



2/08

15.12.2008

ISSN 1861-6364
(Printversion)

ISSN 1861-6372
(Internet-Version)

Informationen aus dem Bereich Forschung und Entwicklung der DFS Deutsche Flugsicherung GmbH

In dieser Ausgabe:

- Towards SESAR Performance Targets – The Super-Highway Approach
- VUSIL Flugversuche erfolgreich abgeschlossen
- The ACAS Monitoring Project
- Zusammenfassung der Ergebnisse im Projekt MSP-D/L
- Modellierung, Verifikation und Validierung der Flugleistung am Beispiel der Echtzeitsimulation



DFS Deutsche Flugsicherung

Inhalt

Dr. Matthias Poppe, Thomas Hellbach

Towards SESAR Performance Targets – The Super-Highway Approach..... 2

Andreas Udovic

VUSIL Flugversuche erfolgreich abgeschlossen 11

Steffen Marquard

The ACAS Monitoring Project..... 14

Stephan Herr, Dr. Andreas Herber

Zusammenfassung der Ergebnisse im Projekt MSP-D/L 17

Oliver Haßa

**Modellierung, Verifikation und Validierung der Flugleistung
am Beispiel der Echtzeitsimulation..... 24**

Impressum 35



Der Bereich F&E der DFS Deutsche Flugsicherung GmbH
ist nach DIN EN ISO 9001:2000 zertifiziert.

Towards SESAR Performance Targets – The Super-Highway Approach

Dr. Matthias Poppe, TEA, Thomas Hellbach, CC/FD

Abstract¹

This study and the envisaged solutions address the handling of continuously growing traffic volume in one of the most challenging European airspace environments and aims to provide evidence that part of the envisaged capacity growth can be achieved by airspace modifications that can be implemented in the near future.

I. Objective and Motivation

The Single European Sky (SES) legislation launched by the European Commission in March 2004 has set the political frame for actions in Europe to unlock viable growth in air transport [1].

The SES ATM Research (SESAR) programme is the European ATM modernisation programme. It will combine technological, economic and regulatory aspects and will use the SES legislation to synchronise the plans and actions of the different stakeholders and federate resources for the development and implementation of the required improvements throughout Europe [2].

The ATM Target Concept [3] defines a performance-oriented approach, i.e. it aims to deliver well defined performance targets expressed in terms of Key Performance Areas (KPA). One of the most challenging KPAs is capacity. It is divided into three focus areas: airspace, airport and network capacity. The initial indicative design target for capacity deployment is that the ATM system can accommodate by 2020 a 73% increase in traffic [4] (annual IFR traffic growth in the European network from 2005 baseline).

In order to evaluate the theoretical potential of the Target Concept regarding en-route capacity, some quantitative assessments were carried out in SESAR [5]. They are based on a number of assumptions and prerequisites:

1. Controller workload per flight will remain an important factor in determining capacity, in the sense that capacity is assumed to peak out whenever total workload reaches a saturation level;
2. The assessment relates to high-density airspace, i.e. a "most challenging environment" from a capacity – or lack of capacity – perspective, where new operational steps will be needed the most.
3. The controller workload factors are characterised as decision-making, monitoring, and execution / coordination.
4. This is a 2020 snapshot based on full "equi-page" and ATM capability deployment. Assumptions regarding equipage rates etc. across the intervening years are key influences on the capacity and hence productivity profiles.

This assessment was carried out with an empiric algorithm and numerical calculations. The judgement of improvements is based on the shared belief of airspace experts.

It is obvious that further validation activities will be necessary in order to increase the credibility, viability and accuracy of the obtained results [6]. Moreover, the assumptions need to be examined carefully. One of these early validation activities was carried out within the framework of the project Super-Highway co-funded by the European Commission in the 6th Framework Research Programme [7]. It is based on the ideas of the "Integrated Use of Airspace" scenario as outlined in AIAA-2007-7876 [8].

The objective of this study is twofold: on the one hand, it aims to provide some evidence that part of the envisaged capacity growth can be

¹ Der vorliegende Beitrag wurde von den Autoren auf dem "26th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences Including The 8th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (ICAS / ATIO 2008)" veröffentlicht. Er beschreibt die Ergebnisse der Schnellzeitsimulation des EU-Projektes "Super-Highway".

achieved by airspace modifications that allow a capacity increase for current procedures and can be implemented in the near future. On the other hand, the solutions should be in line with future operations and procedures in order to support e.g. ASAS applications.

It was decided to use an airspace simulation tool (Total Airspace and Airport Modeller TAAM) in addition to the SESAR performance assessment based on expert judgement [5].

II. Problem Definition

The example and the envisaged solutions address the handling of continuously growing traffic volume in one of the most challenging European airspace environments, the upper information region Rhein (EDUU).

This part of the core area of Europe is characterised by very high traffic figures and high traffic densities. In order to meet the SESAR capacity target, significant improvements have to be made.

In this context, Figure 1 shows the current situation of air traffic density in Europe on Sunday, 09/17/2006. Each square represents a block of airspace (20x20 Nautical Miles) with densities varying between 200 flights (light green) and 450 flights (red) on this day. It can be seen that the highest densities are in the core area of Europe between London, Paris and Frankfurt.

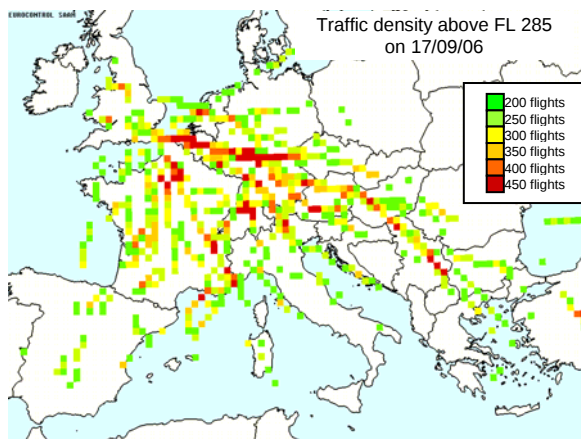


Figure 1: Traffic Density Example

In these high-density areas, the SESAR Operational Concept envisages a fixed route structure in order to provide the required capacity. Solutions that mainly strive for capacity provision are presented and discussed.

III. SESAR Airspace Organisation

All future ATM improvements including airspace modelling and optimisation should be in line with the SESAR solutions. The ATM Target Concept [2, 3] is based upon being able to use airspace in a highly flexible manner. It will be treated as a single continuum, minimising the need for traffic segregation and managing trajectories with only a minimum of distortion due to the use of pre-determined airspace and/or route structures.

In general, airspace will be designated by two categories established and organised in a service-oriented approach:

- “managed”, where the ATM service provider is the pre-determined separator and all traffic is known to the air traffic system.
- “unmanaged”, where the responsibility for separation lies solely with the pilot.

The use of unmanaged airspace goes hand in hand with advanced operational self-separation procedures. They require, among other things, significant upgrades in airborne equipment. Therefore, implementation does not seem to be realistic in the next years. Here, the focus is on improvements in the managed airspace because it is recognised that in especially congested airspace the trade-off between flight efficiency and capacity will require a fixed route structure to facilitate the required capacity.

Fixed route procedures will be suspended when traffic density no longer requires their use. Where major hubs are close, the entire area below a certain level will be operated as an extended terminal area, with route structures possibly extending also into en-route airspace to manage the climbing and descending flows from and to the airports concerned.

It should also be noted that airspace should not be segregated on the basis of equipage [9].

IV. The Super-Highway Approach

In particular, this study aims to decrease the relative traffic load on certain sections of the present air traffic service (ATS) route UL603² as a major enabler of providing additional capacity.

² The UL603 represents a European high-density route with a remarkable complexity at its numerous intersections. The route starts in the United Kingdom,

Two specific high-traffic density problem areas have been identified along the highway. They are shown in Figure 2.

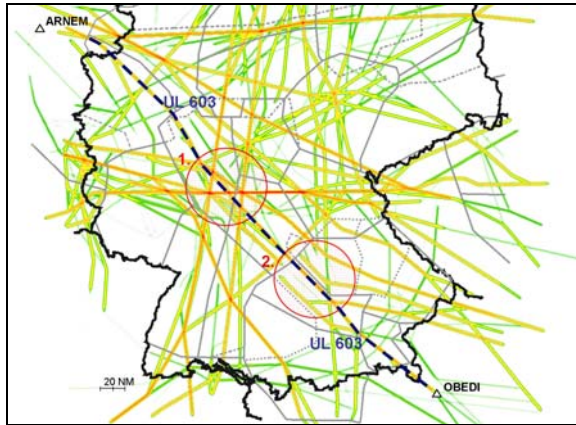


Figure 2: Two Problem Areas Southern Germany

The traffic congestion in the first area around Frankfurt is the result of major intersections. In times of high-traffic load there are neither enough levels nor enough airspace to allow departures from surrounding airports (e.g. Cologne, Düsseldorf) to enter the upper airspace on the UL603. They have to stay at uneconomical low altitudes until they have passed this problem area. Suitable entry and exit procedures have to be designed and implemented. An additional problem is the preliminary integration of several traffic flows which are then distributed later in area 2 either to the East or to the South according to their final destination.

The second area highlights a problem of congested upper airspace routes. The need to separate Munich and Stuttgart inbounds from level flights means that problems cannot be solved early on and leads to an accumulation of upper airspace intersections at the succeeding part of the UL603. The proposal aims to evaluate if these flows can be separated by additional lanes in order to achieve the required capacity increase.

Previous simulations have shown that in some sectors in these areas the controller workload during peak periods is above the tolerable

crosses Maastricht and German airspace, Austria and the Balkan states up to the northern part of Greece. It contains European traffic as well as intercontinental traffic e.g. to South East Asia.

threshold even today. More than 65 aircraft movements per hour were observed. That means that flow control measures have to be applied which may result in ground delays for the concerned flights. Therefore, innovative solutions that are in line with SESAR have to be found.

Two basic questions should be answered:

1. How can the traffic at the major intersections be reduced to an acceptable and workable level?
2. How can additional lanes be integrated into the airspace structure?

The basic idea is to introduce a second parallel lane to the ATS route UL603 between Frankfurt and Munich and to avoid a single merge point.

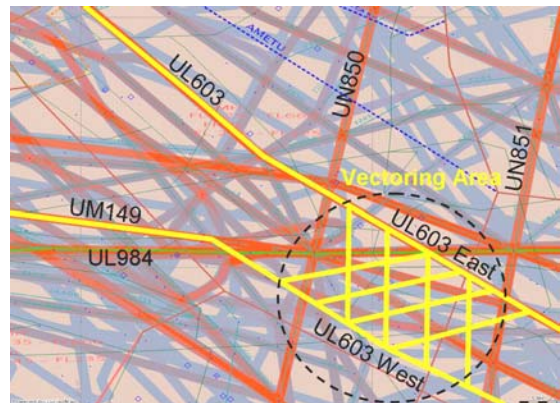


Figure 3: Junction Design

A parallel lane (see Figure 3, UL603 West) can only be established if enough airspace is available. The additional lane should also be unidirectional. Horizontal separation between these lanes is assumed to be 8 Nautical Miles (with standard separation of 5 Nautical Miles horizontally and 1000 feet vertically). This measure will allow a flexible allocation of traffic to either lane and a potential reduction of the traffic density. This implies that the number of potential conflict sections for crossing traffic will be doubled. It does not cause additional problems because normally crossing traffic is separated vertically³. Simulations have shown that the number of conflicts created by crossing traffic does not exceed 5% of the total workload of the respective sector. The second lane also reduces the number of compli-

³ It is assumed that the semi-circular cruising level system or the Flight Level Allocation Scheme (FLAS) is applied.

cated merging procedures and enables more aircraft to fly at their requested flight levels. This can be achieved by a smart distribution of traffic on both lanes. The actual distribution depends on the flight path beyond our area of interest in order to avoid a repeated interaction of flights.

The problem of a single merge point is addressed by the introduction of a junction area. This principle is usually applied in lower airspace in the transition area to final approach of major airports. The grid of yellow lines does not represent a new ATS route system but shows options of altering vectors within this junction area.

V. Analysis Methodology

The simulation setup is based on a scenario comparison. The intended simulation procedure starts with the setup of a baseline. Then, a step by step optimisation led to the development of a new airspace structure including Super-Highway (SPH) segments. Therefore three scenarios were built, the Baseline, Scenario A, and Scenario B.

- The Baseline consists of the present airspace structure including its procedures, restrictions and agreements. The Baseline aims to analyse the current situation in the area of interest. This area accommodates a European main traffic flow, the UL603. The UL603 is a highly loaded upper airway. The Baseline analysis is presented to controllers and operational experts of the respective area. The experts are introduced to the SPH concept and were asked to develop ideas either to solve current operational problems or to prepare the beneficial integration and utilisation of the SPH segments. Preferably one is done with the help of the other.
- Scenario A is based on the same traffic sample used in the baseline but has a different airspace structure. This airspace structure accommodates SPH lanes but the advanced operational procedures are not implemented yet. This is planned for Scenario B. The reason for that approach is to measure the impact of the airspace and air route changes alone in order to:
 - answer if and to which extent further changes are necessary, as it was not tolerable that present sectors or crossing traffic get overly stressed,

- determine the present status after the changes but prior the SPH integration in order to determine accurately the impact in Scenario B.

The final Scenario A represents the last version of a step by step improvement process which included repeated simulations and workshops. They helped to prepare the SPH integration without disturbing the consistency of the airspace structure.

- Scenario B contains the SPH segments and adapted working procedures. The results show the impact of the SPH implementation, i.e. a remarkable decrease of workload in sectors which are intersected by the SPH segments.

VI. Results

The evaluation of the potential in terms of capacity and flight efficiency has shown significant improvements [10]. The objective was to demonstrate that capacity can be improved and that the controller workload remains at an acceptable level, i.e. does not exceed the tolerable threshold.

The SESAR assumptions mentioned in the beginning (refer to section 1) have been addressed and/or improved because:

1. Controller workload per flight uses a sophisticated algorithm; the tool makes it possible to provide results for average and peak workload (TAAM)
2. The chosen high-density airspace is representative for the European core area
3. The controller workload is determined with the following factors: number of movements, conflict density and geometry, coordination effort
4. Three scenarios were considered: baseline today (as reference), scenario A without additional equipment and scenario B with full equipment and advanced operational procedures

VI.1. Results Baseline

The baseline scenario consists of the current airspace structure, present procedures and has no Super-Highway implemented. The analysed sectors are located in the UIR EDUU (Upper

Flight Information Region Rhein in Germany). The baseline results show that the average load of all sectors is slightly below the acceptable average threshold, while two sectors even exceed the peak threshold area.

Traffic congestion at BOMBI (yellow arrows Figure 4) is the result of a major intersection where several traffic flows merge. Operational experts state that in times of high traffic load there are neither enough levels nor enough airspace to allow departures of surrounding airports (more or less below BOMBI) to enter the upper airspace on the UL603.

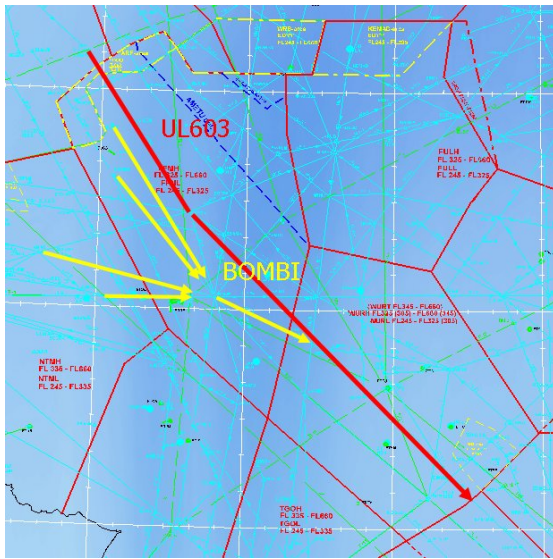


Figure 4: Traffic Flows at BOMBI

The following workload diagrams show peak figures (orange), average figures (blue) and their respective desired area (horizontal lines of same

colour). The 'workload' reflects the average and peak load of the controller team induced by traffic in their area of responsibility. The shown DFS workload is calculated by four factors:

- number of movements and flying time,
- number and type of conflicts,
- coordination events,
- and vertical movements.

The results of analysed baseline sectors of the UIR EDUU (Rhein) show that the average load of all sectors is slightly below the blue average-threshold. However, the peak workload exceeds in three sectors the orange peak threshold area (EDUUFFMB, EDUUFFMM and the EDUWURB).

VI.II. Results Scenario A

The results of Scenario A show the impact of a changed ATS route structure. Scenario A was developed in several workshops by expert groups who were introduced to the SESAR concept and who knew the operational difficulties of the area of interest. The objective was to prepare junctions and a route structure for the Super-Highway implementation. Those changes should not have a negative impact on the workload. The results of Scenario A do not show a negative impact as intended but a decrease in conflicts compared to the baseline scenario.

First the simulation team needed a perception of how the Super-Highway could be operated. This concept of operation ought to be designed in

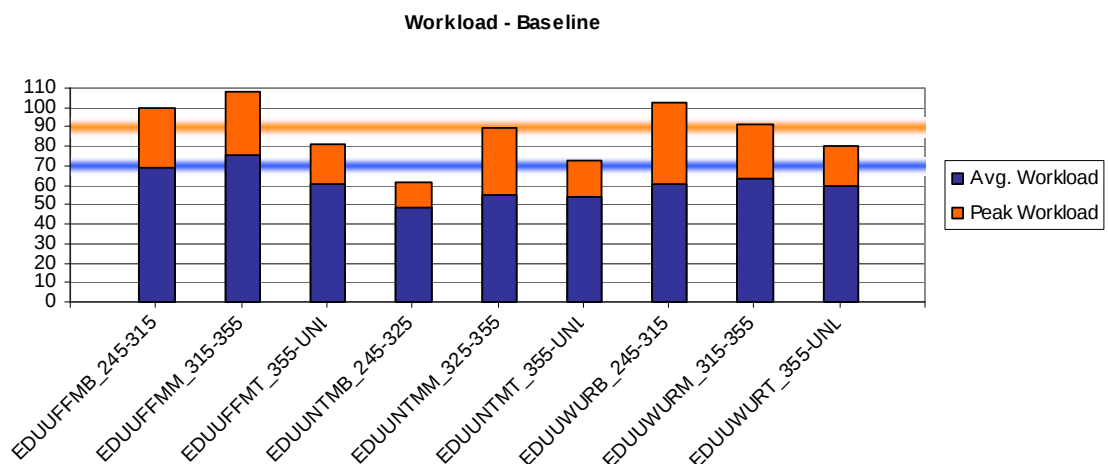


Figure 5: Workload Baseline with 2005 traffic

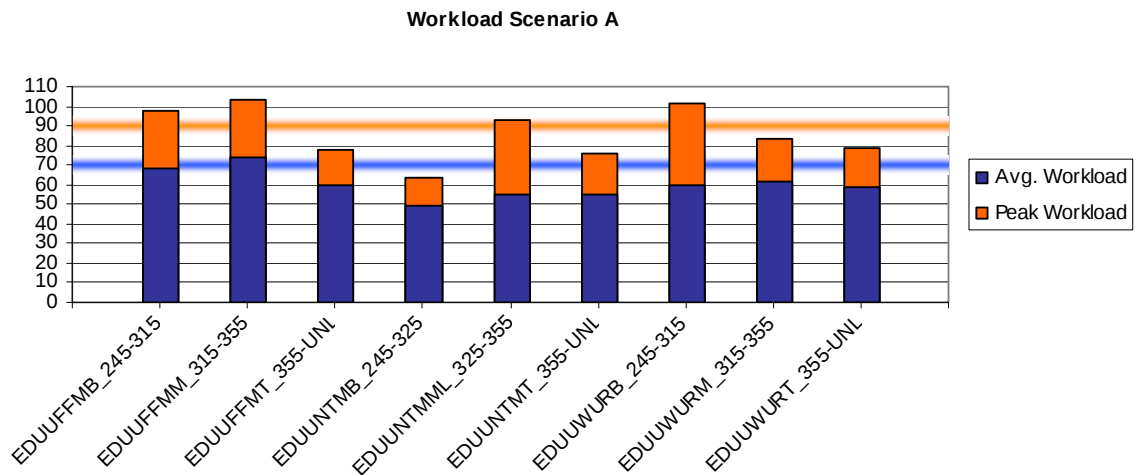


Figure 6: Scenario A with 2005 traffic

regard to current procedures and therewith according to the 'close to transfer' approach by DFS. Therefore, the SPH concept was introduced to air traffic controllers and to other operational experts in five workshops. Those workshops led to several ideas on how to improve the above mentioned problems in the area of interest and to ideas on how to implement the SPH lanes. The first strategy of the airspace redesign was to avoid the traffic cumulating at BOMBI. Therefore, departures from EDDK (Cologne) and EDDL (Düsseldorf) to the east were re-directed via SOGMI in order to avoid BOMBI, while ensuring an early crossing beneath the UL603 before the vertical profiles would match (refer to figure 7).

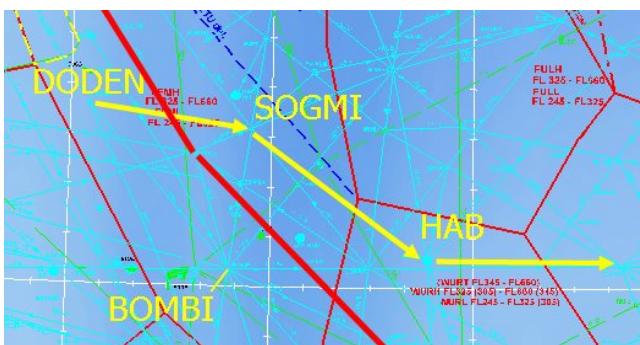


Figure 7: First step of SPH implementation

The second strategy to reduce the load of BOMBI was to establish a second lane parallel to the UL603 (red arrow). This solution was particularly useful in regard to the following SPH implementation. At present inbounds to Munich are descending right next to the UL603 on the west-

ern side. Those inbounds represent a flow too important to be redirected to their disadvantage. Therefore, the new second lane was established even further in the west, but still intersecting the original sectors (yellow arrow pointing to NOMBO, Figure 8). Departures from EDDK and EDDL via DODEN to the southeast were redirected around BOMBI to follow the new lane to NOMBO. The same applied for flights from UK and EHAM (Amsterdam) via AMASI and for flights from EBBR (Brussels) via UBIDU.

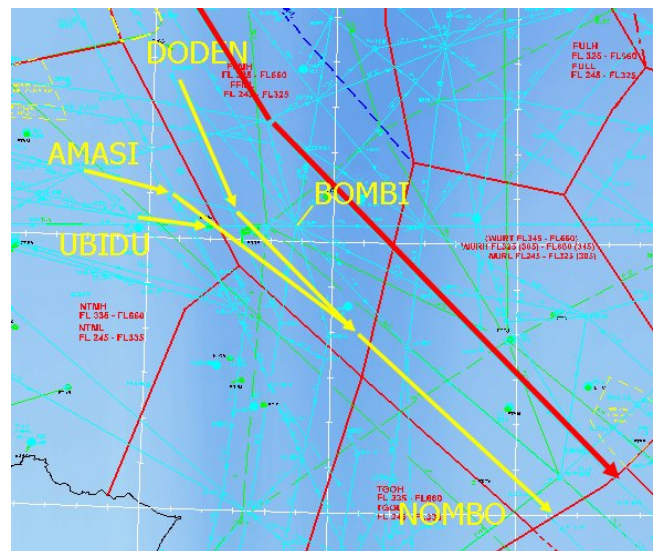


Figure 8: Second step of SPH implementation

The broken lines in the picture below (refer to Figure 9) indicate that traffic of every direction was taken on both SPH lanes. The traffic was

distributed by looking their flight path beyond Munich.

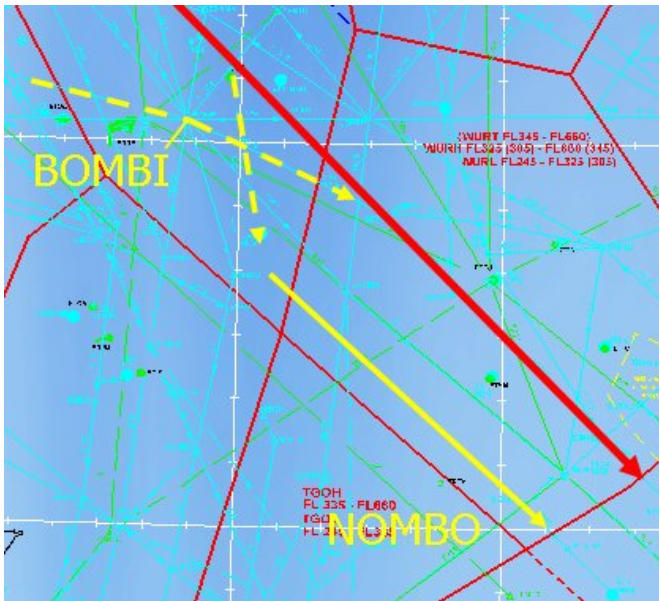


Figure 9: Final step of SPH Airspace Preparation

Those flights heading to the south (e.g. via LIZUM) were taken on the western track while those heading to the southeast (e.g. via EGG) were taken on the eastern track. These measures led to fewer conflicts in the MUNICH UIR by preventing that flights interact again which once before were separated.

VI.III. Results Scenario B

Scenario B shows the impact of the full implementation. It shows the result and impact of the SPH implementation and the assumed way of operation (refer to Figure 9).

Prior the implementation expert groups were interviewed on how to implement and operate a SPH. The assumed way of operation was:

The Executive Controller (EC) remains responsible for the SPH segment within his area of responsibility. But standard tasks will be reduced by technical enablers like e.g. CPDLC. The EC still cares for conflicting trajectories within his

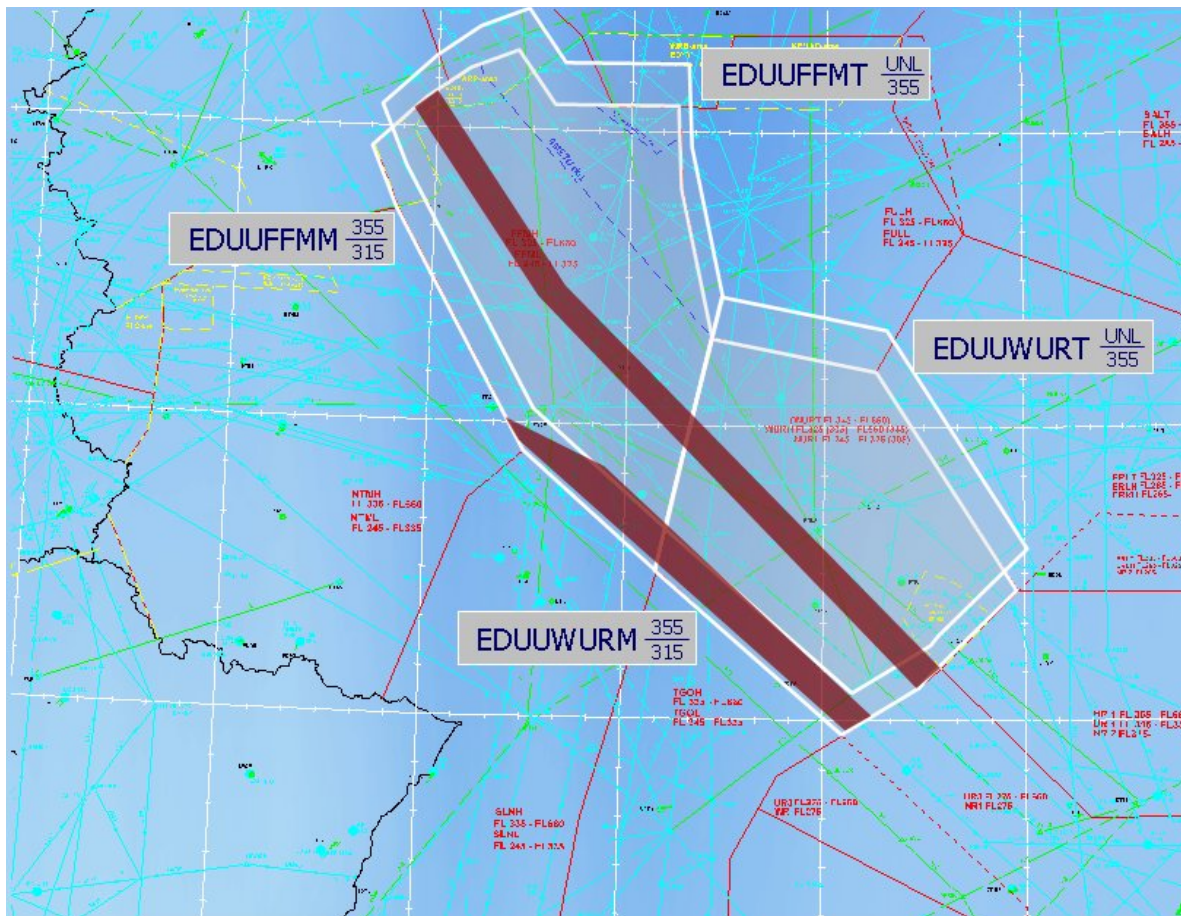


Figure 10: Super Highway Structure Scenario B

area of responsibility with one exception. Neither the EC nor the Multi Sector Planer will solve potential conflicts of flights which are established on the Highway segments. This does not apply for traffic crossing the SPH segments. Separation of flights on the SPH with crossing flights remains with the responsibility of the controller team of the respective sector.

The SPH segments are carefully integrated into the airspace structure. Entry and exit procedures are coordinated by the EC who ensures a conflict-free entry and exit.

The results show a remarkable decrease in workload in sectors which are intersected by the Super-Highway segments. The evaluation of this concept shows promising results:

- The controller workload reduction leads to a gain of capacity. The exact quantification of the capacity gain depends on the composition of traffic and its complexity. As can be deduced from Table 1 and using the same approach as in [5] the gain will be around 20%.
- The workload per aircraft was reduced by the application of ASAS sequencing procedures and data link communication within the Super-Highway segments. This was achieved without causing penalties for crossing traffic such as vertical or lateral detours.

Sector name	Reduction of peak workload	Reduction of average workload
EDUUFFMM (FL315-355)	25 %	17 %
EDUUFFMT (FL355-UNL)	6 %	13 %
EDUUWURM (FL 315-355)	19 %	20 %
EDDUWURT (FL 355-UNL)	21 %	18 %

Table 1: Workload Reduction

Also the cost-effectiveness of aircraft carriers is improved by the application of this concept. For example, Cologne (EDDK) and Düsseldorf (EDDL) departures have access to higher flight levels earlier because of smarter planning and because traffic congestion at the major intersections will be resolved sooner.

IV. Conclusion

The introduction of parallel and independent lanes as well as vectoring areas in upper airspace can be regarded as support for future operational procedures such as Airborne Separation Assistance System (ASAS) applications. The vectoring areas provide enough room for Enhanced Sequencing and Merging Operations [11] while the traffic on the independent additional lanes can be used for in-trail or station-keeping procedures.

These applications could further alleviate the workload of the controller within the framework of the SESAR Operational Concept [3] The solutions are also in line with more long-term oriented

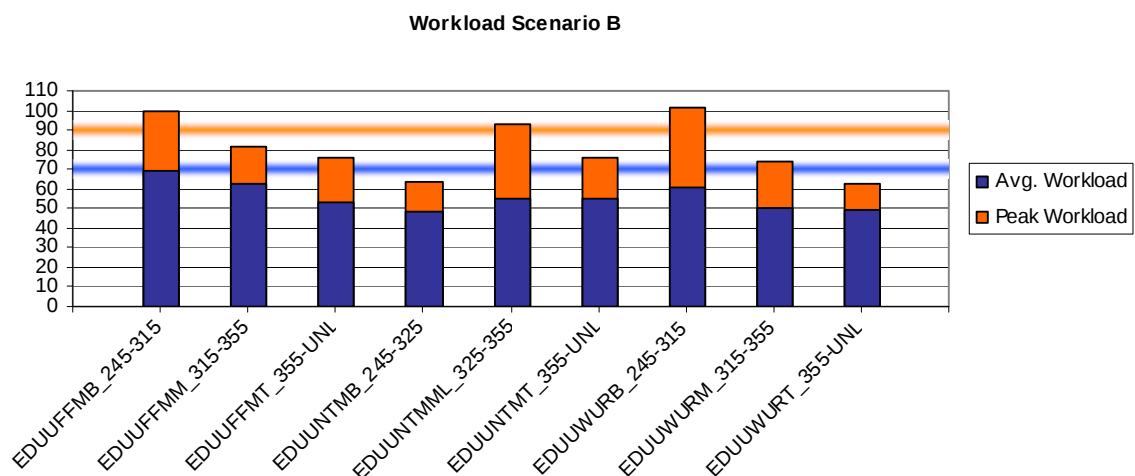


Figure 11: Workload Scenario B with 2005 traffic

research activities. Therefore, it is expected that it will be possible to accommodate even substantially higher traffic volumes in the future.

References

1. SESAR Definition Phase, Deliverable 2, The Performance Target, DLM-0607-001-02-00a, December 2006
2. SESAR Definition Phase, Deliverable 3, The ATM Target Concept, DLM-0612-001-01-00, July 2007-07-23
3. SESAR Definition Phase, Concept of Operations, DLT-0612-222-02-00, November 2007
4. SESAR Definition Phase, Performance Objectives and Targets, RPT-0708-001-00-02, November 2007
5. SESAR Definition Phase, Compute and map Operational and Airspace KPI's, DLT-0706-231-00-03, November 2007
6. Donohue, George L. (2001). Air Transportation Systems Engineering, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics. ISBN 1-56347-474-3
7. European Commission, 6th Framework Programme, Development of an Operationally Driven Airspace Traffic Structure for High-Density High-Complexity areas, Project Super-Highway, Contract Number TREN/06/FP6AE/S07.56057/019544
8. AIAA-2007-7876 Solutions within the Super Highway Project Allowing Integrated Use of Airspace of Both, Civil and Military Users, A. Prieto, ISDEFE, Madrid, Spain, 7th AIAA Conference, September 2007
9. ASAS TN2 Workshop 5 Report, ASAS-TN2/WP1/WS5/Report/0.2, 19/11/2007
10. Results of Airspace Assessment, Final Report Super-Highway, XX-XX, under preparation
11. CARE/ASAS Activity 5, Description of a first package of GS/AS applications, Version 2.2, September 20, 2002

VUSIL Flugversuche erfolgreich abgeschlossen

Andreas Udovic, TEH

Einleitung

Ziel des vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung finanzierten Projekts VUSIL (*Validierung von UAS zur Integration in den Luftraum*) ist die Integration von unbemannten Flugzeugen (UAS - Unmanned Aircraft System) in den kontrollierten Luftraum. „See and Avoid“ (sinngemäß „aufpassen und vermeiden“) ist das Konzept, auf welchem die Kollisionsvermeidung beruht. Dieses Konzept stellt allerdings die größte Herausforderung für die Integration von UAS dar. Dies gilt insbesondere für die Lufträume D und E (VFR Verkehr).

Im Juni/Juli 2008 wurden dazu am Flugplatz Manching und im Sperrgebiet E-DR 138 Flugversuche mit dem UAS „LUNA“ der Firma EMT erfolgreich durchgeführt.

Konzept

Um die Problematik „See and Avoid“ zu lösen, wurde von Seiten der DFS Deutsche Flugsicherung GmbH (DFS), Bereich Forschung und Entwicklung ein Integrationskonzept erarbeitet, welches auf einer Transponder gestützten Lösung beruht. Basierend auf einer Transponderausrüstung, sowohl des UAS als auch des umgebenden Verkehrs, konnte ein System bereitgestellt werden, das den UAS-Bediener in die Lage versetzte sein Fluggerät sicher durch den Ver-

kehr zu steuern. Das bereitgestellte System umfasst zum einen die Radardarstellung des Flugverkehrs im Versuchsgebiet durch das DFS ATC-System „Phönix“ (s. Abb. 1) und eines prototypischen „Sense and Avoid“-Systems der Firma ESG (s. Abb. 2).

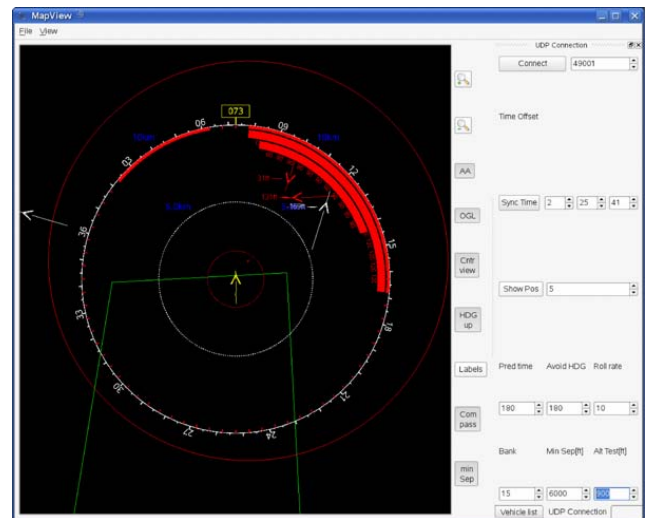


Abb. 2: Darstellung des „Sense and Avoid“-Systems der Firma ESG



Abb. 1: Luftlagedarstellung auf dem Phönix System der DFS (LUNA Callsign: DBFSZ)

Da in den Flugversuchen keine realen Flugzeuge als umgebender Verkehr genutzt werden konnten, wurden diese Flugzeuge durch den Advanced Function Simulator (AFS) der DFS simuliert.

Die dazu notwendige Infrastruktur wurde vom Simulationscenter des DFS Forschungsbereichs bereitgestellt. Der Simulator produzierte die Radardaten der umgebenden Flugzeuge, welche dann durch das Phönix System der Abteilung CNS dargestellt wurde. Gleichzeitig wurden die live Radardaten der Luna ebenfalls in das System eingespeist, so dass sowohl die simulierten als auch die live Radardaten verarbeitet und den UAV Bediener dargestellt werden konnten.

Flugversuche

Die LUNA startete auf dem Absetzplatz der „Wehrtechnischen Dienststelle“ (WTD 61) ca. 1 Kilometer südlich der Startbahn des Flugplatzes

Manching mit Hilfe einer Abschussrampe (s. Abb. 3). Von dort flog sie durch die Kontrollzone des Flugplatzes in das aktivierte Sperrgebiet ein, in dem dann die eigentlichen Flugversuche stattfanden. Die LUNA wurde durch die Radaranlagen der DFS erfasst. Sowohl die simulierten Radardaten, als auch die realen Daten der LUNA wurden in das Phönix-System eingespielt und dargestellt, so dass dem UAV-Bediener ein realistisches Verkehrsbild zur Verfügung gestellt werden konnte. Das „Sense and Avoid“ System



Abb. 3: Startvorbereitung des UAV „LUNA“

verarbeitete ebenfalls die Radardaten der DFS.

Insgesamt waren für die Flugversuche 12 Messflüge innerhalb von drei Wochen vorgesehen, in denen planmäßig an drei aufeinanderfolgenden Tagen jeweils zwei Flüge stattfinden sollten. Aufgrund des guten Wetters konnten sogar insge-

samt 13 Flüge mit einer Gesamtdauer von über 20 Flugstunden durchgeführt werden, so dass die geplante Anzahl an Flügen erreicht werden konnte. Die gesammelten Daten werden momentan ausgewertet und die ersten Ergebnisse liegen bereits vor.

Im Rahmen der Flugversuche wurde in der dritten Woche ein Demonstrationstag für ein breites Publikum durchgeführt. Die Versuche stießen auf ein reges Interesse sowohl bei verschiedenen Behörden (BmVBS, BmVg, LBA, Landes- und Bundespolizei, Bundesnetzagentur, verschiedene Dienststellen der Bundeswehr, DLR), als auch bei Vertretern der Industrie (z.B. EADS, RUAG, Swiss UAV, Diehl BGT, Rheinmetall Defence Electronic) sowie einem Vertreter der Vereinigung Cockpit. Insgesamt nahmen 46 Gäste an der Veranstaltung teil. Abbildung 4 zeigt das Abschlussfoto mit allen Teilnehmern dieses Demonstrationstags.

Ergebnisse

Die Auswertung der Flugversuche ergab, dass eine Integration von UAS auf Basis der Radardarstellung des Verkehrs prinzipiell möglich ist. Allerdings zeigte sich auch, dass die geforderten Abstände zu den simulierten Flugzeugen nicht in allen Fällen eingehalten werden konnte. Dies lag zum einen an Beschränkungen durch das genutzte Fluggebiet, zum anderen aber auch an der fehlenden Praxis im Umgang mit dem generierten Verkehr und mit



Abb. 4: Gäste und Veranstalter des Demonstrationstags der Flugversuche VUSIL am 02.07.2008

dem „Sense and Avoid“-System.

Ein weiteres Ergebnis der Versuche ist, dass für die Konfliktvermeidung und für die Ausweichmanöver in der Bodenkontrollstation ein Team notwendig war. Der verantwortliche Pilot wurde durch einen zweiten Kollegen unterstützt, der normalerweise für die Bedienung der Nutzlast (z.B. Kamera) verantwortlich ist. Dieser Kollege überwachte das Radarbild und den „Sense and Avoid“-Bildschirm und teilte den Piloten die notwendigen Ausweichmanöver mit. Es zeigte sich, dass mit zunehmender Komplexität des Verkehrs die Gefahr einer Unterschreitung der definierten Abstände zunahm.

Da keine Abstandsvorschriften für die Separation von VFR Flugzeugen untereinander existieren, mussten für die Flugversuche Abstände vereinbart werden. Es wurden als einzuhaltende Mindestabstände 0,5 NM lateral und 500 ft vertikal festgelegt. Werden diese Abstände größer gewählt, steigt die Alarmrate. Dies hat dann einen erheblichen Einfluss auf die Durchführbarkeit der geplanten Mission, da das UAS häufiger ausweichen muss. Sind die Abstände zu gering, werden u.U. gefährliche Annäherungen zu spät erkannt und ungewollte Gefährdungen sind nicht auszuschließen.

Im Anschluss an die Flugversuche wurde ein Workshop (WS) mit allen Beteiligten durchgeführt. Die Erfahrungen aus den Flugversuchen wurden in diesem WS auf sicherheitsrelevante Aspekte hin bewertet. Übereinstimmend wurde festgestellt, dass mit dem gewählten Aufbau, in dem der Umgebungsverkehr durch das Phönix-System und den Forschungssimulator bereitgestellt wurde, zusammen mit einer „Sense and Avoid“-Komponente die Teilnahme von unbemannten Flugzeugen am allgemeinen Flugverkehr nachgebildet werden kann. Eine Teilnahme von UAS am Luftverkehr erscheint daher unter bestimmten Randbedingungen möglich. Allerdings müssen Aspekte wie z.B. die Ausfallsicherheit gewährleistet werden. Fragen wie z.B. „Wie kann das UAS von anderen Verkehrsteilnehmern gesehen werden?“ konnten nicht abschließend geklärt werden. Ebenfalls wurde die Datenlinkverbindung zum UAS als ein sicherheitskritischer Faktor identifiziert. Ein Ausfall dieser Verbindung ist dann auch mit dem Verlust sowohl der „Sense“ als auch der „Avoid“-Fähigkeit verbunden.

Als Projektverantwortlicher bedankt sich die DFS bei den beteiligten Firmen EMT und ESG, sowie bei der WTD 61 für die sehr gute und erfolgreiche Zusammenarbeit. Danken möchte ich auch den Kollegen der DFS, die diese Flugversuche durch ihre technische Unterstützung erst ermöglichen konnten.

The ACAS Monitoring Project

Steffen Marquard, TEA

INTRODUCTION⁴

Driven by Air Traffic Control (ATC) safety requirements after a mid-air collision near Lake Constance, the DFS started the research project "Safety through Transparency" in 2004. This project was embedded within the 3rd Aviation Research Program of Germany. It delivered a prototype ACAS Monitor, which is able to receive and process ACAS messages distributed via radio frequency (r.f.) link during the resolution of a potential conflict situation. Since May 2007 a prototype ACAS Monitor is operated by DFS at the facilities in Langen/Germany.

The DFS is going to continue this activity through the new "ACAS Monitoring" project with the aim to proof the feasibility of the use of ACAS/TCAS messages for future ground applications in ATC to keep capacity and safety in highly occupied airspaces with growing numbers of airplanes. Beside technical improvements other issues like human factors will have to be taken into account.

This paper gives an overview on the development activities for the ACAS Monitor system, the RA analysis and the future planning in the project.

BACKGROUND

For the conflict detection in Air Traffic Control a ground based Short Term Conflict Alert system (STCA) is used, which delivers a warning to the Air Traffic Controller (ATCO) about 120 to 90 seconds prior to the closest point of approach of involved aircraft. STCA is based on data used also for other ATC applications.

On the airborne side, the aircraft crew has an Airborne Collision Avoidance System (ACAS) available, also known as Traffic Alert and Collision Avoidance System (TCAS). This system is independent from all other systems used for ATC purposes. It alerts the crew in case of a collision

risk with aural and visual warnings and provides a Resolution Advisories (RA). RA's are given solely in vertical direction. The warning time is closing speed dependent and delivered between 15 and 35 seconds prior to a potential collision. If all the involved aircraft are ACAS equipped, the vertical sense of the RA's are automatically coordinated between the conflict partners.

In addition to the coordination messages, ACAS transmits an RA-Broadcast message to the ground and stores the information in the aircraft ATC-transponder using a dedicated "Binary Data Store" (BDS). The BDS information can be extracted via Mode S Radar. RA coordination messages are transmitted via r.f. link, RA-Broadcasts on 1030 MHz and BDS information use 1090 MHz only.

Since Mode S radar based downlink of RA information is scan time dependent, the average update period is approximately 9 seconds for 95% of all cases. Since the requirement for such a time critical operational application like the visualization of an RA to the ATCO is 2 seconds, this is too slow for the intended use. The alternative solution is the use of RA-Broadcasts. The RA-Broadcast is transmitted immediately as an RA emerges, is repeated or updated every 8 seconds and lasts until the RA is changed or ceased. For a real time application the use of a combination of RA-Broadcast and RA coordination messages offers the most promising solution. In this case the complete information of all participants during the RA is provided in a timely manner.

Consequently, the very new aspect within the ACAS Monitoring project is the potential utilization of airborne generated and exchanged RA messages for Air Traffic Control, independent of radar and furthermore the analysis of ACAS events in the observed airspace.

SYSTEM CONCEPT

The system concept embraces 1030/1090 MHz hardware to receive, decode and process the messages on both channels, software to detect

⁴ Eingereichter Vortrag für die 6. Internationale Konferenz „Computing, Communications and Control Technologies: CCCT 2008“

and pre-process RA relevant messages for analysis and visualization.

The hardware development is done by THALES-ATM in close cooperation with iAd GmbH and DFS. Based on the currently used prototype, new hardware and software is developed, which integrates receiver, digital signal processing and computing functions on one PCB.

The analogue and digital signal processing is designed to receive and decode Mode S and ACAS messages even in a harsh r.f. environment, where the high numbers of signals on the same frequency can cause a lot of distortions to the wanted signal. The receiver delivers a data stream which contains time stamp, message type and content including signal quality information. The data from both channels is streamed to the analysis software and stored for further use.

The RA analysis is currently performed in two steps. An on-line "ACAS Detector" combines the data from both channels and filters all messages which belong to ACAS activities. To reduce the amount of data and remove erroneous RA detections, the tool correlates the globally unique ICAO 24-bit address in the ACAS message with the address received by Mode S messages. In case the address found in the RA is equal to the address in the Mode S message, the RA is assumed as coming from a real target. Only these ACAS events are recorded. The software also provides a quick decoding function for the display of ACAS messages in a readable form to the user (fig. 1).

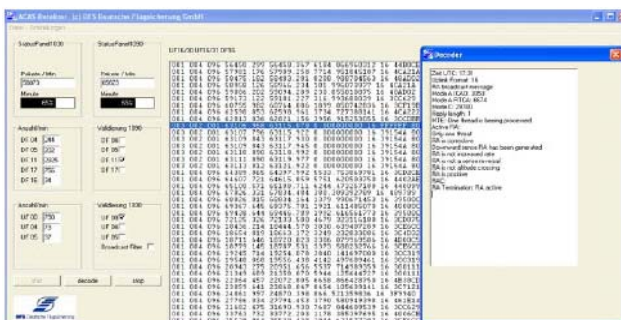


Figure 1: The ACAS Detector HMI

In a second step the RA is combined with radar position information to restore the aircraft tracks. For that purpose the "ACAS Event Analyzer" filters the positions of the conflict partners using the address and RA information. The tool com-

piles an XY diagram containing all relevant information for a detailed assessment. Is only one address known, the tool can be parameterized using horizontal and vertical range filters to find the most likely conflict constellation. Both software tools are developed by DFS.

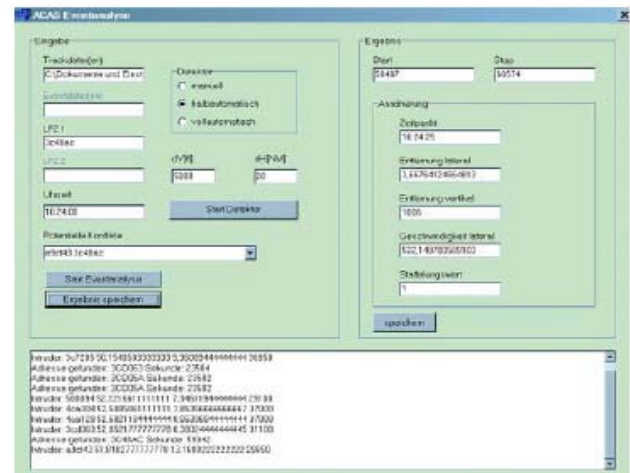


Figure 2: The ACAS Event Analyzer HMI

With the ACAS Monitor system in the current configuration, the first time a detailed evaluation of ACAS RA events is possible. DFS records on a 7/24 base all events in the airspace around Frankfurt. The data are analyzed to find typical conflict scenarios and observe the aircraft equipment behavior.

The results of conflict analysis (fig. 3) are being used as a direct input to ACAS equipment specifications, the planning of airspace structures, ATC procedures and aircrew training.

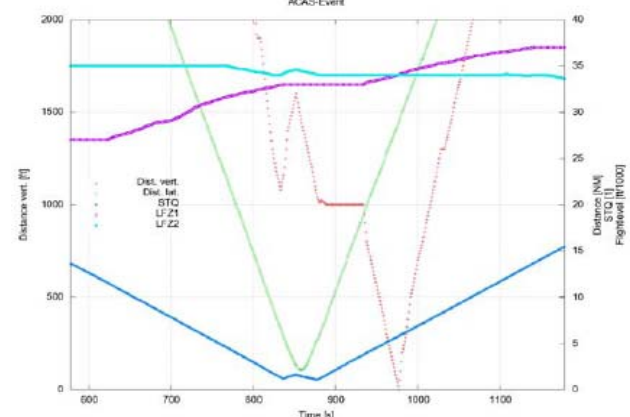


Figure 3: Conflict analysis example

FUTURE DEVELOPMENT

New hardware developments will integrate signal direction estimation into the 1030/1090 MHz receivers to gain additional information out of amplitude and phase and thus enhance the detection probability of the wanted signals.

Beside the hardware development it is intended to combine the various tools into one piece of software and extend it with new functions. The automation of analyses and the 3D visualization of aircraft tracks in combination with additional ATC, aeronautical and geographical information is the main objective of further analysis and tool developments. The basis for this is DFS visualization software currently used for incident investigation.

One of the next important steps is the investigation of the usability of RA data for operational Air Traffic Control. This includes on the technical side especially data quality and the time delay between the receiving station and the ATCO display. Human factor aspects, like the presentation of RA events to the ATCO and legal aspects (who is responsible when) are also major points of concern.

Furthermore, the extension of the ACAS Monitor infrastructure to provide RA data of the complete German airspace is main issue. In this course DFS is intending to install in the near future a number of monitoring stations in remote locations throughout Germany to build up a comprehensive network.

Abbreviations

ACAS	Airborne Collision Avoidance System
ATC	Air Traffic Control
ATCO	Air Traffic Controller
BDS	Binary Data Store
DFS	Deutsche Flugsicherung GmbH
ICAO	International Civil Aviation Organization
PCB	Printed Circuit Board
RA	Resolution Advisory
TCAS	Traffic Alert and Collision Avoidance System

Zusammenfassung der Ergebnisse im Projekt MSP-D/L

Stephan Herr, Dr. Andreas Herber, TEA

Einleitung

Im Rahmen des inzwischen abgeschlossenen Projekts MSP-D/L (Multi-Sektor Planer mit Data Link) wurden insgesamt drei Realzeitsimulationen durchgeführt. Der vorliegende Artikel gibt eine Zusammenfassung zum Projekt und beschreibt speziell die Ergebnisse des dritten Realzeit-Simulationsblocks.

Die Funktionalität des Simulationssystems und das experimentelle Design werden nur auszugsweise erläutert, für weitergehende Beschreibungen wird auf früheren Artikel dieser Zeitschrift verwiesen [2], [5], [7].

Überblick über das Projekt

Gegenstand des Projektes war die Weiterentwicklung und Untersuchung von Arbeitsweisen und Verfahren mit Systemfunktionalitäten - wie z.B. Data Link oder Medium Term Conflict Detection (MTCD), die in künftigen ATM Systemen zu erwarten sind. Ziel ist der Transfer der Ergebnisse in die spätere Anwendung.

Um die Untersuchungen möglichst praxisnah zu gestalten, war der Fokus der Betrachtung im Rahmen dieses Projekts auf den oberen Luftraum der Niederlassung Karlsruhe beschränkt worden, da nach der gegenwärtigen Centerplanung die entsprechenden Systemfunktionalitäten - mit P1/VAFORIT - dort zuerst zur Verfügung stehen werden.

Die Untersuchungen sollten auf Basis bereits erfolgter Simulationen (z.B. Simulationen bei TE, Untersuchungen im Rahmen von europäischen Projekten, Erkenntnisse aus dem VAFORIT-Umfeld) durchgeführt werden.

Zur Durchführung der Untersuchungen waren neben vorbereitenden Tätigkeiten zur Weiterentwicklung von Arbeitsweisen und Verfahren eine Schnellzeit- sowie drei Realzeitsimulationen vorgesehen.

Projektstart war im Februar 2005, das Projekt endete im Juli 2008.

Nach Definition der anzuwendenden Luftraumstruktur, die von einer Arbeitsgruppe Karlsruher Lotsen erarbeitet wurde, erfolgten drei Realzeit (RTS) -Simulationsblöcke:

- RTS Phase 1, durchgeführt im März 2006
- RTS Phase 2, durchgeführt im April 2007

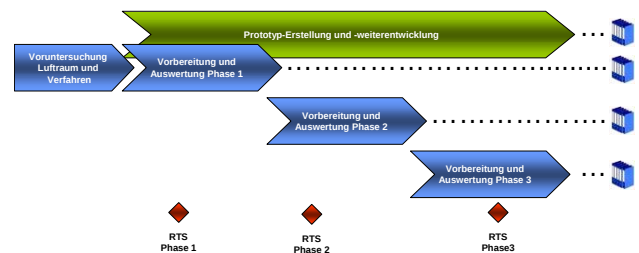


Abb. 1: Vorgehen im Projekt MSP-D/L

- RTS Phase 3, durchgeführt im April 2008

In jeder einzelnen Phase wurden die entwickelten Verfahren und Arbeitsweisen analysiert und anschließend anhand der Simulationsergebnisse weiterentwickelt. Nachfolgend werden die Ergebnisse der dritten Realzeitsimulation dargestellt. Weitere Einzelheiten zu den vorangegangenen Simulationen finden sich den vorherigen Artikeln der Forschungszeitschrift „TE im Fokus“ sowie den Abschlussberichten, die im DFS-Intranet verfügbar sind (Externe wenden sich bitte an die Redaktion).

Zielsetzung der der dritten Realzeitsimulation

Folgende Hypothesen sollten in der letzten Phase der Realzeitsimulationen im Projekt MSP-D/L untersucht werden

- Die Nutzung von Data Link hat bei einem Ausstattungsgrad von 35% keine negativen Auswirkungen auf die Belastungssituation. Die Sprechfunkbelastung ist reduziert. Der Verkehr kann mit dem gleichen Sicherheits- und Wirtschaftlichkeitsniveau bearbeitet werden.
- Durch den Übergang zwischen alter und neuer Luftraumstruktur in FL330 wird die Verkehrsbearbeitung nicht erschwert.

- Der Einsatz des Multi- Sector- Planners ermöglicht bei einem Verkehrsaufkommen $\leq 80\%$ der heutigen Kapazitätseckwerte die Bearbeitung des Verkehrs mit dem gleichen Sicherheits- und Wirtschaftlichkeitsniveau wie in der traditionellen Rollenverteilung.

Simulationsdesign

- Luftraumstruktur:** Eine der Zielsetzungen der Simulation war die Anwendung der Arbeitsverfahren mit einer neuen Luftraumstruktur, in der in den unteren Sektoren die herkömmliche Routenstruktur verwendet wurde, während die Luftfahrzeuge in den oberen Sektoren direkt vom UIR-Eintritts- zum UIR-Austrittspunkt flogen. Der Übergang von herkömmlicher zu neuer Routenstruktur erfolgte an einem definierten Punkt, an dem erfahrungsgemäß ca. 80% der

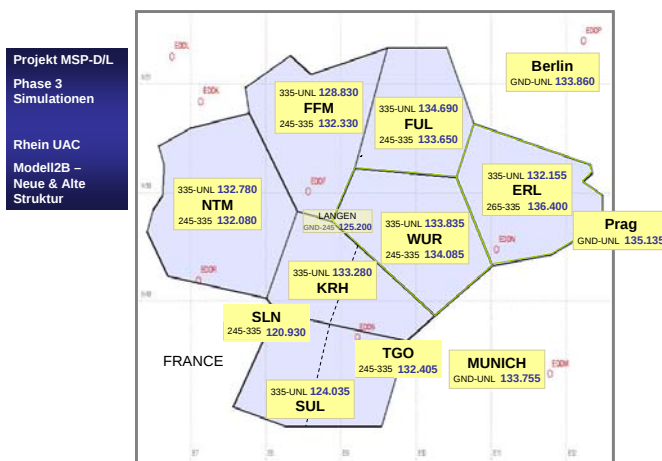


Abb. 2: Simulierter Luftraum und Sektorisierung

Luftfahrzeuge eine Höhe von FL330 erreicht haben.

- Untersuchte Systemfunktionalitäten:** Folgende Systemfunktionalitäten nebst den korrespondierenden Verfahren und Arbeitsweisen waren Untersuchungsgegenstand dieser Realzeitsimulation:
 - Systemgestützte Konflikterkennung (Medium Term Conflict Detection und Executive Conflict Search)⁵
 - Elektronische Koordination

⁵ MTCD basiert auf (Flug-)Plandaten, ECS auf aktuellen Positions- und Freigabedaten

- Eingaben von Frequenzübergaben, Freigaben und Koordinationsergebnissen in das System
- Stärker standardisierte Zuordnung von Aufgaben zu den Lotsenrollen
- Einsatz von Data Link für Frequenzübergaben (ACM) und Höhenfreigaben (ACL).

- Untersuchungskonfigurationen:** Simuliert wurde zum einen die traditionelle Rollenverteilung (EC und PC), sowohl ohne Data Link als auch mit 35%-iger Data Link Ausrüstung. Zum anderen wurde auch die Rolle des „Multi Sector Planner“ (vertikale Zusammenlegung der Sektoren) simuliert, hierbei allerdings mit geringerem Verkehr (s. Tab. 1).
- Verkehrsbeispiele:** Jede untersuchte Konfiguration wurde mit vier verschiedenen Szenarien simuliert, die zwischen 100 und 130% der heutigen Kapazitätseckwerte darstellten. Bei den MSP-Bedingungen wurde ein Verkehrsvolumen von 70-100% bearbeitet (s. Tab. 1).

Variable	Verkehr	0% D/L	35% D/L
Konfiguration			
Traditionelle Rollen: Executive und Planner	100 – 130%	4 runs	4 runs
Executive und Multi- Sector- Planner	70 – 100 %	0 runs	4 runs
Summe		12 Messruns & 8 Trainingsruns	

Tab. 1: Untersuchungskonfigurationen

- Teilnehmer:** Insgesamt 12 Lotsen aller drei Einsatzberechtigungsgruppen der NL Karlsruhe nahmen an dieser 7-tägigen Simulation teil.

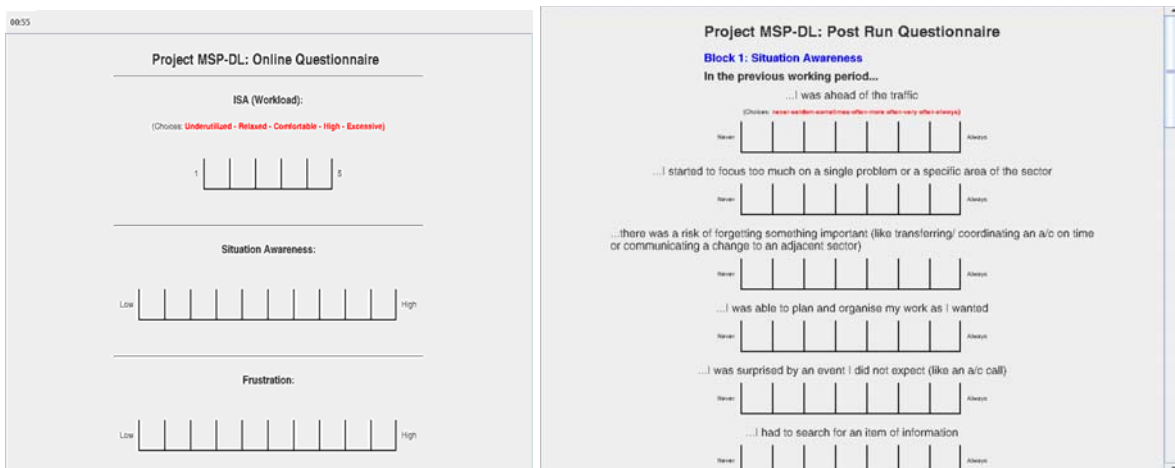


Abb. 3: Online (links) und post-run (nur Anfang) Fragebogen in der RTS Phase 3

Experimentelles Design und Methodik

- Die **subjektive Datenerhebung** umfasste das „Standard-Repertoire“ wie z. B. elektronische online-Fragebögen (alle 5 Minuten) zu Beanspruchung und Situationsbewusstsein, Fragebögen nach jedem Run sowie strukturierte Interviews zu Verfahren, Systemfunktionalitäten und Luftraumstruktur (vgl. Abb. 3).
- Im Rahmen der **objektiven Datenerhebung** wurden Kenngrößen wie z.B. Verkehrszahlen, Sektordurchflugzeiten, Konflikte, Anzahl und

Dauer von Funkkontakten, sowie Dauer und Art von Lotsen-Interaktionen mit dem System aufgezeichnet. Ein Beispiel für die Ergebnisse aus den Aufzeichnungen zeigt Abb. 4.

- Im Rahmen des Projekts MSP-D/L wurde erstmalig das Verfahren „Blickbewegungsmessung“ im DFS-Bereich F&E angewendet, um die Informationssammlung von Lotsen analysieren zu können. Dabei wurden verschiedene Blickbereiche unterschieden (Displays für Radaranzeige, Streifenanzeige, Sprachverbindungsanzeige, Beanspruchungserhebung, Sek-

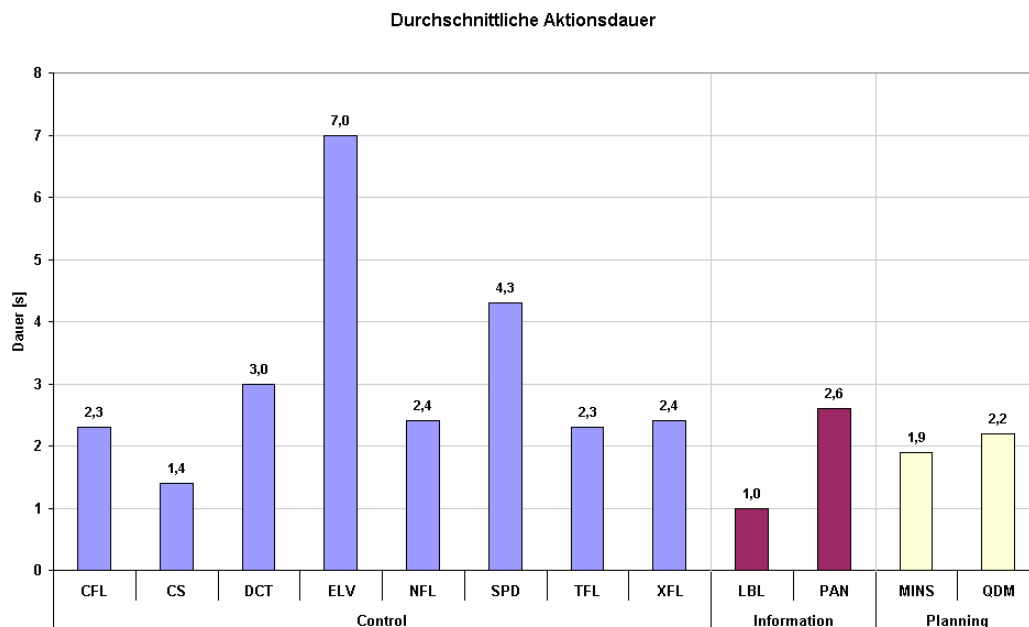


Abb. 4: Darstellung der durchschnittlichen Aktionsdauer von Systeminteraktionen, z.B. die Eingabe des Frequenzwechselfs im Callsignmenü (CS), die Eingabe des Headings mit anschließendem Rückführungspunkt zur ursprünglichen Flugroute mit dem Elastic Vector (ELV), die Änderung von Entry und Exit Level (NFL, XFL), sowie das Verschieben eines Luftfahrzeuglabels (LBL)

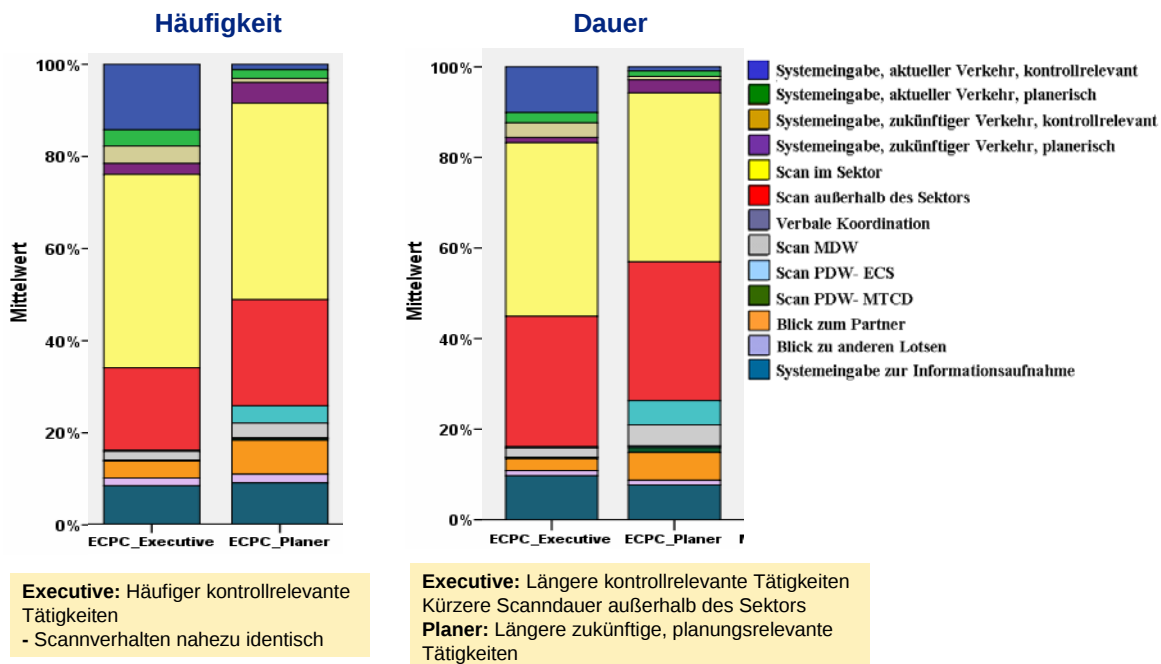


Abb. 5: Blickbewegungsanalyse: Häufigkeit und Dauer von Interaktionen (Abkürzungen s. Ende des Artikels)

torpartner etc.). Ein Beispiel für die ausgewerteten Video-Aufzeichnungen zeigt Abb. 5. Hierbei sind Häufigkeit und Dauer von unterschiedlichen Blickzielbereichen dargestellt. Dabei ist jeweils zwischen Exekutivlotsen (EC) und Planungslotsen (PC) unterschieden worden. Erwartungsgemäß kam der EC häufiger und länger kontrollrelevanten Tätigkeiten nach, während der PC längere, planungsrelevante Tätigkeiten ausübte.

Infrastruktur

Wie auch in der Vergangenheit wurden die Simulationen mit einem im Bereich entwickelten prototypischen System durchgeführt, das die wesentlichen P1/VAFORIT Systemfunktionalitäten nach-

bildet (VAFORIT „look alike“).

Für die Simulation standen insgesamt 11 Lotsenpositionen (8 gemessene Sektoren und 3 „Adjacent“) zur Verfügung. Jede Position war wie in Abb. 6 gezeigt mit diversen Displays ausgestattet: ASW (Air Situation Window, Radar), MDW (Main Data Window, elektronische Streifen) und zwei TIDs (Touch Input Device) für Funk-/Telephonie (Voice Comm) und die Online-Beanspruchungserhebung (NASA-TLX). Letzteres wurde auch für die elektronischen Fragebögen (post-run questionnaire, s. Abb. 3) verwendet.

Exemplarisch werden einige Systemfunktionalitäten nachfolgend näher beschrieben:

- Da dem System die freigegebene und koordinierte Route bekannt ist, können Abweichungen davon erkannt und angezeigt werden (s.

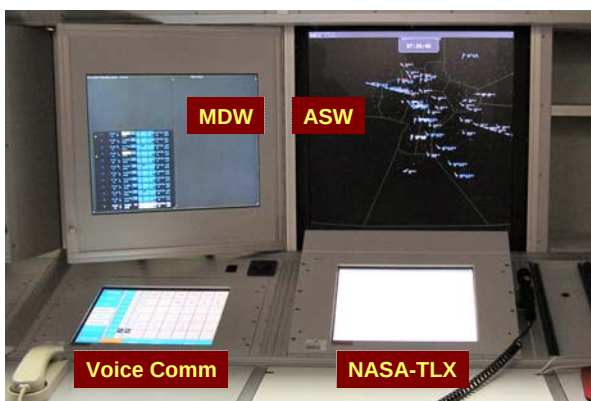


Abb. 6: Lotsenarbeitsplatz



Abb. 7: Systemunterstützte Erkennung einer Abweichung von der freigegebenen Route (RDEV)

Abb. 7).

- Die Koordination einer geänderten Ausflugsbedingung erfolgt über Systemeingaben am ASW und anschließender Meldung an den betreffenden downstream-Sektor via elektronischer Koordination (s. Abb. 8).



Abb. 8: streifenloses System: Interaktion zur Koordination eines Exit Flight Level (Sysco) via ASW

scher Koordination (s. Abb. 8).

- Der geänderte Wert wird entsprechend markiert dargestellt (s. Abb. 9), wobei diese Markierung nach Interaktion wieder verschwindet.



Abb. 9: Anzeige des geänderten Exit Flight Level

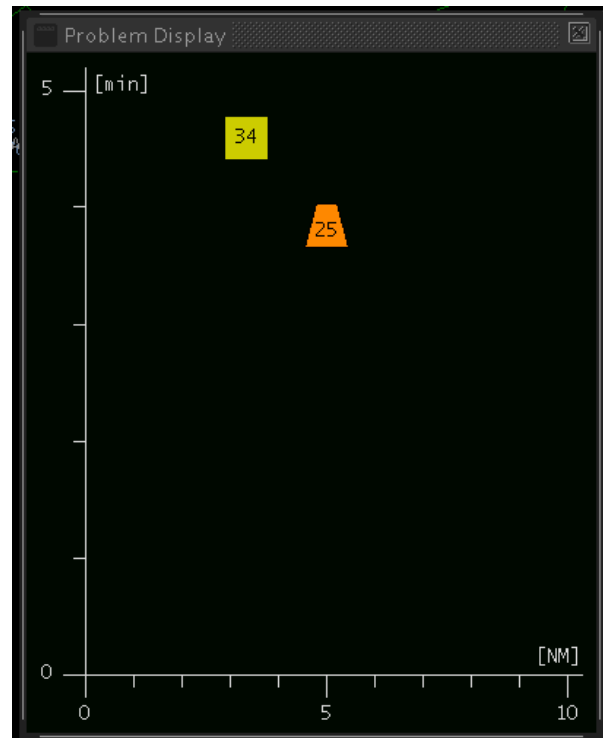


Abb. 10: Anzeige von MTCDs (gelb) und ECSs (orange) im "Problem Display Window"

- Mögliche Konflikte (Planungskonflikte erkannt durch den MTCD-Algorithmus oder Freigabedatenkonflikte erkannt durch den ECS-Algorithmus) wurden in einem speziellen Fenster im ASW angezeigt. In einem Koordinatensystem wurde der erwartete Mindestab-

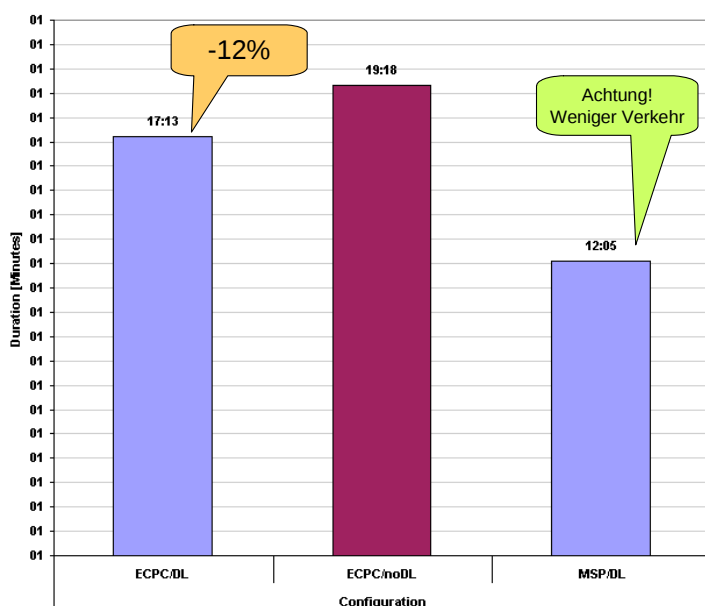


Abb. 11: gemessene Sprechfunkdauer pro Sektor und Run

stand, sowie die Zeit bis zum Beginn des Konflikts dargestellt (s. Abb. 10). Per Mausinteraktion können dann die Rufzeichen der betroffenen Flieger sowie deren geplanter Flugverlauf (Flight Leg) angezeigt werden.

Zusammenfassung der Ergebnisse der dritten Realzeitsimulation

Die Ergebnisse der letzten Simulation im Projekt MSP-D/L lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Data Link konnte in allen Verkehrssituationen angewendet werden. Besonders die Frequenzübergabe per Data Link wurde als arbeitsentlastend empfunden. Die Sprechfunkbelastung reduzierte sich bei einem Ausrüstungsgrad von 35% und ansonsten gleichem Verkehr um 12% (s. Abb. 11).
- Der Übergang zwischen alter und neuer Luftraumstruktur in FL330 führte insgesamt nicht zu einem erhöhten Arbeits- und Koordinationsaufwand. Insgesamt stellt die neue Luftraumstruktur eine Verbesserung gegenüber der heutigen Situation dar. Es sind jedoch weitere Anpassungen erforderlich. Insbesondere ist die Situation in den angrenzenden Sektoren zu betrachten.
- Der Multi-Sector-Planner konnte bei mittlerem Verkehrsaufkommen ($\leq 80\%$ der heutigen Eckwerte) und geringer Komplexität eingesetzt werden, da die Executives den aktuellen Verkehr prinzipiell auch alleine bearbeiten konnten und wenig Unterstützung benötigten. Allerdings könnte der Multi-Sector-Planner diese Unterstützung auch nicht gewährleisten, da ihm der Überblick über den aktuellen Verkehr fehlt.
- Bereits bei 2 Sektoren war die Menge der zu berücksichtigenden Informationen für den Multi-Sector-Planner häufig zu groß, um geeignete Planungslösungen zu implementieren. → Hier sollte eine Unterstützung durch what-if probing getestet werden.

Ergebnisse aus früheren Simulationen

In den vorangegangenen Simulationen wurde die neue Luftraumstruktur von den beteiligten Lotsen als Entlastung empfunden und positiv bewertet. Im Vergleich zur alten Luftraumstruktur ergab

sich eine Reduktion der Kontrollfreigaben um 20%.

Weiterhin zeigte sich eine deutliche Reduktion der verbalen Koordination um ca. 60% durch den Einsatz eines Systems mit elektronischer Koordination im Vergleich zur IST-Aufnahme (mit KARLDAP).

Nutzung der Ergebnisse des Gesamtprojekts MSP D/L für VAFORIT und darüber hinaus

Die Ergebnisse des Projekts MSP-D/L werden in folgender Weise für weitergehende Aktivitäten genutzt:

- Die Weiterentwicklung und Validierung des Betreiberkonzepts einschließlich der neuen Luftraumstruktur wird im Rahmen eines noch aufzusetzenden Projekts der NL Karlsruhe erfolgen (u.a. Untersuchung des sog. „Functional Executives“).
- Das „VAFORIT look-alike“ Simulationssystem wird in die Anwendung als Trainingssystem für die Akademie überführt, da es als geeignet angesehen wird, die Grundausbildung von Lotsen zu unterstützen, die später mit P1/VAFORIT arbeiten werden.
- Die im Projekt entwickelte Untersuchungsmethodik zur Erfassung von Lotsentätigkeit wird im Rahmen eines weiteren Vorhabens genutzt, um ein tätigkeitsbasiertes Arbeitslastmodell zu entwickeln.

Erfahrungen und Empfehlungen

Die gemachten Erfahrungen aus Sicht des Bereichs F&E lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Untersuchung von konzeptionellen Änderungen am System Flugverkehrskontrolle durch Realzeitsimulationen erscheint hilfreich und notwendig, da erst durch die Simulationen die komplexen Zusammenhänge erkennbar werden, die durch neue Systemfunktionalitäten im Zusammenspiel mit neuen Verfahren entstehen. Nach Einschätzung der beteiligten Lotsen war das prototypische System sehr gut geeignet, die Arbeitsverfahren zu analysieren.
- Im Rahmen der durchgeführten Simulationen wurden viele Fragestellungen parallel betrach-

tet. Gleichzeitig war die Anzahl der durchgeführten Simulationsruns bedingt durch begrenzte Verfügbarkeit von operativem Personal gering. Dadurch waren zum einen keine statistisch relevanten Aussagen möglich. Zum anderen konnten manche Fragestellung nur punktuell betrachtet werden. Die Möglichkeit zur genaueren Untersuchung wäre in einigen Teilbereichen wünschenswert gewesen und hätte aus unserer Sicht einen Mehrwert bezüglich der Einführung der neuen Systemfunktionalitäten geboten.

Daraus lassen sich folgende Empfehlungen ableiten:

- Die Vorgehensweise der prototypischen Untersuchung mit Hilfe von Realzeitsimulationen sollte als Standardmethodik in der DFS etabliert werden, um neue Systeme mit resultierenden Änderungen der Verfahren einzuführen.
- Die Durchführung von Realzeitsimulationen sowie das Erstellen der dazu notwendigen Simulationsplattform erfordern einen hohen personellen Aufwand. Das Bewusstsein für diesen Aufwand, aber auch für den Nutzen von Realzeitsimulationen sollte in der DFS gestärkt werden.

Abkürzungen

ECPC	Simulationslauf mit klassischer Rollenverteilung: Executive Controller (EC) und Planner Controller (PC)
MSP	Multi Sector Planner; hier: Simulationslauf mit "neuer" Rollenverteilung: Executive Controller und Multi Sector Planner
MDW	Main Data Window, Darstellung der elektronischen Flugstreifen
PDW	Problem Display Window (Darstellung von MTCD- und ECS-Ausgaben)
ECS	Executive Conflict Search, Funktion die potentielle Konflikte aufgrund von aktuellen Flugverlaufsdaten und Freigabedaten erkennt.
MTCD	Medium Conflict Detection, Funktion die potentielle Konflikte aufgrund von Plandaten (Systemflugplan) erkennt.

Referenzen

Im Rahmen des Projektes wurden eine Reihe von Dokumenten erstellt (siehe F&E-Dokumentendatenbank im Intranet⁶). Dazu kommen Artikel in der Forschungszeitschrift „TE im Fokus“. Eine Liste der wichtigsten Referenzen ist wie folgt:

[1]	20.08.08	Stephan Herr, Dr. Andreas Herber: Projekt MSP-D/L: Simulation Report, Version 1.0
[2]	12.12.07	Stephan Herr, Tim Gesekus: MSP-D/L Simulation bei TE: TE im Fokus 2/07, S. 20-27
[3]	19.10.07	Stephan Herr, Tim Gesekus: Weiterentwicklung und Validierung des Arbeitssystems "Flugverkehrskontrolle" durch Realzeitsimulationen an einer prototypischen Systemplattform, Vortrag beim DGLR-Ausschuss für Anthropotechnik
[4]	17.09.07	Stephan Herr: Ergebnispräsentation Realzeitsimulationen Phase 2 im April 2007
[5]	01.12.06	Stephan Herr, Dr. Andreas Herber: Projekt MSP-DL: Ergebnisse der ersten Realzeitsimulation, TE im Fokus 2/06, S. 29-34
[6]	04.09.06	Stephan Herr: Ergebnispräsentation Realzeitsimulationen Phase 1, Fachkolloquium am Forschungszentrum
[7]	25.07.06	Stephan Herr, Dr. Andreas Herber: Erste Realzeitsimulation im Projekt MSP-D/L, TE im Fokus 1/06, S. 27-33
[8]	05.08.05	Dr. Andreas Herber, Stephan Herr, Anforderungsdokument "Requirements for the simulation platform"

⁶ Externe Interessenten wenden sich bitte an die „TE im Fokus“-Redaktion

Modellierung, Verifikation und Validierung der Flugleistung am Beispiel der Echtzeitsimulation

Oliver Haßa, TEH

Hintergrund

Aufgabe des Flugverkehrsmanagements (Air Traffic Management, ATM) ist es, die Sicherheit und Effizienz von Flugbetriebsdiensten am Boden und in der Luft zu gewährleisten. In diesem Bereich werden seit geraumer Zeit Simulationen für diverse Aufgabenstellungen eingesetzt.

Darüber hinaus gewinnt die Trajektoriengenerierung und damit auch die Modellierung der Luftfahrzeugleistung auch außerhalb von Simulatoren zunehmend an Bedeutung. Daher kann davon ausgegangen werden, dass sich ein immer größerer Personenkreis mit diesen Themen befassen muss. Ziel des Artikels ist es, eine allgemeine Einführung in diesen Themenkomplex zu bieten. Durch das Vorstellen der Struktur der Simulatoren und Modellierungen sollen dem Leser Anknüpfungspunkte für tiefer gehende Studien geboten werden. Daher enthält der Artikel auch ein umfangreiches Quellenverzeichnis.

Der vorliegende Artikel bietet zunächst eine Einführung in die Anwendung von Simulationen im Bereich des Flugverkehrsmanagements. Dabei werden die unterschiedlichen Klassen der dabei genutzten Simulatoren und deren Einsatzgebiete vorgestellt und erläutert. Für den Bereich der Echtzeitsimulation werden anschließend die Modellbildung, -verifikation und -validierung der Flugleistung und des Luftfahrzeugverhaltens an zwei Beispielen beschrieben.

1 Simulationen im Bereich der Flugsicherung und des Flugverkehrsmanagements

In den folgenden Unterkapiteln erfolgt zunächst eine Einführung in die Simulationstypen im Bereich des Flugverkehrsmanagements.

1.1 Typen von Simulationen und Simulatoren

Die im Bereich des Flugverkehrsmanagements eingesetzten Simulatoren lassen sich grob in vier Kategorien einteilen (s. Abb. 1):

- Mathematische Simulatoren
- Prozess-, Ereignis- und Wahrscheinlichkeits-simulatoren
- Schnellzeitsimulatoren
- Echtzeitsimulatoren

Dabei sind diese Kategorien nicht trennscharf. So lassen sich zum Beispiel manche Echtzeitsimulatoren auch schneller betreiben und bestimmte Schnellzeitsimulatoren können einen Echtzeitbetrieb gewährleisten. Auch können Echtzeit- und Schnellzeitsimulatoren zum Teil gekoppelt werden (so genannte Hybridsimulationen, siehe auch Pritchett 2000). In den folgenden Unterkapiteln werden die unterschiedlichen Simulatorklassen kurz charakterisiert.

1.2 Schnellzeitsimulation

Das Hauptaufgabengebiet der Schnellzeitsimulation liegt im Bereich der Luftraumstrukturuntersuchung und -entwicklung. Schnellzeitsimulationen verlaufen automatisch, sie sind in der Regel nicht interaktiv (non human-in-the-loop). Sie erlauben daher sowohl zeitlich als auch geografisch große Untersuchungen. Durch die Integration von Arbeitslastmodellen ermöglichen sie auch eine Abschätzung der auftretenden Belastung an den simulierten Arbeitsplätzen.

Bisherige Schnellzeitsimulatoren sind regelbasiert. Zurzeit befindet sich eine neue Generation von Schnellzeitsimulatoren in der Entwicklung. Diese basieren auf der Modellierung durch so genannte Agenten.

1.3 Echtzeitsimulation

Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Schnellzeitsimulatoren sind Echtzeitsimulatoren interaktiv (human-in-the-loop). Es handelt sich bei diesen Systemen um dynamische, kontinuierliche Simulationen. Sie bilden im Bereich der Luftfahrt das Gegenstück zu den bekannten Flugsimulatoren. Daher spricht man bei diesen

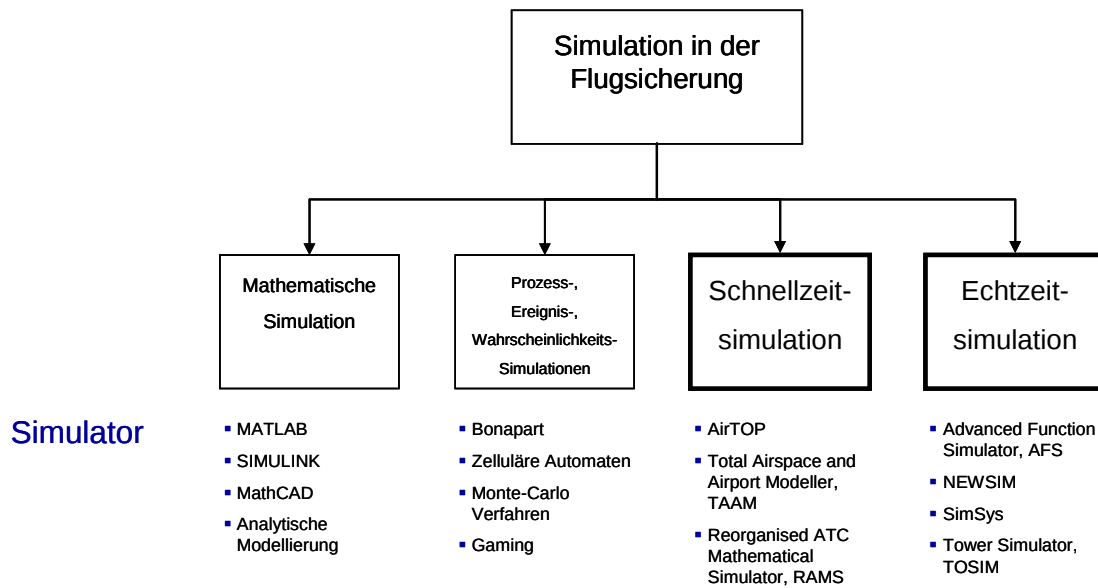


Abb. 1: Simulationen und Simulatoren im Flugverkehrsmanagement

Echtzeitsimulatoren auch von Flugsicherungssimulatoren.

Diese Simulationssysteme lassen sich entsprechend der simulierten Arbeitsplätze in zwei Klassen einteilen:

- Towersimulatoren
- En-Route-Simulatoren

Nachfolgend werden beide Klassen von Flugsicherungssimulatoren kurz erläutert. Neben dem Einsatz der Echtzeitsimulation im Bereich der Forschung und Entwicklung liegt die hauptsächliche Anwendung dieser Systeme in der Ausbildung von Fluglotsen.

1.3.1 Towersimulation

Towersimulatoren verfügen in der Regel über ein System zur Darstellung einer Außensicht. Große Towersimulatoren erlauben dabei eine komplette Rundumsicht von 360°. Neben den eigentlichen Arbeitsplätzen in einem Tower ermöglichen diese Systeme häufig auch die Simulation von weiteren Arbeitsplätzen eines Flughafens wie z. B. der Vorfeldkontrolle einschließlich der dort verwendeten technischen Systeme.

1.3.2 En-Route-Simulation

Im Gegensatz zu den zuvor vorgestellten Tower-simulatoren verfügen die En-Route-Simulatoren über kein Außensichtsystem. Die simulierten Arbeitsplätze dieser Systeme beinhalten in der Regel eine Radaranzeige. Daher werden diese Simulatoren auch häufig als Radar-Simulatoren bezeichnet. Um größere geografische Bereiche abdecken zu können, ist es bei manchen En-Route-Simulatoren möglich diese untereinander zu koppeln. Die Kopplung von En-Route- und Towersimulatoren ermöglicht realistische Simulationen *Gate to Gate* bzw. *En Route to En Route* (siehe Haßa & Haugg 2006, Kaufhold 2008)

1.4 Andere Simulationstypen

Über die zuvor beschriebenen Typen hinaus, werden im ATM-Bereich nahezu alle modernen Simulationsarten eingesetzt. Zu diesen gehören unter anderem:

- Mathematische, analytische bzw. quasi analytische Modellierungen (z. B. Abundo 1990, Swedish 1981, Malone 1995)
- Zelluläre Automaten (Amor et al. 2006, Kim et al. 2005)
- Prozessmodellierungen (Kaufhold & Lauf 2000, Akinbodunse et al. 2006)

- Monte-Carlo Verfahren (Brokof 1986)

- Regelungstechnische Verfahren (Abott 2002)

Auch Methoden aus dem Bereich der Unternehmensforschung (Operations Research), der Strategieentwicklung und der Spieltheorie, wie zum Beispiel das so genannte Gaming, gewinnen bei der Entwicklung und Validierung im Flugverkehrsmanagement zunehmend an Bedeutung.

Die Einteilung in die zuvor beschriebenen vier Simulationsklassen ist nicht trennscharf. So werden zum Beispiel Echtzeitsimulatoren zum automatischen Testen von technischen System, ganzen Flugsicherungssystem oder Subsystemen, eingesetzt. Solche Untersuchungen weisen sowohl Merkmale der Echtzeitsimulation, als auch der Schnellzeitsimulation auf.

Da in der Gestaltung insbesondere technische Systeme des Flugverkehrsmanagements fast ausschließlich Echtzeitsimulatoren zum Einsatz kommen, liegt der Schwerpunkt der weiteren Ausführungen in den nachfolgenden Kapiteln auf dieser Simulatorkategorie.

2 Modellbildung in der Echtzeitsimulation

2.1 Einführung in die Modellbildung für die Echtzeitsimulation

Für eine Echtzeitsimulation müssen in der Regel folgende Elemente modelliert werden:

- Luftraum
- Verfahren
- Technische Systeme (z. B. Radar-, Flugplan- und Unterstützungssysteme)
- Flugleistung und Verhalten der simulierten Luftfahrzeuge

Das Modell der Flugleistung (siehe Brüning et al. 1986) ist die Basis für die meisten darauf aufbauenden Modellierungen. So ist zum Beispiel der Realitätsgrad der Modellierung eines Radarsystems direkt von dem darunter befindlichen Modell der Flugleistung abhängig. In den nachfolgenden Kapiteln liegt der Schwerpunkt daher auf der Modellierung der Flugleistung und deren Überprüfung.

2.2 Modelle der Luftfahrzeugeleistung

Im Bereich der Echtzeitsimulation werden unterschiedliche Modelle der Flugleistung eingesetzt. Diese lassen sich nach ihrer Genauigkeit, dem erforderlichen Rechenaufwand, dem Modellierungsansatz und der Anzahl der Freiheitsgrade in mehrere Kategorien einteilen (s. Abb. 2):

- 6 Freiheitsgrade, kinetisches Modell
- 3 Freiheitsgrade, kinetisches Modell
- 3 Freiheitsgrade, kinematisches Modell
- Tabellenbasierte Modelle

Die genauesten Modelle der Flugleistung verwenden sechs Freiheitsgrade. Diese Modelle entsprechen weitgehend denen im Bereich der Flugsimulation. Die hohe Genauigkeit bedingt jedoch auch einen erheblichen Rechenaufwand. Da im Gegensatz zum Flugsimulator in einem Flugsicherungssimulator nicht nur ein, sondern mehrere hundert bzw. in einem Schnellzeitsimulator sogar mehrere zehntausend Luftfahrzeuge gleichzeitig simuliert werden (siehe Amor et al. 2006), müssen für diese Anwendungen vereinfachte Modelle eingesetzt werden.

Im Bereich der Towersimulatoren kommen in der Regel Modelle mit sechs Freiheitsgraden zum Einsatz, da nur diese die zur Darstellung der Luftfahrzeuge in der Außensicht benötigten Eulerschen Winkel bereitstellen können. In der Schnellzeitsimulation werden häufig einfache, tabellenbasierte Modelle eingesetzt. Im Bereich der Echtzeitsimulationssysteme haben sich Flugleistungsmodelle mit drei Freiheitsgraden etabliert

Eine Modellierung der Flugleistung besteht im Bereich des Flugverkehrsmanagements in der Regel aus zwei Teilen. Einen Teil bildet die allgemeine physikalische oder mathematische Modellierung, den anderen Teil bilden die luftfahrzeugabhängigen Datensätze. Erst die Kombination aus Rechenvorschrift und Datensatz erlauben die eigentliche Modellierung bzw. Berechnung der typabhängigen Flugleistung. Da es in der Regel nicht möglich ist, alle Typen von Luftfahrzeugen zu modellieren, werden die beiden zuvor beschriebenen Elemente durch eine so genannte Synonymliste ergänzt. Diese Liste ermöglicht den Ersatz eines wenig gebräuchlichen und daher nicht modellierten Luftfahrzeugtyp durch einen ähnlichen, modellierten Typ. So ver-

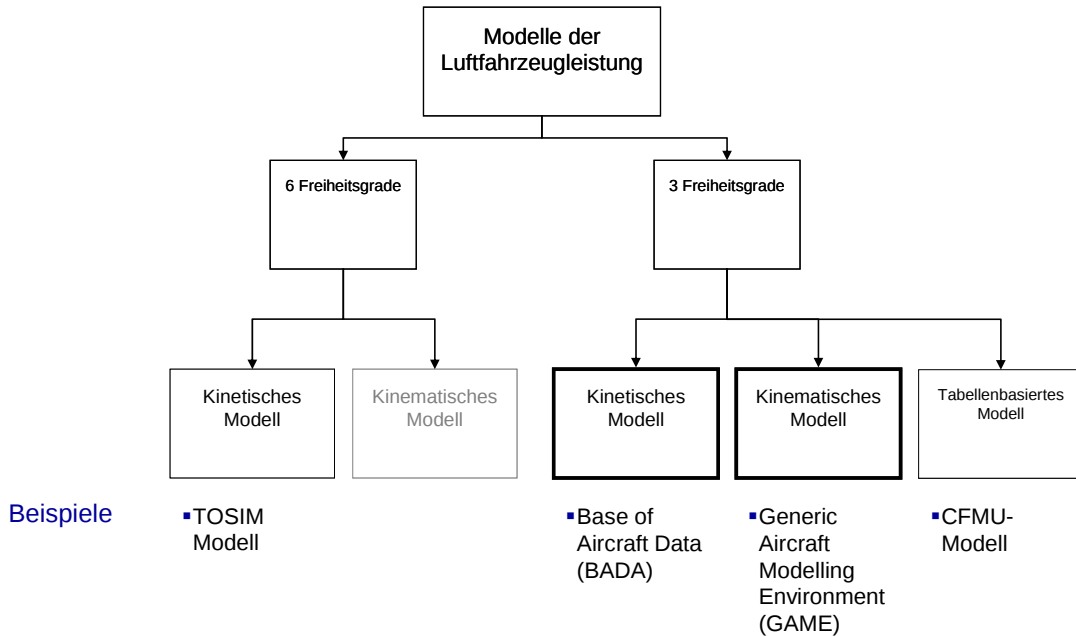


Abb. 2: Modelle der Luftfahrzeugleistung

fügt das nachfolgend beschriebene Modell „Base of Aircraft Data“ zum Beispiel über 91 direkt modellierte Luftfahrzeugtypen (siehe EUROCONTROL 2004a). Darauf aufbauend kann auf weitere 204 weitere Typen durch die Synonymliste zugegriffen werden. Damit verfügt dieses Modell der Flugleistung über eine Abdeckung von 99,14% der in Europa eingesetzten Luftfahrzeugtypen (siehe EUROCONTROL 2004b).

Da die meisten Simulationen zur Systemgestaltung im En-Route-Bereich stattfinden, beschreiben die nachfolgenden Kapitel die Modellierung der Flugleistung in einem solchen Simulationssystem. Als Beispiel dient dabei der Echtzeitsimulator des Bereiches Forschung und Entwicklung der DFS Deutsche Flugsicherung GmbH, der so genannte Advanced Function Simulator (AFS).

2.3 Modellierung der Flugleistung am Beispiel des Advanced Function Simulators

Mit dem Advanced Function Simulator verfügt der Bereich Forschung und Entwicklung über einen modernen Forschungssimulator für den En-route- und Flughafennahbereich. Durch kontinuierliche Erweiterungen und Verbesserungen wird dieser Simulator stets auf dem aktuellen Stand der Technik gehalten.

Als Modell der Flugleistung der simulierten Luftfahrzeuge kommen beim AFS zwei unterschiedliche Modelle mit drei Freiheitsgraden zum Einsatz. Dabei handelt es sich um das Modell „Base of Aircraft Data“ (BADA, (siehe EUROCONTROL 2004a) und das Modell „Generic Aircraft Modelling Environment“ (GAME, siehe EUROCONTROL 2000a). Im AFS können diese beiden Modelle alternativ, aber auch in Kombination miteinander genutzt werden. Die beiden folgenden Abschnitte beschreiben die Eigenschaften beider Modelle.

2.3.1 Base of Aircraft Data

Bei dem von EUROCONTROL entwickelte BADA (EUROCONTROL 2004a) handelt es sich um ein Modell mit konstanter Gesamtenergie (*Total Energy Model*). Es ist ein so genanntes Punktmasse-Modell und hat daher 3 Freiheitsgrade. Der Modellierung liegt ein kinetischer Ansatz zugrunde. Als Basis für die Modellierung wurden in der Regel Angaben der Luftfahrzeughersteller genutzt. Wie bereits zuvor beschrieben, verfügt BADA über 91 direkt und weitere 204 Luftfahrzeugtypen auf die durch eine Synonymliste zugegriffen werden kann. Damit verfügt dieses Modell über eine gute Abdeckung (99,14%) der in Europa eingesetzten Luftfahrzeugtypen (EUROCONTROL 2004b). Eine genauere Beschreibung des BADA-Modells und seiner Wei-

terentwicklung findet sich in Nuic 2005a, Nuic 2005b, Nuic 2005d und Iagaru 2005.

2.3.2 Generic Aircraft Modelling Environment

Das GAME-Modell wurde ursprünglich von EUROCONTROL entwickelt (EUROCONTROL 2000a und 2000b). Inzwischen wird es von der Firma INNTECH weiter gepflegt. GAME verfügt über 3 Freiheitsgrade (Punktmass-Modell).

Bei der Modellierung des GAME-Modells wurde der kinematische Ansatz verfolgt. Dieser Ansatz ermöglicht die Modellierung mit einer vorgegebenen Maximalabweichung von den durch den Luftfahrzeughersteller gelieferten Daten. Daten des dafür benötigten Umfangs und der erforderlichen Genauigkeit stehen nur für Luftfahrzeuge großer Hersteller (z. B. Airbus und Boeing) zur Verfügung. Daher sind weniger Luftfahrzeugtypen direkt in GAME modelliert. Zurzeit sind Daten von 30 Luftfahrzeugtypen in GAME verfügbar. Der Hersteller des Modells gibt eine höhere Genauigkeit gegenüber dem zuvor beschriebenen BADA-Modell an.

GAME verfügt über eine sehr große Synonymliste. Diese deckt alle in der europäischen Verkehrsflusssteuerungszentrale (Central Flow Management Unit, CFMU) bekannten Luftfahrzeugtypen ab. Da jedoch weniger Luftfahrzeugtypen direkt modelliert sind, ergeben sich für die meisten anderen Typen geringere Genauigkeiten.

Am AFS ist sowohl BADA, als auch GAME implementiert. Beide Modelle können alternativ oder in Kombination genutzt werden. Bei vielen Forschungssimulationen wird am AFS eine angepasste Version des BADA-Modells genutzt. Die Anpassungen beziehen sich auf eine erweiterte Synonymliste und auf verbesserte Genauigkeiten im Flughafennahbereich. Für andere Simulationen werden in der Regel BADA und GAME gleichzeitig genutzt.

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln zwei typische Modelle der Flugleistung vorgestellt wurden, werden in den nachfolgenden Abschnitten die für eine Verifikation und Validierung dieser Modelle erforderlichen Systeme erläutert.

2.4 Überprüfung der Modellierung der Flugleistung

Eine Modellierung sollte immer verifiziert werden. Für den Bereich der Flugleistung in Echtzeitsimulatoren können dabei zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt werden. Zum einen können die Modelle mit Daten der Luftfahrzeughersteller verglichen werden, zum anderen können die mit den Daten erzeugten Flugbahnen mit real geflogenen Trajektorien verglichen werden. Beide Ansätze wurden bei der Überprüfung der Modellierung des AFS verfolgt. Im Projekt „Platform for Aircraft Model Performance Analysis“ (PAMPA, siehe Calders 2005a) wurde von der DFS im Auftrag von EUROCONTROL eine Plattform zur Analyse von Modellen der Flugleistung erstellt. Auch die Entwicklung des „Radar Data Analysis and Processing Tool“ (RDAPT, siehe Nuic 2005c) erfolgte im Auftrag von EUROCONTROL. Dieses erlaubt die Validierung der mit den Flugleistungsmodellen erzeugten Trajektorien. Beide Systeme werden in den nachfolgenden Kapiteln kurz beschrieben.

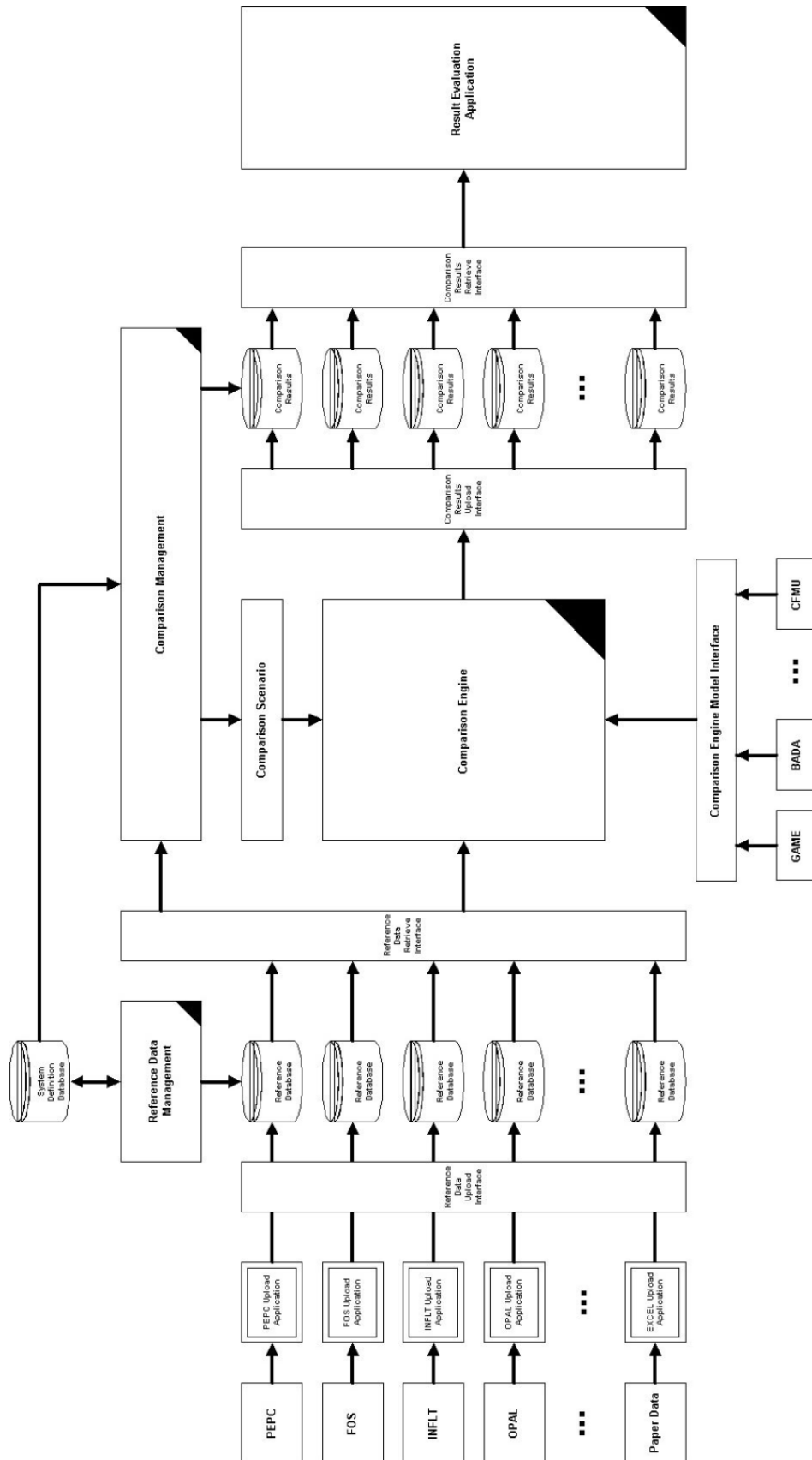


Abb. 4: Aufbau von PAMPA

2.4.1 Platform for Aircraft Model Performance Analysis (PAMPA)

PAMPA erlaubt den Vergleich unterschiedlicher Modellierungen untereinander sowie mit Daten der Luftfahrzeughersteller (Calders & Haßa 2005a). Dabei kann neben der erzielten Genauigkeit auch die dafür benötigte Rechenzeit mit in die Analyse einbezogen werden.

Um die unterschiedlichsten Modelle an die Plattform anbinden zu können, wurde diese weitgehend modular ausgelegt. Für die Anbindung der Flugleistungsmodelle wurde ein allgemeines Interface spezifiziert und implementiert (Standard Aircraft Modeling Interface, SAMI, siehe Caldery & Haßa 2005b). Dieses wird inzwischen auch im Bereich der Echtzeitsimulation eingesetzt und erlaubt die gleichzeitige oder alternative Verwendung unterschiedlicher Modelle. Auch der AFS beruht inzwischen auf dieser Schnittstelle. Abb. 4 zeigt den grundsätzlichen Aufbau der Analyseplattform.

In den folgenden Grafiken werden drei Benutzerdialoge des Systems exemplarisch vorgestellt. Abb. 5 zeigt die Benutzerschnittstelle am Beispiel des Vergleichs der Steigleistung (Rate of Climb, ROC) über der Flughöhe des Luftfahrzeugtyps Boeing B737-300 mit CFM56 Triebwerken.

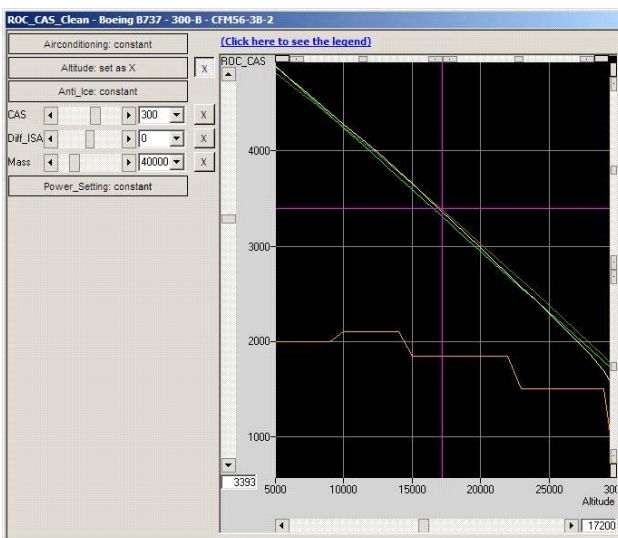


Abb. 5: Darstellung der Flugparameter in PAMPA

Eine Darstellung des erlaubten Flugbereiches (Flight Envelope) dieses Flugzeugmusters zeigt Abb. 6.

Einen Vergleich zwischen der Modellierung des oben aufgeführten Luftfahrzeugmusters mit BADA und den Referenzdaten des Herstellers

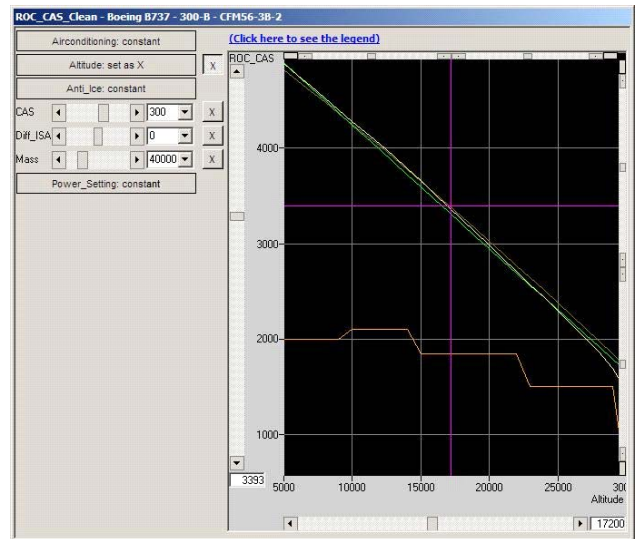


Abb. 6: Darstellung des erlaubten Flugbereiches in PAMPA

zeigt Abb. 7. Für diesen Vergleich kann in PAMPA eine so genannte Pivot-Tabelle verwendet werden.

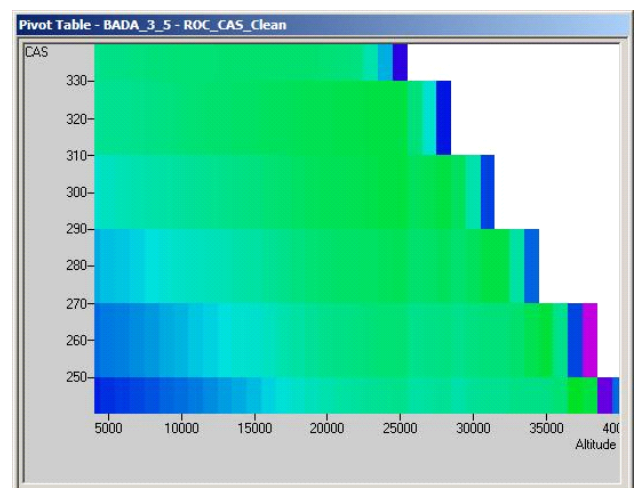


Abb. 7: Vergleich der Modellierung mit den Referenzdaten

Mit PAMPA wird ein detaillierter Vergleich unterschiedlicher Modellierungen untereinander sowie mit Daten der Luftfahrzeughersteller ermöglicht. Es erlaubt die Verifikation eines Modells der Flugleistung. Eine Validierung ermöglicht dieses System nicht. Für diesen Zweck kann das im folgenden Abschnitt beschriebene Werkzeug verwendet werden.

2.4.2 Radar Data Analysis and Processing Tool (RDAPT)

RDAPT ermöglicht eine Validierung der mit einem Flugleistungsmodell erstellten Flugbahnen (siehe auch Haßa 2004b). Als Referenzdaten werden dabei Aufzeichnungen realer Trajektorien genutzt. Diese beruhen sowohl auf Radar- als auch auf Flugplandaten.

Zurzeit befinden sich in der RDAPT-Datenbank der DFS die Trajektorien von 80 kompletten Tagen des deutschen Luftraums aus den Jahren 2003 und 2004. Die Datenbank beinhaltet im Detail:

- 230 000 Trajektorien, davon
- 71 400 Steigflüge
- 57 200 Steig- und Streckenflüge
- 47 500 Sinkflüge
- 37 600 Strecken- und Sinkflüge
- 40 000 000 Radardaten (so genannte Tracks)

Abb. 8 illustriert den Umfang der in der Datenbank verfügbaren Trajektorien.

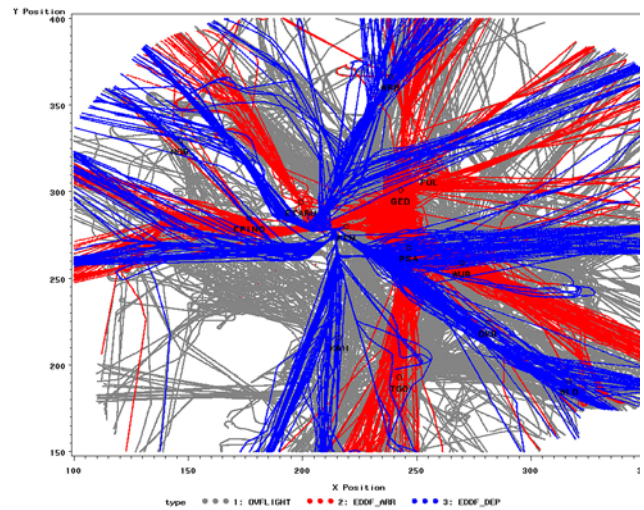


Abb. 8: Flugspuren der RDAPT-Datenbank eines Tages (14.08.2003)

Die Datenbank hat eine Größe von 6,5 Gigabyte. Neben den Radar- und Flugplandaten enthält die Datenbank auch Wetterinformationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD).

RDAPT ermöglicht einen Vergleich von errechneten mit real geflogenen Trajektorien. Abb. 9 zeigt einen solchen Vergleich. In dieser Grafik werden drei errechnete Flugbahnen des Flugzeugtyps

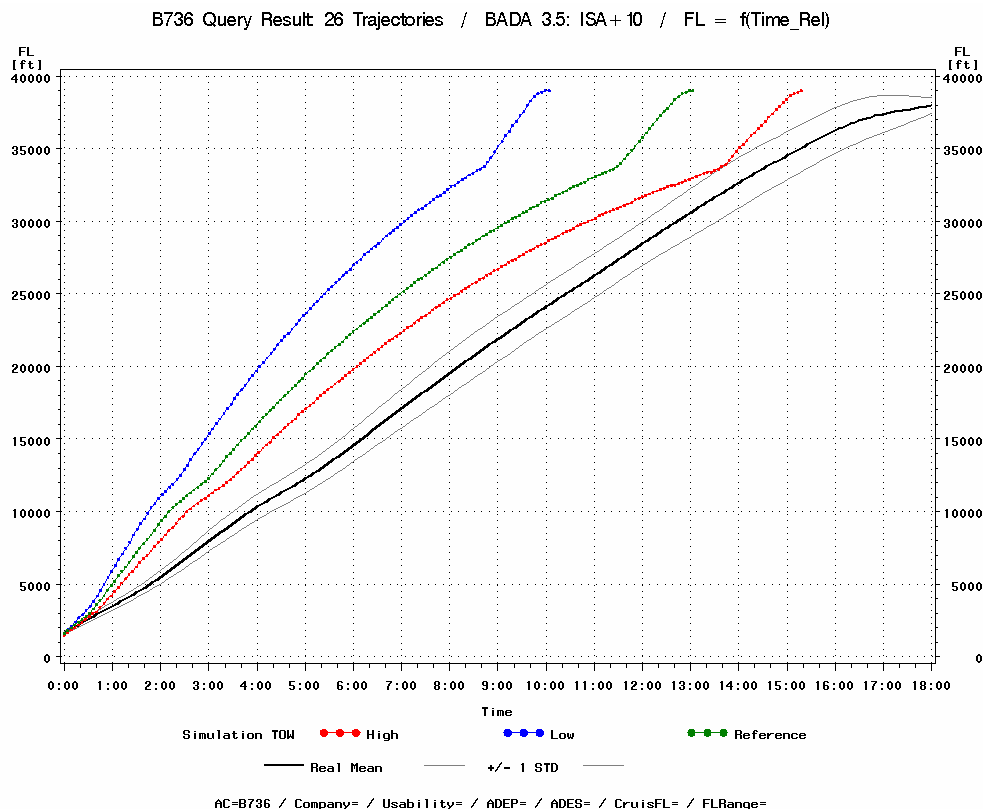


Abb. 9: Vergleich von errechneten mit realen Trajektorien (Beispiel)

Boeing B737-600 (B736) mit unterschiedlichen Beladungszuständen (high, low und reference) mit real geflogenen Trajektorien des gleichen Luftfahrzeugtyps verglichen. Die Berechnungen basieren im vorliegenden Beispiel auf dem Modell BADA in der Version 3.5.

Im Folgenden wird der Einsatz von RDAPT an einem Beispiel erläutert. In diesem werden reale Trajektorien des gleichen Flugzeugtyps (Boeing B747-400, B744) unterschiedlicher Betreiber miteinander verglichen. Dabei haben alle Flüge denselben Start- und Zielflughafen. Es handelt sich um Flüge von Frankfurt (EDDF) nach Tokio international (RJAA). Die Luftfahrzeuge wurden von den Fluglinien All Nippon Airways (ANA), Japan Air Lines (JAL) und Lufthansa (DLH) betrieben. In den folgenden Grafiken wird die Flugphase vom Start bis hin zur Zielflughöhe (Requested Flight Level, RFL) dargestellt. Insgesamt wurden für den Vergleich 120 Trajektorien genutzt.

Abb. 10 vergleicht die drei Trajektorientypen im Bezug auf erreichte Höhe (Flight Level, FL) pro Zeiteinheit. Dabei treten noch keine großen Abweichungen zwi-

schen den einzelnen Nutzern des betrachteten Flugzeugtyps auf.

Trägt man die Fluggeschwindigkeit (Calibrated Airspeed, CAS) über die erreichte Flughöhe auf (siehe Abb. 11), so zeigen sich erste Abweichungen je nach Betreiber des Luftfahrzeuges.

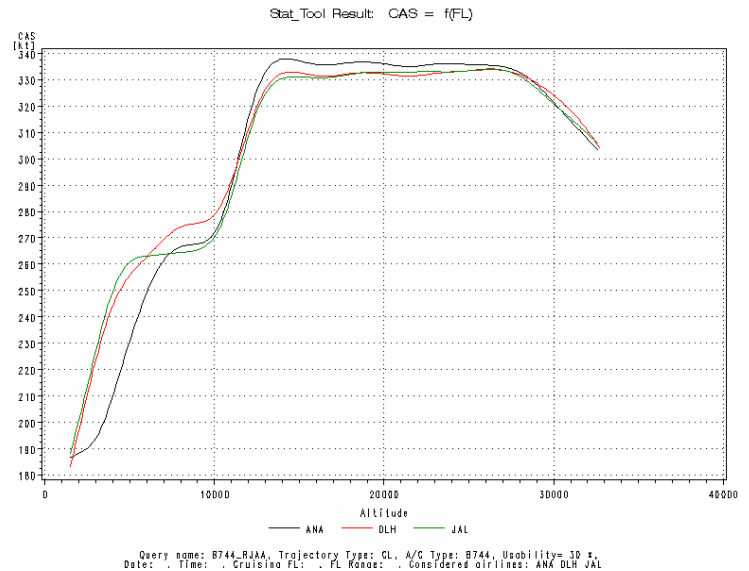


Abb. 11: Vergleich der Trajektorien (Geschwindigkeit über Höhe)

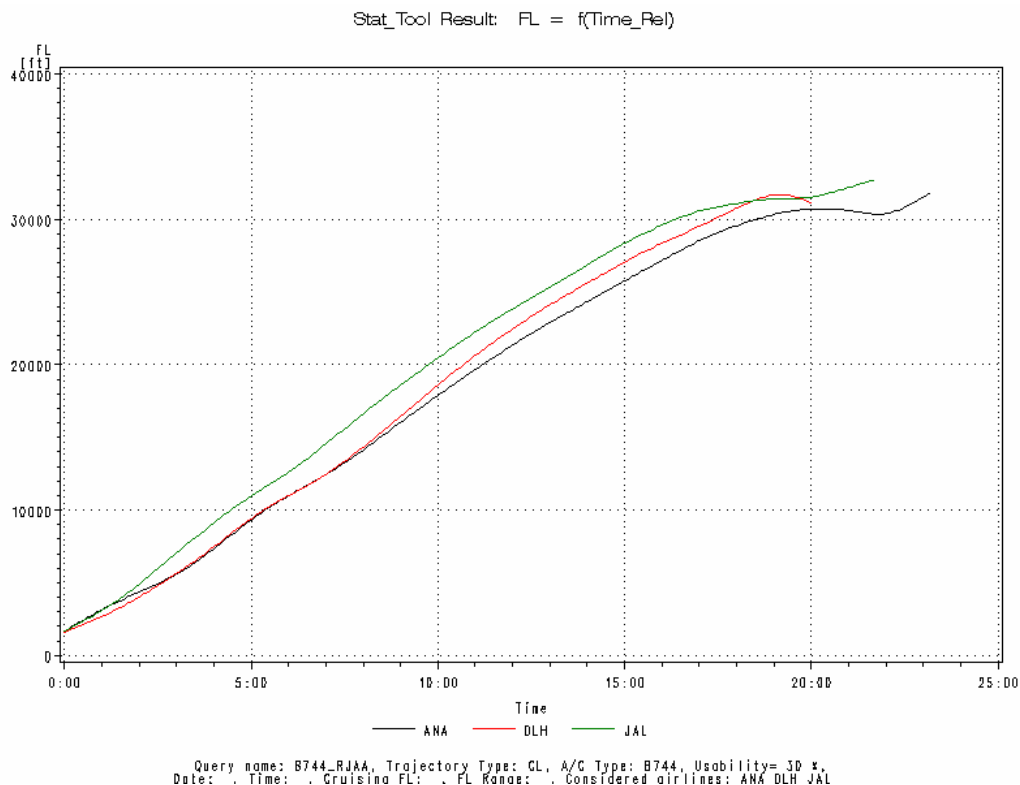


Abb. 10: Vergleich der Trajektorien (Höhe über Zeit)

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Luftfahrzeugbetreibern werden deutlicher, wenn man die Steigrate (Rate of Climb, ROC) über der Flughöhe aufträgt (siehe Abb. 12). So treten in der gleichen Flugphase Unterschiede von mehreren hundert feet/min zwischen den einzelnen Betreibern auf.

Dieser Vergleich zeigt, dass ein genaues Modell der Flugleistung notwendig, jedoch nicht hinreichend ist. Neben der Flugleistung sollten auch unterschiedliche Betreiber modelliert werden. Dies ist in den meisten Flugsicherungssimulatoren noch nicht der Fall. Hier befindet sich ein weites Feld für weitere Entwicklungen.

Mit den vorgestellten Möglichkeiten der Modellierung, Verifikation und Validierung der Flugleistung stehen Nutzern von Flugleistungsdaten umfangreiche Möglichkeiten zur Überprüfung und Verbesserung der Modelle zur Verfügung. Diese werden nicht nur in Simulationssystemen, sondern zunehmend auch in operationellen Systemen zur Trajektoriengenerierung verwendet. Die Modellierung der Flugleistung hat dabei bereits einen sehr hohen Stand erreicht. Im Bereich der Modellierung des Luftfahrzeugverhaltens können jedoch noch große Verbesserungspotenziale erwartet werden.

Fazit

Da die Trajektoriengenerierung und damit auch die Modellierung der Luftfahrzeugleistung zunehmend an Bedeutung gewinnt, kann davon ausgegangen werden, dass sich ein immer größerer Personenkreis mit diesen Themen befassen muss. Der vorliegende Artikel sollte dafür eine allgemeine Einführung in die Modellierung, Verifikation und Validierung der Luftfahrzeugleistung am Beispiel der Echtzeitsimulation bieten. Dabei wurde auch auf die in diesem Bereich eingesetzten Simulatoren und deren Modellierung der Luftfahrzeugleistung eingegangen. Dieser Überblick soll dem Leser eine Einordnung der verschiedenen Modelle und Begriffe ermöglichen und Anknüpfungspunkte für tiefer gehende Studien bieten. Die nachfolgend aufgeführten Quellen sollen dabei als weitere Basis dienen.

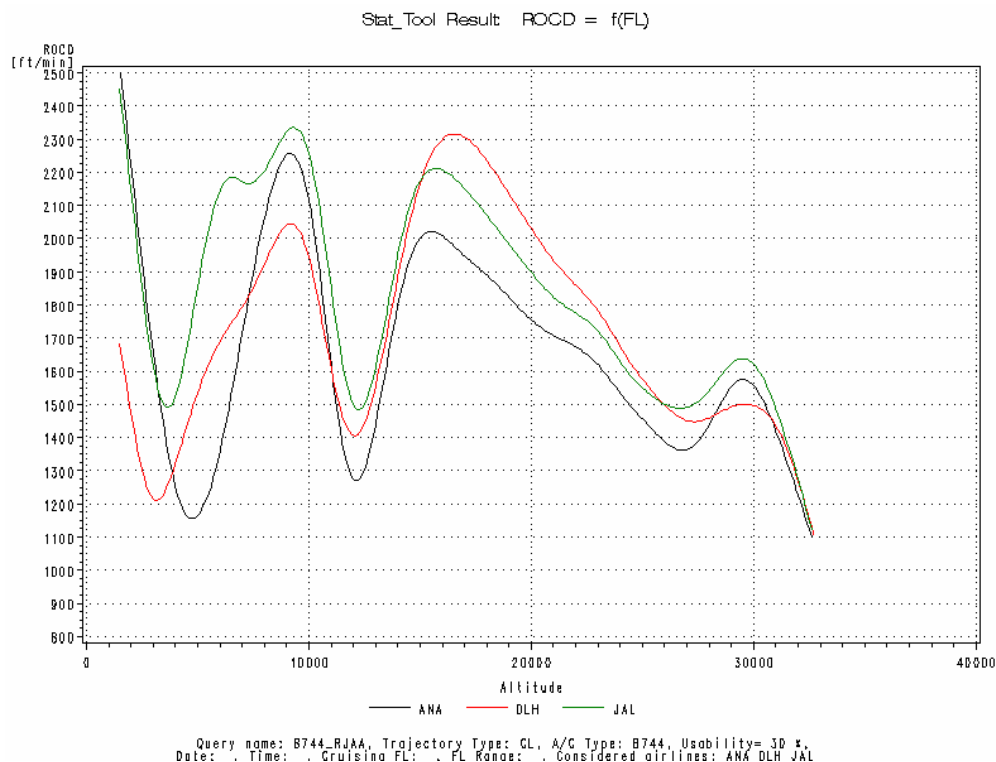


Abb. 12: Vergleich der Trajektorien (Steigrate über Höhe)

Literaturverzeichnis

- Abbott, T. (2002) Speed Control Law for Precision Terminal Area In-Trail Self Spacing. Hampton, Virginia: NASA Langley Research Center
- Abundo, S. (1990) An Approach for Estimating Delay at a Busy Airport. Boston, Massachusetts Institute of Technology
- Akinbodunse, D.; Obah, O.; Kim, C. (2006) Operational Evaluation of Traffic Management Advisor Using Statistical Performance Metrics and Simulations Approach. Air Traffic Control Quarterly Volume 14 Number 4
- Amor, S.; Tran, D., Bui, M. (2006) Investigating Air Traffic Control Dynamics Using Random Cellular Automata. Ein Beitrag zum EUROCONTROL Innovative Research Workshop 2006, Brétigny-sur-Orge: EUROCONTROL EEC
- Bierwagen, T. & Tautz, A. (2005) Methodik zur experimentellen Bestimmung des Kapazitätssteigerungspotentials neuer Air Traffic Management Systeme. Beitrag Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2005, Friedrichshafen: DGLR
- Brokof, U. (1986) Modelle zur Beschreibung von Warteschlangen im Luftverkehr als Hilfsmittel einer Optimierung hinsichtlich Sicherheit und Wirtschaftlichkeit. DVFLR-Mitteilung 86-24 Modellierung von Systemen im Bereich von Flugführung und Flugsicherung für Forschung, Entwicklung und Bewertung, Braunschweig: DFVLR Institut für Flugführung
- Brünning, G.; Hafer, X.; Sachs, G. (1986) Flugleistung: Grundlagen, Flugzustände, Flugabschnitte. Berlin: Springer-Verlag
- Calders, P. & Haßa, O. (2005a) Platform for Aircraft Modeling Performance Analysis – PAMPA. Vortrag im Rahmen des BADA User Group Meetings. Brétigny-sur-Orge: EUROCONTROL EEC
- Calders, P. & Haßa, O. (2005b) Standard Aircraft Modeling Interface – SAMI. Vortrag im Rahmen des BADA User Group Meetings. Brétigny: EUROCONTROL EEC
- EUROCONTROL (2000a). GAME Aircraft Performance Model. Brüssel: EUROCONTROL HQ
- EUROCONTROL (2000b). GAME Model Conventions. Brüssel: EUROCONTROL HQ
- EUROCONTROL (2001b) EUROCONTROL Air Traffic Management Strategy for 2000+", Brüssel: EUROCONTROL HQ
- EUROCONTROL (2004a). User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.6. Brétigny-sur-Orge: EUROCONTROL EEC
- EUROCONTROL (2004b). Coverage of 2004 European Air traffic for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.6. Brétigny-sur-Orge: EUROCONTROL EEC
- EUROCONTROL (2004c). Master ATM European Validation Plan (MAEVA) - Validation Guidance Handbook (VGH) Version 3.0: Brüssel: EUROCONTROL
- Haßa, O. (2004b). Sufficient Modelling of Trajectory Prediction - a Ground User Perspective, Vortrag beim Common Trajectory Prediction Capability - Technical Interchange Meeting. Toulouse: EUROCONTROL
- Haßa, O. & Haugg, E. (2006) DTOP-Simulation bei TE", TE im Fokus Ausgabe 2/06, Langen: DFS Deutsche Flugsicherung GmbH
- Iagaru, M. (2005). BADA supporting tools and modelling enablers. Vortrag im Rahmen des BADA User Group Meetings. Brétigny-sur-Orge: EUROCONTROL EEC
- Kaufhold R. & Lauf, W. (2000) Joint Navigation Experiments - Forecast Capability of the ATM Process Model. Langen, DFS Deutsche Flugsicherung GmbH
- Kaufhold, R. (2008) Abschluss des Vorhabens „Kooperatives Air Traffic Management“ TE-im Fokus Ausgabe 2/08, Langen: DFS Deutsche Flugsicherung GmbH
- Kim, C.; Abubaker, K; Obah, O (2005) Cellular Automata Modeling of En Route and Arrival Self-Spacing for Autonomous Aircraft. Beitrag zum 50th Annual Meeting of Air Traffic Controllers Association
- Malone, K. (1995) Dynamic Queueing Systems: Behavior and Approximations for Individual Queues and for Networks. Boston, Massachusetts Institute of Technology
- Nuic, A. et al. (2005a). BADA project overview. Vortrag im Rahmen des BADA User Group Meetings. Brétigny-sur-Orge: EUROCONTROL EEC
- Nuic, A. (2005b). Approach to model improvement and validation based on aircraft operational data. Vortrag im Rahmen des BADA User Group Meetings. Brétigny-sur-Orge: EUROCONTROL EEC
- Nuic, A. (2005c). Description of RDAP (Radar Data Analysis and Processing) tool. Brétigny-sur-Orge: EUROCONTROL EEC
- Nuic, A. et al. (2005d). Advanced Aircraft Performance Modelling for ATM: Enhancements to the BADA Model. Beitrag zur 24th Digital Avionics System Conference. Washington: DASC
- Pritchett, A. et al. (2000) Hybrid-system simulation for national airspace system safety analysis. Beitrag zur IEEE Simulation Conference Winter 2000
- Swedish, W. (1981) Upgraded FAA Airfield Capacity Model. Washington: US Department of Transportation, FAA

Impressum:

TE im Fokus - Informationen aus dem Bereich Forschung und Entwicklung der DFS Deutsche Flugsicherung GmbH

TE im Fokus erscheint in der Regel halbjährlich. Dieser Bericht ist elektronisch im Internet (www.dfs.de, Bereich „Das Unternehmen“ → Forschung & Entwicklung → Forschungszeitschrift) sowie über das DFS Intranet, Dokumentationsbereich im F&E Portal (<http://forschungszentrum.lgn.dfs.local>) verfügbar. 70 Exemplare werden in gedruckter Form aufgelegt.

Herausgeber: Bereich Forschung und Entwicklung, TE
DFS Deutsche Flugsicherung GmbH
Am DFS-Campus 5
63225 Langen

Redaktion: Dr. Andreas Herber (andreas.herber@dfs.de),
Oliver Haßa (oliver.hassa@dfs.de),
Stefan Tenoort (stefan.tenoort@dfs.de)

Sekretariat: Petra Schuster (petra.schuster@dfs.de)
DFS Deutsche Flugsicherung
Telefon: 06103-707-5751
Telefax: 06103-707-5741

Dieser Zeitschrift ist eine ISSN (International Standard Serial Number) zugeteilt. Dabei ist zu unterscheiden zwischen der Print- und der Internet-Version. Diese sind wie folgt:

Printversion: ISSN 1861-6364

Internet-Version: ISSN 1861-6372

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 © 2008 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.