

- Aktuelle Entwicklungen bei der Messung der Funkfeldbelastung – vom RFM zum RTRFM
- Häufigkeit von Simultaneous Transmissions im Flugfunk
- Machine Learning Feature Extraction for Improved Trajectory Prediction
- ZAAS – Zukunftsarchitektur ATS-Systeme



Inhaltsverzeichnis

Übersicht der Artikel in diesem Heft	4
Aktuelle Entwicklungen bei der Messung der Funkfeldbelastung – vom RFM zum RTRFM.....	5
Harald Fischer & Steffen Marquard	
Häufigkeit von Simultaneous Transmissions im Flugfunk	13
Aline Liedtke & Dr. Jens Konopka	
Machine Learning Feature Extraction for Improved Trajectory Prediction	23
Debora Fieberg (Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg) & Dr. Matthias Poppe	
ZAAS – Zukunftsarchitektur ATS-Systeme	34
Dr. Frank Zetsche & Claus Scheuren	
Impressum	39

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

Harald Fischer & Steffen Marquard: Aktuelle Entwicklungen bei der Messung der Funkfeldbelastung – vom RFM zum RTRFM. Das Thema Funkfeldmessung wird bei der DFS bereits seit mehr als 18 Jahre betrieben. Damals war TCAS der Hauptnutzer doch mittlerweile hat sich einiges verändert: TCAS mit Hybrid Surveillance, ADS-B, Mode-S Enhanced Surveillance, Multilateration im Flughafenbereich, aber auch en-route als Wide Area Multilateration (WAM) sowie die Entwicklung im Bereich Remotely Piloted Aircraft Systems und deren Beitrag zur Funkfeldbelastung. Daneben hat die Europäische Kommission Regelungen eingeführt, welche u.a. die Mitgliedsstaaten verpflichten, das für die Flugverkehrskontrolle genutzte Spektrum zu schützen. Dies alles erfordert ein konsequentes Monitoring der Frequenznutzung. Bei der Funkfeldmessung haben sich die Herangehensweise, bedingt durch verbesserte technische Möglichkeiten, aber auch das Messobjekt selbst in den zurückliegenden Jahren stetig verändert. Der vorliegende Artikel beschreibt den aktuellen Entwicklungsstand des DFS Real Time Radio Field Monitors (RTRFM). Darin wird die externe Kalibrierung mit einem eigens entwickelten Signalgenerator vorgestellt und bewertet. Diese soll bei deutlich geringerer Komplexität zu robusten Messergebnissen führen. Abschließend werden aktuelle Messungen der Funkfeldbelastung präsentiert.

Aline Liedtke & Dr. Jens Konopka: Häufigkeit von Simultaneous Transmissions im Flugfunk. Der Flugfunk ist die bedeutsamste Kommunikationsform zwischen Bord und Boden. Der Funkverkehr wird dabei in der Betriebsart „Wechselsprechen“ ausgeführt, das heißt, dass zu einer Zeit nur jeweils von einer Funkstelle gesendet werden sollte, da gleichzeitige Sendungen von verschiedenen Stellen auf derselben Frequenz in der Regel unverständlich sind. Ein Umstand, der im Zusammenspiel mit anderen Effekten potentiell zu kritischen Situationen im Luftverkehr führen kann. Außer sehr detailliert beschriebener Einzelfälle, in denen solche Ereignisse zu Störungen beigetragen haben und einigen wenigen Feldversuchen sind keine weiteren Quellen bekannt, in denen die Häufigkeit von Doppelaussendungen untersucht worden ist. Auch ist die Rate an Ereignissen, in denen ein Funkspruch einen anderen komplett (zeitlich) überdeckt bis dato unbekannt. Um diese Fälle quantifizieren zu können wurde ein mathematisches Modell erstellt, das die zeitlichen Abläufe im Sprechfunkverkehr beschreibt. Daneben wurden Modelle für die Verteilung der zeitlichen Lage und Länge von Funksprüchen entwickelt. Mittels Monte-Carlo-Simulationen wurde die Häufigkeit von Simultaneous Transmissions abgeschätzt und mit den verfügbaren Daten verglichen. In diesem Artikel werden die Modelle und Parameter beschrieben und erste Erkenntnisse der Simulationen vorgestellt.

Debora Fieberg (Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg) & Dr. Matthias Poppe: Machine Learning Feature Extraction for Improved Trajectory Prediction. Dieser Artikel stellt einen Ansatz vor, wie die „Machine Learning“-Technologie genutzt werden kann, um genaue Vorhersagen von Trajektorien zu erzeugen. Speziell der vertikale Anteil stellt die größten Herausforderungen dar. Moderne Flugsicherungssysteme bieten mit einem gewissen Automationsgrad den Lotsen Unterstützung bei der Planung und Überwachung des Flugverkehrs durch Darstellung und Vorhersage der Flugverläufe. Je genauer diese vorhergesagt werden können, desto besser kann die Luftraumkapazität genutzt und die Sicherheit gewährleistet werden sowie die Arbeitsbeanspruchung der Lotsen reduziert werden. Es werden die Ansätze zur Entwicklung von Algorithmen beschrieben, die die Daten aus Mode S Enhanced Surveillance Data beziehen und welche Parameter hierfür erfolgversprechend sind.

Dr. Frank Zetsche & Claus Scheuren: ZAAS – Zukunftsarchitektur ATS-Systeme. Mit dem Programm ZAAS - Zukunftsarchitektur ATS-Systeme - plant die DFS eine nach modernen IT-Grundsätzen gestaltete Architektur für ihre ATS-Systeme einzuführen, die zukunftssicher, flexibel und anpassungsfähig ist. Der Ansatz einer service-orientierten, zentralen Architektur wird auch von anderen Flugsicherungen in Europa betrachtet sowie im SESAR-Forschungsprogramm verfolgt. Es werden ein Überblick über das Programm gegeben und die zugrundeliegenden Technologien, wie Virtualisierung, Service Oriented Architecture, Cloud Computing, u.a. vorgestellt sowie organisatorische Folgen betrachtet.

Aktuelle Entwicklungen bei der Messung der Funkfeldbelastung – vom RFM zum RTRFM

Harald Fischer & Steffen Marquard

Einleitung

Das Thema Funkfeldmessung, oder präziser: die Messung der Belastung der Sekundärradarkanäle 1030 MHz und 1090 MHz, hat mittlerweile eine gewisse Tradition innerhalb der DFS. In der Tat liegen die Anfänge bereits mehr als 18 Jahre in der Vergangenheit. Allerdings haben sich die Herangehensweise, bedingt durch verbesserte technische Möglichkeiten, aber auch das Messobjekt selbst in den zurückliegenden Jahren stetig verändert.

Um die Jahrtausendwende herum war es die Einführung von TCAS (Traffic Alert and Collision Avoidance System), ein bordgestütztes Sicherheitssystem, die den Blick auf die Funkfeldbelastung lenkte. Mit TCAS wurde ein System mandatiert, das, sehr einfach formuliert, wie ein fliegendes Radar funktioniert. Damit trat in der zivilen Luftfahrt erstmals der Fall ein, dass nicht mehr allein die Radaranlagen vom Boden aus die Transponder abfragten, sondern auch in der Luft Abfrager aktiv waren. Die systembedingte Eigenschaft von TCAS, dass die Abfragen nicht wie bei einem Radar scharf gebündelt gesendet, sondern in maximal 4 Quadranten abgestrahlt werden und die Updaterate nicht bei 5-12 s, entsprechend der Antennendrehzahl eines Radars, sondern (bei entsprechender Luftlage) ein Update mit jeder Sekunde erfolgt, führten im Jahr 2000 zu dem Ergebnis, dass TCAS mit 70 % der Hauptnutzer des SSR-Antwortkanals 1090 MHz war.

Achtzehn Jahre später hat sich die Systemlandschaft, welche die Sekundärradarkanäle nutzt, deutlich verändert. Auch getrieben von den Erkenntnissen im Jahr 2000 wurde nach Möglichkeiten gesucht, die durch TCAS induzierte Funkfeldlast zu reduzieren. Eine mittlerweile mandatierte Komponente (Hybrid Surveillance) nutzt, falls vorhanden und von guter Qualität, die über ADS-B abgestrahlten Positions- und Geschwindigkeitsinformationen zur Beobachtung des umgebenden Verkehrs. TCAS-Abfragen erfolgen nur noch im Falle einer kritischen Annäherung und zur Bestätigung der Datenqualität der ADS-B-Informationen. Ist das nicht ein Widerspruch, Kanalentlastung durch ADS-B bzw. Kanalentlastung durch einen neuen Kanalbelastung? In der Tat konnte der Anteil von ADS-B-Telegrammen an der Funkfeldbelastung im Jahr 2000 vernachlässigt werden.

Der Ausrüstungsgrad beschränkte sich auf ein paar Testinstallationen. Heute liegt der Anteil von mit ADS-B ausgerüsteten Luftfahrzeugen bei etwa 80 %. Bei einer Telegrammrate von 6,2 Hz (gemäß ADS-B Version 2, verpflichtend ab 2020) für die Übertragung von Position, Geschwindigkeit, Identifikation und Status ist der ADS-B-Anteil mittlerweile sicher von Bedeutung.

Neben den bereits genannten Technologien hat in den vergangenen Jahren eine weitere Ortungstechnologie Einzug gehalten: Multilateration. Durch Multilateration können Ziele prinzipiell ohne zusätzliche Belastung der SSR-Kanäle erfasst werden. Sendet ein Luftfahrzeug ein Telegramm aus, welches von mindestens 3 Sensoren empfangen wird, kann aus den Laufzeitunterschieden des Signals die Position des Senders ermittelt werden. Doch gerade in Bereichen, in denen aufgrund hoher Kanallast die Dekodierwahrscheinlichkeit zurückgeht, müssen Multilaterationssysteme auch aktiv abfragen, um die erforderliche Entdeckungswahrscheinlichkeit sicherzustellen. Die Kanallast nimmt also dort zu, wo sie ohnehin schon hoch ist.

Es hat sich seit dem Jahr 2000 also einiges verändert: TCAS mit Hybrid Surveillance, ADS-B, Mode-S Enhanced Surveillance, Multilateration im Flughafenbereich, aber auch en-route als Wide Area Multilateration (WAM). Noch nicht absehbar ist die Entwicklung im Bereich RPAS (Remotely Piloted Aircraft System), im allgemeinen Sprachgebrauch als Drohne bekannt, die auch in Bezug zur Funkfeldbelastung beobachtet werden muss. Schon allein die genannten Veränderungen sprechen für ein konsequentes Monitoring der Frequenznutzung, ähnlich wie seinerzeit durch die Einführung von TCAS begründet.

Die Funkfeldmessung hat aber auch aus anderen Gründen an Relevanz für die Flugsicherheit gewonnen. Zum einen aus Gründen der Regulierung: Die Europäische Kommission hat mit der Durchführungsverordnung Nr. 1207/2011 (überarbeitet durch DVO 2017/386) Regelungen eingeführt, welche die Leistung und Interoperabilität von Ortungsverfahren im einheitlichen europäischen Luftraum sicherstellen sollen [1]. Durch diese Verordnung werden die Mitgliedsstaaten verpflichtet, das für die Flugverkehrskontrolle genutzte Spektrum zu schützen und die dafür notwendigen Maßnahmen zu ergreifen. Konkret ist gefordert, dass die

Summe der bodengestützten Abfrager nicht zum Überschreiten der nach ICAO Annex 10 spezifizierten Transponderraten führen darf. Zum anderen ein Vorfall, der die in der genannten DVO gelisteten Forderungen untermauert: Am 5. und 10. Juni 2014 kam es in Zentraleuropa zu mehreren Zielausfällen, und Luftfahrzeuge waren nur noch als Primärziel zu detektieren. Die kooperative Ortung, basierend auf den Transponderantworten der Luftfahrzeuge, war nicht mehr verfügbar. Die EASA kam nach detaillierten Analysen zu dem Schluss, dass irregulär hohe Abfrageraten zum Ausfall der Transponder geführt hatten. Entsprechend erinnert EASA in ihren resultierenden Empfehlungen an die Einhaltung der DVO zum Schutz des Spektrums. Konkret empfiehlt sie, das „Monitoring“ nicht auf die Beobachtung der Abfrager einzuschränken, sondern auf die Luftfahrzeuge auszuweiten.

Über die Aktivitäten zur Funkfeldmessung wurde an dieser Stelle bereits mehrfach berichtet [7], [10], [11]. Die ersten Ansätze zur Funkfeldmessung, um das Jahr 2000 herum, basierten auf einer digitalen Aufzeichnung der Kanäle im Basisband mit anschließender Analyse der Pulse und daraus regenerierten Signalen/Meldungen [2], [3], [4], [5]. Hierfür wurde das System CORAL (A/D Converter, Recorder and Analyzer) entwickelt. Der entscheidende Nachteil dieser Methode ist, dass Messung und Auswertung nur sequentiell in kleinen Intervallen erfolgen können, d.h. eine kontinuierliche Erfassung des Funkfeldes damit nicht möglich war. Dieser Ansatz wurde durch eine signalorientierte Messung abgelöst. Bei dieser Herangehensweise werden die Signale/Meldungen von einem dedizierten Empfänger ermittelt und die Funkfeldbelastung auf Basis dieser Information in einer anschließenden Verarbeitungssoftware bestimmt [6], [7]. Mit dieser Methode war es möglich, die Funkfeldlast in Echtzeit und kontinuierlich zu bestimmen. Nach wie vor ungelöst war aber das Problem, wie der Anteil der Signale ermittelt werden kann, die durch den Empfänger aufgrund von Störeinflüssen nicht detektiert werden können, mit anderen Worten, wie groß der Messfehler ist. Dieses Thema wird in [7], [8] ausführlich beschrieben. Der dort beschriebene Ansatz, die Detektionswahrscheinlichkeit aus Parametern des Messergebnisses selbst zu bestimmen, konnte durchaus plausibel demonstriert werden. Als nachteilig erwiesen sich jedoch zum einen der an jedem neuen Standort zum Einmessen erforderliche Zeitbedarf, zum anderen die Häufigkeit von Ausreißern im Verlauf der Messungen.

Der vorliegende Artikel beschreibt zunächst den aktuellen Entwicklungsstand des DFS Real Time Radio Field Monitor (RTRFM). Anschließend wird die externe Kalibrierung mit einem eigens entwickelten Signalgenerator vorgestellt und bewertet. Diese soll bei deutlich geringerer Komplexität zu robusten Messergebnissen führen. Abschließend werden aktuelle Messungen der Funkfeldbelastung präsentiert.

Der RTRFM 2018

Der Messverbund des RTRFM basiert auf dem AMOR-System (ACAS-Monitor) und umfasst aktuell vier Standorte (Wasserkuppe, DLR in Braunschweig, Flughafen München, Flughafen Frankfurt) und ein Mess- und Entwicklungssystem im Forschungszentrum in Langen. Ein RTRFM-Standort besteht aus folgenden Modulen:

- Sensorik

Die Sensorik, bestehend aus Antenne und 1030/1090 MHz Empfänger für die SSR-Kanäle, wird am Messstandort aufgebaut. Sie definiert den Ort der Funkfeldmessung. Die Sensorik liefert an einer LAN-Schnittstelle alle von ihr dekodierbaren Telegramme und zusätzlich weitere Informationen zur Empfangssituation, wie Empfangspegel, durchgeführte Fehlerkorrektur etc. Die Sensorik wurde in den zurückliegenden Jahren sukzessive erneuert. Die Grundstruktur des Systems wurde beibehalten, die Empfangseigenschaften jedoch stark verbessert. Die Empfänger, die in den bisherigen Arbeiten [6,7,8] verwendet wurden, wurden ersetzt. Somit konnten die speziell dafür ermittelten Korrekturverfahren nicht mehr angewendet werden. Sie wurden durch eine sehr viel einfachere und doch wirkungsvollere Methode ersetzt, siehe Abschnitt Methodik zur Messfehlerkorrektur.

- RTRFM-PC

Der RTRFM-PC verarbeitet den Rohdatenstrom der Sensorik und gegebenenfalls die Steuerinformation des Testsignalgenerators. Der PC sollte aufgrund der zu erwartenden Datenmenge lokal an die Sensorik angebunden sein. Bei der aktuellen Konfiguration beträgt die Datenrate am Ausgang der Sensorik (Rohdatenstrom) etwa 2 Mbps.

- Referenzsignalgenerator

Der Referenzsignalgenerator dient der externen Kalibrierung lokal angebundener Sensorik. Er wurde als Prototyp im Rahmen einer im Bereich OP/V „Innovationsmanagement und Validierung“ durchgeführten studentischen Arbeit realisiert und wird

hauptsächlich im Forschungszentrum eingesetzt. Über eine Benutzungsschnittstelle können Testsignale ähnlich einem Arbitrary Functions Generator (AFG) konfiguriert werden. Die „Funktionen“ sind dabei auf SSR- und Mode-S-Telegramme begrenzt. Diese können in Inhalt, Abfolge, Frequenz, Dauer und Pegelverlauf frei konfiguriert werden. Das Signal wird an zwei Ausgängen des Generators bereitgestellt: Als modulierte HF-Signal zur Einspeisung in die Sensorik und als Infosignal für den RTRFM-PC. Somit hat die RTRFM-Software Kenntnis über das anliegende Referenzsignal und kann die momentane Detektionswahrscheinlichkeit für diesen Signaltyp bestimmen. Zwecks Einspeisung des Testsignals in den Empfangszweig der Sensorik muss sich der Generator am Standort des zu kalibrierenden Sensors befinden. Die Bedienung kann aus der Ferne über Netzwerk erfolgen.

- MySQL-Server

Auf dem MySQL-Server wird für jeden Sensorstandort eine MySQL-Datenbank für die Speicherung der jeweiligen Messdaten vorgehalten. Der Server ist im Forschungszentrum der DFS in Langen untergebracht.

- Statistik

Die auf dem RTRFM-PC vorverarbeiteten und in der Datenbank abgelegten Informationen werden täglich automatisch ausgewertet und in Form von Reports zusammengefasst. Es werden Zeitverläufe der Flugzeugpopulation, Signalverteilung, Transponderbelastung und Gesamtfunkfeldlast erstellt. Die Reports werden basierend auf der Skriptsprache PHP erstellt und sind somit plattformunabhängig nutzbar. Die Auswertungen sind bezüglich Zeitbereich und Detaillierungsgrad der Analyse parametrierbar und könnten auch über ein WEB-Interface gesteuert werden. Die Skripte sind dahingehend vorbereitet.

- Netzwerk

Die Sensorstandorte sind, falls verfügbar, über DFS-interne Netze angebunden. Wo dies nicht möglich ist, werden VPN-Verbindungen, teilweise über Internet, teilweise über lokale Zugangsnetze, wie das Deutsche Forschungsnetz (DFN) beim DLR in Braunschweig, genutzt.

Kalibrierung

Ein wesentliches Argument für die Nutzung der AMOR-Sensorik zur Funkfeldmessung war die durch die Sensorik realisierte Signalerkennung. War diese bei CORAL noch in die Teilprozesse A/D-Wandlung und Speicherung mit nachgelagerter Puls- und Signaldetektion aufgeteilt, werden diese Schritte jetzt von

einer „Blackbox“ in Echtzeit durchgeführt. Die damit gewonnenen Vorteile der Echtzeitverarbeitung und kontinuierlichen Messung wurden aber mit einer gewissen Intransparenz erkauft. War es mit CORAL noch möglich, wenn auch in der Praxis aufgrund des erforderlichen Zeitaufwandes kaum realisierbar, die Messergebnisse visuell nachzuprüfen, liefert der Sensor nur das Ergebnis ohne weitere Möglichkeit zur Verifikation. Daher setzten sich verschiedene Arbeiten in der Vergangenheit mit dem Thema der Kalibrierung auseinander. Dabei wurde mit dem m-wertigen Löschkanal [5] ein durchaus vielversprechender Ansatz gefunden, der sich in der Umsetzung jedoch als zu komplex herausgestellt hat. Nachfolgend wird ein Ansatz beschrieben, der diese Methode auf eine Dimension reduziert. Nach einer Begriffsdefinition folgen die Erläuterung der Kalibriermethode und eine Abschätzung der Wirksamkeit anhand von Messungen.

Begriffe und Definition

Die in der Messtechnik gebräuchlichen Begriffe sind in DIN 1319-1 veröffentlicht [9]. Die in diesem Artikel verwendeten Begriffe Messung, Messgerät, Messwert, Messergebnis und Kalibrierung sollen nun gemäß dieser DIN für die Funkfeldbestimmung erläutert und angewendet werden.

Das Funkfeld auf den SSR-Kanälen besteht aus einer Vielzahl verschiedener Signale. Dieses Signalgemisch liegt am HF-Eingang des Sensors an. Am Ausgang des Sensors, ein Ethernet Interface, wird ein digitaler Datenstrom ausgegeben und dieser mit einem Zähler verarbeitet. Durch Sensor und Zähleinrichtung wird das Messgerät realisiert. Ziel der Messung ist es, die Anzahl der verschiedenen Signale am Eingang zu bestimmen. Zunächst wird als Messwert jedoch die Anzahl der erfolgreich dekodierten Signale am Ausgang des Sensors erhalten. Dieser Messwert repräsentiert in unserem Fall auch das Messergebnis. Zum wahren Wert, der Signanzahl am Eingang des Sensors, gelangt man, indem das Messergebnis berichtigt wird.

Kalibrierung bedeutet gemäß DIN 1319-1 „Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Messwert ... und dem richtigen Wert ... bei vorgegebenen Bedingungen“. Dieser Zusammenhang dient der Erstellung einer Korrekturabelle oder Kalibrierfunktion für die Bestimmung des wahren Wertes aus dem Messwert oder Messergebnis. Für die Kalibrierung wurden in die Sensorik zunächst ausschließlich Testsignale eingespeist. Diese Testsignale konnten aufgrund ihrer eindeutigen Signatur am Ausgang der Sensorik ausgekoppelt und gezählt werden. Somit wurde, im

Sinne des Begriffs Kalibrierung, der Zusammenhang zwischen dem Messergebnis (Anzahl der Testsignale am Ausgang) und dem wahren Wert (am Eingang eingespeiste Anzahl) hergestellt. Die Detektionswahrscheinlichkeit für Mode-S-Signale liegt bis zu einem minimalen Signalpegel von -85 dBm bei mindestens 99 %. Folglich arbeitet der Sensor bis zu diesem Pegel, ohne Störsignal, nahezu verlustfrei. Unter der Bedingung, dass auf den SSR-Kanälen keine Signalüberlagerungen auftreten, wäre für die Funkfeldmessung bis -85dBm keine Kalibrierung erforderlich.

Methodik zur Messfehlerkorrektur

Wird dem Testsignal nun zusätzlich das real existierende und zeitvariante Funkfeld überlagert, ändert sich dieses Bild. Abhängig von Pegel und Funkfeld sinkt die Detektionswahrscheinlichkeit. Abbildung 1 zeigt die

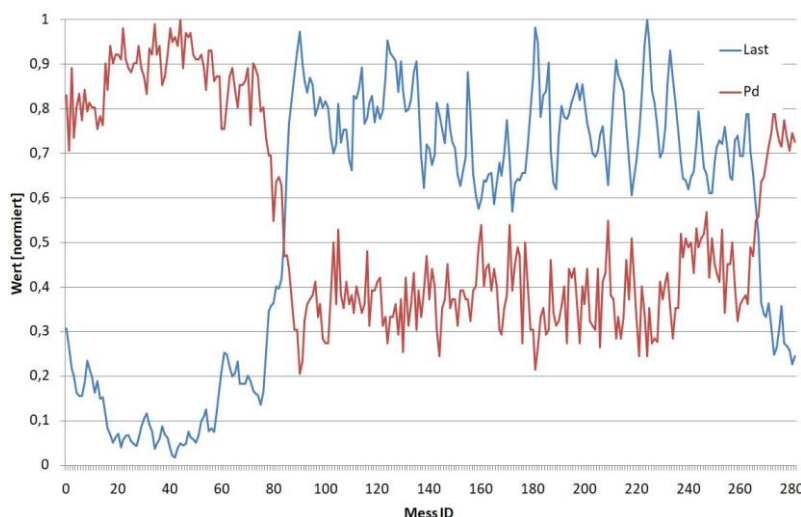


Abb. 1: Vergleich Kanallast (blau) und Dekodierwahrscheinlichkeit (rot)

normierten Verläufe der empfangenen und erfolgreich dekodierten Signale (Last) und ermittelten Detektionswahrscheinlichkeit für das Testsignal (Pd).

Der Zusammenhang der beiden Parameter ist deutlich zu erkennen. Berechnet man für die Verläufe in dem Beispiel den Korrelationskoeffizienten, erhält man den Wert -0,95. Dieser Wert unterstützt die These, dass ein starker, wenn auch gegenläufiger Zusammenhang besteht. Diese Erkenntnis ist nicht neu und wurde bereits als eine Komponente des m-wertigen Löschanalyses eingesetzt [5]. Welchen Nutzen kann man nun aus dem dargestellten Zusammenhang zwischen Messergebnis und Testsignal Pd ziehen? Ist es möglich, basierend auf diesem Zusammenhang eine Kalibriertabelle oder Funktion zu ermitteln, die den Messwert auf den richtigen

Wert abbildet bzw. den Messfehler reduziert? Und kann der wahre Wert möglicherweise mit Angabe eines Restfehlerintervalls angegeben werden?

Um diese Fragen beantworten zu können, wurde der RTRFM in Langen mit variablen Testsignalen beaufschlagt. Die Testsignale wurden dem Antennensignal mit einem HF-Koppler überlagert und in der Signalleistung durchgestimmt. Bei der 14 Tage andauernden Analyse wurden ca. 60.000 Datensätze zu Funkfeldlast, Signalstärke und Dekodierwahrscheinlichkeit erhoben. Abbildung 2 zeigt den ermittelten Zusammenhang zwischen Funkfeldlast (Abszisse) und mittlerer Dekodierwahrscheinlichkeit (Ordinate) mit der Referenzsignalleistung als Parameter. Exemplarisch ist das Verhalten für lange Mode-S downlink Signale dargestellt, grundsätzlich ist das ermittelte Verhalten jedoch für alle Mode-S-Signale gleich. Wie erwartet, nimmt die Dekodierwahrscheinlichkeit mit zunehmender

Funkfeldlast (häufigere Signalüberlagerungen) und abnehmendem Pegel, d.h. schlechteres Signal/Stör-Verhältnis ab. Anders formuliert: Die Differenz zwischen Messwert und wahren Wert steigt, der Messfehler nimmt zu. Bemerkenswert ist dabei der nahezu lineare Verlauf im vorherrschenden Funkfeld. Neben dem in Abbildung 2 dargestellten Mittelwert wurden auch Varianz und Verteilung der Dekodierwahrscheinlichkeiten ermittelt. Nimmt man für die jeweilige Detektionswahrscheinlichkeit eine Normalverteilung an, was nach Ansicht der empirisch ermittelten Verteilungskurven zulässig erscheint, kann man noch einen Schritt weiter gehen.

Auf Basis der empirisch ermittelten Detektionswahrscheinlichkeiten kann der Messwert korrigiert werden. Dieser korrigierte Wert unterscheidet sich vom wahren Wert dann noch durch einen zufälligen Fehler, dessen Größe wiederum abhängig von Signalpegel und Funkfeldlast ist. Die Wahrscheinlichkeit, dass dieser Fehler eine bestimmte Größe nicht überschreitet, kann bei angenommener Normalverteilung über die Varianzen berechnet werden. Die Darstellung der Kurven findet sich in Abbildung 3. Bei einem Signalpegel von -80dBm liegt der Fehler in 95 % der Fälle unter 16 %, selbst bei hoher Funkfeldlast. Mit steigendem Pegel nimmt der Fehler ab. Im Vergleich dazu lag der ermittelte mittlere Fehler (Abbildung 2) bei über 30 %. Ein Offset, der zu einer

systematisch zwar bekannten, aber bislang nicht quantifizierbaren Unterschätzung der Funkfeldbelastung

Kanäle stark geändert. War im Jahr 2000 TCAS mit 70 % Anteil noch der Hauptnutzer, zeigt Abbildung 4 die

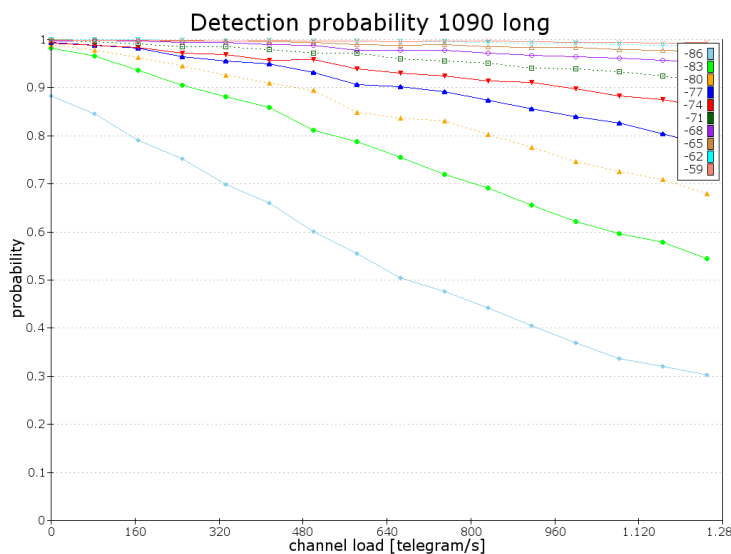


Abb. 2: Dekodierwahrscheinlichkeit

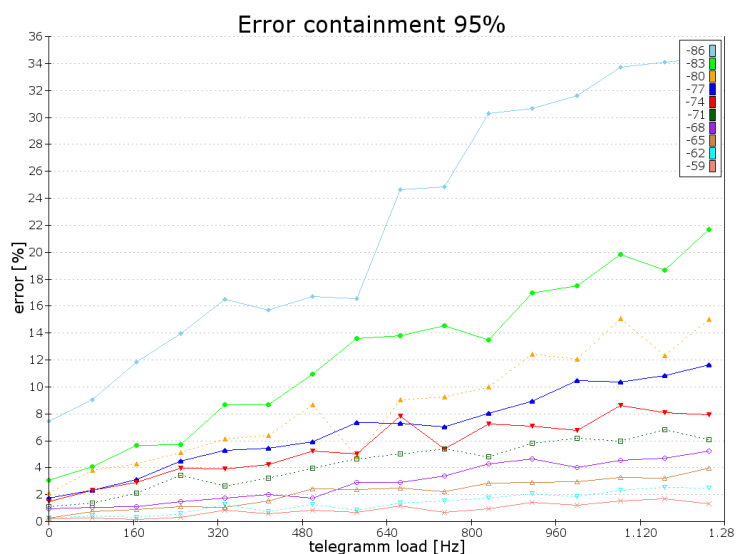


Abb. 3: Fehlerabschätzung

führte. Durch die gefundene Korrekturmöglichkeit besitzt die Messung mit dem RTRFM nun eine deutlich höhere Qualität und Aussagekraft.

Aktuelle Messungen und Analysepotential

In diesem Abschnitt soll an einem Beispiel gezeigt werden, welche Möglichkeiten zur Funkfeldmessung bzw. Detektion von Anomalien und Analyse durch das prototypische System gegeben sind. Zunächst jedoch zum aktuellen Stand der Funkfeldnutzung. Wie Eingangs beschrieben, hat sich die Nutzerlandschaft der SSR-

anteile stark geändert. War im Jahr 2000 TCAS mit 70 % Anteil noch der Hauptnutzer, zeigt Abbildung 4 die aktuelle Verteilung am Standort Wasserkuppe. Die Werte unterscheiden sich natürlich zwischen den Standorten und sind auch Schwankungen unterworfen, grundsätzliche Trends sind aber standortunabhängig feststellbar. Die Mode-S-Anwendungen können aufgrund der im Mode-S-Protokoll definierten Formate in Surveillance, TCAS, ADS-B, Acquisition und Communication unterschieden werden. Klassisches SSR kann ebenfalls identifiziert und extrahiert werden. Etwa ein Viertel entfällt aktuell auf die Ortungsfunktion. TCAS und ADS-B bewegen sich zwischen 14 % und 16 %, TCAS ist folglich nicht mehr der hervorstechende Kanalnutzer. Die Kommunikationsfunktionalität, die das Mode-S-Protokoll bietet, wird derzeit nicht genutzt. Etwas unerwartet liegt der Anteil, der für Acquisition-Prozesse von Mode-S-Radaren aber auch von TCAS genutzt wird, bei ca. 18 %. Überraschend ist dies aus zweifacher Hinsicht. Erstens, die von der DFS betriebenen Mode-S-Radare arbeiten in einer Clusterstruktur und verursachen nachgewiesenermaßen nur eine sehr geringe Anzahl von all-call Antworten. Zweitens, der Acquisition Squitter wird von Mode-S-Transpondern konstant einmal pro Sekunde gesendet und trägt ebenfalls nur zu einem geringen Teil bei. Eine Analyse der Interrogator Codes macht deutlich, dass die Funkfeldnutzung an nationalen Grenzen nicht Halt macht. Der Anteil der DFS-Cluster beträgt weniger als 10 %, der weitaus größere Teil wird von benachbarten und militärischen Anlagen verursacht. Trotz eines bestehenden Mode-S-Mandats, fällt der größte Anteil, mit etwa einem Drittel

Kanalbelegung, in die Kategorie SSR. Die Tatsache, dass noch immer Luftfahrzeuge mit SSR-Transpondern in Betrieb sind, ist nachvollziehbar und, soweit sie in entsprechenden Lufträumen unterwegs sind, auch nicht zu beanstanden. Auch der Anteil an SSR-Radaranlagen in der gegenwärtigen Ortungsinfrastruktur spielt hier eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Somit ist ein gewisses Maß an SSR-Kanallast erklärbar, der gemessene Anteil überrascht dennoch.

An dieser Stelle sei noch ein Aspekt erwähnt, der ebenfalls die Veränderung der Nutzerlandschaft betrifft

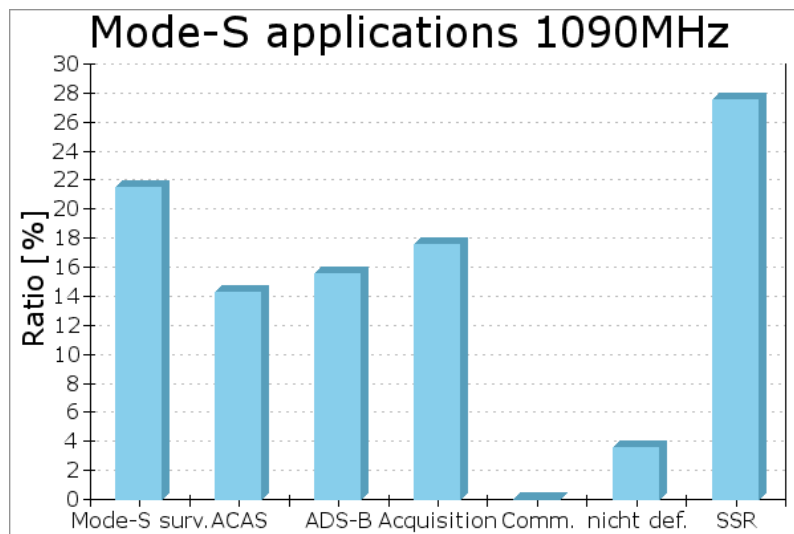


Abb. 4: Verteilung der 1090MHz Kanalnutzung

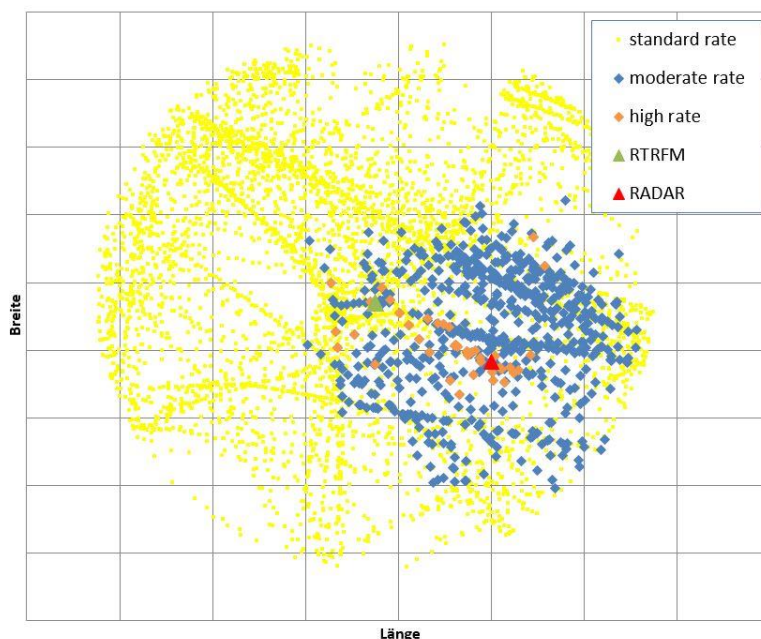


Abb. 5: Geografische Auswertung Transponderlast

und lokal begrenzt auftritt, nämlich die Ausrüstung von Flughafen-Bodenfahrzeugen mit ADS-B. Mit den Sensoren an den Flughäfen Frankfurt und München kann die ADS-B-Kanallast nach den Quellen Flugzeug und Bodenfahrzeug unterteilt werden. Der Anteil der Luftfahrzeuge ist derzeit um den Faktor 4-5 höher, trotzdem sollte die Entwicklung beobachtet werden, ist doch gerade an diesen Flughäfen die Belastung durch Anzahl und Dichte der Flugzeuge (erhöhte TCAS-Aktivität) und MLAT-Systeme (Bodenlage, PAM-FRA, WAM Austria) ohnehin schon besonders hoch.

Im ICAO Annex 10, Volume 4, sind minimale Transponder-Senderaten definiert, die in der DVO 1207/2011 als maximal zulässige Raten referenziert werden. Die Analyse der maximal auftretenden Transponderaten ist daher bereits im Funktionsumfang des RTRFM enthalten. An einem RTRFM-Standort werden seit Februar 2018, neben den üblichen Schwankungen, vermehrt starke Anstiege der Transponderraten über mehrere Stunden festgestellt. Alle weiteren Standardanalysen zeigen keine Auffälligkeiten. Zur Ursachenfindung wurden alle Daten aus der Datenbank extrahiert, die in Bezug zu einem dedizierten Transponder stehen. Dabei wurde festgestellt, dass einige Luftfahrzeuge stark erhöhte „all-call reply“-Raten aufweisen. In den summarischen Übersichten waren diese Anstiege aufgrund der relativ geringen Auswirkung auf das Gesamtfunkfeld nicht signifikant und somit nicht zu erkennen. Mit Hilfe der ADS-B-Positionsinformation der analysierten Flugzeuge wurde das Phänomen grafisch aufbereitet. Abbildung 5 zeigt die all-call-Antwortraten aller Luftfahrzeuge während des Ereignisses. Die gelb eingefärbten Positionen entsprechen normaler Aktivität, blau erhöhter und orange sehr hoher Aktivität. Im Zentrum der Grafik befindet sich der RTRFM, das Zentrum der erhöhten Aktivität ist südwestlich davon, am Standort einer Radaranlage. Die Annahme legt nahe, dass diese Anlage in Zusammenhang zu dem entdeckten Transponder-

verhalten steht, ein Nachweis kann allerdings so noch nicht erfolgen.

Dieses Beispiel illustriert, dass mit kreativen Auswertungsmethoden auch Phänomene erklärt werden können, welche nicht unmittelbar in den erfassten Daten enthalten sind. Die möglicherweise betroffene Radaranlage ist für den RTRFM quasi unsichtbar und wird erst durch das beobachtete Phänomen erkennbar. Die durch ADS-B verfügbare Position der Flugzeuge stellt für derartige Analysen eine wertvolle Information dar, die auch im RTRFM genutzt wird.

Fazit und Ausblick

Die DFS besitzt mit dem RTRFM ein prototypisch entwickeltes System zur kontinuierlichen Echtzeitmessung der SSR-Kanalbelastung. Mit den Standorten Center München und Flughafen Frankfurt ist der RTRFM an den beiden verkehrsreichsten und vermutlich auch bezüglich Funkfeld am höchsten belasteten Orten vertreten. Mit der Wasserkuppe und Braunschweig wurde die durch Messung abgedeckte Fläche zur Mitte und in den Norden Deutschlands hinein erweitert. Die Messungen und grundlegenden Auswertungen werden kontinuierlich und automatisiert durchgeführt, sodass signifikante Änderungen der Funkfeldlast erkannt und dann weitere Analysen durchgeführt werden können. Der RTRFM bildet eine solide Basis für das in der DVO 1207/2011 geforderte Monitoring. Es ist geplant, das Netzwerk an RTRFM-Stationen weiter auszubauen, um ganz Deutschland abzudecken.

Durch die externe Kalibrierung und den gefundenen Zusammenhang zwischen der Mode-S Telegrammfrequenz und der Dekodierwahrscheinlichkeit ist es jetzt möglich, den bislang unbekannten Messfehler zu korrigieren und auch die Güte des Ergebnisses anzugeben, was die Akzeptanz der Auswertungen enorm steigern sollte. Inwieweit der gefundene, lineare Zusammenhang bei höheren, als der bislang auftretenden Kanalbelastung gilt, ist Gegenstand aktueller Arbeiten.

In den vergangenen 18 Jahren hat sich die Nutzung der SSR-Frequenzen stark verändert. Der Anteil des TCAS-Systems ist deutlich zurückgegangen, dafür sind neue Nutzer wie ADS-B, Multilateration und Enhanced Surveillance dazugekommen. Klassisches SSR sollte nach geltender Mode-S-Ausrüstungsverpflichtung nicht mehr erforderlich sein, macht aktuell aber immer noch den größten Anteil der 1090 MHz Kanalnutzung aus.

Abkürzungen

ACAS	Airborne Collision Avoidance System
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance Broadcast
AFG	Arbitrary Function Generator
DFN	Deutsche Forschungsnetz. Kommunikationsnetz wissenschaftlicher Einrichtungen.

DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DVO	Durchführungsverordnung
RFM	Radio Field Monitor
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System
RTRFM	Real Time Radio Field Monitor
TCAS	Traffic Alert and Collision Avoidance System
VPN	Virtual Private Network
WAM	Wide Area Multilateration
MLAT	Multilateration
PAM-FRA	Precision Approach Monitoring-Frankfurt

Glossar

Acquisition Squitter	Ein Mode-S Transponder sendet den Acquisition Squitter einmal pro Sekunde und wird dadurch für TCAS ausgerüstete Luftfahrzeuge sichtbar.
All-call reply	Mode-S Radare senden zwecks erstmaliger Entdeckung der Luftfahrzeuge ein All-call Telegramm. Auf dieses antworten Luftfahrzeuge mit dem All-call reply.
Interrogator Code	Der Interrogator Code ist die Adresse oder Identifikation eines Mode-S Radars.

Referenzen

- [1] European Commission: Commission Implementing Regulation (EU) Nr 1028/2014, Official Journal of the European Union, 30.09.2014.
- [2] FAA; DFS; EEC: PEGASUS Final Report. Part 1 – 3. 04.05.2001
- [3] H. Fischer: CORAL – A/D Converter, Recorder and Analyzer. TE im Fokus 1/2001.
- [4] R. Oberhoffner: Entwicklung eines Analysetools für einen Sekundärradar-Funkfeldmonitor. Diplomarbeit FH Darmstadt. 2002.

- [5] S. Marquard: The ACAS Monitoring Project. TE im Fokus 2/2008.
- [6] R. Raekow: Funkfeldüberwachung von Sekundärradarkanälen. Diplomarbeit FH Darmstadt. 2010.
- [7] R. Raekow; H. Fischer: Funkfeldanalyse basierend auf AMOR-Netzwerkkomponenten. TE im Fokus 1/2011.
- [8] R. Hutzenlaub: Kontinuierliche Analyse der Funkkanalbelastung von Sekundärradarkanälen. Diplomarbeit Hochschule Karlsruhe. 2012.
- [9] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 1319-1 Grundlagen der Meßtechnik, Beuth Verlag GmbH. Berlin. 1995.
- [10] H. Fischer: Entwicklung eines Analysetools für einen Sekundärradar-Funkfeldmonitor. TE im Fokus 1/2002.
- [11] H. Fischer, R. Hutzenlaub: Funkfeldmessung in Echtzeit mit AMOR-Komponenten. TE im Fokus 2/2012

Häufigkeit von Simultaneous Transmissions im Flugfunk

Aline Liedtke & Dr. Jens Konopka

Einleitung

Flugfunk stellt für Fluglotsen und Piloten ein unabdingbares Instrument zur Kommunikation zwischen Boden- und Luftfunkstelle oder zwischen Luftfunkstellen dar [1]. Das Einhalten der Funkdisziplin soll für eine störungsfreie Kommunikation auf einer Frequenz sorgen.

Doppelaussendungen oder „Simultaneous Transmissions“ im Flugfunk entstehen, wenn zwei oder mehr Sprechfunkteilnehmer zur gleichen Zeit auf derselben Frequenz oder auf verkoppelten Frequenzen senden, sich also zwei Funksprüche zeitlich überlappen [2]. Darüber hinaus kann zwischen einer bemerkten und einer unbemerkten Doppelaussendung unterschieden werden. Die Mehrzahl gehört der ersten Gruppe an, jedoch gibt es kaum belastbare Daten über den Anteil, der unentdeckt ist.

Doppelaussendungen können sich zum Beispiel durch Interferenzpfeifen, externe Störgeräusche, Rauschen oder das Hören von mehr als einer Sendung bemerkbar machen. Doppelaussendungen, die nicht vom Piloten oder Lotsen als solche erkannt werden, bergen das Potential, zu einem sicherheitskritischen Ereignis beizutragen. Beispiele für solche Ereignisse sind in Untersuchungsberichten [3, 4] zu finden.

Trotz festgelegter Phraseologie [5] können bei Doppelaussendungen Fehlinterpretationen auftreten, wenn zwei Funksprüche zeitgleich erfolgen. Daher ist auch nach Möglichkeit eine Verschiedenheit der Rufzeichen (Callsign Diversity) sicherzustellen. Zwei Rufzeichen, die sehr ähnlich klingen und auf derselben Frequenz oder auf verkoppelten Frequenzen genutzt werden, können bewirken, dass sich zwei Piloten angesprochen fühlen und gleichzeitig auf die Anweisung des Fluglotsen antworten. Umgekehrt kann die Erwartung des Lotsen, ein bestimmtes Readback zu erhalten, dazu führen, dass das Readback des Piloten von einem Flugzeug mit ähnlichem Callsign vom Lotsen nicht richtig interpretiert wird, also somit das eigentlich fehlende Readback vom Lotsen nicht bemerkt wird.

Doppelaussendungen lassen sich bei Verwendung des CSMA-Zugriffverfahrens (Carrier Sense Multiple Access) nicht vermeiden. Ihre Häufigkeit steigt mit zunehmender Frequenzbelastung, die u.a. auf das Wachstum des Luftverkehrs zurückgeführt werden kann.

Dieser Artikel untersucht in systematischer Weise das Auftreten von Simultaneous Transmissions unter Verwendung eines mathematischen Modells für die zeitliche Verteilung von Funksprüchen.

Nach einer Einführung in die verschiedenen Ausprägungen von Doppelaussendungen und einer Zusammenfassung bisheriger Arbeiten zu ihrer Quantifizierung wird ein Modell vorgestellt, mittels dessen die Häufigkeit von Simultaneous Transmissions in Abhängigkeit von der Frequenzbelastung berechnet wird.

Diverse Parameter dieses Modells werden unter Zuhilfenahme von Daten aus Messkampagnen bestimmt. Monte-Carlo-Simulationen [6, 7] werden durchgeführt, um zusätzliche Kenngrößen zu extrahieren, für die es bis dato kaum Messdaten gibt.

Doppelaussendungen – „Simultaneous Transmissions“

Grundsätzlich kann zwischen zwei Klassen von Doppelaussendungen unterschieden werden:

1. Überlappung zweier Sendungen,
2. Überdeckung zweier Sendungen.

Doppelaussendungen treten vielfach an einem Tag auf, allein beim Approach Frankfurt ist von bis zu 100 Simultaneous Transmissions am Tag auszugehen. Dabei sind diese zu einem sehr hohen Prozentsatz nicht kritisch. Gerade bei Frequenzen mit hoher Belastung tritt häufig der sogenannte „Fast-Pilot/Fast-Controller“-Effekt auf. Die Überlappung entsteht durch frühzeitige Sendung eines dringenden Funkspruchs gegen Ende des vorangehenden Funkspruchs auf derselben Frequenz.

Die Kritikalität einer Doppelaussendung wird durch die Sendedauer der jeweiligen Funksprüche und ihren Signalstärken bestimmt, wobei Überdeckungen kritischer sind als Überlappungen, da Überdeckungen nicht so leicht erkannt werden können.

Im Folgenden wird zuerst rein die zeitliche Komponente von simultanen Sendungen betrachtet, bevor anschließend auch auf die Effekte durch unterschiedliche Signalstärken eingegangen wird. Der Einfachheit halber werden hier lediglich zwei zeitgleiche Funksprüche betrachtet.

Bei einer Überlappung von zwei Sendungen beginnt ein Funkspruch während der Aussendung eines früher

begonnenen Funkspruchs und überdauert diesen. Ist die Überlappung hinreichend groß, so wird, unabhängig von der Funkfeldstärke der beiden Signale, von einer bemerkten Doppelaussendung gesprochen (DSiT-detected Simultaneous Transmission). Unbemerkt (USiT-undetected Simultaneous Transmission [2]) kann eine Überlappung sein, wenn eine Sendung kurz nach Beginn eines früher abgesetzten Funkspruchs beginnt und kurz nach dem Ende dieses Funkspruchs endet.

Bei einer Überdeckung hingegen wird Funkspruch 2 zeitlich von Funkspruch 1 eingeschlossen. Auch hier kann zwischen unbemerkten und bemerkten Simultaneous Transmissions unterschieden werden.

Ob eine Doppelaussendung unbemerkt bleibt, hängt neben der relativen zeitlichen Lage der Funksprüche noch von weiteren Elementen ab, u.a. auch von den Funkfeldstärken. Die Feldstärke nimmt näherungsweise quadratisch mit der Entfernung zum Sender ab (Freiraumdämpfung).

Abhängig von der Funkfeldstärke können folgende Fälle auftreten:

1. Nur ein Funkspruch ist zu hören wegen stark unterschiedlicher Empfangssignalstärken.
2. Ein Sprachgemisch aus beiden Funksprüchen ist zu hören (beide sind deutlich herauszuhören oder einer ist verständlich und der andere ist bemerkbar, aber unverständlich).
3. Garbling: Beide Funksprüche werden unkenntlich.
4. Interferenzpfeifen ertönt.

Liegt die Empfangssignalstärke einer Funkaussendung um mehr als 12 dB unter der einer zeitgleich erfolgten Aussendung eines anderen Senders (Luftfahrzeug), so wird der Funkspruch auf dem schwächeren Signal akustisch nicht mehr wahrgenommen. Das entspricht im Falle der reinen Freiraumdämpfung einem Entfernungsverhältnis von 4:1, also würde z.B. ein Funkspruch von Luftfahrzeug 1 in 40 NM Entfernung nicht mehr wahrgenommen, wenn zeitgleich ein Luftfahrzeug 2 in 10 NM mit derselben Leistung sendet.

Bezüglich der zeitlichen Lage der Signale können drei Fälle unterschieden werden, die in den Abbildungen 1 bis 3 illustriert werden.

Abhängig von der Feldfunkstärke der beiden Funksprüche können alle oben erwähnten Fälle auftreten. Ist die Überlappung hinreichend kurz, wird diese Simultaneous Transmission aber immer erkannt, da der Beginn des ersten Funkspruchs (blau) und/oder das Ende des zweiten Funkspruchs (orange) kenntlich bleiben (Abbildung 1).

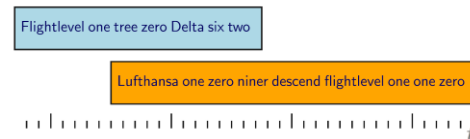


Abb. 1: Überlappung zweier Funksprüche

Bei einer geringfügigen Überlappung liegt der Beginn des zweiten Funkspruchs kurz vor dem Ende der ersten Aussendung. Dieser sogenannte „Fast-Pilot/Fast-Controller“-Effekt tritt vermehrt auf stark belasteten Frequenzen auf, bei denen die nächste Aussendung durch frühzeitiges Einhaken in die Frequenz garantiert werden soll. Z.B. würde ein Lotse, wie in Abbildung 2 zu sehen ist, nur dann das vollständige Callsign nicht abwarten, wenn sich nur ein Luftfahrzeug der Delta Airline im Sektor befände.

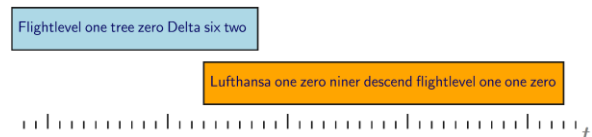


Abb. 2: Geringfügige Überlappung zweier Funksprüche („Fast-Pilot/Fast-Controller“-Effekt)

Bei einer Überdeckung (Abbildung 3) können ebenfalls die obigen feldstärkebedingten Effekte auftreten, wobei in den o.g. Fällen 2 bis 4 auffällt, dass eine Doppelaussendung vorliegt und noch einmal nachgefragt werden muss. Ist das Signal des ersten Funkspruchs so viel stärker, dass der komplette zweite Funkspruch nicht mehr zu hören ist, wird diese Simultaneous Transmission unbemerkt bleiben. Dieser Fall ist besonders kritisch. Bei ähnlichen Callsigns könnten z.B. auch beide Piloten die Anweisungen auf sich beziehen und zurücklesen und ausführen, was wiederum nicht sofort auffallen würde, wenn ein Signal das andere bis zur kompletten Nichtwahrnehmbarkeit überlagert.



Abb. 3: Überdeckung eines Funkspruchs durch einen anderen Funkspruch

Das im Folgenden verwendete Modell berücksichtigt die relative zeitliche Lage von Funksprüchen. Es wird nicht weiter untersucht, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Doppelaussendung stark unterschiedliche Signalstärken aufweist, so dass sie nicht entdeckt werden kann.

Es wird analysiert, welchen Anteil Überlappungen und Überdeckungen haben. Weiterhin wird nicht unterschieden, ob eine Simultaneous Transmission nur von Pilotenseite oder von Bord- und Bodenseite ausgeht. Ebenso wird der Inhalt und die logische Abfolge der Kommunikation (Anweisung gefolgt von Readback) nicht betrachtet. Das Modell kann durchaus um diese Aspekte erweitert werden, büßt dann jedoch etwas von seiner Stärke, nämlich seiner Einfachheit, ein.

Bisherige Arbeiten zur Quantifizierung der Häufigkeit von Doppelaussendungen

Gleichzeitige Doppelaussendungen sind im Flugfunk schon wegen des Zugriffsverfahrens „listen before talk“ kein neues Thema. Die DFS begann 2001 mit der systematischen Dokumentation von erst im Nachhinein als solche erkannten, sicherheitsrelevanten Simultaneous Transmissions. Eine interne Sicherheitsbewertung wurde 2005 durchgeführt mit dem Ziel, den Umfang des Auftretens von Doppelaussendungen zu bewerten.

EUROCONTROL veröffentlichte 2010 ein „Risk Assessment of the „USiT“ Phenomenon“ [8]. Die Aufgabe der individuellen quantitativen Bestimmung des Risikos wurde an die Flugsicherungsorganisationen der Mitgliedstaaten übertragen. Eine weitere DFS-interne Sicherheitsbetrachtung wurde 2014 erstellt, in der mögliche Risiken, verursacht durch Doppelaussendungen, untersucht und quantifiziert wurden.

Das Unternehmen Rohde & Schwarz hat einen Algorithmus zur Detektion von für die Sprechfunkteilnehmer potentiellen Undetected Simultaneous Transmissions entwickelt [9, 10], kurz USiT-Algorithmus. Dieser kam in einer Feldversuchskampagne 2014/2015 zum Einsatz. Dabei wurden 21 Enroute-, neun Approach- und drei Towerfrequenzen über insgesamt 9273 Stunden ausgewertet. Mithilfe der automatischen Erkennung von Simultaneous Transmissions wurden diese quantitativ untersucht und geprüft, ob die Funktionalität für die operationelle Nutzung geeignet ist.

Für einen Einsatz am Lotsenarbeitsplatz ist eine sehr kleine False-Alarm-Rate erforderlich, um in der Mehrzahl auf tatsächlich potentiell kritische Doppelaussendungen hinzuweisen. Von vorrangigem Interesse ist daher, den Anteil von kompletten Überdeckungen an den von einem Algorithmus erkannten Doppelaussendungen zu bestimmen. Eine derartige Untersuchung im Rahmen eines weiteren Feldversuchs würde erfordern, dass der Sprechfunk komplett aufgezeichnet und im Nachgang

1:1 von operationell geschultem Personal analysiert wird, um Überdeckungen von Überlappungen zu trennen.

Hier wird ein alternativer Weg beschritten: Ein Modell für die zeitliche Abfolge von Sprechfunkereignissen dient dazu den Anteil von Überdeckungen an den Doppelaussendungen zu bestimmen.

Theoretische Überlegungen zur Modellierung der Auslastung des zur Verfügung stehenden Spektrums wurden bereits früher schon getätigt [11]. Die Unterscheidung zwischen einer Überdeckung oder teilweisen Überlappung wurde so noch nicht vorgenommen.

Vereinfachtes Modell der zeitlichen Verteilung von Funksprüchen

Betrachtet werden alle Aussendungen über einen längeren Zeitraum T , z.B. einen Monat. Die zeitliche Lage und Dauer der Funksprüche werden zufällig bestimmt, wobei die Verteilungsfunktionen möglichst realitätsnah gewählt worden sind. Hierauf wird in den beiden folgenden Abschnitten näher eingegangen.

Beginnend mit dem Zeitpunkt $t = 0$ wird der Anfang a_1 eines Funkspruchs zufällig bestimmt. Das Ende des Funkspruchs ergibt sich aus dem Zeitpunkt a_1 und der ebenfalls zufällig gewählten Sendedauer d_1 . Die Zeit wird auf $t = a_1$ gesetzt und mit den weiteren Funksprüchen in analoger Weise verfahren, bis das Ende des Zeitraums T erreicht ist.

Aus den Anfangs- und Endzeitpunkten zweier aufeinanderfolgender Funksprüche kann somit leicht bestimmt werden, ob eine Simultaneous Transmission bzw. eine Überdeckung oder Überlappung vorliegt.

Die Exponentialverteilung in Abbildung 4 beschreibt die zeitlichen Abstände zufälliger, nicht voneinander abhängiger Ereignisse und eignet sich somit als Modell für die zeitliche Verteilung von Sprechfunkereignissen. Dass die zeitliche Abfolge nicht rein zufällig erfolgt, weil z.B. auf eine Anweisung ein Readback erfolgt, stellt lediglich eine geringfügige Einschränkung dar, die durch weitere Elemente des Modells kompensiert wird. Exponentialverteilte Funkereignisse stellen nur eine erste Hypothese dar. Das Abwarten, bis die Frequenz für die eigene Aussendung frei wird, wird explizit berücksichtigt, wie weiter unten noch erläutert wird.

Mit wachsender Zahl μ der erwarteten Ereignisse pro Zeiteinheit verringert sich der Abstand x (in Sekunden) zwischen den Anfangszeitpunkten a_i und a_{i+1} aufeinanderfolgender Funksprüche, wie Abbildung 4 zeigt. Der Erwartungswert der Exponentialverteilung,

also die mittlere Dauer zwischen zwei Ereignissen, ist $\frac{1}{\mu}$.

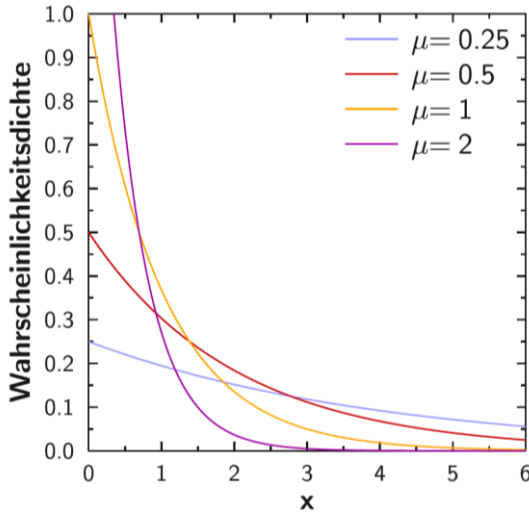


Abb. 4: Dichte der Exponentialfunktion $f(x) = \mu e^{-\mu x}$ für verschiedene Werte von μ .

Exponentialverteilte Zufallszahlen x_i lassen sich generieren durch [12]

$$x_i = -\frac{1}{\mu} \ln(u_i),$$

wobei u_i eine auf $(0,1]$ gleichverteilte unabhängige Zufallsvariable und $\ln$ der natürliche Logarithmus ist. Im vorliegenden Fall hängt der Parameter μ dabei von der Frequenzbelastung und der durchschnittlichen Funkspruchlänge ab. Bei einer durchschnittlichen Länge einer Sendung von 3 Sekunden und $\mu = \frac{1}{12 \text{ s}}$ (im Schnitt wird alle 12 Sekunden ein Funkspruch gesendet), liegt die Frequenzbelastung bei 25 %, denn drei von zwölf Sekunden ist die Frequenz im Durchschnitt belegt. Ausgehend von einem Funkspruch i mit Startpunkt a_i lässt sich der Anfangspunkt a_{i+1} des darauffolgenden Funkspruchs $i + 1$ berechnen durch

$$a_{i+1} = a_i + x_i = a_i - \frac{1}{\mu} \ln(u_i).$$

Hierbei wird $a_1 = 0$ gesetzt. Ist für einen Funkspruch der Anfangspunkt mithilfe der Exponentialverteilung bestimmt, wird diesem eine Dauer d_i zugewiesen.

Die Länge von Funksprüchen folgt anderen Gesetzmäßigkeiten, so dass diese gemäß einer Weibull- oder Betaverteilung bestimmt werden.

Die Weibull-Verteilung hat die Dichtefunktion

$$f(x) = \frac{\gamma}{\beta} \left(\frac{x - \alpha}{\beta} \right)^{\gamma-1} e^{-((x-\alpha)/\beta)^\gamma} \quad \text{für } x \geq \alpha,$$

die Dichtefunktion der Betaverteilung ist

$$f(x) = \frac{(x - a)^{p-1} (b - x)^{q-1}}{(b - a)^{p+q-1} B(p, q)} \quad \text{für } a \leq x \leq b,$$

wobei $a < b$ und $p, q > 0$. $B(p, q)$ ist die Betafunktion, die über das Integral

$$B(p, q) = \int_0^1 x^{p-1} (1 - x)^{q-1} dx$$

definiert ist [13].

Einem Funkspruch i wird also mittels einer geeigneten Verteilung eine Funkspruchdauer d_i zufällig zugeordnet. Diese nimmt unter Verwendung der Weibull-Verteilung folgende Form an:

$$d_i = \alpha + \beta (-\ln(u_i))^{\frac{1}{\gamma}},$$

wobei $\beta, \gamma > 0$ und u_i wiederum eine auf $(0,1]$ gleichverteilte unabhängige Zufallsvariable ist, siehe auch [12].

Das vorgestellte vereinfachte Modell der zeitlichen Verteilung von Funksprüchen lässt sich u.a. durch Zuweisung von Signalstärken ergänzen. Dazu würde jedem Luftfahrzeug zufällig im vorgegebenen Sektor eine Position zugewiesen und die Entfernung zum Empfänger die Signalstärke bestimmen, siehe dazu Abbildung 5.

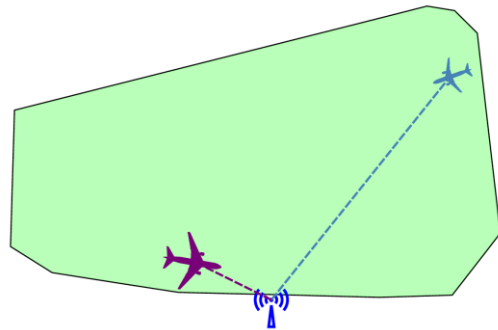


Abb. 5: Entfernungen im Sektor (schematisch)

Durch Abgleich der Funkfeldstärken kann eine Abschätzung getätigt werden, ob es eher zu einem Sprachgemisch oder Garbling (bei ähnlich starken Signalen) oder zu einer Unterdrückung eines Funkspruchs (bei ausgeprägten Signalstärkeunterschieden) kommt.

Mit der Berücksichtigung realistischer oder sogar realer Verkehrsverläufe können die relativen Abstände zwischen Sende- und Empfangsanlagen und den Luftfahrzeugen sowie die Fluggeschwindigkeiten dazu genutzt werden, um die Empfangsfeldstärken und die Dopplerverschiebung zu simulieren. Diese Vorgehensweise würde eine noch bessere quantitative

Bewertung und ggf. Optimierung der Erkennung von Doppelaussendungen ermöglichen.

Mitunter könnte so die Überdeckung eines Funkspruchs noch um die Information ergänzt werden, ob die Überdeckung von einem Lotsen wahrgenommen werden könnte oder nicht.

Bestimmung der Länge von Funksprüchen

Die Häufigkeit von Doppelaussendungen steigt mit der Belastung des Funkkanals an, wobei bereits einfache Überlegungen mit Hilfe der Warteschlangentheorie [14] zeigen, dass die Wahrscheinlichkeit von Simultaneous Transmissions stärker als linear mit der Kanalbelastung ansteigt.

Die Kanalbelastung selbst setzt sich wiederum aus zwei Komponenten zusammen: Der Anzahl der Funksprüche pro Zeiteinheit und der Länge der Funksprüche.

Die Anzahl der erforderlichen Transmissions, um den Flugverkehr in einem Sektor sicher, flüssig und geordnet abzuwickeln, hängt von der Komplexität des Luftraums und der zu bewältigenden Verkehrsmenge ab, ein Zusammenhang, der hier jedoch nicht weiter betrachtet wird. Außer einer Tendenz, in hoch belasteten Sektoren etwas schneller zu sprechen und die Funksprüche vom Inhalt her auf das absolut Notwendige zu begrenzen, ist die Länge der Funksprüche weniger stark von solchen Faktoren abhängig, was die Anzahl an Datenquellen erhöht, die für eine statistische Analyse kombiniert werden können.

Die Auswertung des Flugfunks ist im Allgemeinen sehr aufwändig und besteht in der Regel daraus, analoge oder digitale Aufzeichnungen des Sprechfunks abzuhören, was sehr präzise Analysen von Einzelfällen gestattet, jedoch für größere Zeiträume und für mehrere Sektoren einen sehr hohen Personalaufwand erforderlich macht.

Sehr detaillierte quantitative Aufzeichnungen und Auswertungen vom Sprechfunk bieten Echtzeitsimulationen, da hierbei sowohl am Lotsenarbeitsplatz als auch am simulierten Cockpit-arbeitsplatz Beginn und Ende der Belegung des Funkkanals mit Millisekundenauflösung aufgezeichnet werden.

Aus Echtzeitsimulationen der Anflugkontrolle Frankfurt aus der ersten Jahreshälfte 2013 wurden mehr als 14.000 Funkereignisse aus fünf Simulationsruns ausgewertet. Die Verteilung der Funkspruchlängen ist in Abbildung 6 als Histogramm in blau aufgetragen.

Da die Inhalte der Funksprüche nicht aufgezeichnet worden sind, konnte dieser Datensatz nicht um Artefakte

bereinigt werden. Dies betrifft vor allem die deutlich erkennbaren Ereignisse mit weniger als 1 s Dauer, in der in den meisten Fällen keine Anweisung oder Readback erfolgt sein dürfte. Es handelt sich um kurzzeitiges Drücken der Push-to-talk-Taste am Mikrofon bzw. Headset.

Im Projekt Technologie für Flugverkehrsmanagement in großen Strukturen (TeFiS) wurden in insgesamt vier zweiwöchigen Simulationskampagnen ebenfalls quantitative Auswertungen der Sprechfunkvorgänge vorgenommen [15]. Obwohl es sich um Simulationen von Verkehr im oberen Luftraum handelte, war die mittlere Dauer eines Funkspruchs mit denen aus den vorgenannten Echtzeitsimulationen kompatibel.

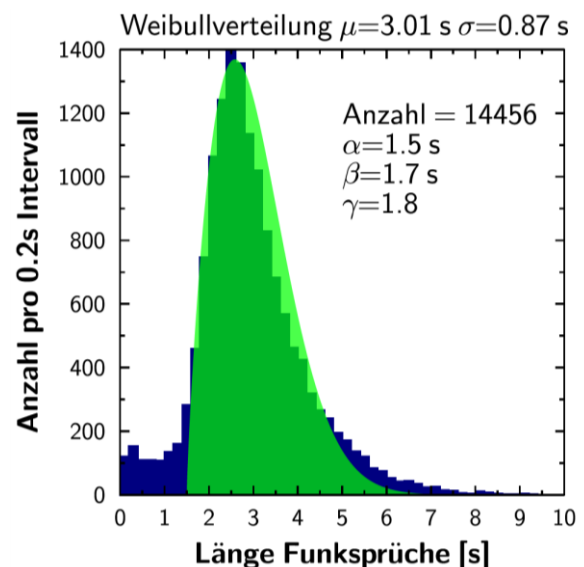


Abb. 6: Anpassung einer Weibull-Verteilung an die Verteilung von Funkspruchlängen aus Echtzeitsimulationen.

Abbildung 6 zeigt die empirische, aus Simulationsdaten ermittelte Verteilung der zeitlichen Länge von Funksprüchen (dunkelblaues Histogramm), an die eine Weibull-Verteilung (grüne Fläche) angepasst wurde. Während die Spitze der Verteilung um 3 s gut abgedeckt wird, unterschätzt diese Verteilungsform die Häufigkeit von vergleichsweise sehr langen Funksprüchen mit mehr als fünf oder sechs Sekunden Dauer. Daher wird, wie weiter unten noch näher erläutert, noch eine weitere Verteilung zum Einsatz kommen, die diesen Teil besser abdeckt (Abbildung 10).

Festlegung der Modellparameter

Das Modell beinhaltet folgende Parameter, die hier einzeln erläutert werden,

- mittlere Dauer D und Verteilungsform der Länge von Funksprüchen,
- einer Zeitkonstante τ , die bestimmt, wie schnell zwei Funksprüche aufeinanderfolgen dürfen, damit noch von einem gleichzeitigen Anfang ausgegangen wird,
- einer Wahrscheinlichkeit p , mit der der gleichzeitige Beginn von zwei Aussendungen noch bemerkt, daraufhin ein Funkspruch beendet und nach Ende des anderen Funkspruchs wiederholt wird,
- sowie einer Zeitkonstante ϱ , die festlegt, wie lange vor dem Ende eines Funkspruchs ein weiterer Funkspruch begonnen werden kann, ohne dass es zu einem nicht kompensierbaren Informationsverlust kommt („Fast-Pilot/Fast-Controller“-Effekt).

Der Parameter μ der Exponentialverteilung beschreibt den zeitlichen Abstand zwischen zwei Anfangspunkten a_i und a_{i+1} . Mit der durchschnittlichen Dauer einer Transmission D ergibt sich die rechnerische Frequenzbelastung zu $F = D \cdot \mu$.

Die Kanalbelastung wird variiert, und in Abhängigkeit hiervon diverse Kenngrößen, wie z.B. die Anzahl der Doppelaussendungen pro Stunde, bestimmt. Aus der jeweils vorgewählten Kanalbelastung und der mittleren Länge der Funksprüche wird μ berechnet. Da die Gesamtzeit aller N Funkereignisse einer Simulation, $N \cdot D$, auch die Doppelaussendungen enthält, ist die tatsächliche Zeit, die der simulierte Funkkanal belegt ist, kleiner als $N \cdot D$, nämlich um die Gesamtzeit aller Doppelaussendungen Σ . Daher ist die empirisch nach Ende der Simulation bestimmte Kanalbelastung $\frac{ND-\Sigma}{T}$ etwas geringer als die vorgegebene Größe. Bei allen hier ermittelten Ergebnissen und Graphiken wurde jedoch die a posteriori ermittelte Kanalbelastung verwendet. Diese Größe korrespondiert auch besser zu den im Rahmen der Feldversuche ermittelten Größen.

Das Modell geht von der Unabhängigkeit jeweils zweier Kommunikationsvorgänge aus. Das mag für zwei Piloten, die sich gleichzeitig auf einer Frequenz melden möchten, zutreffen, berücksichtigt aber nicht das Abwarten der Kommunikationsteilnehmer z.B. beim Readback. Ist die Frequenz erkennbar belegt, wird gewartet, bis diese wieder frei ist, bevor gesendet wird. Die Funkdisziplin wird folgendermaßen modelliert:

Ergibt die zufällige Wahl eines Anfangszeitpunkts eines Funkspruchs, dass dieser noch während eines gerade stattfindenden Funkspruchs liegt, so wird abhängig vom exakten Zeitpunkt wie folgt verfahren:

Jeder Funkspruch i ist in drei zeitliche Intervalle zerlegt, wie Abbildung 7 zeigt: $[a_i, a_i + \tau)$, $[a_i + \tau, e_i - \varrho)$, $[e_i - \varrho, e_i]$ mit Ende des Funkspruchs $e_i = a_i + d_i$.

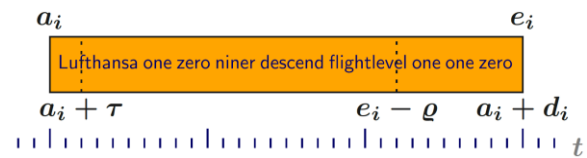


Abb. 7: Zeitliche Unterteilung eines Funkspruchs

Für den Anfang a_{i+1} des nachfolgenden Funkspruchs wird die folgende Fallunterscheidung getroffen:

1. a_{i+1} liegt in $[a_i, a_i + \tau)$
2. a_{i+1} liegt in $[a_i + \tau, e_i - \varrho)$
3. a_{i+1} liegt in $[e_i - \varrho, e_i]$

Für den ersten Fall wird angenommen, dass die Doppelaussendung nur mit einer Wahrscheinlichkeit von $1 - p$ von dem Sendenden unbemerkt bleibt und eine nahezu gleichzeitige Aussendung stattfindet, d.h. a_{i+1} wird unverändert gelassen. Die Simultaneous Transmission wird mit einer Wahrscheinlichkeit p bemerkt. In diesem Fall wird der Funkspruch $i + 1$ erst nach Ende des Funkspruchs i , aber dann unmittelbar anschließend, ausgesendet ($a_{i+1} = e_i$).

Im zweiten Fall, bei dem die Zufallsvariable a_{i+1} im Intervall $[a_i + \tau, e_i - \varrho)$ liegt, wird davon ausgegangen, dass derjenige, der senden möchte, die Funkdisziplin bewahrt und somit der Beginn des Funkspruchs $i + 1$ auf das Ende des Funkspruchs i folgt, also $a_{i+1} = e_i$.

Liegt der zufällig gewählte Zeitpunkt a_{i+1} im dritten Intervall, so lässt das Modell dies als Berücksichtigung des „Fast-Pilot/Fast-Controller“-Effekts zu.

Gilt $a_{i+1} > e_i$, so wird der zufällig gewählte Anfangszeitpunkt beibehalten, in diesem Fall tritt keine Überlappung auf. Um sich der Realität durch die getroffenen Annahmen bestmöglich anzunähern, ist eine geeignete Wahl der Parameter τ und ϱ entscheidend.

Der Parameter τ gibt jenen Zeitraum nach dem Beginn einer Transmission an, in dem der Beginn eines zweiten Funkspruchs nahezu „gleichzeitig“ mit dem Beginn des ersten ist.

Um eine grobe Abschätzung für sinnvolle Werte von τ zu bekommen, wurde jene Situation experimentell

nachgestellt: Eine Versuchsperson sollte zufällig beginnen einen beliebigen Satz zu sprechen, während eine zweite Versuchsperson aufgefordert war, unmittelbar nach der Wahrnehmung und so früh wie möglich, ebenfalls etwas zu sagen. Ein Ergebnis eines solchen Versuchs ist in Abbildung 8 gezeigt.

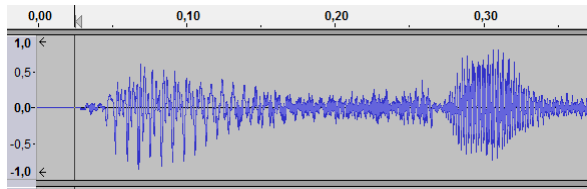


Abb. 8: Analyse einer Sprachaufnahme

Die beiden Wellenberge liegen zeitlich etwas mehr als 0,2 s auseinander. Der erste markiert den spontanen Ausruf der ersten Versuchsperson, der zweite, bei ca. 0,3 s kennzeichnet den Moment, in dem die zweite Versuchsperson den ersten Sprecher unterbricht bzw. gleichzeitig mit ihm spricht.

Demzufolge können Funksprüche, deren Startzeitpunkte nicht mehr als ungefähr 200 ms auseinanderliegen, als gleichzeitig begonnen angesehen werden.

Bei einem größeren Wert muss davon ausgegangen werden, dass die aktuelle Sendung bereits wahrgenommen werden kann und sich die Nutzer an die Funkdisziplin halten, mit dem eigenen Funkspruch also innegehalten wird, bis der laufende Kommunikationsvorgang abgeschlossen ist.

Hier gilt wieder die Einschränkung, dass das Modell an dieser Stelle nicht berücksichtigt, dass neben dem gerade stattfindenden Funkspruch ggf. auch noch das Readback abzuwarten wäre.

Im Rahmen der weiter unten erörterten Anwendung des Modells wurde der Parameter τ variiert, um den Einfluss auf die Alarmhäufigkeit zu untersuchen.

Unter der Annahme, dass ein sehr kurzer Funkspruch circa 2 s andauert, wird $\varrho = 0,8$ s gesetzt. D.h. frühestens 800 ms vor Ende der aktuellen Aussendung lässt es das Modell zu, dass sich ein weiterer Nutzer auf der Frequenz einklinkt.

Auftreten von Simultaneous Transmissions in Abhängigkeit von der Kanalbelastung

Im Folgenden werden sogenannte Alarme betrachtet, wobei ein Alarm gemäß Rohde & Schwarz ein Ereignis ist, das entsprechend der Bedingungen aus dem Feldversuch als Simultaneous Transmission markiert

worden wäre. Hierbei gilt wieder die Einschränkung, dass die Effekte durch unterschiedliche Empfangsfeldstärken vernachlässigt worden sind. Zudem wurde keine Bedingung an die Differenz der beiden Trägerfrequenzen gestellt.

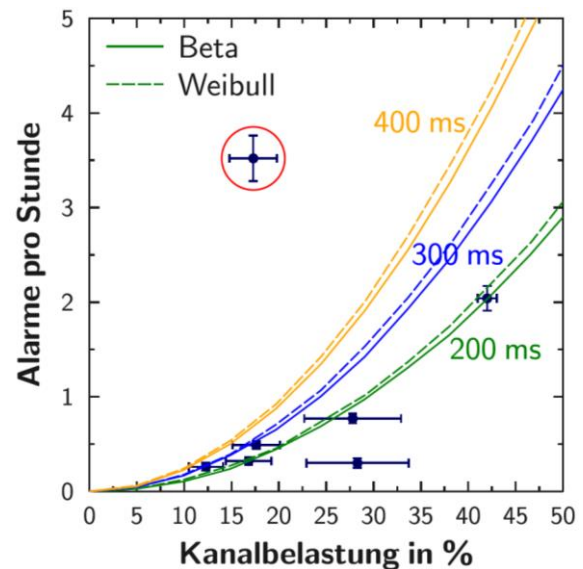


Abb. 9: Anzahl der Alarme pro Stunde in Abhängigkeit von der Kanalbelastung und für verschiedene Werte für τ .

Die Anzahl der Alarme pro Stunde ist in Abbildung 9 als Funktion der Frequenz- bzw. Kanalbelastung aufgetragen. Deutlich ist ein nichtlinearer Anstieg der Alarmhäufigkeit zu erkennen. Das gewählte Modell für die Länge der Funksprüche hat nur geringfügigen Einfluss, wobei die Beta-Verteilung (durchgezogene Linien), wenngleich sie längere Funksprüche gegenüber der Weibull-Verteilung (gestrichelte Linien) favorisiert, jeweils etwas weniger Alarme liefert. Eine Anpassung einer Beta-Verteilung an die Verteilung der Funksprachlängen aus Echtzeitsimulationen ist in Abbildung 10 zu sehen.

Für jeden Punkt auf den Kurven in Abbildung 9 wurde jeweils ein Jahr Funkverkehr bei angenommener konstanter Kanalbelastung mittels einer Monte-Carlo-Simulation betrachtet.

Zusätzlich wurde der Parameter τ variiert, wobei höhere Werte für τ jeweils mehr Alarme generieren. Der Parameter p , der bestimmt, mit welcher Wahrscheinlichkeit der zweite Sprecherteilnehmer noch bemerkt, dass bereits jemand anderes auf der Frequenz spricht, war in allen Fällen auf 0,85 gesetzt.

Die Parameterkombination $\tau = 200$ ms und $p = 0,85$ ist kompatibel mit dem Trend, den man grob auch in den Daten aus der Feldversuchskampagne 2014/2015

(volle Kreise mit Fehlerbalken in Abbildung 9) findet. Die Daten stammen von Approachfrequenzen der Flughäfen Frankfurt, Hamburg sowie Berlin-Schönefeld und -Tegel. Allerdings konnte die Kanalbelastung nur sehr grob bestimmt werden. Außerdem mussten wegen unterschiedlicher Verfügbarkeit bzw. Nichtverfügbarkeit von Daten aus den Messungen die Abschätzungen auf verschiedenen Wegen getätigt werden. Z.B. wurden für drei Frequenzen von Frankfurt Approach Daten von zwei unterschiedlichen Wochentagen und aus unterschiedlichen Tageszeiten herangezogen. Die Belastung lag je nach Arbeitsposition bzw. Frequenz zwischen 20 % und 45 %. Zudem schwankte sie wahrscheinlich im Laufe der über mehrere Tage erfolgten Messungen.

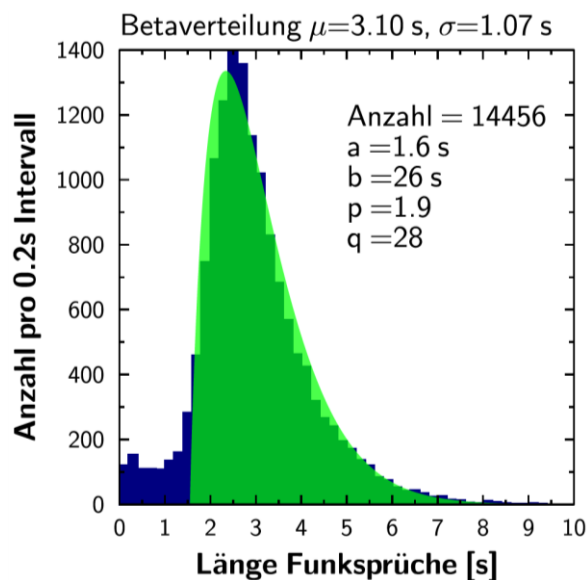


Abb. 10: Anpassung einer Betaverteilung an die Verteilung von Funkgesprächslängen aus Echtzeitsimulationen.

Eine Ausnahme hinsichtlich der Übereinstimmung stellt der mit einem roten Kreis markierte Datenpunkt in Abbildung 9 dar. Das Modell ist selbst bei im Mittel 50 % längeren Funkgesprächen nicht in der Lage, diesen Punkt zu erklären. Allenfalls eine weitgehende Aufweichung der Funkdisziplin im Modell führt zu hohen Alarmraten von mehr als drei pro Stunde bei moderater Belastung der Frequenz. Dies wird als nicht realistisch erachtet, der Datenpunkt enthält daher wahrscheinlich einen unentdeckten systematischen Fehler. Diese These wird gestützt durch die beobachtete mittlere Alarmdauer, die bei diesem Datensatz nur 1.1 s betrug, bei allen anderen jedoch konsistent um 2.5 s lag, und zwar unabhängig von der Kanalbelastung, wie aus Abbildung 11 hervorgeht.

Modellrechnungen mit anderen mittleren Längen der Funkgespräche, die eine höhere Alarmrate um 3.5 Alarme pro Stunde ergaben, lieferten jedoch auch deutlich

längere Alarmdauern, so dass der rot markierte Datenpunkt im Rahmen des vorgestellten Modells nicht mit den übrigen Daten in Einklang gebracht werden kann.

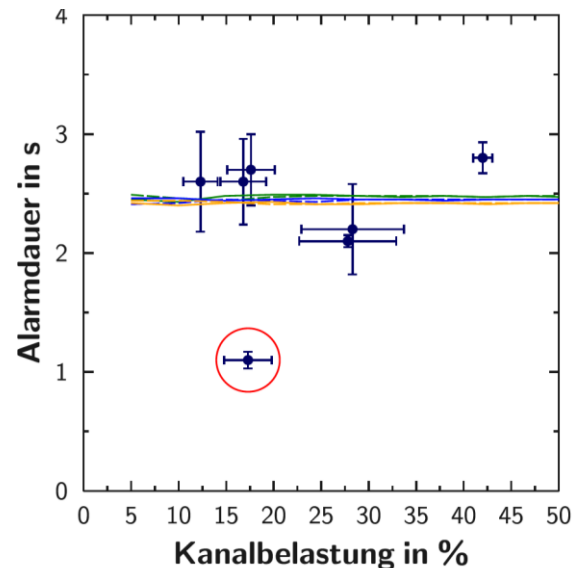


Abb. 11: Mittlere Dauer von Alarmen in Abhängigkeit von der Kanalbelastung. Farben und Symbole wie in Abb. 9.

Schließlich können die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation auch dazu verwendet werden, um Größen zu bestimmen, die nicht im Rahmen der Feldversuche erhoben werden konnten. Dies gilt insbesondere für den Anteil an Überdeckungen bei den Alarmen.

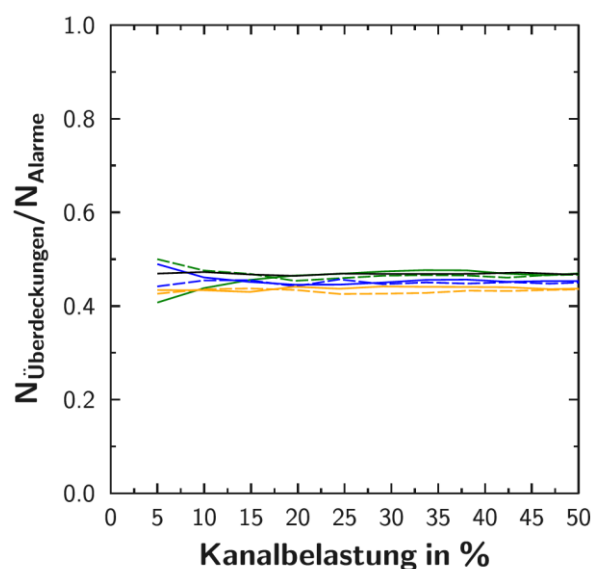


Abb. 12: Verhältnis der Anzahl von Überdeckungen zur Anzahl von Alarmen in Abhängigkeit von der Kanalbelastung. Farben und Symbole wie in Abb. 9 und 11.

Wie aus Abbildung 12 ersichtlich machen Überdeckungen ca. 45 % der Alarme aus, wobei dieser Anteil ebenfalls unabhängig von der Kanalbelastung ist. D.h. in den höchst belasteten untersuchten Sektoren mit zwei Alarmen pro Stunde (Abbildung 9) trat eine Überdeckung etwa einmal pro Stunde auf. Wie eingangs bereits erläutert, haben zeitliche Überdeckungen abhängig von dem Verhältnis der Signalstärken ein hohes Potential, nicht wahrgenommen zu werden.

Zusammenfassung

Gleichzeitige Aussendungen von Funksprüchen stellen einen Umstand dar, der im Zusammenspiel mit anderen Effekten potentiell zu kritischen Situationen im Luftverkehr, z.B. Staffellungsunterschreitungen, führen kann.

Außer sehr detailliert beschriebenen Einzelfällen, in denen solche Ereignisse zu Störungen beigetragen haben und einigen wenigen Feldversuchen sind keine weiteren Quellen bekannt, in denen die Häufigkeit von Doppelaussendungen untersucht worden ist. Auch ist die Rate an Ereignissen, in denen ein Funkspruch einen anderen komplett (zeitlich) überdeckt bis dato unbekannt.

Daher wurde ein mathematisches Modell erstellt, das die zeitlichen Abläufe im Sprechfunkverkehr beschreibt. Es wurden Modelle für die Verteilung der zeitlichen Lage und Länge von Funksprüchen entwickelt.

Mittels Monte-Carlo-Simulationen, die einem Sprechfunkaufkommen von mehreren Jahren entsprechen, wurde die Häufigkeit von Simultaneous Transmissions abgeschätzt und mit den verfügbaren Daten verglichen.

Gemäß diesem Modell treten Doppelaussendungen in der Regel mehrfach pro Stunde auf, wobei die zeitliche Überlappung in den meisten Fällen zu klein ist, um die Kommunikation zu stören.

Die Häufigkeit von Alarmen, hier gleichbedeutend mit zwei Funksprüchen, die mehr als 800 ms überlappen, steigt nichtlinear mit der Belastung des Sprechfunkkanals an. Für einen Satz an Modellparametern lassen sich die in Feldversuchen erhobenen Daten, bis auf einen Ausreißer, nachvollziehen. Dies betrifft die Häufigkeit von Doppelaussendungen, die zu einem Alarm führen würden, sowie die mittlere Dauer eines Alarms.

Das Modell sagt vorher, dass 45 % der Alarme von zeitlichen Überdeckungen herrühren. Um deren Kritikalität bewerten zu können, müsste das Modell substantiell erweitert werden und Form und Größe des

zu untersuchenden Sektors, die Lage der Verkehrsströme, Fluggeschwindigkeiten und die Standorte von Sende- und Empfangsanlagen berücksichtigen.

Dank

Für die Zurverfügungstellung von Daten und die freundliche Unterstützung bei der Beantwortung von Fragen geht unser Dank an die Kollegen Gerhard Engels, Artur Gogel und Oliver Haßa.

Abkürzungen

CSMA	Carrier Sense Multiple Access: Zugriffsverfahren auf einen gemeinsam genutzten Funkkanal oder Datenbusleitung, bei dem alle Teilnehmer überprüfen, ob der Kanal belegt ist und nur dann senden, wenn kein anderer Teilnehmer gerade sendet.
DSiT	Detected Simultaneous Transmission
USiT	Undetected Simultaneous Transmission

Quellenangaben

- [1] International Civil Aviation Organization, Doc 4444, Procedures for Air Navigation Services, Air Traffic Management, Sixteenth Edition, 2016.
- [2] EUROCONTROL, European Action Plan for Air Ground Communications Safety, Appendix AGC 4: Blocked transmissions, Edition 1.0, May 2006.
- [3] Büro für Flugunfalluntersuchungen BFU der Schweizerischen Eidgenossenschaft, Schlussbericht Nr. 2113, Payerne, ohne Jahresangabe.
- [4] Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung, Untersuchungsbericht BFU 5X003-13, Braunschweig, 2013.
- [5] International Civil Aviation Organization, Doc 9432, Manual of Radiotelephony, Fourth Edition, 2007.
- [6] N. Metropolis, A. W. Rosenbluth, M. N. Rosenbluth, A. H. Teller, and E. Teller, Equation of state calculations by fast computing machines. Journal of Chemical Physics, 21(6):1087–1092, 1953.

- [7] N. Metropolis. The beginning of the Monte Carlo method. Los Alamos Science, 15:125–130, 1987.
- [8] EUROCONTROL, Risk Assessment of the "Undetected Simultaneous Transmissions" Phenomenon, Edition, 1.00, Brüssel, 2010.
- [9] Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, Detektion simultaner Doppelaussendungen, Erfinder: Thorben Detert, Europäische Patentschrift 3 014 831 B1, 15.03.2017, Anmeldedatum 09.05.2014.
- [10] Rohde & Schwarz, DSiT: Detection of Simultaneous Transmissions in ATC Voice Communications https://www.rohde-schwarz.com/us/solutions/aerospace-defense/air-traffic-control/air-traffic-control/dsit_229450.html, abgerufen am 08.06.2018.
- [11] Qing Zhao, Wei Ren, Ananthram Swami, Spectrum Opportunity Detection: How Good Is Listen-before-Talk? Proceedings of IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, 4-7 November, 2007.
- [12] William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, and Brian P. Flannery, Numerical Recipes in Fortran 77, The Art of Scientific Computing, Second Edition, Cambridge University Press, 1992.
- [13] M. Abramowitz, I.A. Stegun, Handbook of mathematical functions, Dover Publications Inc., New York, 1965.
- [14] Donald Gross, Carl M. Harris, Fundamentals of Queueing Theory, 2nd Edition, Wiley & Sons: New York, 1994.
- [15] Jens Konopka, Quantitative Analyse des erwarteten Bord-Boden-Kommunikationsumfangs bei sektorloser Flugverkehrskontrolle, Innovation im Fokus, 01/2015, S. 43-50.

Machine Learning Feature Extraction for Improved Trajectory Prediction

Debora Fieberg (Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg) &
Dr. Matthias Poppe

Introduction

One of the manifold research activities of the DFS department 'Planning and Innovation' aims to use machine learning techniques for more accurate predictions of aircraft trajectories. Of particular interest is the improvement of the vertical part of the trajectory, which seems to be one of the most challenging questions because of the high bandwidth of vertical climb rates and the associated operational and technical uncertainty [2].

The focus of this article lies in predicting an aircraft's altitude from flight level 100 up to flight level 285 (1FL = 100ft, FL short for "flight level") after its initial climb by making use of machine learning methods, e.g. supervised learning in form of a feedforward or recursive neural network.

A successful prediction would be highly advantageous not only for the Controller Assistance Tools (CATO) but in general for improving the service quality of Air Traffic Control. These tools provide conflict detection and resolution support for Air Traffic Controllers [3], helping them to control aircraft in a more efficient manner.

Already, real time simulations in SESAR (e.g. on iTEC platform [4] [5]) have shown that controllers were able to control up to 20 percent more traffic when using the CATO tools while safety levels remained high. Nonetheless, room for improvement is left to obtain from algorithms with respect to trajectory prediction.

At the moment, climb rates are calculated as follows: Whenever two planes are predicted to come closer than 6 NM on the lateral axis, a vertical conflict calculation is needed. A prediction for the next six minutes will allow the controller to successfully resolve potential conflicts in advance.

For now, this is being done by simply taking the most recent rate of climb from the radar with a static buffer of ± 500 feet/minute. This buffer is needed in order to take into account the vertical uncertainty and to obtain a good compromise between false alarms and missed alarms [6].

This buffer, however, necessarily results in a higher workload for controllers because it potentially increases

the alarm rate. With more potential conflicts to resolve, their attention is constantly captured inducing stress and perhaps even mistrust in the system.

In addition, the airspace cannot be optimally used. Especially when there are three or more flights flying close to one another, efficiency is hampered by the rather big buffer. To reduce false alarms while keeping the rate of missed conflicts reasonably low, a more accurate prediction is needed.

A successful machine learning prediction of the flight level for each individual flight might improve all of the above mentioned points, resulting in less maneuvers and more accurate clearances. Also, for the DFS automation strategy, a more accurate trajectory prediction is one of the key enablers [7].

The project idea stems from the research centre of the DFS Deutsche Flugsicherung GmbH.

In this article, the chosen feature vectors for the Machine Learning approach are explained and how they can be extracted from Mode S data. An outlook on the building of a neural network and ideas for future improvements will be given.

Machine Learning

The field of Machine Learning is considered by many industries currently as a key technology. It is a subset of artificial intelligence in the field of computer science that often uses statistical techniques to give computers the ability to "learn" (i.e., progressively improve performance on a specific task) with data, without being explicitly programmed [17].

In general, three different kinds of Machine Learning can be distinguished: supervised learning, unsupervised learning and reinforcement learning [18].

Main objective for supervised learning that is supposed to be applied for this trajectory prediction task, is to train a model with labeled training data. This trained model allows to make predictions of future yet unknown input data. The training data are often called 'features' and they are annotated with 'X' while the output data are called 'labels' and are annotated with 'y'. The next sections will explain in detail which training data X are

used in our model and how they are obtained from the raw Mode S input data.

Supervised learning itself can be broadly divided in two different categories: classification and regression. In classification tasks, the output y belongs to a category or to a group. For example, we could forecast the aircraft type given certain input trajectories to train the network. In regression tasks, the output y is a variable with a 'real' value. In our problem, we will use regression techniques to forecast the flight level (our output y or label) in six minutes, expressed as a numerical value, e.g. FL326.

Unsupervised learning is used to discover structures in big data sets and try to extract useful information without knowing the corresponding output variable like in supervised learning. Unsupervised learning problems can be further divided into association and clustering problems.

An association rule learning problem is where you want to discover rules that describe large portions of your data, such as "people that buy A also tend to buy B". A clustering problem is where you want to discover the inherent groupings in the data. In Air Traffic Control, it could be interesting to group aircraft with similar performance without knowing for example the Cost Index or the Take-Off Weight.

In Reinforcement Learning, a computer program will interact with a dynamic environment in which it must perform a particular goal (such as playing a game with an opponent or driving a car). The program is provided with feedback in terms of rewards and punishments as it navigates its problem space. Using this algorithm, the machine is trained to make specific decisions. The machine is exposed to an environment where it continuously trains itself [19]. For example, an Arrival Manager could learn to turn and space the aircraft with minimum separation while receiving feedback e.g. in terms of number of landings per hour (the more the better).

For Supervised Learning, it is essential that the raw input data contain useful features that are not highly correlated (redundant). They should, however, contain a certain yet not known and may be highly non-linear relation to the output data. For this reason, we have put some effort in defining and preprocessing the raw input data as described in this article in order to obtain the feature data suited for Machine Learning.

Data preparation

Extraction and Decoding of Mode-S EHS

Selected Mode S Enhanced Surveillance Data (EHS) were used in January and February 2018 to extract the required information for data preparation. Seven radar stations all over Germany were considered:

- Frankfurt Süd FFS/ASR
- München Süd MUS/ASR
- Düsseldorf DUS/ASR
- Nordholz NHZ/SREM
- Tegel TGL/ASR
- Auersberg AUB/SREM
- Gosheim GOS/SREM.

Figure 1 shows the location of the currently used radar stations in Germany.

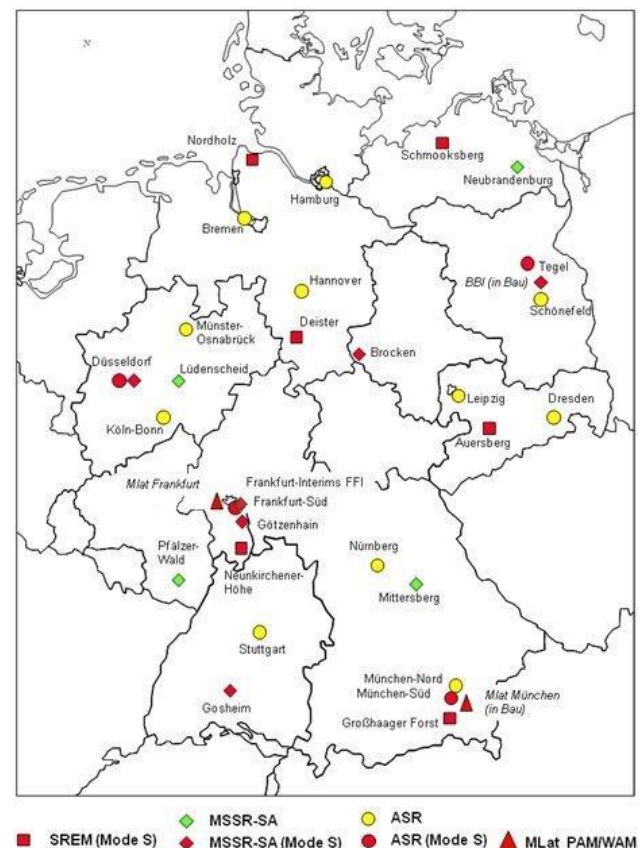


Figure 1: Radar Stations

The date and time are converted into a UNIX timestamp and decoded all necessary information from Item 250, which contains the Mode-S Enhanced Surveillance (Mode-S EHS) data as a byte string. The "S" in Mode-S stands for "select" as the radar does not only record the position of a flight but specifically addresses an aircraft

requesting enhanced information like the rate of climb or the aircraft's identity.

The Mode-S EHS data [10] contain the following information:

First, the Comm-B Data Selector (BDS) number in hexadecimal notation which indicates the available register:

1. BDS 4.0 - Selected Vertical Intention
 - MCP/FCU selected altitude,
 - FMS selected altitude,
 - barometric pressure setting
2. BDS 5.0 - Track and Turn Report
 - roll angle,
 - track angle,
 - ground speed,
 - track angle rate,
 - true airspeed
3. BDS 6.0 - Heading and Speed Report
 - heading,
 - indicated airspeed,
 - MACH number,
 - barometric altitude rate,
 - inertial vertical speed.

The first two digits of the Item 250 message indicate how many registers are available.

The rest of the message shall be separated into blocks of 8 bits, whereas the last byte of such a code indicates the BDS register.

For decoding the library *pyModeS* [8] was used.

Furthermore, the available data follow the convention to use a negative sign for descending, and a positive sign for climbing flights. Contrarily, *pyModeS* assumes a negative sign for the rate of climb of ascending flights so that the functions dealing with the barometric altitude rate and vertical speed had to be re-implemented.

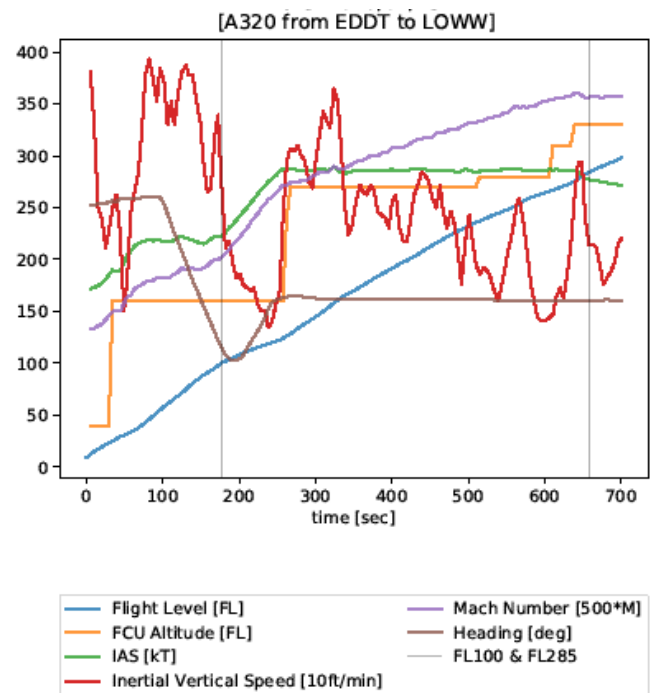


Figure 2: Visualization of flight example

The flight example in Figure 2 shows the different extracted parameters and how they evolve over time. The IAS restriction of 250 knots (green line) below FL100 at about 200 seconds can be seen. After that, the acceleration takes place with the typical drop in the vertical rate (red line). Then, the IAS remains constant until the change to Mach at about 700 seconds. The FCU Selected Altitude (orange line) somehow reflects the current clearance but in this example the flight is not constrained in the climb because of the difference between the actual Flight Level (blue line) and FCU altitude remaining above a certain threshold. This figure also shows the initial peak in the climb rate (initial vertical speed, red colour) at 0 seconds shortly after take-off.

An overview of the extracted raw data can be seen in Table 1.

Index	Abbreviation	Explanation	Unit
0	t	Time	sec
1	FL	Flight level	FL
2	AID	Aircraft ID	-
3	TAS	True Airspeed	kt
4	FCU	FMS Selected Altitude	Ft
5	GS	Ground Speed	kt

6	α	True Track Angle	deg
7	h	Magnetic Heading	deg
8	IAS	Indicated Airspeed	kt
9	Ma	MACH Number	Mach
10	ROC _{inert}	Inertial Vertical Speed	ft/min
11	P	Barometric Pressure	mb
12	ROC _{baro}	Barometric Altitude rate	ft/min
13	ROC _{calc}	Calculated rate of climb	ft/min

Table 1: Data Extracted with datamanager.py.

Data Cleansing

Being interested in making predictions for climbing flights, a flight to be “climbing” was defined whenever the recorded data fulfills:

$\text{Min } t \{FL(t)\} < 20, \text{ max } t \{FL(t)\} > 285^1$,
and
 $\text{argmin}_t \{FL(t)\} < \text{argmax}_t \{FL(t)\}$.

The data are filtered such that these conditions hold true. In addition, all datasets for which no time stamp was available were dropped since no information can be gained out of these. Unavailable call signs were replaced by a numeric ID. A posteriori, it was observed that a few data sets contained a call sign of question marks or blank spaces. These flights were also discarded.

Furthermore, the radar stations are not always capable of capturing all data so that our sets are not necessarily complete. In specific, values are set to ‘NaN’² if unavailable. With the benefits of *NumPy*³, which can easily handle data calculations with infinite values, it is possible to keep these data sets nonetheless.

In total, 6421 out of 106536 flights were extracted using this cleansing method. Unfortunately and surprisingly, this is only 6% of all recorded flights. On one hand, this might simply represent that there are a lot more descending and overflights than climbs. On the

other hand, it might be a difficulty of our filtering technique. Especially regarding our definition that a “climbing” flight shall start under 2000ft might lead to troubles. Apparently, altitudes below the transition altitude⁴ are also given in respect to 1013.25 hPa (and not to QNH) in our data so no deviations to the Flight Level information were obtained from these circumstances⁵. Yet, differing altitudes at take-off due to varying airport elevations are not respected.

One should be very careful not to discard too many datasets due to an inappropriate definition of climbing flights. A more lax criterion might be advisable.

Feature Extraction

In order to determine which features are predictive for the dynamics of climb rates after FL100, information from multiple sources were gathered, including the knowledge of controllers, pilots and Airbus employees, statistics of the given datasets, a full flight simulator study and last but not least their long experience in aviation and operational know-how. All features are calculated using the data, which have been described previously (refer to Table 1)⁶.

The motivation for the chosen features was to keep the machine learning network relatively small with fewer layers and less neurons per layer, compared to an unfiltered set of features with less predictive characteristics. Also the training is expected to be faster and more efficient.

Ultimately, the following features have been selected:

Decision Speed V2 (x0)⁷

The first feature is based on values of the indicated airspeed (IAS). In specific, it was tried to get an approximation of the V2 decision speed, also called the V2 “takeoff safety speed”, which is the minimal speed an airplane needs to reach in order to takeoff with only one engine inoperative. Typically, all engines will be used so

¹ The algorithm is designed for the Lower airspace, therefore the upper bound was chosen to be to FL285.

² Not a Number

³ NumPy is the fundamental package for scientific computing with Python [9]

⁴ At the transition altitude, the aircraft switches from the use of local barometer derived altitudes to flight levels. In Germany, this altitude is reached at about 5000ft (depending on local conditions).

⁵ The QNH is the barometric pressure adjusted to mean sea level. It is dependent on current weather conditions and the difference to 1013.25 hPa can be large dependent on the current weather situation [11].

⁶ No Cl or Take-Off Weight, no reliance on future plans e.g. ADS-B EPP

⁷ X0 – x11 are used here to label the elements of the feature vector. In machine learning, feature vectors are used to represent numeric or symbolic characteristics, called features

that the speed will actually be reached shortly after takeoff (see Figure 3) but before an altitude of 3500ft is reached.

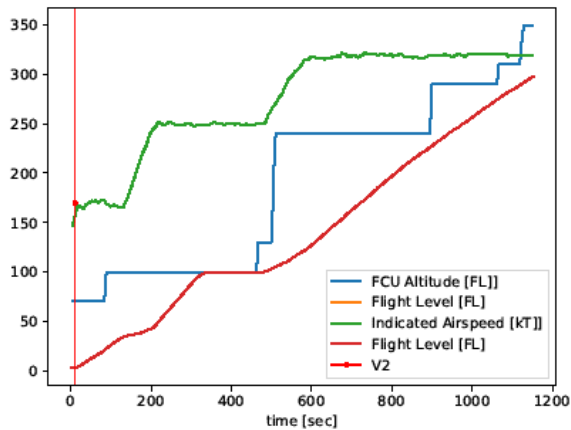


Figure 3: Decision Speed V2 at 0 seconds (red dot at Indicated Airspeed, time 0 seconds)

The data suggested that it might be a good idea to use the first finite entry of the IAS, where the flight level is greater than 1000ft for mimicking the V2.

Thus, the feature was set to be

$$V2 := IAS(t_x) \text{ such that } FL(t_x) = 10.$$

As the V2 decision speed is based on aircraft-specific parameters such as weight, temperature, wind, and field elevation, it is expected to gain some information about aircraft specifics out of this feature.

Caveat: As mentioned in the Data Cleansing section, care shall be taken when dealing with altitudes below the transition altitude. One needs to pay special attention to the accuracy of these data because of the used reference.

Constant IAS (x1)

As the aircraft is climbing, pressure and density decrease so that the IAS will decrease as well. Thus, when flying at constant IAS during a climb, the aircraft actually accelerates its speed. Usually, this occurs after FL100 in the unrestricted cruise phase. The entrance into this phase seems to be a good feature because aircraft are almost completely free to follow their energy-share-factors and surplus power (below FL100,

departure routes and controllers pose too many restrictions⁸).

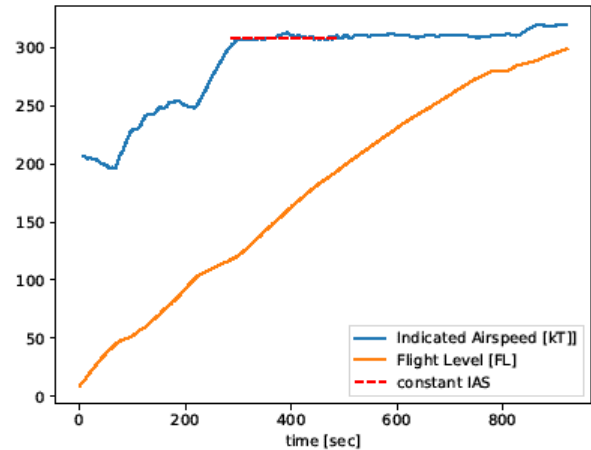


Figure 4: plateau of constant IAS (marked in red)

Thus, the plateau of constant indicated airspeed seems to be characteristic for each flight. Sometimes it is more prominent and in a few cases it is non-existing due to the high variability of the IAS.

For calculations, the plateau-speed is defined to be the average IAS of the first interval between FL100 (below, some plateaus occur due to restrictions) and FL285 (above, the IAS starts to decrease due to CAS/Mach transition) where a plateau of desired length $T := 200$ (in seconds) could be found, i.e. the average gradient does not exceed $\epsilon := 0.1$.

Since the value of constant indicated airspeed is available only after t_{x0} , the feature of constant IAS was set to

$$x1 := 0 \quad \text{if } 0 < t < x0$$

$$x1 := \text{mean}(IAS(t)) \text{ if } t_{x0} \leq t \leq t_{x0}+k$$

Average Rate of Climb (x2)

This is the average value of the rate of climb (ROC) over time until FL285 is reached. From the data, three different rates of climb were extracted: the inertial vertical velocity and barometric altitude rate from Mode-S BDS register 6.0 and the rate of climb calculated from the provided flight level and time. Since numeric differentiation is very noisy and may lead to huge errors, data from Mode-S was used. It is assumed that the

⁸ Most common restriction is the speed < 250 knots.

inertial vertical velocity ROC inert is more accurate than the barometric altitude rate ROC baro⁹, but not always available.

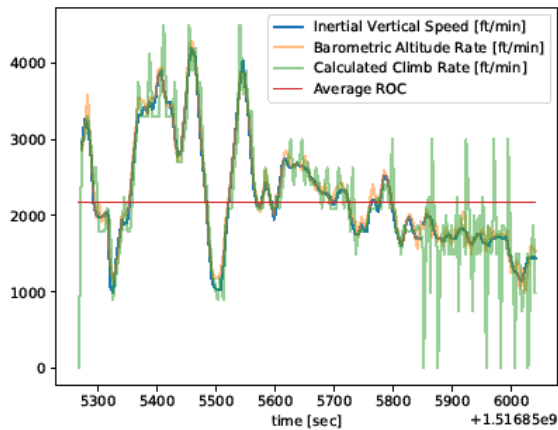


Figure 5: Comparison of climb rates using different values

Thus, for all features, ROC inert is used if more than 80% of the data points are finite, and the one with more available data points in any other case.

A comparison of the three climb rates can be seen in Figure 5.

ROC Peak below 2800ft (x3)

Controllers observed that during the initial climb phase, there is a vertical speed peak immediately after takeoff, which - to a certain degree - seems to correspond with the rate of climb after FL100 (Figure 6 gives a first impression of the idea). Indeed, a moderate correlation of this peak and the average rate of climb between FL100 and FL285 exists (correlation coefficient $r = 0.40$).

The peak might be typical for the performance of different aircraft types or airlines and could give a hint to the energy share factor used depending on the cost index of a particular flight.

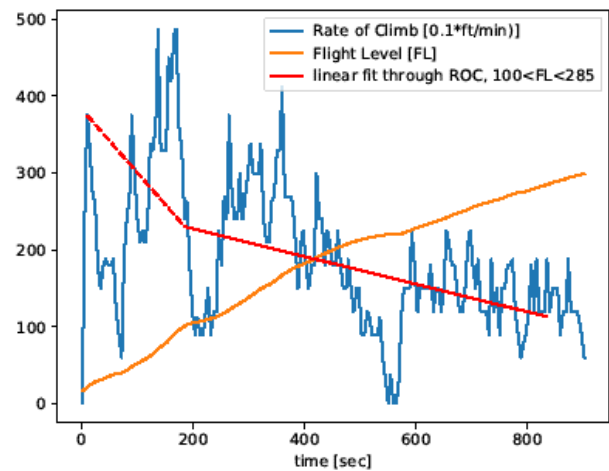


Figure 6: Relation of initial peak to ROC after FL100

Thus, the maximum value below 2800ft was used as a value for this peak for our feature vector:

$$x3 := \max \{ \text{ROC}(t) \mid \text{FL}(t) < 28 \}.$$

Caveat: The value of 2800ft was chosen, but could be replaced by other altitudes in this range. It is important to include the characteristic peak, but not any other peaks that might occur later in time. Again, one might also want to consider QNH adaptations.

Wind below FL285 (x4)

The wind most likely influences the aircrafts performance during a climb as well (assumption yet to be confirmed by the results from our full flight simulator study). For calculations, it was proceeded as suggested by Deborah Gahururu [12].

The average wind in flight direction is calculated from the ground speed (GS), the true air speed (TAS), the true track angle (α in degrees) as well as the magnetic heading (h in degrees).

First, the magnetic heading h has to be adjusted to the geographic/true heading h_{true} by adding the angle between magnetic north and geographic north for Germany¹⁰ (VAR).

$$h_{\text{true}} := h(t) + \text{VAR}.$$

⁹ Due to the inertial reference system of the aircraft which is using different sources used for navigation. This information is a more smooth and filtered parameter [10].

¹⁰ For the sake of simplicity, a constant declination is assumed for the geographical area considered. Compared to other errors and the resolution of the BDS register data, this assumption may be justifiable.

Hereby, negative signs indicate tailwind and positive signs stand for headwind.

Unfortunately, only a few wind data points are actually finite because many terms including entities of missing data sets are involved in the calculations¹¹.

Any 'NaN' in standard arithmetics will turn the result to 'NaN' as well. Alternatively, one might consider using the same wind feature for all flights from the same hour (or day) and departure route including information from external sources like weather stations.

Heading Change (x5)

It is assumed that the influence of our wind feature (x4) would be less predictive if the aircraft makes bigger turns. Therefore, we include a feature of heading changes, which is the mean of the heading change rate below FL285.

Altitude Restriction Flag (x6)

Especially below FL100, the aircraft is restricted in its climb rate by the Flight Control Unit (FCU) or Control and Display Unit (CDU) settings because of the trade-off between acceleration to constant CAS and vertical rate. We assume that restrictions will not change very much the average climb rate, but that there might be some deviations arising due to restrictions like level-off clearances.

Therefore, a boolean flag was set, which is true, if the aircraft comes closer than a certain threshold (in ft) to the FCU selected altitude anywhere under FL285. It is assumed that this impacts the average climb rate although we have observed that aircraft tend to compensate this level-off period by higher climb rates later on (of course, within the limits of aircraft performance envelopes).

$x6 := 0$, if $\exists t : FCU(t) - 100 \cdot FL(t) \leq \omega$, $FL(t) < 285$

$x6 := 1$, else

It was chosen to set $\omega := 1000$. A visualization of the altitude restriction and its influence on the climb rate is given in Figure 7.

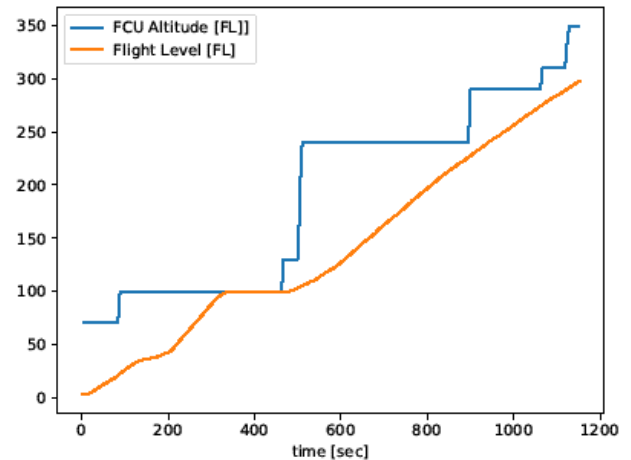


Figure 7: FCU Altitude Restriction and Flight Level

Time since FL100 (x7)

Furthermore, the time that passed since FL100 was reached (in seconds) was included. The work of Maximilian Beierl [13] has shown, that climb rates can well be fit by an exponential model $ROC(t) = a \cdot \exp(-b \cdot t)$ after this time point. So it might be useful for the network to include the following feature:

$x7 = t - t_{100}$, where $FL(t_{100}) = 100$.

Last FL (x8 to x12)

To provide a history and the development over time of the flight level, the following five features were included:

- FL 60s ago
- FL 45s ago
- FL 30s ago
- FL 15s ago
- FL 0s ago

To obtain these values, the FL needs to be interpolated to estimate the values if they were missing at these particular times. Calculations of the interpolation include all available flight levels since t_{100} . The interpolation is done with *numpy.interp*.

Last IAS (x13 to x17)

For the same reason, an interpolation of the IAS at the above mentioned times is also included. If the aircraft is

¹¹ Note that BDS 5.0 register is available only every 10th revelation from many Mode S radar stations in Germany which mainly causes this problem.

not yet flying with constant IAS, this feature may well describe the acceleration (or in general: the change) of the speed.

Feature Statistics

In order to check whether the extraction yield reasonable features, the distribution of each feature for all flights was regarded. Figure 8, Figure 9 and Figure 10 show the distribution for some selected features, whereas Figure 11 and Figure 12 give an overview of the history data of IAS.

Most features can be fitted with a Gaussian distribution, only for the distribution of heading changes a gamma fit was the better choice. The history data of IAS interestingly shows two characteristic peaks. It might be well worth the effort to try to understand the background of this phenomenon. A first approach to cluster the flights according to their performance (i.e. IAS and ROC) via *sklearn.cluster.KMeans*¹² was unsuccessful.

In the future, one could perhaps come up with different criteria or clustering methods in order to sort the aircrafts into different performance groups, e.g. according to aircraft types.

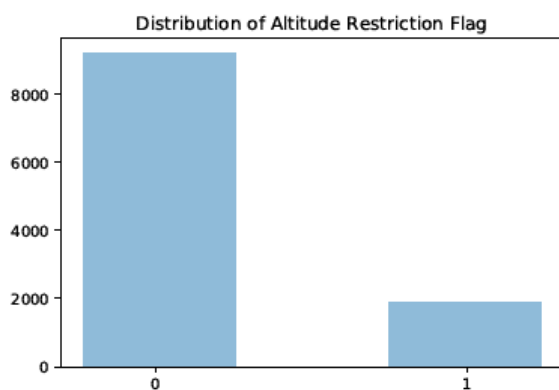


Figure 8: Distribution of Altitude Restriction Flag

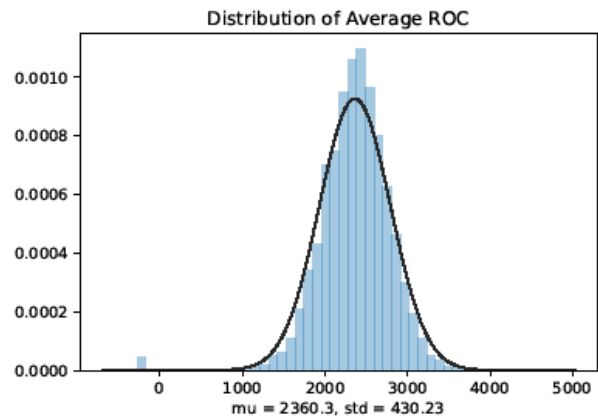


Figure 9: Distribution of average ROC

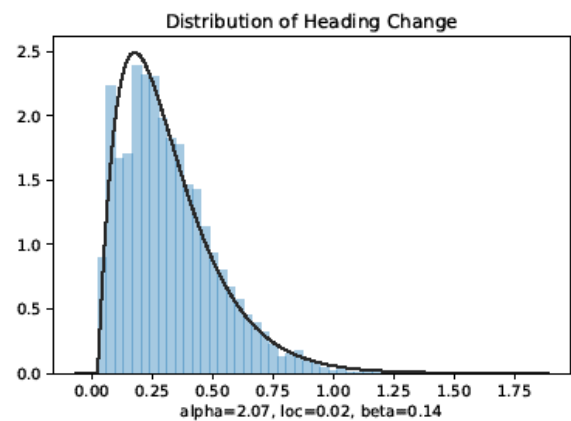


Figure 10: Distribution of Heading Change

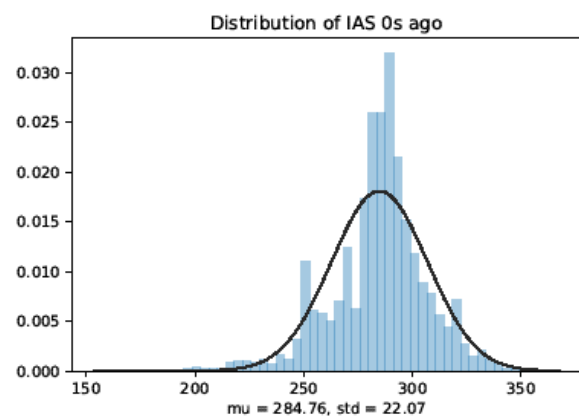


Figure 11: Distribution of IAS (0 seconds ago)

¹² sklearn is a function taken from the scikit-learn framework [16]. It contains different Machine Learning tools for classification, regression, clustering etc.

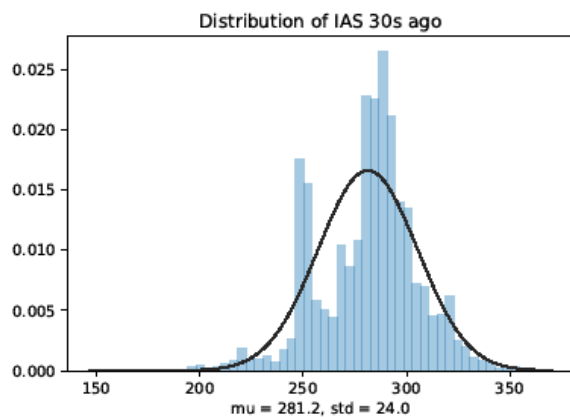


Figure 12: Distribution of IAS (30 seconds ago)

Label Creation

The aim is to predict the flight level of the aircraft for the next six minutes¹³ (360s). It was decided to label each feature vector with a five dimensional vector containing the values of the

- FL in the next 60s
- FL in the next 120s
- FL in the next 180s
- FL in the next 240s
- FL in the next 300s

Again, to obtain these values, an interpolation of the flight level had to be used, in which all available flight levels since t_{100} were used. The interpolation is done via `numpy.interp`.

For each flight, random indices were chosen and the feature vector for each index created (only the data up to this index are provided, as it will be the case in future applications) as well as the corresponding label vector.

For at most twenty times, four new random points were chosen whenever the labels could not be obtained. This yielded 11081 instances out of 25728 possibilities.

Full Flight Simulator

The analysis and preparation of the Mode S data needs to deal with a certain lack of information, which impacts the climb rate. The most prominent factors are the

unknown Cost Index (CI) and the Take-Off Weight of the individual flight.

For a better understanding of the surveillance data and for reference, it has been decided to record the same data set from a Full Flight Simulator (FFS). In this 'clinic' environment, there is full control of all relevant aircraft parameters and even the environmental conditions like (standard) atmosphere and wind.

Several conditions were defined and it was decided to record one flight per condition because no major variations in the full flight simulator were expected. All flights use the Managed Mode without manual intervention. Although in reality the managed and the autopilot mode will be applied the managed mode had been chosen in order to be able to establish controlled experimental conditions for the data collection. It was assumed that a climb (ATC) unrestricted from take-off to the crossover altitude was possible. Only the usual speed restriction of 250 knots below FL100 was taken into account.

Four different variables were varied, which were assumed to have the biggest impact to the observed climb behavior:

- Cost Index, 0 and 99¹⁴,
- Take-Off Weight (min=190t, max=271t),
- Flex Power¹⁵ setting,
- Wind (in aircraft direction, head and tail).

The first two sessions took place at the Lufthansa Aviation Training Center with the A340-300 Simulator FT.36 [14] in Frankfurt at 20.02.2018 and 26.02.2018.

Figure 13 shows the FFS data with Take-Off Weight of 271 tons (close to maximum Take-Off Weight), Cost Index = 0, Flex power on (F36) and a head wind of about 30 knots with slight variations.

¹³ This is the currently configured look ahead time for CATO conflict detection

¹⁴ Please note that the available range of the cost index depends on the manufacturer of the FMS.

¹⁵ Reduced take-off thrust in order to reduce noise, engine wear and maintenance costs

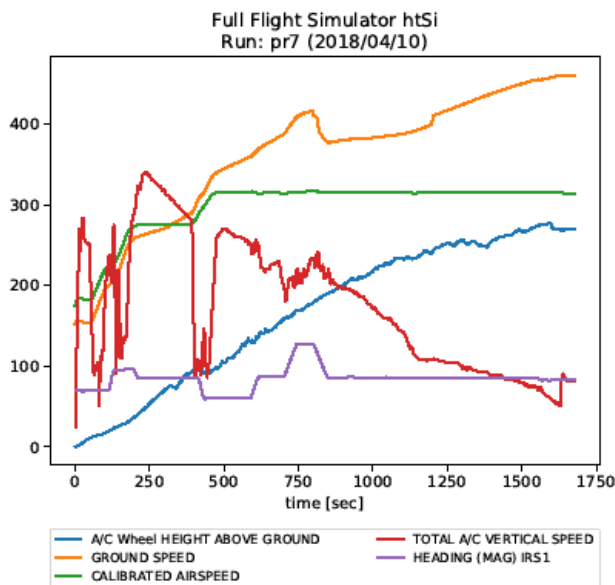


Figure 13: Recordings from Full Flight Simulator

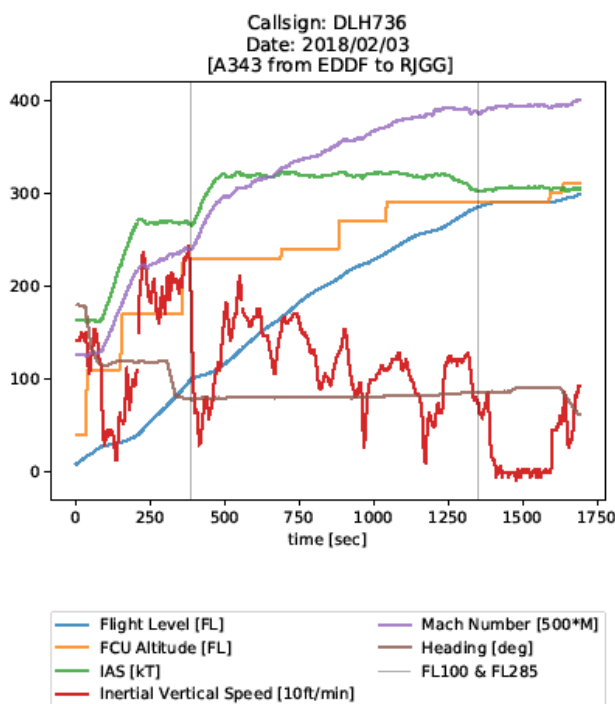


Figure 14: Reference data for flight DLH736

On the other hand, Figure 14 shows the same data from a real flight with the same aircraft type, of course with unknown parameters. However, some similarities seem to be obvious, for example looking at the IAS or the principle rate of climb.

The whole analysis has not started yet. Our main objective is to find out the impact of the different parameters on the climb rate and to obtain analytically possible correlations. One prominent example is the

impact of the Cost Index (CI). In the initial climb phase, the CI has no major impact due to feedback from pilots and also from Airbus engineers but later on during the climb it might well impact the vertical rate.

In the near future, similar Full Flight Simulator sessions are planned for the Airbus A320 family.

Outlook

Now, the data are ready for a neural network using Machine Learning (ML) algorithms.

Machine learning tasks are usually described in terms of how the ML system should process a collection of features [15]. The task could be described as a classification (with missing inputs) to identify the category, the feature vector belongs to. Alternatively, it could be regarded as a regression task to forecast the climb rate or flight level as numerical value.

During the learning process, ML algorithms can be broadly categorized as unsupervised or supervised [15]. Here, supervised learning algorithms can be used because each example can easily be associated with a label, derived from the training data set.

In general, the interest lies in a deep learning structure with multiple layers. As a first step, one might try to feed a fully connected feedforward network with the data. Alternatively, a recurrent neural network (e.g. Long Short Term Memory LSTM) might be very powerful. After all, time series data are used. Further ideas include the use of a Restricted Boltzmann Machine to speed up training or a Random Forest Ansatz to figure out the most influential features.

It might also be advantageous to add additional features. For example, the aircraft type including the different engine types will definitely influence the performance characteristics of an aircraft. Also, a cluster of aircraft types with similar characteristics might be identified and fed into the network for training.

In close cooperation with universities and research institutes, these questions will be addressed in future work.

This article is based on an extract of the documentation provided by Debora Fieberg, math student at the Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg. She completed a voluntary internship at DFS from 15 February to 15 April 2018 [1].

Abbreviations

ASR	Airport Surveillance Radar
BDS	Comm-B Data Selector
CAS	Calibrated Air Speed
CATO	Controller Assistance Tools
CI	Cost Index
EHS	Enhanced Surveillance
FCU	Flight Control Unit
FL	Flight Level
GS	Ground Speed
IAS	Indicated Air Speed
iTEC	interoperability Through European Collaboration
ML	Machine Learning
ROC	Rate Of Climb
SESAR	Single European Sky ATM Research
SREM	Surveillance Radar Equipment Medium-range

References

- [1] Feature Preparation for a Machine Learning Prediction of Trajectories of Climbing Flights, Voluntary Internship at DFS, Debora Fieberg, April 2018
- [2] Common Trajectory Prediction Capability for Decision Support Tools, Sip Swierstra, EUROCONTROL HQ, Brussels, Steven M. Green, National Aeronautics and Space Administration, Ames Research Center, Moffett Field, CA, 5th USA-Europe ATM Seminar, Budapest, June 2003
- [3] Controller Assistance Tools Requirements Specification, Development Requirements - Release 6 / Final for industrial Prototype, Version 1.0, 22.01.2015
- [4] SESAR Project 04.07.02 Deliverable D09, Validation Report Exercise VP175, Edition 00.01.01, September 2015
- [5] Poppe, M., Herr, S., Reinhardt, K. & Achatz, G. (2015). Erste Validierungsergebnisse der Controller Assistance Tools an der iCAS-SESAR-Plattform, Innovation im Fokus 2/15
- [6] Controller Working Tools, Ergebnisbericht, Version 1.0, DFS Deutsche Flugsicherung GmbH, März 2015
- [7] DFS-Automationsstrategie, Fachstrategie Streckenkontrolle und Platzkontrolle, DFS Deutsche Flugsicherung GmbH, Mai 2018
- [8] <https://github.com/junzis/pyModeS>, last visited 26.04.2018
- [9] <http://www.numpy.org>, last visited 25.04.2018
- [10] ICAO Doc 9871 AN/464 Technical Provisions for Mode S Services and Extended Squitter, First Edition, 2008
- [11] EUROCONTROL Guidance Material For Transition Altitude Change, First Edition, Brussels, September 2004
- [12] Voluntary Internship at DFS, Presentation 'Analyse Konsistenz von Mode S Daten im deutschen Luftraum', Deborah Gahururu, September 2014
- [13] Maximilian Beierl, OTH Regensburg, March 2018. 'Trajektorienprädiktion' Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Science
- [14] <https://www.lufthansa-aviation-training.com/training-devices/flight-training-devices/ffs-airbus-a340-300-fra-ft36/>, last visited 26.04.2018
- [15] Section 5.1, page 96ff, Deep Learning, Ian Goodfellow, Yoshua Bengio and Aaron Courville, MIT Press Cambridge, Massachusetts, London, England, 2016
- [16] Scikit-learn framework, last access 27.04.2018, available under: <http://scikit-learn.org/stable/index.html>.
- [17] https://en.wikipedia.org/wiki/Machine_learning, last visited 26.04.2018
- [18] Machine Learning with Python, Sebastian Raschka, mitp Verlags GmbH, 2017
- [19] <https://towardsdatascience.com/introduction-to-machine-learning-db7c668822c4>, last visited 24.06.2018

ZAAS – Zukunftsarchitektur ATS-Systeme

Dr. Frank Zetsche & Claus Scheuren

Abstract

Mit dem Programm ZAAS (Zukunftsarchitektur ATS-Systeme) plant die DFS eine nach modernen IT-Grundsätzen gestaltete Architektur für ihre ATS-Systeme einzuführen. ZAAS umfasst alle Projekte und Maßnahmen zur Konzeption und Schaffung einer zentralen und gleichzeitig hoch verfügbaren Basisinfrastruktur mit zwei Data-Center, die nach neuesten IT-Betriebskonzepten, z. B. Virtualisierung, Cloud, betrieben wird. Auf diese Data-Center-Infrastruktur sollen sukzessive alle ATS-Systemfunktionen der DFS, ggf. inkl. Communication, migriert werden. Pilotnutzer der erarbeiteten Konzepte und bereitgestellten Infrastruktur sind zunächst die Tower ATS-Systeme, die im Projekt TANGe (Tower ATS-System Next Generation) auf ZAAS angepasst werden.

Einleitung

Seit 2004 und mit den ersten Verordnungen zum Single European Sky hat sich die Europäische Kommission zum Ziel gesetzt, die Fragmentierung des europäischen Luftraums zu begrenzen und größere Luftraumstrukturen zu fördern/fordern. Dies hat u.a. zur Einführung von sog. Functional Airspace Blocks (FABs) geführt, in denen der Luftverkehr effizienter abgewickelt werden soll. So besteht z.B. der FABEC (Functional Airspace Block Europe Central) aus den Lufträumen von Deutschland, Frankreich, der Schweiz und den Benelux-Staaten. Die Hoffnung der Europäischen Kommission, dass mit der Einführung von FABs auch Kontrollzentralen zusammengelegt werden, um damit größere Lufträume aus einer Hand und mit größerer Produktivität zu kontrollieren, hat sich indes nicht erfüllt. Die organisatorischen und sozialen Aspekte dieser Konsolidierungen erscheinen aktuell nicht lösbar.

Die grundsätzlichen Herausforderungen für das Air Traffic Management in Europa bleiben daher weiterbestehen. Die fortschreitende Liberalisierung des Flugsicherungsmarktes in Europa und die bestehenden und zukünftigen Regulierungsvorgaben stellen neue Anforderungen an die DFS hinsichtlich einer kosteneffizienteren Erbringung von Flugsicherungsdiensten. Da eine räumliche Konsolidierung von Kontrollzentralen nicht angestrebt wird, ist eine technische Konsolidierung und Zusammenführung von ATS-

Systemtechnik eine weitere Option, die Synergien und Kostenvorteile bringen kann.

Des Weiteren ist eine Öffnung und/oder Konsolidierung der Dienste-Erbringung auf dem europäischen Flugsicherungsmarkt absehbar. Um diese Chance zu ergreifen und diesen Markt bedienen zu können, sind hochgradige Flexibilität und Skalierbarkeit der ATS-Systemtechnik notwendig. Diese muss in der Lage sein, schnell und bedarfsgerecht auf wechselnde Anforderungen zu reagieren, um unter anderem auch ATS-Systemdienste für Dritte zu erbringen.

Die derzeit in Betrieb befindlichen und zur zeitnahen Einführung geplanten ATS-Systeme der DFS adressieren diese neuen Anforderungen nicht ausreichend.

Mit der Vision „von der DFS zur EFS (Europäische Flugsicherung)“ hat sich die DFS-Geschäftsführung zum Ziel gesetzt, die DFS durch Innovation als eine leistungsstarke Flugsicherung in Europa zu positionieren, um diesen Herausforderungen zu begegnen. Diese Vision soll nun in einer zukunftsweisenden Architektur für die DFS ATS-Systeme konkretisiert und umgesetzt werden.

Ziele

Mit ZAAS soll eine zukunfts sichere, flexible und anpassungsfähige operationelle IT-Infrastruktur eingesetzt werden, um

- eine optimale Unterstützung des Kerngeschäfts der Flugsicherungsdienste zu gewährleisten, die eine Weiterentwicklung in beherrschbaren Schritten erlaubt,
- eine nach dem Stand der Technik angewandte IT-Security zu etablieren,
- erprobte und bewährte Methoden der Informationstechnik für operationelle Systemen anzuwenden,
- eine Optimierung des Systembetriebs zu erreichen,
- einen kosteneffizienten LifeCycle der ATS-Systeme zu gewährleisten.

Damit soll auch erreicht werden, dass

- interessante und attraktive (IT-)Arbeitsplätze in der DFS verbleiben und entstehen,
- die DFS bestehende und neue Dienste auch über die Grenzen des Unternehmens hinaus anbieten kann.

erbringen, wird eine weitere Redundanzstufe gegenüber dem Status Quo eingeführt.

Die Anbindung der FVK-Betriebsstätten, derzeit 4 Kontrollzentralen und 16 Tower, erfolgt über hochverfügbare redundante Weitverkehrsnetze.

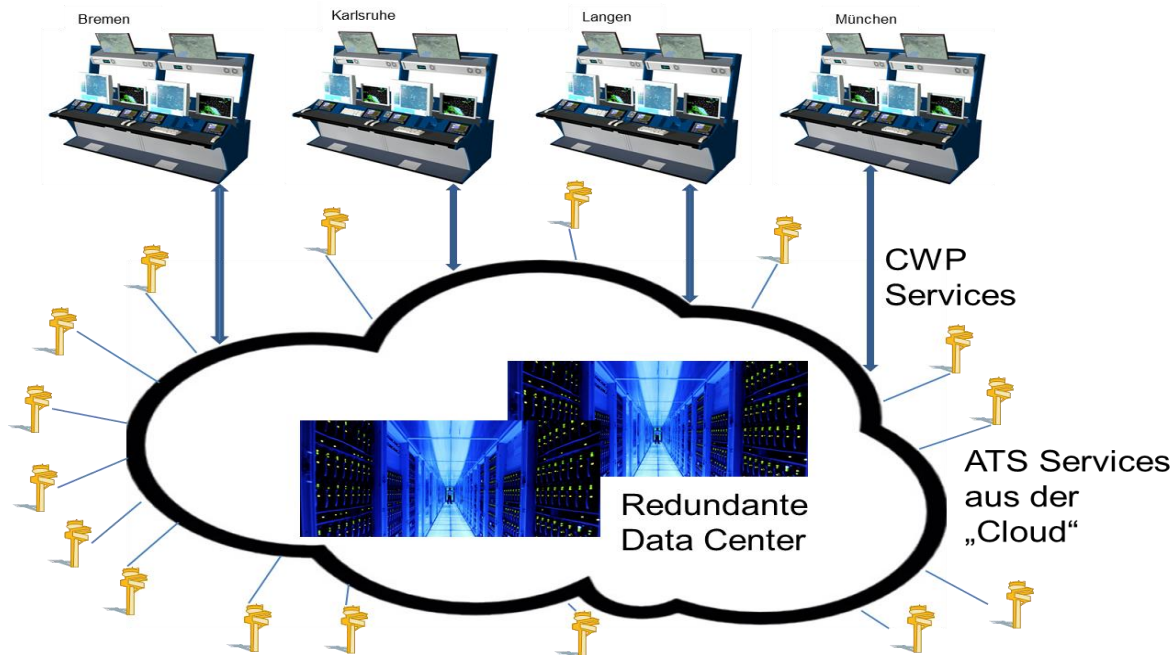


Abbildung 1: Zielarchitektur der DFS

Zielarchitektur

Die aktuelle ATS-Systemarchitektur folgt dem Prinzip „Ein Standort - ein ATS-System“, d. h. jede Kontrollzentrale und jeder Tower betreibt ein dediziertes, lokales ATS-System, welches mit den anderen ATS-Systemen vernetzt ist. Die Umsetzung einer solchen Architektur wurde in den 1990er Jahren möglich, als man von großen Zentralrechnern zu verteilten Systemen überging. Dieses Prinzip wird nun mit ZAAS neu überdacht und mit den heutigen technologischen Möglichkeiten einer ATS Service-Erbringung abgeglichen.

Diese Überlegungen führen zu einer Zielarchitektur, in der die Flugsicherungsdienste durch eine georedundante Zentralisierung von ATS- & COM- Systemfunktionen über standardisierte IT-Plattformen kosteneffizienter und zukunftssicherer erbracht werden sollen. Hierzu wird die ATS- & COM-Systemtechnik in zwei Rechenzentren konsolidiert und von dort zentral betrieben. Durch die Fähigkeit jedes Rechenzentrums, die notwendigen technischen Dienste vollständig zu

Die im Rahmen der DFS-Zielarchitektur, siehe Abbildung 1, eingesetzten Technologien sind im Folgenden kurz beschrieben.

Technologien

Service Oriented Architecture - SOA

SOA ist ein Paradigma für die Strukturierung und Nutzung verteilter Funktionalität, die von unterschiedlichen Besitzern verantwortet wird. Dies erlaubt, dass eine konkrete Endnutzer-Rolle aus der additiven Kombination von Services realisiert wird (Orchestrierung). Die örtlichen und organisatorischen Ausprägungen einer Nutzerrolle erfolgen nicht in den Services selbst, sondern durch deren Orchestrierung. Services sind einheitlich und haben keine Varianten. Sie sind als einzelnes Produkt pflegbar und automatisiert testbar [1].

Virtualisierung & Container

Virtualisierung bezeichnet in der Informatik die Nachbildung eines Hard- oder Software-„Objekts“ durch ein ähnliches Objekt vom selben Typ mit Hilfe einer

Software-Schicht. Dadurch lassen sich virtuelle, d. h. nicht-physische, Dinge wie emulierte Hardware, Betriebssysteme, Datenspeicher oder Netzwerkressourcen erzeugen [2].

Container-Virtualisierung ist eine Methode, um mehrere Prozesse isoliert voneinander auf einem Kernel des Hostsystems zu betreiben. Im Gegensatz zur Virtualisierung mittels eines Hypervisors (Software zur Abstraktion der Hardware) hat Container-Virtualisierung zwar einige Einschränkungen in der Art ihrer Gastsysteme, gilt aber als besonders ressourcenschonend und bietet Vorteile bei der Bereitstellung von Applikationen [3].

Cloud Computing

Cloud Computing ist ein Ansatz, um den allgegenwärtigen, automatisierten und dynamischen (On-Demand) Netzwerkzugriff auf einen gemeinsamen Pool konfigurierbarer Rechnerressourcen, z. B. Netzwerke, Server, Speichersysteme, Anwendungen und Dienstleistungen, zu ermöglichen, die mit geringstem Managementaufwand oder Eingriff eines Serviceanbieters schnell bereitgestellt und freigegeben werden können [4].

DevOps & SRE

DevOps beschreibt einen Prozessverbesserungs-Ansatz aus den Bereichen der Softwareentwicklung und Systemadministration. DevOps soll durch die Verwendung der gleichen Prozesse und Werkzeuge eine effektivere und effizientere Zusammenarbeit der Bereiche Dev (Development/Entwicklung), Ops (Operations/Betrieb) und QS (Qualitätssicherung) ermöglichen. Mit DevOps sollen die Qualität der Software, die Geschwindigkeit der Entwicklung und der Auslieferung sowie das Miteinander der beteiligten Teams verbessert werden [5].

Site Reliability Engineering (SRE) ist ein Konzept des Rechenzentrumsbetriebs, wie er vom Konzern Google durchgeführt wird und Einzug in den Betrieb auch anderer Rechenzentrumsanbieter gefunden hat. Der Fokus liegt auf dem Einsatz fachübergreifender Teams und der höheren Automatisierung im Systembetrieb. Voraussetzung dafür ist eine stärkere Präsenz von Software Engineering Skills in den Teams [6].

Auswirkungen

Die Zentralisierung großer Teile der operationellen IT-Infrastruktur hat Auswirkungen auf die Organisation der Inbetriebhaltung und damit auch auf die damit befassten Mitarbeiter.

Durch die beabsichtigte Reduzierung der Standorte für den IT-Betrieb auf zwei Data Center, wird die Arbeitsweise in den Data Centern der eines modernen IT-Betriebs entsprechen. Damit werden zukunftsorientierte, moderne IT-Arbeitsplätze geschaffen, wodurch die DFS als Arbeitgeber für IT-Fachpersonal attraktiv bleibt.

Auch wenn sich die Standorte für die primäre IT-Infrastruktur reduzieren werden, bedeutet das nicht, dass alle Arbeitsplätze nur an den Data Center-Standorten konzentriert werden müssen. Die mit den neuen IT-Konzepten mögliche höhere Flexibilität ist nun bei der Erstellung des Inbetriebhaltungskonzeptes zu berücksichtigen.

Für MitarbeiterInnen und das Unternehmen soll dabei die optimale Lösung gefunden werden. Hierzu arbeitet das Programm ZAAS mit den Sozialpartnern in einem konstruktiven Dialog zusammen.

ZAAS-Programm

Das Programm ZAAS wurde 2017 gestartet, nachdem in der DFS bereichsübergreifend die Notwendigkeit zu Erneuerung der ATS IT-Landschaft erkannt wurde. Die Definitionsphase des Programms wurde im Juli 2017 genehmigt und erstreckt sich bis 2019.

Während der Definitionsphase arbeiten Experten der DFS bereichs- und standortübergreifend an der ATS Architektur der Zukunft. In verschiedenen Arbeitspaketen werden die unterschiedlichen Facetten der Transformation betrachtet. Neben den offensichtlichen technischen Fragestellungen werden aber auch regulative, organisatorische und betriebliche Fragestellungen bearbeitet. Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Vorhabens wird erstellt und kontinuierlich fortgeschrieben um aktuelle Erkenntnisse widerzuspiegeln. Erste Umsetzungsprojekte sind bereits identifiziert:

TANGe

Das Projekt TANGe (Tower ATS-System **N**ext **G**eneration) hat zum Ziel eine neue zukunftsfähige und wirtschaftliche technische Basis für die ATS-Komponenten der TWR-Dienste zu schaffen und eine serviceorientierte Architektur entsprechend den Prinzipien der ZAAS-Zielarchitektur zu entwickeln, welche auf den durch ZAAS etablierten Rechenzentren betrieben wird.

TANGe soll zudem eine Optimierung der gesamten Wertschöpfungskette im Pflege- und Änderungsprozess der ATS-Systemlandschaft TWR durchführen. Dies erstreckt sich von der ersten Anforderungserhebung bis hin zur Auslieferung und Inbetriebnahme beim Lotsen

sowie den täglichen Aktivitäten zur Inbetriebhaltung der ATS-Komponenten.

Gleichzeitig sollen die neuen geforderten Funktionen der europäischen Regulierung - der Durchführungsverordnung (EU) 716/2014 [7] - für die Hub-Standorte umgesetzt werden.

Das Projekt TANGe ist das Pilotprojekt zur Nutzung der Ergebnisse aus ZAAS und wird nach modernen Konzepten der IT entwickelt.

Data Center

Durch das Projekt Data Center soll die IT Basisinfrastruktur der DFS aufgebaut werden, welche das Rückgrat der angestrebten Zukunftsarchitektur bildet.

Im ersten Schritt wird an den beiden derzeitigen Tower Cluster Standorten München und Langen eine erste Ausbaustufe für die Nutzung durch TANGe bereitgestellt. Der Betrieb der Data Center Infrastruktur soll zentral erfolgen.

Die Bereitstellung an den Standorten München und Langen ist jedoch keine Vorentscheidung für die endgültige Data Center Standortauswahl.

Nach einer sorgfältigen Betrachtung der möglichen Data Center Standorte und der Standortfestlegung 2019 wird eine zweite Stufe des Projekts die Planung und die Umsetzung des Aufbaus der Endausbaustufe der Data Center durchführen.

Weitere Projekte und Maßnahmen

Ziel ist die Migration aller ATS-Systemfunktionen der DFS, ggf. inkl. COM, in den Data Center Betrieb. Verschiedene Untersuchungen werden bereits jetzt durchgeführt, um frühzeitige Chancen für eine Migration zu identifizieren, u.a. eine Machbarkeitsstudie zur zentralen Bereitstellung der zukünftigen Funktionalität der Flight Object Interoperability (FO IOP)¹ für das ATS-System iCAS.

Es ist zu erwarten, dass über die Dauer des Programms weitere Projekte und Maßnahmen im Kontext von ZAAS entstehen. Der geplante zeitliche Ablauf des Programms ZAAS ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

Das Programm ZAAS erstreckt sich über einen längeren Zeitraum, in dem Schritt für Schritt Systemfunktionen migriert werden. Dementsprechend gibt es einen Übergangszeitraum, in dem die „Alte Welt“ und die „Neue Welt“ parallel koexistieren werden.

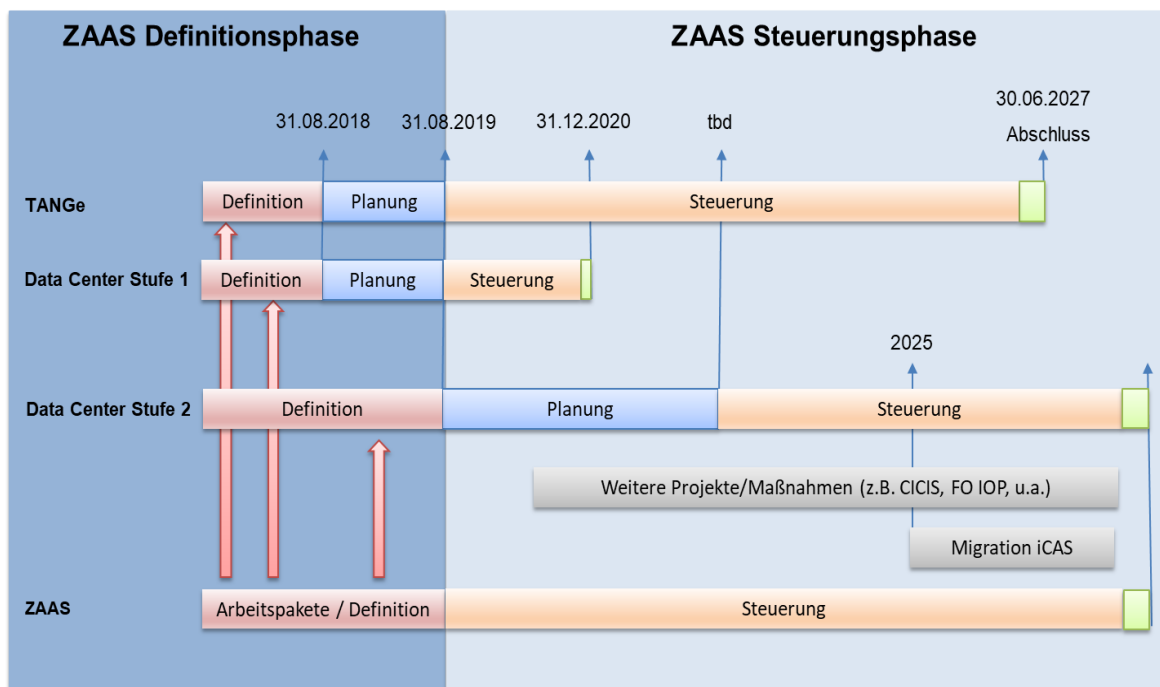


Abbildung 2: Zeitliche Planung ZAAS

¹ Flight Object Interoperability (FO IOP) bezeichnet den aktuell in der Entwicklung befindlichen Austauschmechanismus von

Flugdaten auf Basis des Flight Objects, welches u.a. die gesamte Trajektorien-Information eines Fluges beinhaltet.

Ausblick

Mit dem Programm ZAAS untersucht die DFS die Anwendung von modernen IT-Konzepten für den zukünftigen Betrieb ihrer ATS-Systeme. Der Ansatz einer service-orientierten, zentralen Architektur wird auch von anderen Flugsicherungen in Europa betrachtet, z.B. von NATS und skyguide. Auch im SESAR-Forschungsprogramm wird dieser Ansatz eines „Virtual Center“ verfolgt. Mit diesen Partnerorganisationen werden Erfahrungen und Erkenntnisse zu/mit ZAAS ausgetauscht, um am Ende der Definitionsphase zu einer tragfähigen Zielarchitektur zu kommen, die dann in den 2020er Jahren Schritt für Schritt in der DFS umgesetzt werden kann.

- [7] EU Kommission (2014). Durchführungsverordnung (EU) Nr. 716/2014 der Kommission vom 27. Juni 2014 über die Einrichtung des gemeinsamen Pilotvorhabens für die Unterstützung der Durchführung des europäischen Masterplans für das Flugverkehrsmanagement Text von Bedeutung für den EWR. Aufgerufen am 25.06.2018. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX:32014R0716>

Referenzen

- [1] OASIS (2006, 2. August) Reference Model for Service Oriented Architecture 1.0, Committee Specification 1, Aufgerufen am 25.06.2018. Verfügbar unter: <http://docs.oasis-open.org/soa-rm/v1.0/soa-rm.pdf>
- [2] Wikipedia (2018). Virtualisierung (Informatik). Aufgerufen am 25.06.2018. Verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Virtualisierung_\(Informatik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Virtualisierung_(Informatik))
- [3] Wikipedia (2018). Containervirtualisierung. Aufgerufen am 25.06.2018. Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Containervirtualisierung>
- [4] National Institute of Standard and Technology (NIST, 2011). The NIST Definition of Cloud Computing. Special Publication 800-145. Verfügbar unter: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nist-specialpublication800-145.pdf>
- [5] Wikipedia (2018). DevOps. Aufgerufen am 25.06.2018. Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/DevOps>
- [6] Wikipedia (2018). Site Reliability Engineering. Aufgerufen am 25.06.2018. Verfügbar unter: https://en.wikipedia.org/wiki/Site_Reliability_Engineering

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: 13.08.2018

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 © 2018 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

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.

