2010
[61]	Haßa, O.: Luftraumentwicklung - Vorgehensmodelle, Werkzeuge und Beispiele, FH Frankfurt Vorlesung. Frankfurt 2015

Funkspruchzuordnung bei Weitbereichssprachkommunikation in einem sektorlosen Luftraum

Wiebke Drop, Dr. Jens Konopka

Einleitung

Für die Flugverkehrskontrolle wird der kontrollierte Luftraum weltweit in Sektoren eingeteilt. Ein Sektor ist dabei ein horizontal und vertikal begrenztes Gebiet, das in der Regel von zwei Fluglotsen, dem Planungsloten und dem Radarloten kontrolliert wird. Jedem Sektor ist eine eigene Funkfrequenz zugeordnet, die sowohl bei den Funkgeräten der Lotsen als auch bei den durch den Sektor fliegenden Luftfahrzeugen gerastet ist. Dadurch gibt es eine direkte und von Lotsen anderer Sektoren unabhängige Sprachverbindung zu den kontrollierten Luftfahrzeugen.

Um auf tageszeitliche oder saisonale Schwankungen der zu kontrollierenden Verkehrsmenge zu reagieren, ist die Zusammenlegung bzw. die Aufteilung von Sektoren die einzige Option. Außerdem können Lotsen nur in einer bestimmten Anzahl von Sektoren, der Einsatzberechtigungsgruppe, eingesetzt werden, sodass die Personalplanung eine große Zahl an Bedingungen berücksichtigen muss, was die Flexibilität, auf Engpasssituationen zu reagieren, einschränkt. Aus diesen Gründen hat die DFS 2008 angefangen, das Konzept „Sektorloses Air Traffic Management“, kurz S-ATM, zu untersuchen. Mehr zu den Vor- und Nachteilen von S-ATM sowie ersten Ergebnissen aus dem dazu laufenden Forschungsprojekt TeFiS kann [1] entnommen werden.

Die Idee von S-ATM ist, dass sich mehrere Lotsen einen großen Luftraum teilen und zusammen bearbeiten. Fliegt ein Luftfahrzeug in diesen Luftraum ein, wird es einem Lotsen zugeteilt. Dieser Lotse kontrolliert das Luftfahrzeug bis zum Ausflug aus dem Luftraum. Die von einem Lotsen kontrollierten Luftfahrzeuge können sich geografisch über den gesamten Luftraum verteilen, und ihre Flugwege können die Flugwege von Flugzeugen, die von anderen Lotsen kontrolliert werden, kreuzen.

Die vielversprechenden Ergebnisse des Forschungsprojektes TeFiS [2] führten zur Initiierung eines Projektes zur Einführung von S-ATM in einem Teil des von Karlsruhe kontrollierten oberen Luftraums (ab FL 380). Eine der großen noch vorhandenen Herausforderungen ist die Sicherstellung einer verzögerungsfreien Bord-Boden-Kommunikation über

sehr große Flugstrecken hinweg. Auf lange Sicht wird hierfür eine Punkt-zu-Punkt Kommunikation zwischen Pilot und Lotse notwendig sein. Für den ersten Umsetzungsschritt soll die -Ausrüstung der Luftfahrzeuge allerdings nicht verändert werden, sodass für die Weitbereichssprachkommunikation herkömmliche VHF-Technik verwendet werden soll.

Weitbereichssprachkommunikation mittels VHF-Sprechfunk

Da bei der sektorlosen Kontrolle mehrere Lotsen im selben Luftraum arbeiten, ergeben sich insbesondere Änderungen in der Realisierung der Bord-Boden- bzw. Boden-Bord-Sprachkommunikation. Die von einem Lotsen kontrollierten Luftfahrzeuge sind über ganz Deutschland verteilt und können somit nicht mehr nur von einer Sendestelle bedient werden. Die Boden-Bord Sendeproblematik kann dadurch aufgehoben werden, dass der Lotse das Luftfahrzeug, welches er ansprechen möchte, auf dem Display auswählt. Das gekoppelte ATM- und COM-System muss dann den passenden Sendemast auswählen und den Funkspruch nur von dort aussenden.

Die Richtung Bord-Boden erfordert u.U. eine größere Änderung des Sprachkommunikationssystems. Das Problem ist, dass der Pilot über Funk nicht mehr automatisch den richtigen Lotsen erreicht, wenn nicht jedem Lotsen im sektorlosen Luftraum eine in dem gesamten Luftraum nutzbare Funkfrequenz zugeteilt werden kann. Die DFS hat drei verschiedene Bord-Boden-Kommunikationsvarianten identifiziert [3]:

1. Kognitive Trennung
2. Einkanallösung
3. Funkspruchzuordnung durch Peiler

Außer bei der Einkanallösung sollen mehrere Lotsen nicht nur im gleichen Luftraum arbeiten, sondern auch die hierfür allokierten Frequenzen gemeinsam nutzen.

Kognitive Trennung bedeutet, dass mehrere Frequenzen der Rhein UIR zu einem Verbund miteinander verkoppelt werden, um den gesamten Zuständigkeitsbereich abzudecken. Das bedeutet dass jeder Lotse den Sprechfunk aller Luftfahrzeuge im sektorlosen Luftraum und aller seiner Kollegen mithört. Die S-ATM-Lotsen teilen sich die verschiedenen Funkfrequenzen. Das

Heraushören des Callsigns aus dem Sprechfunk soll mittels der mentalen Fähigkeiten des Lotsen erfolgen. Diese Lösung kann ohne Änderungen am ATM- bzw. COM-System erfolgen und ist somit die technisch einfachste und kostengünstigste Variante. Allerdings ist das bei der großen Anzahl an Flugzeugen auch eine anspruchsvolle Aufgabe für den Lotsen, die ein hohes Maß an selektiver Aufmerksamkeit erfordert.

Bei der Einkanallösung wird jedem Lotsen eine eigene Frequenz zugeteilt, über die er mit Luftfahrzeugen unter seiner Kontrolle sprechen kann. Dies bedeutet die Allokation von mehreren Frequenznutzungsgebieten, die deutschlandweit - respektive Rhein UIR weit - verfügbar sind. Dieser Lösungsansatz hätte jedoch einen hohen Aufwand im Bereich des europäischen Frequenzmanagements zur Folge.

Die dritte Variante ist Gegenstand dieses Artikels: Funksprüche der Luftfahrzeuge sollen mithilfe eines Netzwerkes aus Peilern zunächst zwischengepuffert und lokalisiert, durch eine Kopplung mit dem ATM-System identifiziert und dann nur an den Lotsen weitergeleitet werden, der das Luftfahrzeug unter Kontrolle hat. Dies bedeutet jedoch einen Eingriff in das derzeitige Flugsicherungssystem und die Etablierung einer neuen technischen Infrastruktur mit der neuen Peiler-Systemtechnik, da derzeit keine Weitbereichspeiler von der DFS betrieben werden.

Bevor weitere Überlegungen zur etwaigen Umsetzung einer aufwändigen Infrastruktur gemacht werden, soll zunächst untersucht werden, wie sicher die funkenden Luftfahrzeuge in einem dicht beflogenen Luftraum mit einer solchen Technologie identifiziert werden können. Hierfür wird die Funkspruchzuordnung mithilfe von Peilern rechnerisch simuliert, um herauszufinden, wie häufig diese Zuordnung eindeutig und richtig ist.

Im Folgenden wird die neue Methodik zur Analyse der Funkspruchzuordnung und die Ergebnisse einer ersten Anwendung der Peilersimulationen vorgestellt. Zunächst werden neue Funktionen des Forschungssimulators AFS/NEWSIM [2] beschrieben, die diese Untersuchung überhaupt erst ermöglichen machen. In den folgenden Abschnitten werden Datengrundlage, Berechnungsmethodik sowie die Kenngrößen der Funkspruchzuordnung erläutert. Anschließend werden die Ergebnisse diskutiert.

Neue Funktion des Simulators

Zukünftige Bord-Boden-Kommunikationslösungen für Daten, aber auch für Sprache gehen von Punkt-zu-Punkt-

Verbindungen aus. Im Falle von Datalink kann man heute schon gezielt Luftfahrzeuge adressieren [4].

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projekts „Technologie für Flugverkehrsmanagement in großen Strukturen“, TeFiS, wird in Echtzeitsimulationen untersucht, inwieweit S-ATM in Teilen des deutschen Luftraums betrieblich und technisch durchführbar ist.

Insbesondere wird hierfür seit Anfang 2014 das Echtzeitsimulationssystem NEWSIM funktional erweitert, um auch sektorlose Kontrollkonzepte simulieren zu können.

Die gravierendste und für Lotsen und Simulationspiloten unmittelbar spürbare Veränderung betrifft die Kommunikation zwischen Lotsen und Piloten in der Echtzeitsimulation. Seit Ende Oktober 2015 kommen SIP-Telefonanlagen und der LDACS-Simulator eines TeFiS-Projektpartners, der Firma iAd, in der Simulation zum Einsatz, womit Punkt-zu-Punkt-Verbindungen zwischen Luftfahrzeugen (Simulationspiloten) und Fluglotsen realisiert werden. Damit sind erstmalig die Voraussetzungen geschaffen, um die Auswirkungen eines zukünftigen Weitbereichssprachkommunikationssystems auf betriebliche Abläufe bewerten zu können.

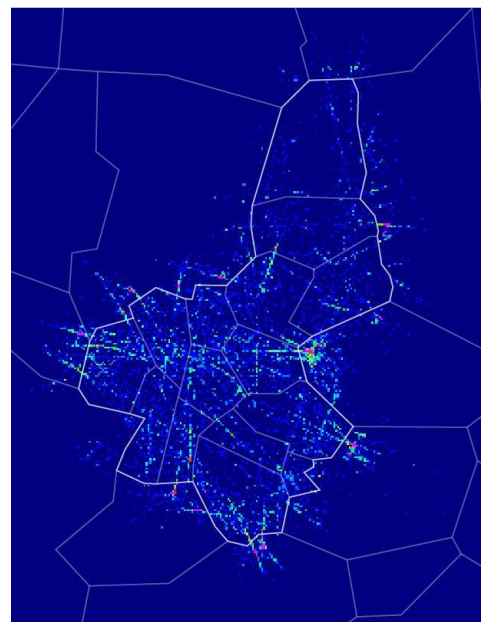


Abb. 1: Dichte an Funkkontakten aus einer kumulierten Simulationszeit von 33 Stunden.

In allen bisherigen Echtzeitsimulationen gab es feste Kommunikationsverbindungen zwischen Lotsen- und Simulationspiloten. Alle Luftfahrzeuge, die ein Fluglotse kontrolliert, wurden vom selben Simulationspiloten

bedient und die Akteure waren beim Drücken von Push-to-Talk automatisch mit dem richtigen Simulationspiloten bzw. Lotsen verbunden. Dies entspricht auch der aktuellen betrieblichen Realität bei dem über eine feste Funkfrequenz kommuniziert wird.

In einer sektorlosen Umgebung hingegen wird der zu wählende Kommunikationskanal u.U. davon abhängen, mit welchem Luftfahrzeug gesprochen werden soll. Selbst wenn man für die ersten Einführungsschritte von sektorlosem ATM von der Nutzung von analogem Funk für die Übertragung von gesprochenen Anweisungen der Lotsen zu den Piloten ausgeht, muss man wegen der endlichen Reichweite der Sendeanlagen das Luftfahrzeug, zu dem gesprochen soll, explizit auswählen, um mit dem betreffenden Piloten sprechen zu können. Dies wurde in der Simulationsumgebung der DFS umgesetzt.

Die Flexibilisierung der Kommunikation wurde auch auf Seiten der Simulationspiloten genutzt: Die Zuordnung der Luftfahrzeuge zu den Simulationspiloten ist nun fest, sodass während der Simulation kein Transfer von Luftfahrzeugen von einem Simulationspiloten zu einem anderen mehr erforderlich ist. Mithin ist die Anzahl der für eine Simulation benötigten Piloten nicht mehr von der Anzahl der besetzten Sektoren/Arbeitsplätze abhängig. Auch die Simulationspiloten müssen nunmehr das Luftfahrzeug aktiv anwählen, um mit dem passenden Fluglotsen sprechen zu können.

In bisherigen Echtzeitsimulationen, genauso wie im Livebetrieb, ist es nur über das gesprochene Callsign möglich, festzustellen, welches Luftfahrzeug konkret angesprochen wird bzw. welches Luftfahrzeug, genauer welcher Pilot, aktuell funkt. Mit den Daten aus der zweiwöchigen TeFiS-Simulationskampagne im Spätherbst 2015 steht erstmals eine größere, statistisch auswertbare Datenmenge zur Verfügung, aus der nicht nur Zeitpunkt und Dauer der Sprechfunkkommunikation zwischen Bord und Boden hervorgeht, sondern auch das betreffende an der Kommunikation beteiligte Luftfahrzeug identifiziert ist. Dadurch ist insbesondere auch die Position festgelegt, von der aus die (simulierte) Aussendung erfolgt ist. Diese neue Eigenschaft bildet das Fundament dafür, die in diesem Papier beschriebenen quantitativen Untersuchungen zu Peilungen überhaupt durchführen zu können. Abbildung 1 zeigt die Verteilungsdichte der während der Simulationskampagne erfassten Bord-Boden-Kommunikationsvorgänge. Im dunkelblauen Bereich fand keine Kommunikation über Funk statt. Deutlich zu erkennen hingegen sind Konzentrationen auf den Hauptverkehrsströmen in Rot bis Magenta.

Auch mit diesem neuen, substantiell erweiterten Datensatz ist es auf Basis der in TeFiS durchgeführten Arbeiten nicht möglich, den Inhalt der Kommunikation zu analysieren. Eine solche Möglichkeit zur Analyse könnte erstrebenswert sein, um weiterführende Aussagen treffen zu können (z.B. bezüglich Workload).

Datenerhebung

Ein aus einem Luftfahrzeug abgesetzter Funkspruch soll mithilfe eines Netzwerkes aus Weitbereichspeilern in Deutschland geortet und einem Luftfahrzeug zugeordnet werden. Das Netzwerk muss den gesamten sektorlosen Luftraum (EDSL) sowie umgebende Lufträume, in denen schon Übergaben an den EDSL erfolgen können, abdecken. Ein solches Netzwerk gibt es zurzeit in der DFS nicht, sondern müsste zunächst aufgebaut werden. Zwei potentielle Netzwerke mit unterschiedlicher geographischer Verteilung der Peiler an von der DFS größtenteils bereits für andere Anwendungen genutzten Standorten, werden näher untersucht. Abbildung 2 zeigt den sektorlosen Luftraum EDSL sowie die Peilerstandorte dieser beiden Varianten. Netzwerk Nummer eins besteht aus 13, Netzwerk Nummer zwei aus 14 Peilern.

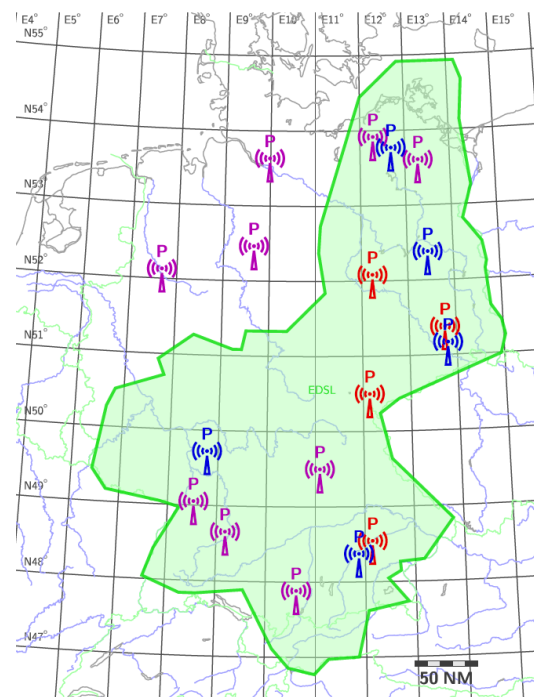


Abb. 2: Zwei mögliche Peilernetzwerke. In Variante 1 sind alle rot sowie violett dargestellten Peiler vorhanden. Variante 2 besteht aus den in blau und violett dargestellten Peilern.

Aufgrund der geografischen Ausdehnung kann der gesamte zu betrachtende Luftraum nicht von einer Sende- bzw. Empfangsstelle abgedeckt werden. Außerdem muss die gleichzeitige Aussendung über mehrere Sender auf der gleichen Trägerfrequenz ausgeschlossen werden, so dass der sektorlose Luftraum in mindestens drei bis vier Funkblöcke mit unterschiedlichen Frequenzen aufgeteilt wird. Abbildung 3 zeigt die beiden im Nachfolgenden betrachteten Funkblockgeometrien.

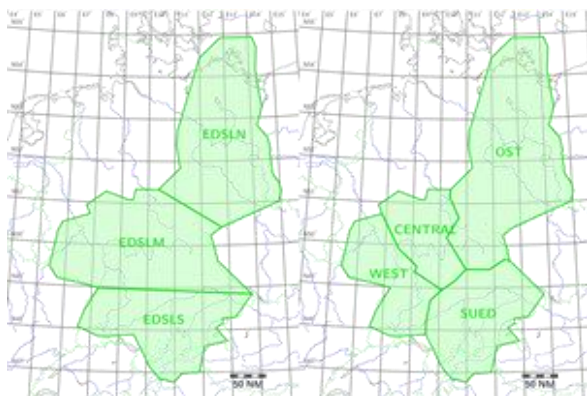


Abb. 3: Mögliche Varianten für die Funkblöcke. Links die Einteilung in drei Funkblöcke Nord, Mitte und Süd. Auf der rechten Seite ist die Funkblockstruktur an die EBG-Grenzen von Karlsruhe UAC angepasst.

Der Pilot muss also auch bei dieser Kommunikationslösung trotz S-ATM innerhalb vom EDSL Frequenzwechsel vornehmen. In der Rhein UIR befinden sich allerdings in der gleichen Fläche 15 Sektoren, so dass die Anzahl Frequenzwechsel verringert werden könnte. Für den Lotsen bedeuten die Funkblöcke, dass an den Grenzen vom Lotsen ein Frequenzwechsel angeordnet werden muss, woraus eine zusätzliche Funkbelastung resultiert.

Die Peiler selbst wurden nur vereinfacht simuliert. Empfängt der Peiler einen Funkspruch, gibt er den Winkel zwischen Norden und der Verbindungslinie vom Peiler zur Sendestelle aus. Für diesen Peilwinkel wurde angenommen, dass der Fehler normalverteilt mit einer Standardabweichung von einem Grad streut [5]. Da für eine Peilung eine Sichtlinie zwischen Peiler und Luftfahrzeug bestehen muss, die Erdoberfläche aber gekrümmt ist, wurde eine Reichweite von 190 NM angenommen, was in etwa dem Radiohorizont entspricht. Direkt über dem Peiler, im sogenannten Schweigekegel, ist die Peilung nicht möglich bzw. wird

verfälscht. Hier wurde vereinfachend ein Schweigezylinder mit einem Radius von dreieinhalb NM um den Peiler gelegt, in dem dieser Peiler nicht verwendet wird.

Aufbau und Berechnung der Peilersimulation

Setzt ein Luftfahrzeug einen Funkspruch ab, wird es in einem ersten Schritt durch eine Kreuzpeilung mindestens zweier Peiler lokalisiert. In einem zweiten Schritt wird die ermittelte Position mit den Radardaten abgeglichen. Befindet sich ein Luftfahrzeug gemäß der Radardaten an der durch Kreuzpeilung ermittelten Position, wird dem Luftfahrzeug die Peilung zugeordnet. Der zugehörige Funkspruch wird dann lediglich an den Lotsen weitergeleitet, der das entsprechende Luftfahrzeug unter Kontrolle hat. Ist die Identifizierung des funkenden Luftfahrzeugs nicht eindeutig, weil sich mehrere Luftfahrzeuge in unmittelbarer Nähe der Funkposition befinden, erhalten alle Lotsen dieser Luftfahrzeuge den Funkspruch. Dies kann dazu führen, dass ein Lotse einen Funkspruch hört, der von einem Flugzeug unter der Kontrolle eines anderen Lotsen abgesetzt wurde. Die Häufigkeit eines solchen Ereignisses ist Teil der Güte des Verfahrens (siehe Kenngrößen der Funkspruchzuordnung). Gegenstand dieses Artikels ist die Simulation sowohl der Lokalisation als auch der anschließenden Identifizierung durch

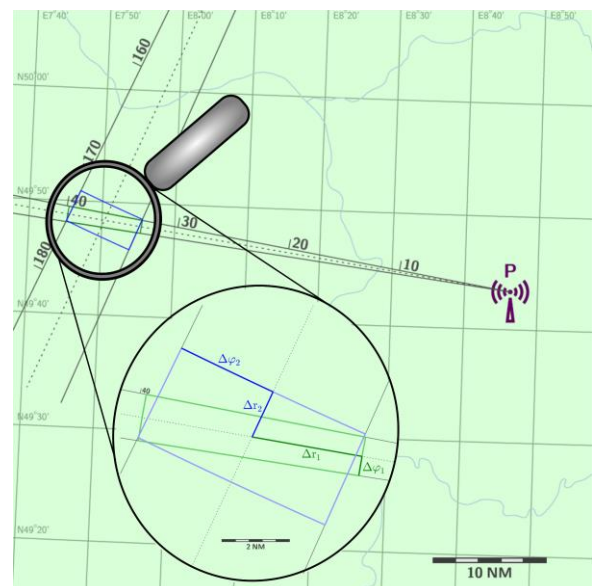


Abb. 4: Kreuzpeilung des Funkspruchs durch zwei Peiler. Radardaten.

Für jedes Szenario, das in der TeFiS-Echtzeitvalidierung simuliert wurde, sind sowohl Funk- als auch Radarinformation verfügbar. Die in der Simulation abgesetzten Funksprüche wurden durch die

berechneten Selbstübergaben sowie durch die Datalinkanweisungen, die bei der S-ATM-Einführung zunächst auch durch Funk erfolgen müssen, ergänzt. Für jeden Funkspruch ist die Start- sowie die Endzeit, die exakte Position und die Information, wer wen angefunkelt hat, gespeichert. In den Radarinformationen sind die Trackupdates aller Luftfahrzeuge für den gesamten Simulationszeitraum enthalten.

Für jeden Funkspruch wird zunächst die Lokalisation simuliert. Dafür wird als erstes die Distanz zwischen der exakten Position der Sendestelle und allen Peilern berechnet. Ist diese Distanz größer als die Peilerreichweite oder kleiner als der Radius des Schweigezylinders wird der Peiler bei der anschließenden Berechnung ignoriert. Für alle anderen Peiler $i \in \{1, \dots, n\}$ mit Positionen (x_i, y_i) wird der exakte Winkel φ_{iE} zwischen Norden (y-Achse) und der Verbindungslinie von Peiler zur Funkposition berechnet. Da in der Realität die Peilung fehlerbehaftet ist, wird nun für jeden in Frage kommenden Peiler ein zufälliger normalverteilter Fehler ϵ_i mit einer Standardabweichung von einem Grad ermittelt und zu dem exakten Winkel addiert. In der Simulation wird anschließend mit dem fehlerhaften Winkel $\varphi_i = \varphi_{iE} + \epsilon_i$ weitergerechnet.

Für jede Kombination aus je zwei Peilern $i, j \in \{1, \dots, n\}$, wobei $i \neq j$, die den Funkspruch gepeilt haben, wird die Position der Sendestelle wie in Abbildung 4 dargestellt durch Kreuzpeilung ermittelt. Die Kombination der Peiler wird im Folgenden mit $k \in \{1, \dots, \binom{n}{2}\}$ indiziert. Die Position des Senders (x_{Fk}, y_{Fk}) für die Kombination k ergibt sich aus dem Schnittpunkt der beiden Peilstrahlen. In dem Schnittpunkt gilt:

$$\begin{aligned} x_{Fk} &= x_i + r_{ik} \sin(\varphi_i) \\ &= x_j + r_{jk} \sin(\varphi_j) \\ y_{Fk} &= y_i + r_{ik} \cos(\varphi_i) \\ &= y_j + r_{jk} \cos(\varphi_j) \end{aligned}$$

wobei φ_i bzw. φ_j die fehlerbehafteten Peilwinkel und r_{ik} bzw. r_{jk} die gesuchten Abstände zwischen Peiler und Schnittpunkt der Peilstrahlen bezeichnen. Zu beachten ist dabei, dass der Abstand zwischen Peiler und der durch Kreuzpeilung bestimmten Funkposition variiert, je nachdem, mit welchem Peiler der fragliche Peiler kombiniert wird, da die Peilwinkel nicht exakt sind. Durch Umstellen der Gleichungen erhält man:

$$r_{ik} = \frac{(x_j - x_i) \cos(\varphi_j) - (y_j - y_i) \sin(\varphi_j)}{\sin(\varphi_i - \varphi_j)}$$

$$r_{jk} = \frac{(x_j - x_i) \cos(\varphi_i) - (y_j - y_i) \sin(\varphi_i)}{\sin(\varphi_i - \varphi_j)}$$

Die kartesische Position des Senders (x_{Fk}, y_{Fk}) lässt sich nun aus den Polarkoordinaten des ersten oder durch die Polarkoordinaten des zweiten Peiler bestimmen.

Da wie zuvor beschrieben nicht exakte, sondern fehlerbehaftete Winkel verwendet werden, resultiert auch eine fehlerhafte Position des Senders. Interessant ist dabei, in welcher Größenordnung dieser Fehler liegt. Als Fehlergröße des Peilwinkel wird die doppelte Standardabweichung, also $\Delta\varphi_i = \Delta\varphi_j = 2^\circ$, verwendet. Das bedeutet, dass mit $\Delta\varphi_i$ bzw. $\Delta\varphi_j$ im Schnitt 95,5% aller Peilfeiler abgedeckt sind. Der Fehler in r_{ik} bzw. r_{jk} kann durch eine Taylorentwicklung erster Ordnung

$$\begin{aligned} \Delta r_{ik} &= \left| \frac{\partial r_{ik}}{\partial \varphi_i} \right| \Delta\varphi_i + \left| \frac{\partial r_{ik}}{\partial \varphi_j} \right| \Delta\varphi_j, \\ \Delta r_{jk} &= \left| \frac{\partial r_{jk}}{\partial \varphi_i} \right| \Delta\varphi_i + \left| \frac{\partial r_{jk}}{\partial \varphi_j} \right| \Delta\varphi_j, \end{aligned}$$

mit

$$\begin{aligned} \frac{\partial r_{ik}}{\partial \varphi_i} &= -\frac{r_{ik} \cos(\varphi_i - \varphi_j)}{\sin(\varphi_i - \varphi_j)}, \\ \frac{\partial r_{ik}}{\partial \varphi_j} &= \frac{r_{ik} \cos(\varphi_i - \varphi_j)}{\sin(\varphi_i - \varphi_j)} - \frac{(x_j - x_i) \sin(\varphi_j) + (y_j - y_i) \cos(\varphi_j)}{\sin(\varphi_i - \varphi_j)}, \\ \frac{\partial r_{jk}}{\partial \varphi_j} &= \frac{r_{jk} \cos(\varphi_i - \varphi_j)}{\sin(\varphi_i - \varphi_j)}, \\ \frac{\partial r_{jk}}{\partial \varphi_i} &= -\frac{r_{jk} \cos(\varphi_i - \varphi_j)}{\sin(\varphi_i - \varphi_j)} - \frac{(x_j - x_i) \sin(\varphi_i) + (y_j - y_i) \cos(\varphi_i)}{\sin(\varphi_i - \varphi_j)}, \end{aligned}$$

approximiert werden [6].

Analog können auch die kartesischen Fehler berechnet werden. Hier gibt es zwei Möglichkeiten, nämlich die Berechnung mithilfe der Polarkoordinaten des ersten Peilers oder mithilfe des zweiten Peilers. Aus den beiden Varianten resultieren auch zwei in der Regel verschiedene Schätzungen für die Fehler Δx_{Fk} und Δy_{Fk} . Als konservativer Wert wird jeweils das Maximum verwendet. Beispielhaft berechnen wir die Fehler aus den Polarkoordinaten bezogen auf den ersten Peiler i . Die Berechnung für den zweiten Peiler j erfolgt analog.

Erneute Taylorapproximation ergibt für die Fehler:

$$\Delta x_{Fk} = \left| \frac{\partial x_{Fk}}{\partial r_{ik}} \right| \Delta r_{ik} + \left| \frac{\partial x_{Fk}}{\partial \varphi_i} \right| \Delta \varphi_i$$

$$\Delta y_{Fk} = \left| \frac{\partial y_{Fk}}{\partial r_{ik}} \right| \Delta r_{ik} + \left| \frac{\partial y_{Fk}}{\partial \varphi_i} \right| \Delta \varphi_i$$

mit den partiellen Ableitungen

$$\frac{\partial x_{Fk}}{\partial r_{ik}} = \sin(\varphi_i)$$

$$\frac{\partial y_{Fk}}{\partial r_{ik}} = \cos(\varphi_i)$$

$$\frac{\partial x_{Fk}}{\partial \varphi_i} = r_{ik} \cos(\varphi_i)$$

$$\frac{\partial y_{Fk}}{\partial \varphi_i} = -r_{ik} \sin(\varphi_i)$$

Als skalares Fehlermaß der Peilung wird

$$\varepsilon_k = \sqrt{\Delta x_{Fk}^2 + \Delta y_{Fk}^2}$$

gewählt. Dabei sind wie bereits erwähnt Δx_{Fk} und Δy_{Fk} jeweils die maximalen Fehler in einer Koordinatenrichtung bei Verwendung der Positionen der Peiler i und j zur Berechnung des Fehlers des Kreuzungspunktes.

Soll die Position des Senders lediglich mit zwei Peilern ermittelt werden, wird die Kombination k^* zweier Peiler ausgewählt, für die das oben definierte Fehlermaß ε_k minimiert wird, also

$$\varepsilon_{k^*} \leq \varepsilon_k, \text{ für alle } k \in \{1, \dots, \binom{n}{2}\},$$

gilt. Daraus ergeben sich $x_F = x_{Fk^*}$, $y_F = y_{Fk^*}$, $\Delta x_F = \Delta x_{Fk^*}$ und $\Delta y_F = \Delta y_{Fk^*}$. Dieses Verfahren wird in den Berechnungen, die in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden, angewendet.

Formalismus bei Nutzung von mehr als zwei Peilern

Sollen die Peilwinkel von drei oder mehr Peilern bzw. mehrere Kombinationen von jeweils zwei Peilern für die Funkortung verwendet werden, müssen wir zunächst eine Größe einführen, mit der jede Kombination gewichtet wird. Die Gewichte

$$w_{xk} = \frac{1}{(\Delta x_{Fk})^2}, \quad w_{yk} = \frac{1}{(\Delta y_{Fk})^2}$$

stellen sicher, dass Kombinationen mit einem kleinen Fehler stärker gewichtet werden als Kombinationen mit einem großen Fehler. Die Position des Funkspruchs ergibt sich aus den gewichteten arithmetischen Mittelwerten:

$$x_F = \frac{\sum_{k=1}^N w_{xk} x_{Fk}}{\sum_{k=1}^N w_{xk}}, \quad y_F = \frac{\sum_{k=1}^N w_{yk} y_{Fk}}{\sum_{k=1}^N w_{yk}}$$

Die Fehler der Position ergeben sich aus dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz [6]

$$\Delta x_F = \sqrt{\sum_{k=1}^N \left(\frac{\partial x_F}{\partial x_{Fk}} \Delta x_{Fk} \right)^2}$$

$$= \sqrt{\sum_{k=1}^N \left(\left(\frac{w_{xk}}{\sum_{k=1}^N w_{xk}} \right) \frac{1}{\sqrt{w_{xk}}} \right)^2}$$

$$= \sqrt{\sum_{k=1}^N \left(\frac{w_{xk}}{(\sum_{k=1}^N w_{xk})^2} \right)}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{\sum_{k=1}^N w_{xk}}}$$

sowie analog

$$\Delta y_F = \frac{1}{\sqrt{\sum_{k=1}^N w_{yk}}}.$$

Da somit die Fläche bekannt ist, aus der der Funkspruch mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit kommt, kann herausgefunden werden, welches Luftfahrzeug den Funkspruch abgesetzt hat.

Dafür werden die Radardaten nach Trackupdates in einem Zehn-Sekunden-Fenster vor dem Start des Funkspruchs durchsucht. Als nächstes werden diejenigen Luftfahrzeuge herausgefiltert, die niedriger als FL 350 fliegen, da diese nicht im Funkkontakt mit den Lotsen im sektorlosen Luftraum EDSL stehen. Sind von einem Flugzeug noch zwei oder mehr Trackpositionen in der verbleibenden Liste, wird nur der neueste Track behalten, die anderen aus der Liste entfernt. Anschließend wird die Position aller verbleibenden Luftfahrzeuge mithilfe der Geschwindigkeit, Steig- bzw. Sinkrate und der Flugrichtung zum Startzeitpunkt des Funkspruchs extrapoliert. Die extrapolierte Position sei mit (x_L, y_L) bezeichnet. Falls

$$x_F - \Delta x_F \leq x_L \leq x_F + \Delta x_F,$$

$$y_F - \Delta y_F \leq y_L \leq y_F + \Delta y_F,$$

gelten, dann befindet sich das Luftfahrzeug in der Fehlertoleranzzone um die ermittelte Position des Funkspruchs und wird als mögliches funkendes Luftfahrzeug in eine Liste getragen. Die Fehlertoleranzzone wird im Folgenden mit Fehlerrechteck

bezeichnet, obwohl es dreidimensional gesehen ein nach oben offener Quader ist. Dies wird für alle verbliebenen Tracks durchgeführt.

Im Idealfall enthält die Liste der in Frage kommenden Luftfahrzeuge genau ein Flugzeug, nämlich dasjenige, das tatsächlich den Funkspruch abgesetzt hat. Befinden sich mehrere Luftfahrzeuge auf der Liste, kann der Funkspruch nicht sicher genug einem einzelnen Luftfahrzeug zugeordnet werden. Daher wird der Funkspruch allen Luftfahrzeugen auf der Liste zugeordnet. Ist die Liste leer, d.h. es befindet sich kein Luftfahrzeug im Fehlerrechteck, wird der Funkspruch demjenigen Luftfahrzeug zugeordnet, das lateral den geringsten Abstand zur Position des Senders besitzt. Alternativ könnte der Funkspruch auch allen Luftfahrzeugen im EDSL zugeordnet werden.

Wird einem Luftfahrzeug ein Funkspruch zugeordnet, dann wird der Funkspruch demjenigen Lotsen weitergeleitet, der laut ATM-System das Luftfahrzeug unter Kontrolle hat.

Kenngrößen der Funkspruchzuordnung

Um Standortvarianten oder Szenarien bewerten zu können, bedarf es aussagekräftiger und vergleichbarer Kennzahlen. Zuvor wurde von Güte der Ortung und Zuordnung gesprochen, was einer Konkretisierung bedarf:

Es gibt drei verschiedene Ausprägungen für den Lotsen als Ergebnis der Funkortung und der Zuordnung zu einem oder mehreren Luftfahrzeugen. Im ersten Fall hört nur der Lotse den Funkspruch, der das funkende Luftfahrzeug unter Kontrolle hat, im Folgenden schlicht als der „richtige“ Lotse bezeichnet. Bei funktionierender Ortung des Senders sollte dies der Regelfall sein. Außerdem kann es passieren, dass der richtige Fluglotse den Funkspruch hört, aber neben ihm auch noch weitere Lotsen, falls die Zuordnung nicht eindeutig war. Im schlimmsten Fall hört der richtige Lotse den Funkspruch nicht, sondern nur einer oder mehrere andere Lotsen. Dies kann passieren, wenn der Funkspruch nur falschen Luftfahrzeugen zugeordnet wird.

Von Bedeutung ist, wie häufig die Fälle zwei und drei auftreten. Für die durchgerechneten Szenarien wird die jeweilige Anzahl ermittelt und anschließend in „Vorfälle pro Stunde“ und „Mittlere Zeit in Minuten zwischen zwei Vorfällen“ umgerechnet.

Quantitative Ergebnisse

Die zuvor beschriebenen Kenngrößen sind für die verschiedenen Standortvarianten, Funkblockvarianten und für die verschiedenen in den Echtzeitsimulationen verwendeten Verkehrsszenarien berechnet worden.

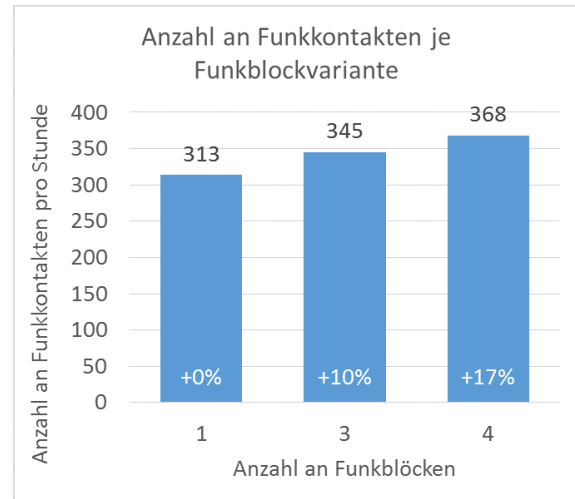


Abb. 5: Durchschnittliche Anzahl an Funkkontakten pro Stunde bei unterschiedlichen Funkblockvarianten.

Zum Vergleich ist außerdem noch der Fall eines einzigen großen Funkblocks, also ohne Selbstübergaben, betrachtet worden. Abbildung 5 zeigt, wie die Anzahl an Funkkontakten pro Stunde durch die Selbstübergaben steigt, wenn mehr Funkblöcke vorhanden sind.

Grundlage für die Untersuchungen bilden die in der zweiten TeFiS-Echtzeitsimulationskampagne vom 23.11. bis 03.12.2015 mit Fluglotsen aus der Kontrollzentrale Karlsruhe durchgeführten Echtzeitsimulationen. Kumuliert liegen Daten von ca. 33 Stunden (simuliertem) Luftverkehr vor, aus denen die jeweiligen Flugverläufe und Bord-Boden-Kommunikationsvorgänge hervorgehen. Um Aussagen sowohl zu der erwarteten durchschnittlichen Qualität der Funkortung als auch zu den Sonderfällen resultierend aus zwar seltenen, aber größeren Peilfehlern machen zu können, wird jede Kommunikation, die eines Pilotenfunkspruchs bedarf, in einer Monte-Carlo-Simulation 100-mal rechnerisch gepeilt. Die Peilfehler sind dabei zufällig gemäß einer Normalverteilung mit 0° als Mittelwert und 1° als Standardabweichung erzeugt und zu den jeweils exakten Peilwinkel addiert worden.

Abbildung 6 zieht Bilanz über die Häufigkeit, mit der der richtige Lotse den Funkspruch nicht erhalten hätte. Für die verschiedenen Varianten (Peilernetzwerk und Funkblockstruktur) ist die mittlere Zeit zwischen zwei Vorfällen in Minuten aufgetragen. Die angegebene Zeit

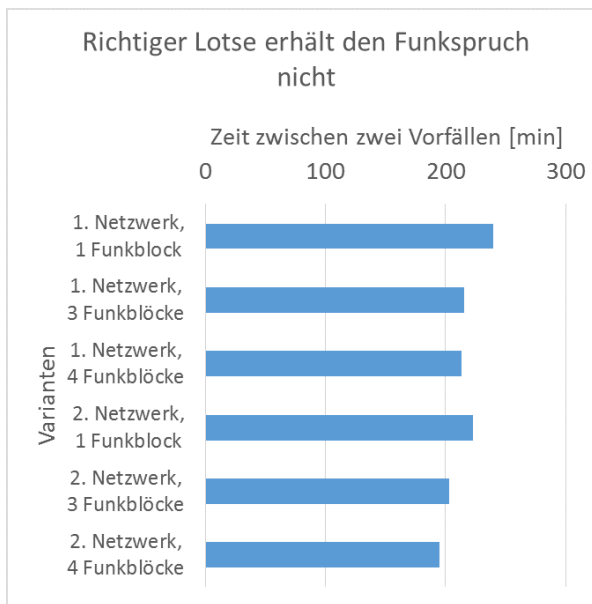


Abb. 6: Vergleich die Auswirkung von Peilernetzwerk und Funkblockvariante darauf, dass der richtige Lotse den Funkspruch nicht erhält.

ist unabhängig von der Anzahl der S-ATM-Lotsen und gibt einen summierten Wert über alle Lotsen an. Ein höherer Wert ist besser, denn er impliziert, dass dieser ungünstige, möglichst zu vermeidende Fall seltener auftritt.

Vergleicht man Peilernetzwerk eins mit Netzwerk Nummer zwei (vgl. Abbildung 2), führt die Nutzung von Peilernetzwerk zwei in den Simulationen zu mehr Funksprüchen, die nicht beim richtigen Lotsen ankommen; somit ist auch die mittlere Zeit zwischen zwei Vorfällen geringer. Das zeigt, dass eine Erhöhung der Anzahl an Peilern sich nicht zwangsläufig positiv auswirkt. Sehr viel entscheidender ist die geografische Anordnung der Peiler.

Dieser Artikel beschränkt sich auf einige wenige Beispiele. Die vorgestellte Methode ist geeignet, eine konkrete Standortoptimierung durchzuführen, falls diese Kommunikationslösung mit Peilern im Rahmen eines Realisierungsprojekts detailliert betrachtet werden müsste.

Erwartungskonform führt eine Erhöhung der Anzahl an Funkblöcken zu mehr Fällen, in denen die Zuordnung nicht eindeutig und richtig erfolgt. Mit vier statt drei Funkblöcken tritt der Vorfall hier im Mittel zwei bzw. acht Minuten früher auf. Die Erhöhung der Anzahl falscher Zuordnungen entspricht in etwa dem, was man aufgrund der erhöhten Anzahl erforderlicher Frequenzwechsel bei steigender Zahl an Funkblöcken erwartet. Anzeichen für

ein überproportionales Anwachsen wurden nicht gefunden.

Dass nicht der richtige Lotse, sondern nur andere Lotsen den vom Luftfahrzeug abgesetzten Funkspruch hören, kann zwei verschiedene Gründe haben. Entweder in dem berechneten Fehlerrechteck befinden sich nur andere Luftfahrzeuge (Fall 1), oder es befindet sich gar kein Luftfahrzeug in dem Rechteck und das Luftfahrzeug mit dem geringsten lateralen Abstand ist nicht das funkende Flugzeug (Fall 2). In beiden Fällen liegt das funkende Luftfahrzeug nicht in dem berechneten Fehlerrechteck.

Fall 2 macht ca. ein Viertel der Fälle aus, in denen der richtige Lotse den Funkspruch nicht erhält, siehe Abbildung 7. Diese Fehlerquelle kann verringert werden, wenn der Funkspruch nicht nur dem Luftfahrzeug mit dem geringsten Abstand zuordnet, sondern auch Luftfahrzeugen, die sich in einer gewissen Toleranzzone um diesen Abstand befinden. Vermieden werden kann dieser Fall, wenn alle Lotsen den Funkspruch erhalten, sobald sich kein Flugzeug im Fehlerrechteck befindet. Dies tritt allerdings im Schnitt dreieinhalb Mal pro Stunde auf und führt dazu, dass die Lotsen häufiger Funksprüche hören, die nicht für sie bestimmt waren.

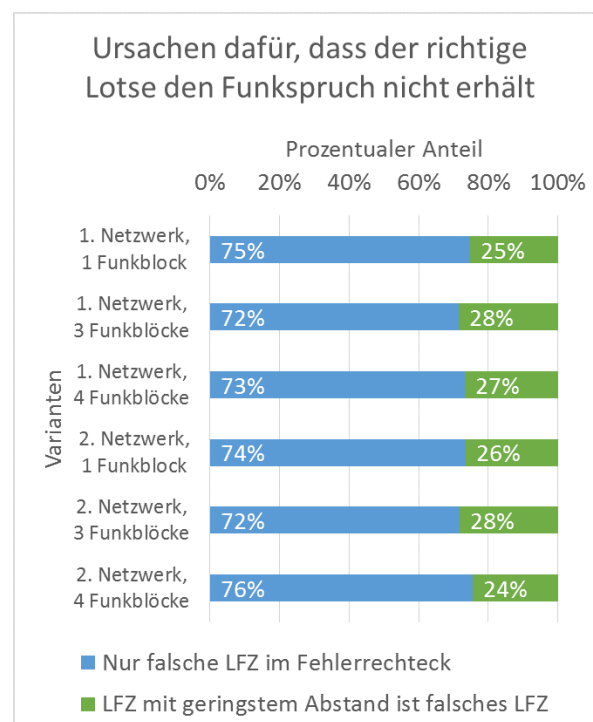


Abb. 7: Prozentuale Verteilung der Ursachen dafür, dass ein Lotse den Funkspruch nicht erhält.

Der häufiger auftretende Fall 1, in dem sich nur falsche Luftfahrzeuge im Rechteck befinden, kann in der Realität nicht identifiziert und somit auch nicht vermieden

werden. Das Nutzen aller Peilinformationen (siehe Aufbau und Berechnung der Simulation) kann jedoch eine genauere Position des Funkspruchs generieren und das Auftreten dieses Falls reduzieren.

Abbildung 8 zeigt die durchschnittliche Häufigkeit, mit der ein Lotse einen Funkspruch erhält, der von einem Flugzeug abgesetzt wurde, das sich nicht unter seiner

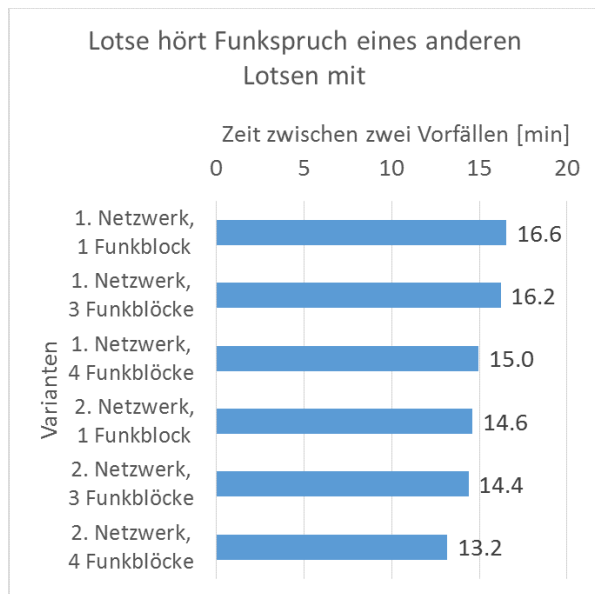


Abb. 8: Vergleich der Auswirkung von Peilernetzwerken und Funkblockvarianten auf die Kenngröße "Lotse hört Funkspruch eines anderen Lotsen mit".

eigenen Kontrolle befindet. Dies kann der Fall sein, wenn der Funkspruch an mehrere Lotsen weitergeleitet wird, aber auch, falls der Funkspruch nur an einen falschen Lotsen weitergeleitet wird. Ein höherer Wert bedeutet auch hier wieder, dass der Vorfall seltener eintritt.

Die Kenngröße ist abhängig von der Anzahl der beteiligten Lotsen und wurde für fünf S-ATM-Lotsen (wie in der Echtzeitsimulation) berechnet. Wird ein Funkspruch zwei Flugzeugen zugeordnet, kann es zufälligerweise passieren, dass sich beide Luftfahrzeuge unter der Kontrolle desselben Lotsen befinden. In diesem Fall würde kein anderer Lotse gestört werden. In dieser Simulation wurden solche Fälle allerdings nicht berücksichtigt, sondern immer der ungünstige Fall, also dass ein anderer Lotse mithört, angenommen.

Auch bei dieser Kenngröße schneidet Peilernetzwerk Nummer eins leicht besser ab als Netzwerk zwei. Mehr Funkblöcke, also mehr Funksprüche durch Selbstübergaben, führen auch hier zu mehr Ereignissen. Bei drei Funkblöcken führen die 10% mehr Funksprüche gegenüber einem Funkblock jedoch nur zu 2% mehr

Fällen, in denen ein Lotse einen Funkspruch hörte, der nicht für ihn bestimmt war. Bei vier Funkblöcken erhöhen sich die Vorfälle allerdings um 11% gegenüber 17% Funkzuwachs im Vergleich zu einem Funkblock.

Eine Optimierung des Peilernetzwerkes (Anzahl und Standorte) erfolgt erst mit der Entscheidung für diese Kommunikationslösung. Um einen Eindruck von den neu entwickelten Analysemöglichkeiten zu vermitteln, wurde beispielhaft die vorgegebene Standortauswahl untersucht. Abbildung 9 zeigt die prozentuale Aufteilung der Verwendungen der Peiler von Standortvariante Nummer eins. Zu beachten ist dabei, dass sich die Werte zu 200% summieren, da pro Kreuzpeilung zwei Peiler verwendet werden. Man kann erkennen, dass Peiler im Norden, wie zum Beispiel Hamburg und Laage, sehr viel seltener verwendet wurden als Peiler in Mittel- und Süddeutschland, insbesondere Plauen, Nürnberg und Landshut. Das ist zu einem großen Teil darin begründet, dass die Verkehrsdichte und somit auch die Funkdichte in Süddeutschland wesentlich höher sind als in Norddeutschland. Dass zum Beispiel Hamburg nicht häufig verwendet wurde, heißt aber nicht, dass ein Ausfall (oder eine Wartung) des Hamburg-Peilers keine großen Auswirkungen hätte. Für ein Referenzszenario aus der Echtzeitsimulation wurde exemplarisch die Auswirkung auf die Kennzahlen bei Nichtverfügbarkeit jeweils eines Peilers simuliert. Obwohl Hamburg am seltensten verwendet wurde, wirkte sich der Ausfall des

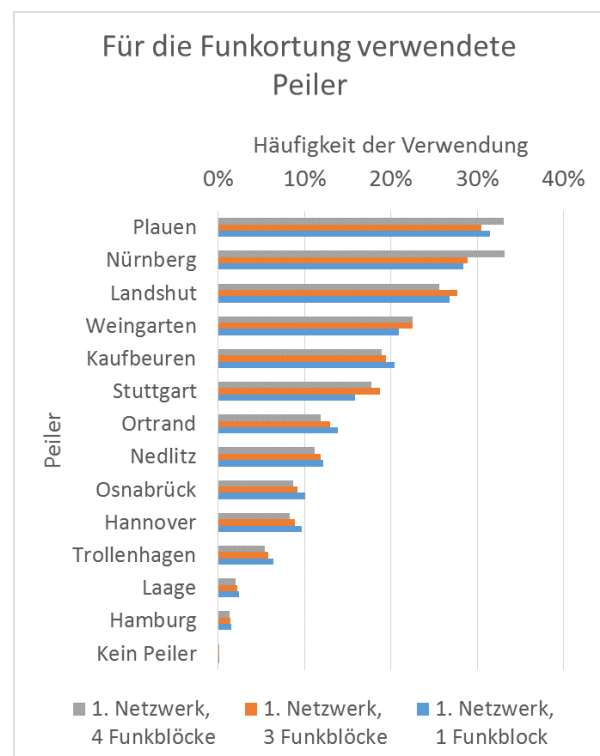


Abb. 9: Für die Funkortung verwendete Peiler bei der Standortvariante 1.

Hamburg-Peilers am stärksten aus. Insbesondere führte seine Nichtverfügbarkeit dazu, dass etwa doppelt so viele Funksprüche nicht beim richtigen Lotsen angekommen sind, sich also die Zeit zwischen zwei Vorfällen halbierte.

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde rechnerisch untersucht, wie häufig ein Funkspruch bei S-ATM mithilfe von Peilern richtig und eindeutig einem Luftfahrzeug zugeordnet werden kann. Die Berechnung wurde möglich, da seit Oktober 2015 in der Simulationsumgebung für TeFiS, neben Informationen zu Start- und Endzeit für die Funksprüche, auch die Position sowie die Gesprächspartner bekannt sind.

Die generelle Vorgehensweise einer Funkspruch-Kreuzpeilung sowie einer anschließenden Identifizierung des zugehörigen Luftfahrzeugs mithilfe von Radardaten wurde erläutert. Darüber hinaus wurde eine Methodik vorgestellt, mit der die Größenordnung der durch eine Kreuzpeilung entstehenden Fehler berechnet werden kann. Aus der Ungenauigkeit der Kreuzpeilung ergeben sich auch Unsicherheiten bei der Zuordnung zu einem Luftfahrzeug.

Es wurden zwei verschiedene Peilernetzwerke sowie zwei Funkblockgeometrien daraufhin analysiert, wie häufig ein Lotse den für ihn bestimmten Funkspruch nicht erhält und wie häufig ein Lotse einen Funkspruch mithört, der nicht für ihn bestimmt war.

Dass ein Lotse den für ihn bestimmten Funkspruch nicht erhält, tritt im Schnitt alle drei bis vier Stunden auf. Dabei führen mehr Funkblöcke zu mehr Funkkommunikation und somit auch zu mehr Fällen, in denen der Funkspruch nicht beim richtigen Lotsen ankommt.

Ein Funkspruch, der dem falschen oder auch mehreren Luftfahrzeugen zugeordnet wird, führt in der Regel dazu, dass auch Lotsen, an die der Funkspruch nicht gerichtet ist, den Funkspruch erhalten. Dies tritt pro Lotse ca. alle 15 Minuten auf. Auch hier erhöht sich die Zahl an Vorfällen proportional mit steigendem Funkaufkommen.

Bei den beiden untersuchten Peilernetzwerken führt Variante eins zu leicht besseren Kennzahlen, obwohl in Variante zwei ein Peiler mehr zur Verfügung steht. Dies zeigt, dass die geografische Verteilung der Peiler wichtiger ist als die reine Anzahl.

Die hier berechneten Werte der Kenngrößen für die Qualität der Funkspruchzuordnung bedürfen zunächst einer betrieblichen Bewertung. Sollte die Bord-Boden-Kommunikationslösung mithilfe von Peilern weiter

verfolgt werden, sollte in einem nächsten Schritt die Lokalisation von Sendestellen unter Berücksichtigung aller verfügbaren Peilinformationen in dem hier vorgestellten Simulationsmodell implementiert und die Auswirkungen untersucht werden. Zusätzlich müssten etwaige zusätzliche Fehler abgeschätzt werden, die aus der nur impliziten Berücksichtigung der Krümmung der Erdoberfläche resultieren. In einem nächsten Schritt kann dann die minimale Anzahl und optimale Verteilung der Peiler bestimmt werden, um die Kosten für den Aufbau der Peilerinfrastruktur besser abschätzen zu können.

Referenzen

[1]	Dr. Jens Konopka, Quantitative Analyse des erwarteten Bord-Boden-Kommunikationsumfangs bei sektorloser Flugverkehrskontrolle, Innovation im Fokus, 01/2015, S. 43-50
[2]	Eliana Haugg, Jens Konopka, Oliver HaBa, TeFiS Ergebnisbericht Validierung 23.02.-06.03.2015 Version 1.0.
[3]	Andreas Walter, Cost Benefit Analysis of Wide Range Communication for Air Space Management 2020, Masterarbeit, Fachhochschule für Oekonomie und Management, April 2016
[4]	ICAO Doc 9705-AN/956 Manual of Technical Provisions for the Aeronautical Telecommunication Network (ATN), Third Edition, 2002
[5]	Rhode & Schwarz, Digitaler Verkehrsweiler R&S@DDF04E, Datenblatt Version 01.00, November 2008
[6]	John R. Taylor, An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements, University Science Books, 2nd edition 1997.

[7]	Dr. Andreas Herber, Dr. Ralph Leemüller, Uwe Micksch, Ralf Schlingmann, Neue ATM-Simulatoren im Forschungszentrum für die gemeinsame Nutzung durch Center Langen und F&E, TE im Fokus 2/2013, S. 24-28
-----	--

Abkürzungen

AFS	Advanced Function Simulator
COM	Communication
DFS	Deutsche Flugsicherung
EDSL	Bezeichnung des sektorlosen Luftraums
FL	Flight Level
LDACS	L-Band Digital Aeronautical Communication System
S-ATM	Sektorloses Air Traffic Management
SIP	Session Initiation Protocol
UIR	Upper Information Region
VHF	Very high frequency

Modifiziertes Air Situation Window für sektorlose Flugverkehrskontrolle

Tobias Hereth, Stefan Fladerer, Christoph Schmand, Oliver Haßa, Dr. Jens Konopka

Einleitung

Nach wie vor ist Flugverkehrskontrolle eng an das Vorhandensein von Flugsicherungssektoren geknüpft. Erste Überlegungen, dass dies mit den heute zur Verfügung stehenden Technologien, wie z.B. die unterbrechungsfreie und flächendeckende Verfügbarkeit von Ortungsinformationen [5] oder Flächennavigation [6], [7], [8], nicht mehr zwingend erforderlich sein muss, wurden bereits zu Beginn der 2000er Jahre gemacht, allerdings wurde die Idee bei den Flugsicherungen nur punktuell aufgegriffen [4].

Seit 2014 untersucht die DFS im Projekt „Technologie für Flugverkehrsmanagement in großen Strukturen“ (TeFiS) des Luftfahrtforschungsprogramms V, inwiefern ein Konzept „sektorloses Air Traffic Management“ (S-ATM) technisch und betrieblich zumindest für größere Teile einer ganzen Kontrollzentrale umgesetzt werden kann [1].

Da bei diesem Konzept die Verantwortung für die sichere Führung und flüssige Durchführung des Luftverkehrs nicht mehr an rein geographischen Kriterien festgemacht wird, müssen insbesondere Lösungen gefunden werden für

1. die Verteilung von Luftfahrzeugen auf eine bestimmte Anzahl von Lotsen,
2. Regeln zur Festlegung des ausweichpflichtigen Luftfahrzeuges und
3. die Kommunikation zwischen Bord und Boden.

Hinzu kommt, dass aktuell genutzte Flugsicherungsverfahren und -systeme das Resultat einer jahrzehntelangen stetigen Weiterentwicklung und Verbesserung einer Flugverkehrskontrolle sind, die auf Sektoren basiert. Weder die von Fluglotsen genutzten Werkzeuge des bestehenden ATM-Systems zur Verkehrsanalyse und -darstellung noch die aktuell bekannten betrieblichen Arbeitsverfahren sind auf die Erfordernisse einer sektorlosen Kontrolle hin optimiert worden.

In den im Projekt TeFiS durchgeführten Echtzeitsimulationen wurde dies regelmäßig in den Rückmeldungen der beteiligten Fluglotsen deutlich. Eine der zentralen von der neuen Arbeitsweise induzierten Veränderungen betrifft die Übersichtlichkeit der auf dem Radarschirm, genauer *Air Situation Window* (s. S. 3-95 in

[9]), dargestellten Verkehrssituation. Der zu überblickende Luftraum ist von der Fläche her deutlich größer als herkömmliche Sektoren. Mithin ist auch die Anzahl der auf der Bildschirmfläche des vorhandenen ATM-Systems anzuzeigenden Flugziele deutlich größer als in einem Sektor.

Während bei konventioneller Flugverkehrskontrolle die Mehrzahl der dargestellten Luftfahrzeuge von den Lotsen auf einer Arbeitsposition selbst aktuell oder bald kontrolliert werden, sich also im Status *Assumed* oder im Status *Advanced* befinden, wird bei sektorloser Kontrolle die Verkehrssituation von solchen Luftfahrzeugen dominiert, die unter der Kontrolle von Kollegen sind, die ebenfalls im sektorlosen Luftraum arbeiten. Der Status solcher Luftfahrzeuge wird mit *Concerned* (s. S. 3-105 in [9]) bezeichnet.

Will man vermeiden, dass Anweisungen von Lotsen über Sprechfunk von mehreren Sendern gleichzeitig ausgesendet werden, um den Piloten des anzusprechenden Luftfahrzeugs sicher zu erreichen, muss der Lotse das anzusprechende Luftfahrzeug aktiv auswählen, um mit dem Piloten des betreffenden Flugzeugs zu kommunizieren.

Heutige Lotsenarbeitsplätze sind weder dafür ausgelegt eine große Dichte an Flugzielen auf dem Radarschirm darzustellen noch ist eine explizite Anwahl des Zieles, mit dem kommuniziert werden soll, vorgesehen. Beide Aspekte sind im Zeitraum von 12.2015 bis 03.2016 im Projekt TeFiS im Rahmen zweier Bachelorarbeiten

1. „Optimierung der Luftlagedarstellung für große Kartenausschnitte“ [2] und
2. „Integration der Sprachkommunikation in die Luftlagedarstellung“ [3]

untersucht worden.

Unter Optimierung der Luftlagedarstellung wird konkret eine Filterung von für den Lotsen interessanten Luftfahrzeugen verstanden. Die Integration der Sprachkommunikation in die Luftlagedarstellung soll die erforderliche explizite Anwahl von Luftfahrzeugen ermöglichen und dabei möglichst vermeiden, dass Lotsen ihren Blick von der Luftlagedarstellung abwenden

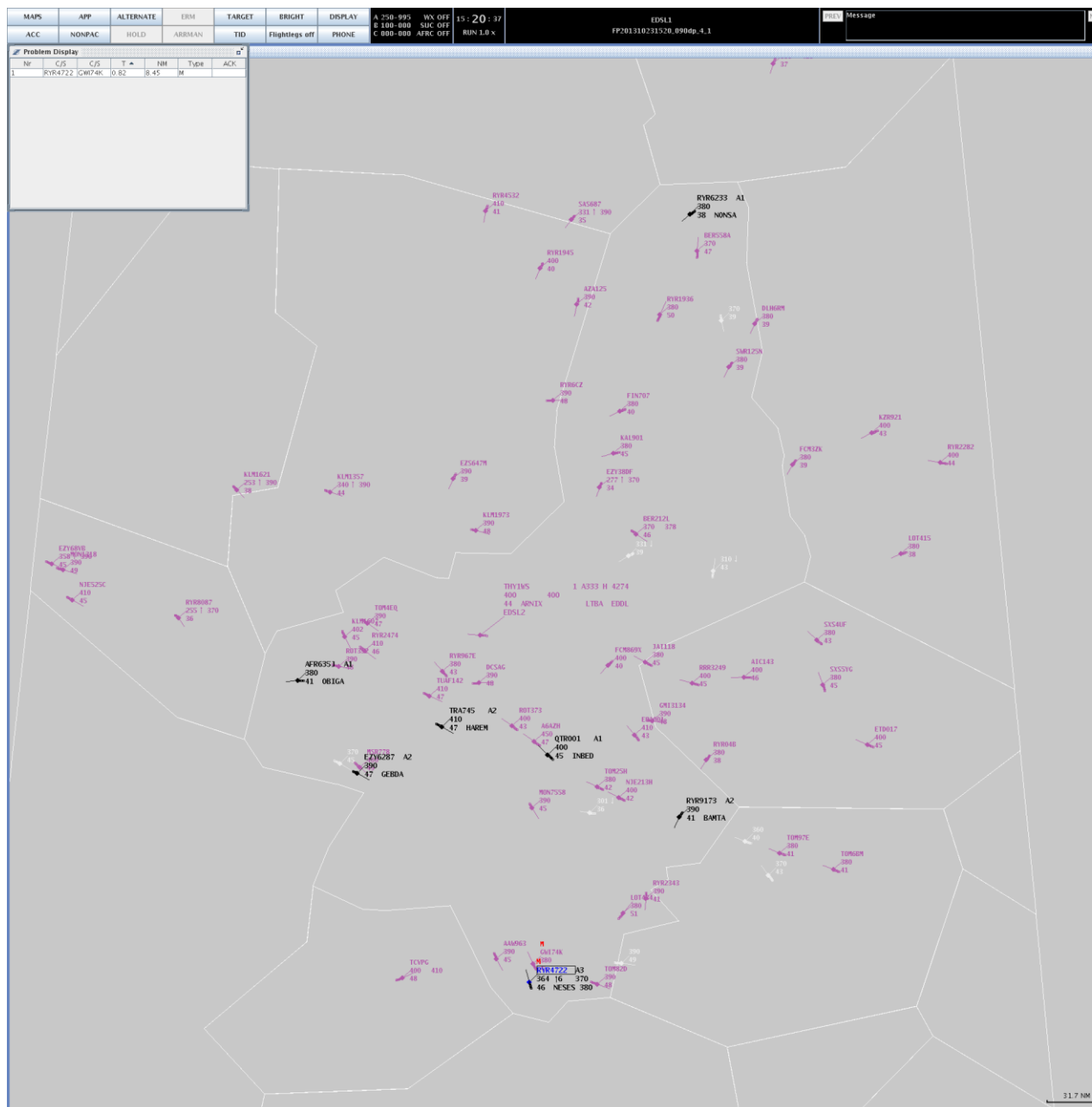


Abbildung 1: Konventionelle Luftlagedarstellung mit S-ATM

müssen, um die Kommunikation mit den Piloten der Luftfahrzeuge durchzuführen. Die jeweilige Vorgehensweise und die umgesetzten Lösungen sind in den beiden folgenden Abschnitten erläutert.

Optimierung der Luftlagedarstellung für große Kartenausschnitte

Mit der Betrachtung des gesamtdeutschen Luftraums im Gegensatz zu den aktuell üblichen Sektoren ist die Übersichtlichkeit der Luftlagedarstellung erheblich schlechter geworden. Grund dafür ist eine signifikant

höhere Anzahl von dargestellten Luftfahrzeugen und die damit einhergehende größere Menge an darzustellenden Informationen [2].

Wie in Abbildung 1 ersichtlich wird, ist die Farbe Magenta dominant. Die in Magenta dargestellten Luftfahrzeuge haben im heutigen System den Status *Concerned*, was so viel bedeutet wie: "Diese Luftfahrzeuge befinden sich zwar in dem durch den Lotsen kontrollierten Sektor, aber werden von ihm nicht kontrolliert" [9]. Die tatsächlich unter aktiver Kontrolle des Lotsen befindlichen Luftfahrzeuge sind schwarz dargestellt. Da jetzt alle

S-ATM-Lotsen gemeinsam den sektorlosen Luftraum kontrollieren, gibt es nun deutlich mehr Luftfahrzeuge, die mit Magenta dargestellt werden.

Aus diesem Grund wurde ein Filter entwickelt, der die Übersichtlichkeit des Radardisplays bei der Darstellung von großen Kartenausschnitten optimieren soll, um den Lotsen so bei seiner Arbeit zu unterstützen. Er unterscheidet relevante Luftfahrzeuge von weniger relevanten Luftfahrzeugen. Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit des Radardisplays werden die weniger relevanten Luftfahrzeuge mit verringerten Informationen in den dazugehörigen Labels dargestellt. Die Filterung betrifft in erster Linie Luftfahrzeuge mit dem Status *Concerned*.

Zur Bewertung der für den Lotsen als interessant dargestellten Luftfahrzeuge werden zwei Ansätze verfolgt:

1. die *Area of Interest* basierend auf einem geographischen Volumen um das kontrollierte Luftfahrzeuge und
2. die *Aircraft of Interest* basierend auf den Ergebnissen der genutzten Konflikterkennungswerkzeuge.

Ein rein geographischer Ansatz zur Filterung der Luftfahrzeuge ist ungenügend, da Fälle auftreten können, in denen Luftfahrzeuge mit derselben Geschwindigkeit hinter dem kontrollierten Luftfahrzeug fliegen und von Lotsen als nicht relevant bewertet würden, da sie sich nicht annähern. Jedoch können auch kritische Situationen auftreten, die bei einer rein geographischen Filterung nicht erfasst werden würden. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse der Konflikterkennungswerkzeuge in der Kombination mit einer geographischen Filterung genutzt, um die für den Lotsen interessanten Luftfahrzeuge zu identifizieren.

Um zu überprüfen, ob sich ein Luftfahrzeug horizontal (zunächst ohne Betrachtung der Höhe) innerhalb einer *Area of Interest* befindet, wird zunächst geprüft, ob es sich im Umkreis um die derzeitige Position eines vom Lotsen kontrollierten bzw. in Zukunft zu kontrollierenden Luftfahrzeugs befindet. Wenn dies nicht der Fall ist, wird überprüft, ob es sich in dem Bereich vor diesem befindet. Dieser Bereich wird dafür durch ein Polygon angenähert. Falls ja, wird anschließend die Flughöhe geprüft. Abbildung 2 zeigt eine zur Illustration eingeblendete *Area of Interest*. Diese lässt sich zur Laufzeit der Simulation ein- und ausblenden.

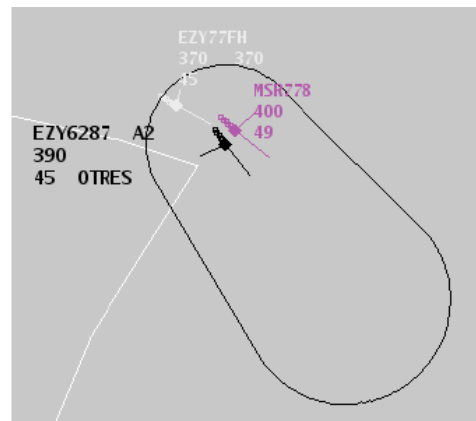


Abbildung 2: Darstellung der Area of Interest

Zur Untersuchung der Funktionsweise der Filterung in der Echtzeitsimulation wurde zur Darstellung der interessanten Luftfahrzeuge das Label in einem bisher nicht genutzten Blau eingefärbt. Dies wurde jedoch mit Ausnahme des *Callsigns* gemacht, da der ursprüngliche Status des Luftfahrzeuges noch erkennbar sein sollte (siehe Abbildung 3).



Abbildung 3: Relevante Luftfahrzeuge mit geänderter Farbgebung (links: Luftfahrzeug im Status „Concerned“, rechts: Luftfahrzeug im Status „Unconcerned“)

Die Berücksichtigung der Konflikte sowie die besondere Darstellung der Luftfahrzeuge mit Konflikten hat ein sehr positives Feedback hervorgerufen. Die Lotsen konnten erkennen, welche Luftfahrzeuge besonders beachtet werden müssen, ohne von ihnen kontrollierte bzw. in Zukunft zu kontrollierende Luftfahrzeuge per Mausklick extra auszuwählen (siehe Abbildung 4).

Bei der Validierung hat sich zwar gezeigt, dass durch das neue Filterkonzept die Aufmerksamkeit der Lotsen stärker als bisher auf die potentiellen Konflikte gelenkt wird. Jedoch wurde das Problem erkannt, dass es den Lotsen unter Umständen schwer fällt, einen zu einem bestimmten Luftfahrzeug gehörenden Konfliktpartner zu identifizieren, weil dieser sich im Vergleich zur heutigen Arbeitsweise deutlich weiter entfernt befinden kann. Zur Lösung des Problems könnte den Lotsen eine

Möglichkeit an die Hand gegeben werden, die Wirkung des Filters zu beeinflussen und die Anzeige auf näher liegende potentielle Konflikte zu beschränken.

Weiterhin gab es die Kritik, dass der Kontrast von Luftfahrzeugen mit dem Status *Concerned* und Luftfahrzeugen mit geänderter Farbgebung den Lotsen nicht prägnant genug war. So erforderte es noch immer einen zu großen Aufwand, relevante Luftfahrzeuge und weniger relevante Luftfahrzeuge voneinander zu

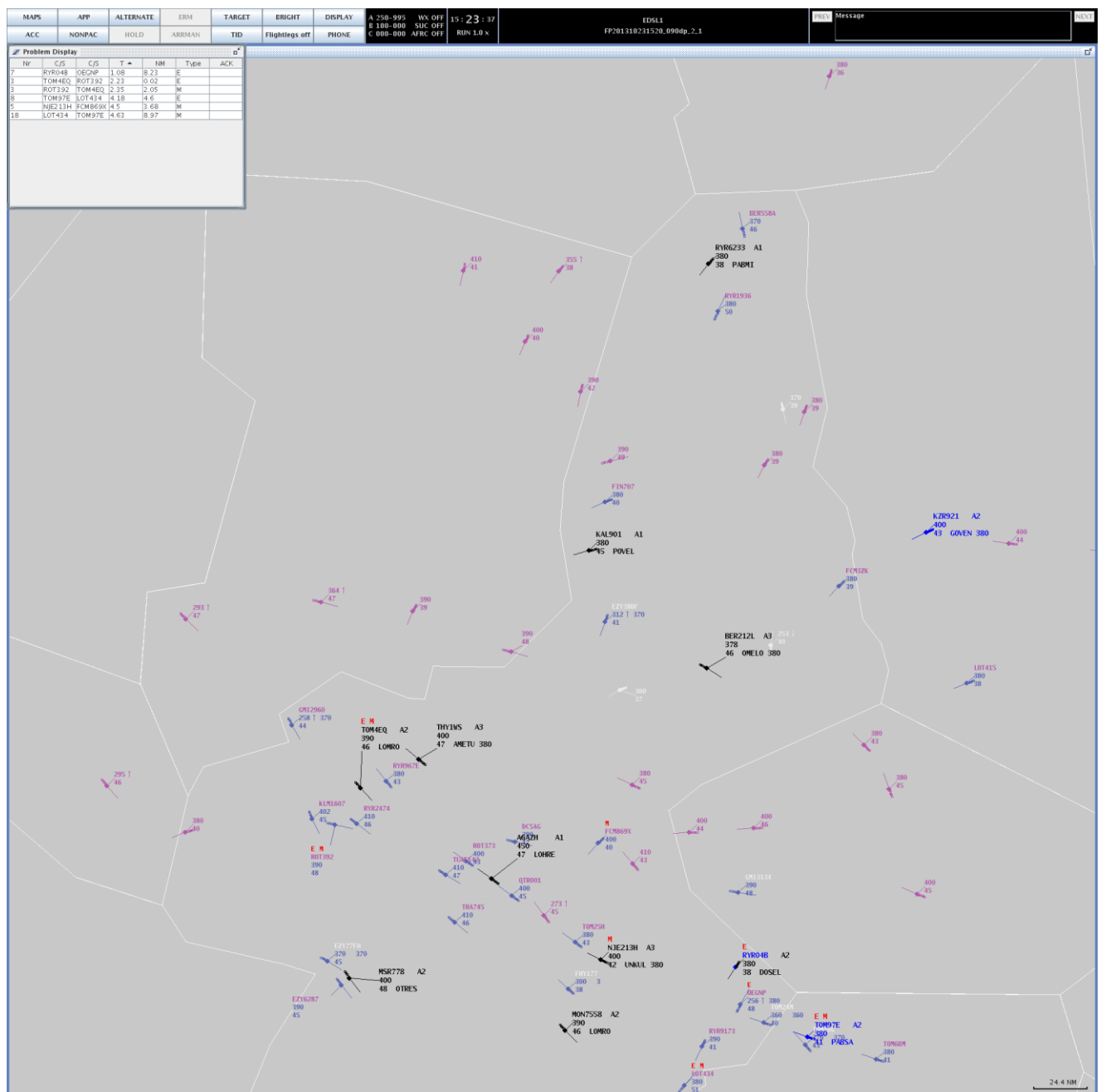


Abbildung 4: Gefilterte Luftlagedarstellung für S-ATM

unterscheiden. Des Weiteren war nicht sofort ersichtlich, mit welchem Luftfahrzeug ein speziell eingefärbtes Luftfahrzeug einen Konflikt hatte. Das führte dazu, dass manche Lotsen durch klicken auf die Kopfsymbole der kontrollierten bzw. in Zukunft zu kontrollierenden Luftfahrzeuge nach den Konfliktpartnern suchten, was sie von ihrer eigentlichen Aufgabe ablenkte. Grund dafür war insbesondere auch die große Entfernung, die Konfliktpartner haben können. Ein Wandel von der geplanten zu einer reaktiven Arbeitsweise des Lotsen war deutlich zu erkennen.

Aus ihrer derzeitigen Arbeit sind es die Lotsen gewohnt, immer den Überblick über alle Luftfahrzeuge in ihrem Verantwortungsbereich zu haben, wodurch sie im Fall der Fälle auch ein Versagen der Konfliktwerkzeuge kompensieren könnten. Aufgrund der enormen Menge an Luftfahrzeugen in dem von ihnen kontrollierten sektorlosen Luftraum ist es jedoch weder sinnvoll noch möglich, dass ein Mensch stets den Überblick über alle Luftfahrzeuge hat. Dies entspricht auch der Meinung der Lotsen: Mit der Vergrößerung des Verantwortungsbereichs muss ihrer Ansicht nach die Arbeit immer mehr durch Systeme unterstützt werden, welche den Luftraum nach Konflikten durchsuchen. Arbeiten in einem solch großen Luftraum ohne funktionale und verlässliche Unterstützungssysteme ist nicht denkbar.

Neben dem Einführen der Filterung wurde auch die Menge der Informationen überarbeitet, die für die durch den Filter eingestufteten Luftfahrzeuge auf dem Radardisplay angezeigt werden. Während der Validierung wurde zudem die Farbdarstellung der Luftfahrzeuge variiert. Es hat sich gezeigt, dass die an der Validierung beteiligten Lotsen mit einer durch die Filterung stark veränderten Radaranzeige gut zurechtkommen. Durch die Farbgebung wird das Augenmerk der Lotsen fast vollständig auf die von der Filterung als relevant klassifizierten Luftfahrzeuge gelenkt, und das Radardisplay wirkt aufgeräumt und übersichtlich.

Als Randbedingung wurde bei den Simulationen idealisiert angenommen, dass das System und die Konflikterkennungstools fehlerfrei arbeiten. Ausfälle der Konflikterkennungstools oder eine Fehlkonfiguration der gefilterten Anzeige durch den Lotsen können dazu führen, dass die Filterung nicht mehr zuverlässig funktioniert und relevante Informationen zu unauffällig dargestellt oder gar ausgeblendet werden. Hier könnte das geographische Filterkonzept helfen: Im Gegensatz zu den anderen Konflikterkennungstools basiert dieses nicht auf geplanten oder durch den Lotsen freigegebenen Flugrouten, sondern auf den aktuellen Radardaten. Dadurch können auch Sonderfälle, wie

beispielsweise *Route Deviations*, von der Filterung erfasst werden, bei denen die Routen der Luftfahrzeuge von den geplanten Flugrouten abweichen. Inwieweit dies tatsächlich sinnvoll ist, muss in weiteren Simulationen untersucht werden.

Integration der Sprachkommunikation in die Luftlagedarstellung

Zur Organisation eines sicheren, geordneten und flüssigen Verkehrsablaufs müssen Fluglotsen mit den Luftfahrzeugführern und den benachbarten Fluglotsen kommunizieren. Daher ist es unerlässlich, dass Fluglotsen miteinander telefonieren und per Funk mit den Piloten sprechen. Zurzeit ist die Bedienung der Sprachkommunikation über ein *Touch Input Device* (TID) am Lotsenarbeitsplatz realisiert, über welches die Lotsen ihren gewünschten Gesprächspartner bzw. die benötigte Funkfrequenz auswählen und dann anrufen bzw. -funken können. Da bei der sektorlosen Flugverkehrskontrolle ein Lotse sowohl für Radarkontrolle als auch Koordination zuständig ist, führt der Nutzen der Sprachvermittlung über das Display zu einer erhöhten Zeitanteile zu dem der Lotse nicht auf das Radar schaut (*Head-Down Time*). Wie zuvor beschrieben, wird es aufgrund der Arbeitsweise des Lotsen im Umfeld von S-ATM notwendig sein, die Aufmerksamkeit auf das Radardisplay zu fokussieren. Um die Head-down Zeiten zu verringern und die *Head-Up Time*, die Zeit, die der Lotse auf das Radar schaut, zu steigern, wurde ein *Human Machine Interface* (HMI) entwickelt. Dieses sollte die beiden Systeme Sprachvermittlung und Luftlage zusammenführen, indem die Sprachvermittlung mit Hilfe des HMI in das Radardisplay integriert wird.

Als grundlegende Anforderungen für dieses HMI wurden die Standardaufgaben eines Fluglotsen zur Koordination über Telefon und zur Kontaktaufnahme mit einem Piloten herangezogen. Für die Telefonie sollte es ein Telefonbuch geben, welches alle verfügbaren Positionen mit Telefonnummern auflistet und es ermöglicht, diese per Auswahl anzurufen. Zu jedem aufgelisteten Eintrag sollte außerdem ersichtlich sein, wie der aktuelle Verbindungsstatus ist. Alle Telefonate, egal ob abgenommen wurde oder nicht, sollten bei den beiden beteiligten Lotsen in einer Historie aufgelistet werden. Dies dient dazu, dass jeder Lotse nachverfolgen kann, mit wem er telefoniert hat bzw. welche Anrufe er verpasst hat. Eine ähnliche Art von Historie sollte es auch für die Funkverbindungen geben, um zu sehen, ob ein Pilot versucht hat den Lotsen anzufunken (siehe Abbildung 7). Aus dieser Historie heraus sollte es auch

möglich sein, die Funkverbindung zu den jeweiligen Piloten aufzubauen.

Neben dem genannten Telefonbuch sollte es zusätzlich möglich sein, Lotsen anderer Sektoren per Auswahl in einer Sektorkarte (siehe Abbildung 10) anzurufen. Dies ist vor allem dann sinnvoll, wenn ein Lotse mit einem anderen Lotsen aus dem unteren Luftraum telefonieren muss. Die Auswahl über die Sektorkarte ist für den Lotsen einfacher, als sich den passenden Arbeitsplatz im Telefonbuch zu suchen. Außerdem mussten noch Einstellungen implementiert werden, welche unter anderem die Lautstärkeregelung des Telefonhörers und des Headsets ermöglichen.

Außerhalb des HMI sollte es direkt im Radardisplay des Flugsicherungssimulators möglich sein, die zuständigen Lotsen über die einzelnen Label anzurufen. Hierzu sollte der kontrollierte Workspace im Label ersichtlich sein und per Anwahl angerufen werden können (siehe Abbildung 5).

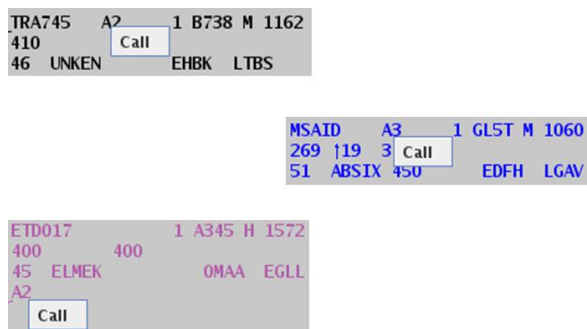


Abbildung 5: Realisierung der Anruhfunktion im Label des Targets in der Luftlagedarstellung

Auf Basis der zuvor beschriebenen Anforderungen wurde ein HMI Prototyp realisiert. Im Folgenden werden nun die Ergebnisse der Prototypenvalidierung präsentiert.

Bei der Arbeit der Lotsen stellte die Größe des HMI kein Problem dar. Selten wurde diese konfiguriert, sondern es wurde die Standardgröße verwendet. Auch das mit Tabs realisierte Menü (siehe Abbildung 6) stellte keine Herausforderung dar. Die Lotsen kamen ohne aufwändige Einweisung, welche Funktion auf einem Tab hinterlegt ist, mit der Bedienung zurecht (siehe Abbildung 6).

Zur Arbeit mit dem Telefonbuch gab es Anmerkungen, wie dieses in Zukunft noch weiter verbessert werden könnte. Momentan existiert in der Simulation nur eine geringe Menge an Einträgen im Telefonbuch, was das Finden des richtigen Gegenübers relativ einfach gestaltet. Wenn nun aber unter Realbedingungen gearbeitet werden würde und deutlich mehr Einträge

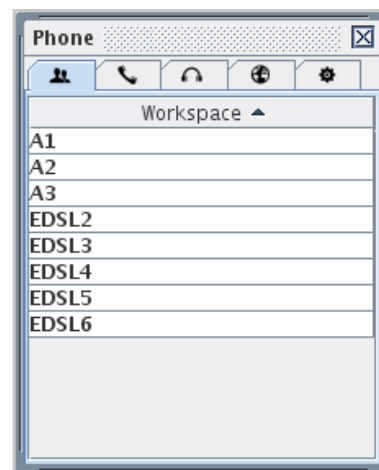
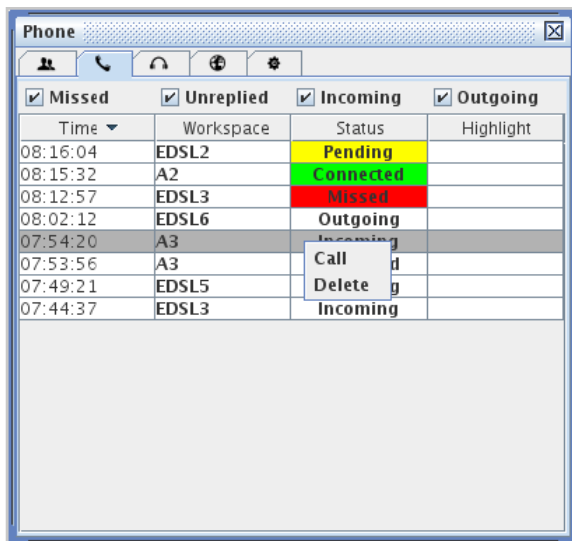


Abbildung 6: Realisierung des Telefonbuchs

vorhanden wären, ist es nicht mehr sinnvoll die unterschiedlichen Verbindungspartner alphabetisch zu sortieren. In diesem Falle wäre es einfacher, wenn die Einträge geographisch sortiert wären, sodass die für einen Lotsen wichtigen Einträge, sowohl im eigenen Luftraum als auch in angrenzenden Sektoren, im Telefonbuch nahe beieinander lägen, um nicht lange durch das Telefonbuch scrollen zu müssen.

Des Weiteren sollte, sofern sich das Telefonbuch wegen eines eingehenden Anrufs öffnet, die Liste des Telefonbuchs immer zu dem Eintrag springen, dessen Adressat gerade anruft. Dies ist unter Realbedingungen sinnvoll, da mehr Einträge existieren und ohne diese Funktion immer erst der Eintrag gesucht werden müsste, um einen Anruf entgegen zu nehmen.

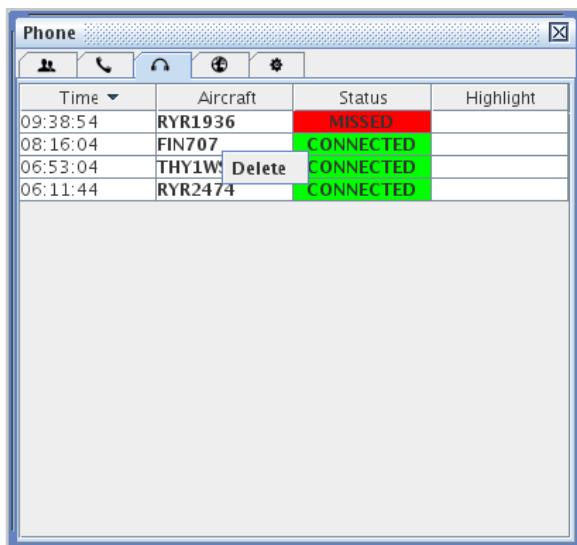
Die Funktion der Telefonhistorie (siehe Abbildung 7) wurde nicht bemängelt. Allerdings war während der Simulation zu beobachten, dass einem verpassten Anruf, welcher durch ein rot hinterlegtes Tab signalisiert wurde, kaum Beachtung geschenkt wurde. Nach Rückfrage erklärten die Lotsen, dass der Anrufer erneut anrufen würde, wenn es wichtig wäre.



Phone			
☒ Missed ☒ Unreplied ☒ Incoming ☒ Outgoing			
Time	Workspace	Status	Highlight
08:16:04	EDSL2	Pending	
08:15:32	A2	Connected	
08:12:57	EDSL3	Missed	
08:02:12	EDSL6	Outgoing	
07:54:20	A3	Incoming	
07:53:56	A3	Call	
07:49:21	EDSL5	Delete	
07:44:37	EDSL3	Incoming	

Abbildung 7: Telefonhistorie

Bei der Funkhistorie (siehe Abbildung 8) wurde einem verpassten bzw. nicht erfolgreichen Funkspruch eines Piloten und dem dadurch rot hinterlegten Tab ebenfalls kaum Beachtung geschenkt.



Phone			
Time	Aircraft	Status	Highlight
09:38:54	RYR1936	MISSSED	
08:16:04	FIN707	CONNECTED	
06:53:04	THY1W	Delete CONNECTED	
06:11:44	RYR2474	CONNECTED	

Abbildung 8: Funkhistorie

Jedoch wurde es als positiv bewertet, dass über die Anzeige in der Historie auch Flieger angesprochen werden konnten, welche aktuell nicht unter Kontrolle des zuständigen Lotsen standen (z.B. dadurch ausgelöst, wenn ein Pilot einen Lotsen schon vor der Übergabe einmal angefunkt hatte). In der Luftlagedarstellung wird das *Callsign* grün hinterlegt, wenn der Funkgesprächspartner ausgewählt wurde (s. Abbildung 9).

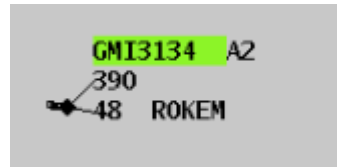


Abbildung 9: Darstellung des angewählten Funkgesprächspartners

Bei der Sektorkarte wurde angemerkt, dass der implementierte Regler für die Flughöhe keine Lösung darstellte, um die Höhe festzulegen. Es wurde vorgeschlagen die Flughöhe mit Hilfe der Checkbox oder des Radiobuttons selektieren zu können, da so die tatsächlich eingestellte Flughöhe besser ersichtlich ist, als mit einem Regler.

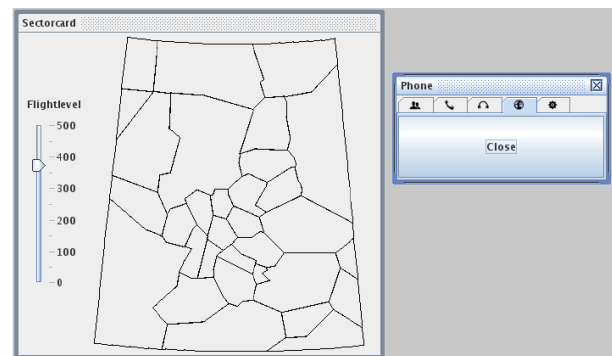


Abbildung 10: Sektorkarte zur Anwahl des Gesprächspartners

Ein weiterer Punkt der zu beobachten war, war das häufige Verwenden des TID statt des Fensters auf dem ASW um Telefonate anzunehmen oder zu beenden. Über das TID wird die Sprachkommunikation im momentan operativ genutzten System bedient. Der Grund hierfür ist, dass die Lotsen es gewohnt waren damit zu arbeiten und es deshalb intuitiv benutzen. Es ist zu überlegen, ob das TID gesperrt werden sollte, um dessen Nutzung zu unterbinden.

Durch die Mehrzahl der Lotsen wurde die Integration der Sprachkommunikation in die Luftlagedarstellung positiv angenommen und ihre Arbeit wurde durch die Systemintegration nicht beeinträchtigt, sondern sogar erleichtert. Für das weitere Vorgehen zur Optimierung des HMI empfiehlt es sich, den Fokus vor allem auf die Anpassungen des Telefonbuchs zu legen, da dieses das Hauptarbeitsmittel für die Lotsen darstellt. Weiterhin sollte daran gearbeitet werden, dass die Sprachkommunikationssoftware „Sinatra“ so umgebaut wird, dass alle Sektoren des unteren Luftraums durch einen Adjacent-Arbeitsplatz simuliert werden können. Der Vorteil dieser Anpassung ist, dass die Simulation

realistischer wird und im Telefonbuch außerdem mehr Einträge erscheinen, um so einen Eindruck zu erhalten, wie groß ein solches HMI im realen Betrieb ausfallen würde.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit der Bachelorarbeit „Optimierung der Luftlagedarstellung für große Kartenausschnitte“ wurden die technischen Voraussetzungen dafür geschaffen, um in Echtzeitsimulationen mit sektorloser Flugverkehrskontrolle Luftfahrzeuge in relevante bzw. weniger wichtige Luftfahrzeuge zu klassifizieren und relevante Luftfahrzeuge entsprechend hervorzuheben. Echtzeitsimulationen mit Fluglotsen aus Karlsruhe zeigten, dass dabei ein rein geometrisches Kriterium nicht zielführend ist. Zum einen werden entweder zu viele Luftfahrzeuge hervorgehoben, wenn die sog. *Area of Interest* um das eigene Luftfahrzeug zu groß gewählt wird, zum anderen werden selbst Luftfahrzeuge auf Kollisionskurs als weniger relevant klassifiziert, wenn der betrachtete Bereich um das eigene Luftfahrzeug zu klein gewählt wird.

Hingegen erwies sich das Konzept der *Aircraft of Interest* als geeignet, um eine bessere Übersichtlichkeit auf dem Radarschirm zu ermöglichen. Dabei werden alle Luftfahrzeuge hervorgehoben, die den unter eigener Kontrolle befindlichen Luftfahrzeugen in den nächsten 10 bis 15 Minuten nahe kommen können. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass die dazu verwendeten Konflikterkennungswerkzeuge alle auftretenden Konflikte zuverlässig erkennen und die Fluglotsen ggf. nach einer Trainings- und Eingewöhnungsphase auch die Zuverlässigkeit anerkennen können und dem System vertrauen. Welche konkreten quantitativen Anforderungen an Konflikterkennungswerkzeuge für die spezifische Arbeit in einem großen sektorlosen Luftraum daraus abgeleitet werden können, gilt es in den kommenden Projektphasen zu untersuchen. Zusätzlich bedarf es noch einer Anpassung des Farbschemas, um die Lesbarkeit der Label von Flugzielen sicherzustellen. Einerseits dürfen Label von solchen Flugzielen, die zwar auch durch diesen Luftraum fliegen, aber nicht den Luftfahrzeugen unter eigener Kontrolle nahe kommen, die Lesbarkeit der anderen wichtigen Labeln nicht erschweren, andererseits müssen diese auch selbst auf dem hellen Hintergrund noch lesbar sein.

Die Integration der Sprachkommunikation in die Luftlagedarstellung wurde sehr positiv aufgenommen.

Sie zeigt eine betrieblich und technisch umsetzbare Alternative für die spezifische Auswahl eines Luftfahrzeugs in einer sektorlosen Flugverkehrskontrolle.

Eine der Herausforderungen, die während den iterativen Entwicklungsszyklen auftrat, war, dass das sog. Telefonbuch sehr viel Bildschirmfläche belegte. In der Simulation konnte das Telefonbuch inklusive der Bedienelemente ausreichend verkleinert werden. Die flüssige und sichere Bedienung, für den betrieblich realistischeren Fall, dass das Telefonbuch deutlich mehr Einträge enthält, ist in zukünftigen Echtzeitsimulationen noch zu prüfen. Die nächste entsprechende Validierung ist für den September 2016 geplant.

Referenzen

[1]	Jens Konopka, Innovation im Fokus 1/2015 S. 43 - 50, 2015.
[2]	Tobias Hereth, Bachelor Thesis, Optimierung der Luftlagedarstellung für große Kartenausschnitte, 2016
[3]	Stefan Fladerer, Bachelor Thesis, Integration der Sprachkommunikation in die Luftlagedarstellung, 2016
[4]	Nathalie Waltenberg, Heterogener komplexer Flugverkehr, TIB Schlussbericht 2013 – DFS, 2013
[5]	Heinrich Mensen, Moderne Flugsicherung: Organisation, Verfahren, Technik, 4., neu bearbeitete Auflage, 2014
[6]	ICAO Doc 4444-ATM/501, Air Traffic Management: Procedures for Air Navigation Services, 2014
[7]	ICAO Doc 9573, Manual of Area Navigation (RNAV) Operations, 1991
[8]	ICAO Doc 9613-AN/937, Manual on Required Navigation Performance (RNP), 1999
[9]	Indra Sistemas S.A., EVA User Manual, 2012

AirMAGIC – Traffic Forecast based on Fast-time Simulation

Wolfgang Theeck und Björn Paul

Introduction

AirMAGIC is a traffic forecast tool based on fast-time simulation. It is developed by Airtopsoft (www.airtopsoft.com). The developer calls the tool “WIZer ATC” an abbreviation for “What If analiZer ATC”. WIZer is a plugin for the fast-time simulator AirTop enabling the reception of live data and introducing a simplified user interface. AirMAGIC works completely independent from the Air Traffic Control System in use.

The new system has been developed and tested in cooperation with the fast-time simulation experts at the DFS Research and Development Center in Langen and shall soon run operational in the DFS center in Munich. For DFS operations major benefits lie in the integration of traffic data from additional external sources than previous systems. Moreover, it allows access to another powerful forecast capability that has not yet been used online in operations for such purpose: fast-time traffic simulation.

FMP and Supervisor Working Environment

AirMAGIC is planned to assist both Supervisors and the Flight Management Positions (FMP). Currently work at these positions is supported by the so called CHMI-system (Collaboration Human Machine Interface) which integrates data from a great number of external partners. In the future AirMAGIC is expected to be the main tool for traffic forecast at DFS, while CHMI is a backup and is only used for certain tasks, which have not been implemented in AirMAGIC. The Supervisors benefit from the possibility to constantly check their sector opening schemes and test different configuration alternatives on their own, guaranteeing safe, fluent and efficient operations. Therefore AirMAGIC automatically reads the shift plans from the in house developed DFS’ rostering tool Stanly-TEP and integrates them as “Published” plans. The information from the DFS weather display (Metfrog) is also integrated in the map view, reducing the number of different tools which have to be monitored. The FMPs benefit from automated processes enabling them to perform more complex traffic analysis, testing of re-routing options, cherry picking (i.e. preferably control aircraft that allow the highest benefits for flow management) and further activities.

How does AirMAGIC work?

The core of AirMAGIC is the fast-time simulator Air Traffic Optimization (AirTop). It contains a model of the airspace e.g. the Munich Airspace and the surrounding airspaces including runways, runway dependencies, SIDs, STARs, Transitions, Letters Of Agreement, etc. realistically reproducing the air traffic within the Munich airspace. The dynamic data for the simulation, like flight plans, routings, etc. are provided through EFD and A-CDM messages which are received, processed and stored by the system. AirMAGIC also receives radar data (CAT62) in order to clearly identify, if aircraft are airborne, update the current position in flight for airborne aircraft and to automatically analyse the forecast accuracy by comparing entry counts and flight duration between the reference trajectory (radar) and the forecast trajectory from the fast-time simulation.

Additionally AirMAGIC receives data from a number of other data sources for example runway-in-use messages for Germany’s major airports. Other data sources from DFS or the Network Manager are likely to be included in the future.

Advantages of Simulating the Traffic

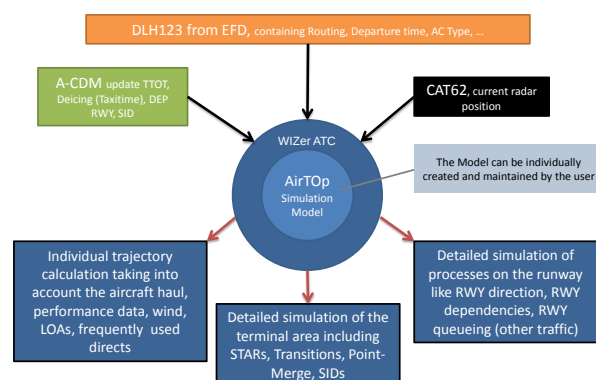


Figure 1: Advantages of a detailed simulation process

Simulating the traffic allows to answer typical “what if”-questions of flow management more easily, because the user can change the simulation model using predefined scenarios to adjust the lateral or vertical flight profile in his airspace or the timing of departing aircraft at an airport to identify the best solution for a flow management problem like overload or bad weather

conditions. At the moment the initial data source for each flight is EFD. The processing of the EFD message for a flight creates a flight plan object containing the Callsign, EOBT, Aircraft Type, Routing, Requested Flight Level and further information for a flight. All information is continuously updated by either new EFD update messages or A-CDM.

The simulation takes into account not only the live traffic, but also the current environment conditions like the runway-in-use at each airport in the simulation area, opened and closed military airspaces, the current wind, etc. If a departing aircraft is simulated, the other traffic at the same airport is also taken into account. Therefore the dependencies between arriving and departing traffic, different departure separation values including wake vortex separation and arrival separation are respected. This allows a much more realistic processing of departure peaks or modelling the influence of arrival peaks on the departure queues of an airport, but also enables to test if e.g. a Minimum Departure Interval (MDI) for certain departures could solve an overload situation in a sector. In flight, altitude restrictions on SIDs can be modelled dynamically depending on conflicting traffic, letter of agreement handling transfer conditions between sectors and control centres are also integrated into the simulation model. Since DFS maintains the simulation model itself, it can easily be improved or adapted to a changing environment.

The Graphical User Interface

The design intention for the graphical user interface was to create an easy to use application. The GUI is divided on two screens one containing a map for geo-based information display and the other screen holds menus and additional evaluation results.

The simple menu structure allows to easily navigate between different tasks. Figure 2 shows the “Standard Analysis” view. The user can switch between the tabs “East”, “West” and “Approach” representing the different sector families in the Munich airspace. For each sector family a published sector configuration exists showing the current published plan from the rostering tool. The user can define an unlimited number of different sector configurations. In the example shown in figure 2 only the configuration “mypublished” has been defined. The red colour of the tab indicates that there is an overload situation in the sector configuration. Which criteria is used depends on the settings in the menu. In this example the criteria Entry Count 1h and Occupancy 1m are used. In the combined airspace CN3 the Entry Count 1h value (upper horizontal bar) is constantly above the

threshold. The occupancy value (lower horizontal bar) is also often too high. For the combined airspace CS9 there is one situation in which the overload threshold is reached. A blue value indicates an under use in the specific airspace. For all airspaces different Entry Count and Occupancy thresholds are defined in the simulation model. Those thresholds correspond to the values used in CHMI.

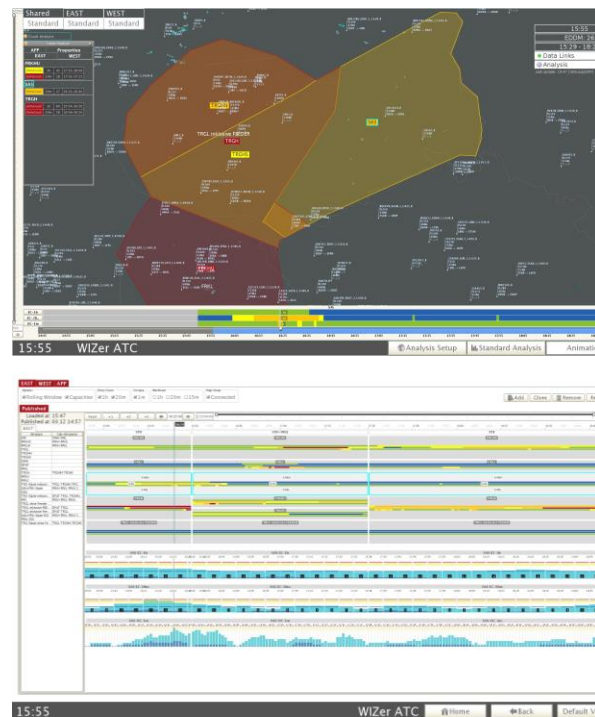


Figure 2: User interface of AirMAGIC showing the map display on top and analysis menu on the bottom

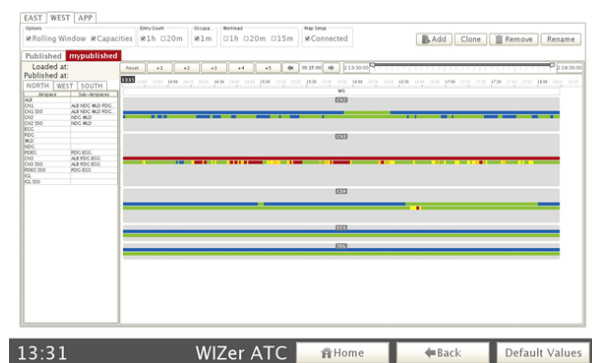


Figure 3: Standard Analysis View

Additionally AirMAGIC integrates the DFS task-based workload model. The workload threshold for one hour is 42 minutes corresponding to 70 percent of the available time of one hour, because a buffer for the controller's planning processes has to be considered.

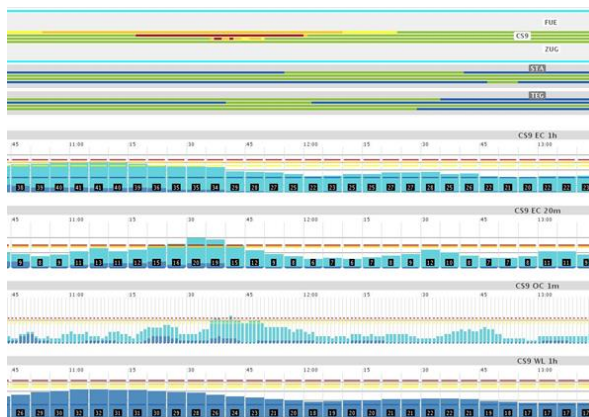


Figure 4: Detailed view for airspace CS9

If the user wants to see some detailed charts he can select a specific airspace. As can be seen in figure 4, charts for Entry Counts 1h, 20min, Occupancy and workload 1h are depicted. The user could decide to divide the airspace CS9 for the time of the overload. The values for the separated airspaces FUE and ZUG are immediately calculated and would show, if the problem has been solved. If the user wants to change the configuration he can select from a number of predefined configurations or create his own configurations by dragging and dropping the airspace bars. If an airspace should be used in single sector operations (SSO) the user can do a right-click on the airspace and select SSO. This has an influence on the sector capacity, because for a single controller operated airspace lower thresholds are applicable. Also different workload settings are used for single sector operations.

Since the traffic peak in the airspace CS9 is not very high, the SV could decide to have a look at the traffic picture. If the user selects a specific airspace the aircraft labels for the aircraft planned to enter the sector or currently located within the sector are shown in a different label. Additionally the horizontal bars already familiar from the analysis view are depicted on the bottom of the map, helping to find the traffic peaks. The user can play the animation back and forth to identify the different traffic destinations and make up his own picture about possible opponents in the traffic stream. Of course, if the forecast horizon is three hours or more, a specific conflict in the simulation between two aircraft at a certain time is not very likely to happen in reality, but the animation gives already a clear picture about the flight paths, the traffic density, crossing points and the number of vertical movements. In the animation mode the colouring of the airspaces changes depending on the colour of the selected map criteria, which are in this example entry counts 1h and entry counts 20min.

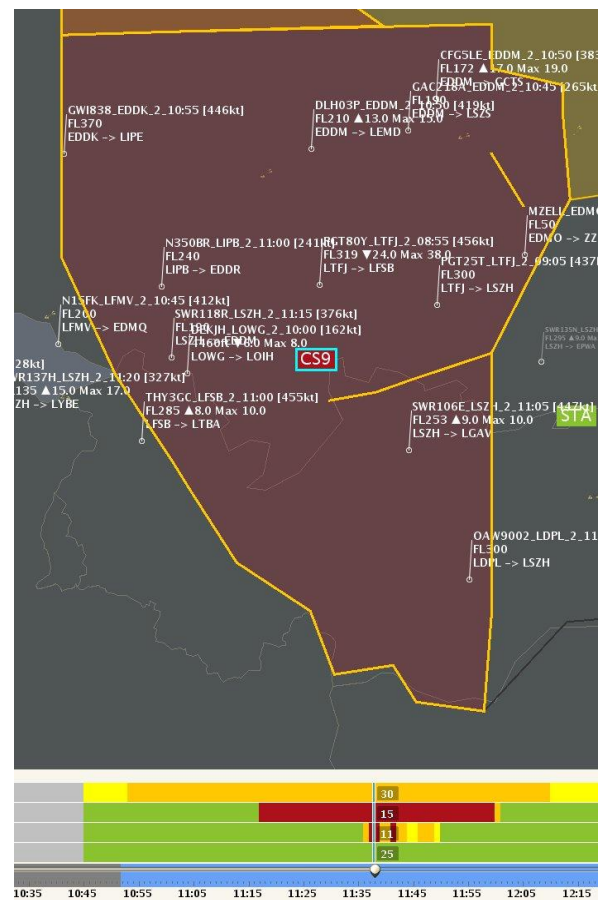


Figure 5: The forecast simulation can be watched on the map display

The label display is completely user definable regarding colour, font type, font size and type of information. A label decluttering has to be implemented yet.

The results of the latest available forecast simulation are used to colour the airspaces on the map. The user can decide if blue and green colours are shown on the map or if those thresholds are deactivated. The colouring on the map and also the figures on the left side of the map show the worst case for the selected forecast horizon, which is usually set to two or three hours. The airspace counts for each airspace opened or planned to be open within the simulation horizon are depicted on the left side.

Additionally the user can select Airport Counts for each airspace showing the number of arrivals and departures to a specific airport within the airspace. All counts can be either depicted directly on the map or -as shown in the figures- in a floating window, which can be moved around on the screen.

Since AirMAGIC calculates every minute a new rolling hour calculation for each analysis criteria, the time

frames shown do not always have to correspond to the length of the count interval (e.g. like 1h for entry counts), but can be longer or shorter. The signal colours show the user clearly, that the current sector configuration for the next hours is critically. Therefore he knows he has to take certain measures. But if all sector colours are green he immediately knows that everything is safe regarding the traffic forecast.

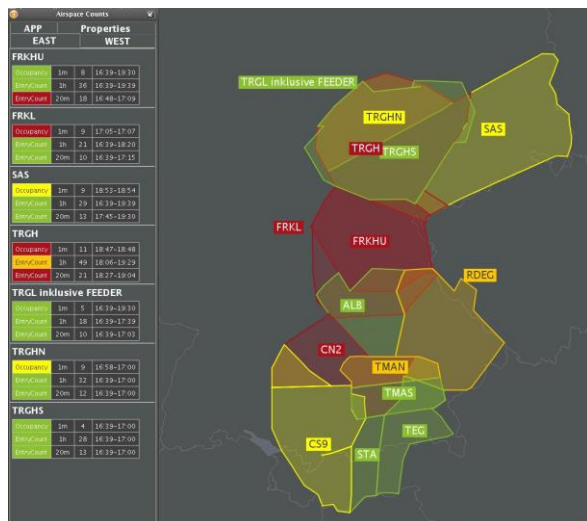


Figure 6: Colored Airspaces showing Simulation Results

Integration of Weather Display

AirMAGIC integrates the weather forecast of the DFS system Metfrog. AirMAGIC shows not only the current weather, but also the weather history of the last hours and a CB forecast for one hour. The display of the weather is synchronized with the traffic animation. This helps obtaining a clear picture of the weather development, but also eases to plan re-routings introduced by bad weather. AirMAGIC also allows to show the current wind prediction both as wind barbs and as heat maps. The wind information is also used to calculate the correct ground speed for the simulated aircraft.

Determine Complexity by Workload Calculation

AirMAGIC incorporates the DFS Workload Model. This task-based model helps assessing the complexity of an airspace within the forecast horizon. The model consists of a small number of different tasks. The task times differ between airspaces and also between control centres. All times besides the values for monitoring have been measured and analysed during campaigns in the different DFS' control centres.

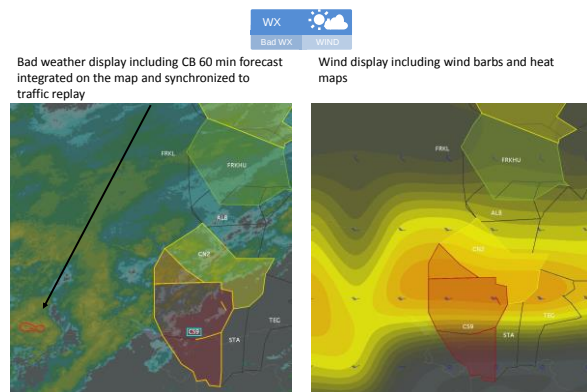


Figure 7: Integrated Weather Information

The model can be divided into Executive Controller and Planning Controller. If only one controller is working an airspace (single sector operations) this influences the number of tasks and the task durations assigned to a controller. The model also differs between the roles of an Executive Controller En-Route, Pick-up Controller or a Feeder (Director).

The example displayed in Figure 8 shows the different tasks for an En-route controller controlling two different flights using a basic setting of task times. For each aircraft a monitoring workload is calculated, but in this example only the events for the aircraft flying from south-east to the north-west are depicted as little stars. The colouring of the stars matches the different workload criteria. The first monitoring event is given when the aircraft enters the airspace. It models the identification process, checking the flight path through the sector and the strip marking. Monitoring events are regularly generated while the aircraft are flying through the sector.

If an aircraft enters or exits a sector, Radio Telephony is added. All time values are also considering the read back duration. Some aircraft entering an airspace have to be coordinated. While the coordination workload for the planning controller is high, the executive controller is mainly doing "elbow coordination" with his adjacent controllers.

If an aircraft starts climbing or descending within a sector or receives a direct to a waypoint, a clearance has to be issued before. The time duration for the clearance also includes the time for the read back. In this example another aircraft crosses the flight path from south-west to north-east. If both aircraft are not separated vertically, the lateral separation has to be analysed. If the lateral separation value is below e.g. a predefined percentage of the minimum radar separation of 5NM, the controller has to decide whether the

potential conflict could become a real conflict. Depending on the conflict type it can be more or less complicated taking this decision. If the two aircraft are closer than e.g. 120% of the minimum radar separation the conflict has not only to be monitored, but the controller would also apply conflict resolution. The workload threshold for each controller is 42min meaning that a maximum value of 42min of summed task times can be safely operated per hour.

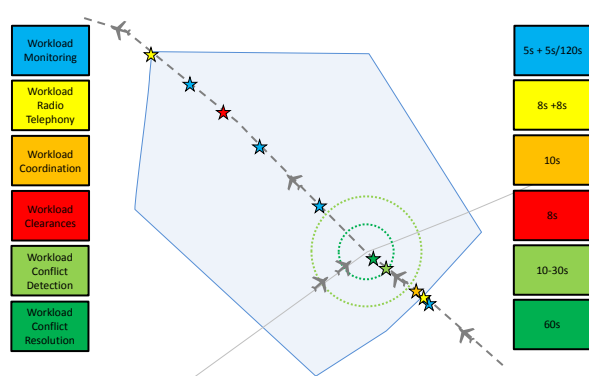


Figure 8: Task-based En-Route workload model

Results of Prototype Test Phase

The official test phase of AirMAGIC Version Zero started in November 2015. The goal was to identify whether the users would find the tool useful, how the system would work in an operational environment, how stable it was and to analyse the usability of the graphical user interface in daily business. In the first weeks of operation there have been stability issues, which could be fixed by Airtopsoft. The information display is considered beneficial, but still the users would like to change parts of the user interface. As a result a lot of smaller enhancement requests have already been implemented. Overall the FMPs and SVs like the system and believe that it delivers additional value compared to CHMI. They voted for a continuation of the development.

Possible Enhancements and Way Ahead

The simulation approach allows a large number of possible enhancements. One of the most interesting from Munich's perspective are the analysis of user defined re-routings. Other important topics are the activation of level-capping scenarios, automatic finding of minimum delay for different regulation options, long-term sector capacity analysis and intruder detection.

If the DFS' management takes the decision to continue the development of AirMAGIC, it is planned to create a

Version 1 until the end of summer 2016 and start the operations in March 2017.

Acknowledgements

This work has been produced as part of the FABEC project and published in [1].

References

- | | |
|-----|---|
| [1] | Theeck, W. & Paul, B.: "AirMAGIC – Traffic Forecast based on Fast-time". In FABEC Report Quick Win „Project ATFCM Tools“, in press. |
|-----|---|

Abbreviations

A-CDM	Airport Collaborative Decision Making
CB	Cumulonimbus
CHMI	Collaborative Human Machine Interface
EFD	Electronic Flight Data
EOBT	Estimated Off Block Time
FABEC	Functional Airspace Block European Central
FMP	Flight Management Position
GUI	Graphical User Interface
MDI	Minimum Departure Interval
SID	Standard (Instrument) Departure (Route)
SSO	Single Sector Operation
STAR	Standard Arrival Route
SV	Supervisor
TEP	Tageseinsatzplanung (engl. „daily operation schedule“)

Aircraft profile study for optimised descent procedures and recommendations to today's ATC procedures

Valentin Reinhardt (Deutsche Lufthansa AG), Ilhan Akin

Introduction

A consortium of European air navigation service providers and airlines is exploring optimised descent profiles (ODP) from upper airspace to terminal manoeuvring areas. The goal is to improve vertical flight efficiency and environmental sustainability while also considering capacity aspects in high density airspace. The project is among one of SESAR's large scale demonstration projects (LSD01.03).

The air navigation service providers of Germany (DFS Deutsche Flugsicherung, consortium leader), Austria (Austro Control), France (DSNA) and Switzerland (Skyguide), as well as EUROCONTROL's Maastricht Upper Area Control Centre (MUAC) and Network Manager aim to develop optimised descent procedures for certain approach paths to the airports of Basel, Berlin-Tegel, Frankfurt, Geneva, Munich, Strasbourg, Stuttgart, Vienna and Zurich. The project is conducting fast-time and real-time simulations as well as several cross-border demonstration exercises, developing continuous descent profiles at the highest level possible, namely cruising flight level.

The results are verified by test flights in cooperation with the airline operators and consortium members Air France, Lufthansa, SWISS and their affiliated airlines (among them HOPI, Austrian Airlines, Germanwings). Several routes have been optimised and flight trials have taken place at eight airports in Austria, France, Germany and Switzerland. The respective changes are intended to be implemented in the Aeronautical Information Publications or as Letter of Agreements. The final project results are expected to be available by September 2016 and will be published through the SESAR Joint Undertaking. The present article summarizes some of the major results and gives recommendations for procedure design.

Pre-trial: Aircraft profile investigation

In a pre-trial, aircraft profile have been investigated. This is part of the airspace user's contribution on SESAR's Optimised Descent Profile project. The optimisation of ANSP descent procedure design and calculations on aircraft's ideal descent profiles have been evaluated and

finalised and have served as input for the ODP demonstration exercise designs.

For this reason, performance data from various aircraft in different configurations in use by airlines were collected.

The outcome has to be seen as a recommendation for optimising descent procedures, applicable mainly in high density airspaces and sectors where a descent at pilot's discretion is not possible (sometimes called continuous descent procedures). With this study, procedure designers will get more information about aircraft performance and operating qualities and of operational possibilities and limitations.

Results

The results of the descent calculations show that the ideal descent from Cruise Flight Level (FL 390) starts around 110 – 135 NAM (nautical air mile, also referred as still air distance or the distance between two points inside an air parcel in nautical miles) before the intermediate approach fix for long range aircraft and around 90 – 105 NAM for short range aircraft. An often published (AIP 2016 [5]) early descent to lower Flight Information Regions (FIRs) around 200 NAM before the field is hence inefficient.

To accommodate an efficient descent for a maximum number of aircraft, a CDO procedure should contain a large portion of airspace defined by the so called window constraints.

The results were based on a set of fixed input parameters agreed by the authoring airlines, which were the same for each aircraft in order to compare the different profiles. Parameters were, for example, the aircraft's relative weight (90 % of the respective maximum landing weight), engine configuration or the

speed profile (based on an agreed Cost Index (CI)¹, which is used by the airlines to define an efficient aircraft speed profile in relation to its actual weight²). However, varying the input parameters means that the descent angles vary as well.

The second part of the study describes the aircraft system's behaviour while flying a continuous descent. Pilots normally fly aircraft by using speeds calculated by the Flight Management and Guidance System, the FMS, which is the software responsible for the connection between the navigation computer and the autopilot. The

Recommendation: focus on speed

The freedom of speed variance is diminished, if a speed constraint is published on a waypoint along the continuous descent procedure. Then, the FMS range will be limited to hold the given constraint (i.e. +5, -20 kt).

If the air traffic controller (ATCO) needs to impose further tactical restrictions and the pilot has to use selected speed mode, which removes the FMS speed range, the aircraft is unable to match the pre-calculated profile solely by adjusting speed. Therefore, other fuel

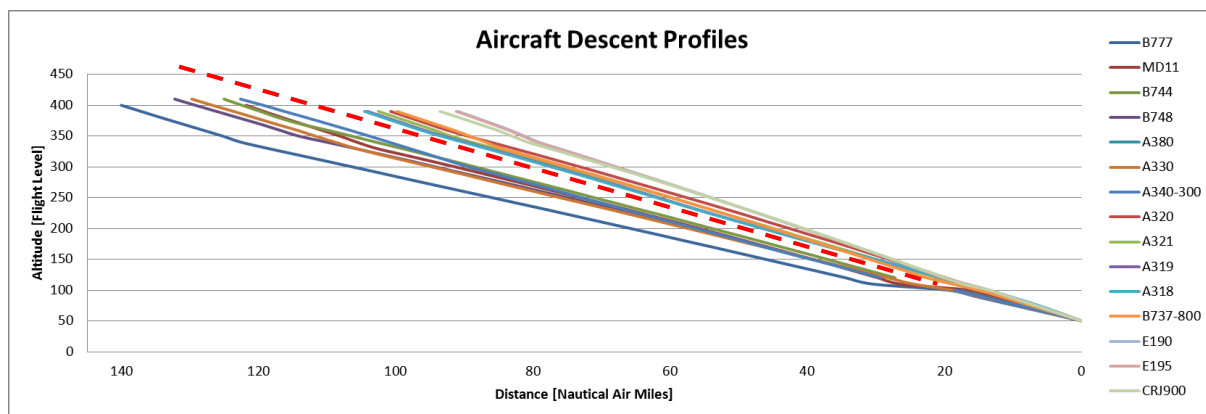


Figure 1: Descent profiles of various aircraft from cruising flight level to 5000ft. The red dashed line illustrates the separation between the different descent characteristics of long-range (below the line) and short-range aircraft (above the line).

calculated speeds are based on the entered Cost Index and current environmental factors (for example wind). The flight crew does not usually modify the CI during a flight. However, the aircraft's managed speed function allows for slight speed deviations to follow the pre-calculated optimised descent profile in the FMS, as energy trading by speed is the most efficient way for the aircraft to return to its optimum trajectory in case of a deviation. Airbus aircraft generally allow a deviation of ± 20 kt around the pre-calculated speed, but other aircraft may vary.

consuming measures like air brakes or thrust have to be applied by the pilot in order to return to the profile and pass given air traffic control altitude constraints with negative impact on CDO.

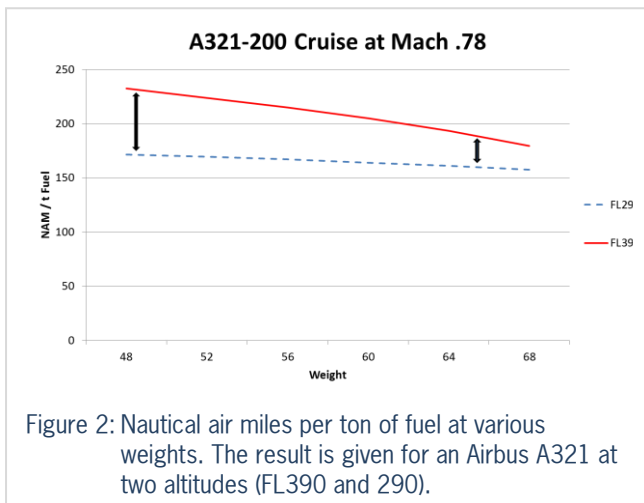
At FL 100 the aircraft's airspeed deceleration rate in level flight is about 10 kt/1 NAM (in no wind conditions). This value is considered in the descent calculations. If the aircraft is cleared to fly a descent to any altitude below FL 100, the autopilot will guide a reduced rate of descent early enough to allow for speed reduction in order to reach 250 kt (which is the international valid speed limit in the lower airspace to allow for visual identification of possible conflicting traffic) when descending through FL 100.

¹ The Cost Index (CI) represents the ideal balance between performance of the aircraft and trip fuel consumption. It is defined as $\equiv \frac{\text{time relevant costs (connecting flights, crew, etc...)}}{\text{fuel costs}}$ and is fixed by the airline individually for each flight.

² According to Airbus (1998, p. 53) a change in the Cost Index has quite a big influence on descent distances for short haul aircraft, it does not much affect the descent of long haul aircraft at CI's <50

During this deceleration phase the flight path angle of an aircraft is reduced by about 1.5 degrees (SESAR, 2011, pp. 35), which often means to cut the descent in half. The speed deceleration rate of a descending aircraft is lower than the one of an aircraft in level flight and wind variations have a big impact on the flight's ability to comply with an altitude constraint while simultaneously reducing speed. This reduced descent rate should be taken into account when applying any speed reduction. Reducing speeds close to minimum clean speeds (see next section) requires a very low rate of descent (down to ≈ 500 ft/min, depending on the aircraft type).

Generally, from an aircraft operator's point of view the number of speed restrictions should be reduced to a minimum when designing procedures. Reasons are the above mentioned CI, taking into account the airlines' time-related costs, the ability of the aircraft to regain the profile by speed trading, as well as passenger comfort and aircraft operating qualities. For these reasons, a single deceleration segment is preferable.



A speed below 230 kt should not be coded prior 3 to 4 NAM of the glide slope intercept in a CDO procedure as aircraft close to their maximum landing weight have to extend the slats and/or flaps to be able to decelerate further, which increases fuel consumption.

Recommendation: focus on altitude

There are four different types of constraints currently used for the implementation of CDO procedures. The AT, AT or ABOVE, AT or BELOW and the window restriction, the latter defining the minimum and the maximum

altitudes between which an aircraft is expected to cross a waypoint.

Without any altitude restriction the FMS creates an IDLE descent profile from cruise flight level down to the ILS glide path and advises its flight guidance part to follow it, requiring the least amount of fuel for the descent³. With constraints the FMS behaves differently, depending on the type of the aircraft.

For Airbus aircraft the FMS will command a geometric profile after the first constraint, not within a continuous IDLE path from cruise flight level. This leads to a constant descent but requires thrust in case the geometric flight path angle (FPA) is below the IDLE FPA. Other aircraft might level off at the constraint altitude and apply a new IDLE profile after reaching the next calculated descent point.

Considering this FMS behaviour, the use of AT or ABOVE, AT or BELOW and WINDOW constraints is preferable. The windows should be big enough to accommodate IDLE descent profiles for most aircraft types with respect to any mandatory deceleration phase as discussed above. Generally, the first constraint should be as low as possible.

Continuous climb versus continuous descent

The aircraft profile analyses report also discusses the question whether a continuous climb or a continuous descent is preferable in a conflicting situation.

Performance data of various airplanes show that the difference in NAM per ton of fuel between two altitudes depends on the weight of the aircraft. This difference is smaller if the aircraft is heavy, like at the beginning of the flight. As seen in figure 2, the decreasing difference of the two lines with increasing weight means that for a heavy aircraft the altitude difference is not as important as for a light aircraft. The conclusion is that in the theoretical case of a conflict between two identical aircraft, one climbing and one descending, the descending one should fly above the climbing one. This recommendation is contradictory to today's procedures and also to the implementation of major air traffic flows. The recommendation within the ODP project would be to keep the descending aircraft high and the climbing aircraft low. Certainly it has to be assured, that the relation of the overall fuel burn of the respective climbing

³ According to Schneiderer (2008, p. 315 et sqq.) the optimum descent of an aircraft is a descent with IDLE thrust.

aircraft is not remarkably higher than that of the descending one (e.g. to avoid prioritising an Embraer E190's descent over a climbing Airbus A380). This should be applied outside the terminal area. Close to the airport other negative effects are to be expected in case of changing current procedures (due to terrain, enlargement of transitions etc.).

Conclusion

Using the above results the project analysed several arrival routes within the FIR's of the local partners in order to optimize descent routes as well as validating the findings of this study.

Three findings are being presented here. In Zurich at the Arrival Route via RILAX speed limit points were shifted for a one week trial to allow for the described Energy Management by the FMS. The preliminary results from assessed flights by Swiss International Airlines show indeed an actual fuel saving.

In Frankfurt the focus was to build a CDO procedure with several window constraints, called the EMPAX transition allowing most of the aircraft an IDLE descent from Cruise Flight Level down to FL 110 prior Spessart VOR. Whereas the first routings showed some passages were not flyable for all a/c the ongoing flight trials lead to several improvements on the route which is now foreseen to be published in winter 2016.

For arrivals to Frankfurt via RIMET the focus was on a flexible division of departing and arriving traffic using the findings of the CCO (Continuous Climb Operations) versus CDO as described above. First results show a potential for fuel savings.

During the trials some issues had to be dealt with, hampering an optimized descent, on ANSP side as well as airside. These issues and possible resolution are discussed in the final project report which is going to be delivered at the end of 2016.

Regarding SESAR the goal of an optimized descent as by definition of the ICAO should be pursued. It is generally possible to apply an optimized descent profile with any speed flown. The integration of XMAN into the Arrival planning is therefore beneficial, as the descent is planned in the Cruise phase.

Furthermore, it is expected that FMS calculations (e.g. i4D⁴) will be reliable for the prediction of descends and

the CDO induced capacity cutback around the airport will no longer be a factor.

References

[1]	Airbus Customer Services (1998) "Getting to grips with the Cost Index", Issue II. Retrieved June 8th, 2016 from http://www.smartcockpit.com/aircraft-ressources/Getting_To_Grips_With_The_Cost_Index.html
[2]	Schneiderer, J. (2008). Angewandte Flugleistung. Berlin: Springer-Verlag
[3]	SESAR (2011). DEL 05.06.02-D03 Airborne Recommendations for CDA Procedure Design
[4]	Bowen, D. (2014). The SESAR concept and i4D. Retrieved June 10th, 2016 from http://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/events/atcglobal2014/ATC-2014-i4D.pdf
[5]	AIP Germany, ENR 3.3- T, page 8, AIRAC, Effective: 28 APR 2016

Abbreviations

a/c	Aircraft
ANSP	Air Navigation Service Provider
ATCO	Air Traffic Controller
CCO	Continuous Climb Operations
CDO	Continuous Descent Operations
CI	Cost Index
DSNA	Direction des Services de la navigation aérienne [French Air Traffic Control Service Provider]
FIR	Flight Information Region
FL	Flight Level
FMS	Flight Management System
FPA	Flight Path Angle

⁴ For more details on i4D concept please refer to [4]

MUAC	Maastricht Upper Area Control Centre
NAM	Nautical Air Mile
NM	Nautical Mile
ODP	Optimised Descent Procedures
SESAR	Single European Sky ATM Research Programme
XMAN	Cross Border Arrival Management

Innovation im Fokus Informationen zu Forschung, Entwicklung und Validierung

Innovation im Fokus erscheint halbjährlich und beschäftigt sich bevorzugt mit Informationen zu Forschung, Entwicklung und Validierung mit Beteiligung DFS Deutsche Flugsicherung GmbH. Diese Ausgabe ist elektronisch im Internet (www.dfs.de > Flugsicherung > F&E > Service) sowie über das DFS Intranet verfügbar. 80 Exemplare werden in gedruckter Form aufgelegt.

Wie auch der Vorgänger-Zeitschrift „TE im Fokus“ wurde dieser Zeitschrift von der Deutschen Bibliothek eine ISSN (International Standard Serial Number) zugeteilt:

Printversion: ISSN 2198-8951 (vormals: 1861-6364)

Internet-Version: ISSN 2198-896X (vormals: 1861-6372)

Datum dieser Ausgabe: 04.07.2016

DISCLAIMER

Alle hier erwähnten Warenzeichen sind Eigentum ihrer jeweiligen Besitzer. Warenzeichen werden nicht ausdrücklich als solche gekennzeichnet. Aus dem Fehlen von Urheber- oder Markenrechtskennzeichen darf jedoch nicht geschlossen werden, dass es sich um einen nicht geschützten Namen oder um eine nicht geschützte Marke handelt.

COPYRIGHT

Dieses Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der DFS Deutsche Flugsicherung GmbH unzulässig und wird zivil- und strafrechtlich verfolgt. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Copyright © 2016 by DFS Deutsche Flugsicherung GmbH - Weitergabe sowie Vervielfältigung dieser Unterlage, Verwertung und Mitteilung ihres Inhalts nicht gestattet, soweit nicht ausdrücklich zugestanden. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadensersatz. Alle Rechte vorbehalten, insbesondere für den Fall der Patenterteilung oder GM-Eintrag.



Impressum

Innovation im Fokus

Informationen zu Forschung,
Entwicklung und Validierung

Herausgeber:

DFS Deutsche Flugsicherung GmbH

Günter Achatz, Ralf Bertsch,
Bereichsleitung Planung & Innovation

Redaktion:

Dr. Konrad Hagemann
Tel. +49 (0)6103 707 5745
E-Mail: konrad.hagemann@dfs.de

Stefan Tenoort
Tel. +49 (0)6103 707 5769
E-Mail: stefan.tenoort@dfs.de

Dr. Morten Grandt
Tel. +49 (0)6103 707 1139
E-Mail: morten.grandt@dfs.de

Oliver Haßa
Tel. +49 (0)6103 707 5762
E-Mail: oliver.hassa@dfs.de

Iris Filbrich
Tel. +49 (0)6103 707-1131
E-Mail: iris.filbrich@dfs.de

Anschrift der Redaktion:

DFS Deutsche Flugsicherung GmbH
Redaktion Innovation im Fokus
Am DFS-Campus 5
63225 Langen
E-Mail: forschung@dfs.de

Nachdruck nur mit Genehmigung.

