

Innovation im Fokus

Informationen zu Forschung, Entwicklung und Validierung

In dieser Ausgabe:

- Einer für alle – Der European ATM Master Plan Edition 2020
- Prädiktion von Anflugsequenzen mit Verfahren des maschinellen Lernens
- A novel approach to emulate and detect packet loss on surveillance radar channels
- Einfluss von Temperatur und Wind auf die Steigrate von Verkehrsflugzeugen
- Klimawandelauswirkungen auf das Luftverkehrsmanagement in Deutschland und deren Kompensation
- Abstände bei kapazitätsoptimaler Pistennutzung



DFS Deutsche Flugsicherung

Inhaltsverzeichnis

Übersicht der Artikel in diesem Heft	4
Einer für alle – Der European ATM Master Plan Edition 2020	5
Ulrich Berlett	
Prädiktion von Anflugsequenzen mit Verfahren des maschinellen Lernens	15
Daniel Seidel	
A novel approach to emulate and detect packet loss on surveillance radar channels	25
Roman Raekow (DFS), Prof. Dr. Michael Kuhn (Hochschule Darmstadt) & Dr. Bernd-Ludwig Wenning (Cork Institute of Technology)	
Einfluss von Temperatur und Wind auf die Steigrate von Verkehrsflugzeugen	33
Christoph Schmand & Marvin Baudis	
Klimawandelauswirkungen auf das Luftverkehrsmanagement in Deutschland und deren Kompensation.....	46
Sophia Marie Heering (Johannes Gutenberg-Universität Mainz)	
Abstände bei kapazitätsoptimaler Pistennutzung	57
Dr. Jens Konopka	
Impressum	63

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

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichwohl für beiderlei Geschlecht.

Übersicht der Artikel in diesem Heft

Ulrich Berlett: Einer für alle – Der European ATM Master Plan Edition 2020

Dieser Artikel führt durch den Plan, genauer gesagt durch den Executive View, stellt wesentliche Änderungen gegenüber der Edition 2015 dar, kommentiert und interpretiert diese in Bezug auf Handlungsstränge der Deutschen Flugsicherung GmbH. Er will das aufmerksame Lesen des Plans nicht ersetzen, sondern dazu ermuntern; denn die Umsetzung dieses Plans wird die ATM-Welt in Europa grundlegend verändern.

Daniel Seidel: Prädiktion von Anflugsequenzen mit Verfahren des maschinellen Lernens

Um die an einem Großflughafen verfügbaren Kapazitäten optimal auszunutzen, wurden An- und Abflugplanungssysteme entwickelt, die die Lotsen bei der Zuflussteuerung des Verkehrs auf die Start- und Landebahnen unterstützen sollen. Die Software dieser Arrival Manager (AMAN) werden derzeit durch Codeänderungen an neue Konstellationen angepasst. In diesem Artikel wird beschrieben, wie dabei Verfahren aus dem Bereich des maschinellen Lernens zur Erstellung von Anflugsequenzen genutzt werden können. Erste Vergleiche mit konventionell erstellten Planungstools zeigen vielversprechende Ergebnisse bzgl. einer verbesserten Qualität der Planung sowie einem deutlich reduzierten Aufwand zur Implementierung.

Roman Raekow, Michael Kuhn & Bernd-Ludwig Wenning: A novel approach to emulate and detect packet loss on surveillance radar channels

Verlässliche Kommunikation ist ein wichtiger Bestandteil der Flugsicherung. Mit einer steigenden Zahl an Applikationen und Teilnehmern auf den Radarkanälen ist aber auch die Wahrscheinlichkeit einer fehlerhaften Übertragung gestiegen. Um eine verlässliche Kommunikation auf diesen Kanälen zu gewährleisten, ist es daher nötig, den Verlust von Datenpaketen zu überwachen. Bis heute gibt es aber kein System, dass die Gesamtheit aller Verluste auf diesen Kanälen beschreiben kann. Dieser Artikel beschreibt einen neuen Ansatz, wie ein solches System aussehen könnte. Einige erste Messungen, die mit einem solchen System erstellt wurden, werden hier ebenfalls vorgestellt.

Christoph Schmand & Marvin Baudis: Einfluss von Temperatur und Wind auf die Steigrate von Verkehrsflugzeugen

Frühere DFS Untersuchungen haben gezeigt, dass der Einsatz von Methoden des Maschinellen Lernens mit diversen Eingangsgrößen, wie z.B. der Steigrate eine verbesserte vertikale Flugbahnvorhersage für einen Zeitraum von bis zu sechs Minuten ermöglichen kann. Diese Vorhersagen werden in künftigen Lotsenassistenzsystemen zur Konflikt-detektion und -lösung eingesetzt. Im Rahmen einer Bachelorarbeit sowie weiteren Untersuchungen im DFS Forschungszentrum wurde der Einfluss von Wind und Temperatur auf die Steigrate untersucht. Das Vorgehen und die Ergebnisse der abgeschlossenen Arbeiten werden in der vorliegenden Veröffentlichung eingehend erläutert.

Sophia Marie Heering: Klimawandelauswirkungen auf das Luftverkehrsmanagement in Deutschland und deren Kompensation

Die Veränderungen von Klimaparametern wie der Temperatur oder das Aufkommen von Extremereignissen aufgrund des anthropogenen Klimawandels stellen bis Mitte des 21. Jahrhunderts ein reales Gefahrenpotential für das Luftverkehrsmanagement in Deutschland dar. Daher wurden die daraus resultierenden Risiken speziell für die DFS Deutsche Flugsicherung, den Flughafen Frankfurt und die Fluggesellschaft Lufthansa frühzeitig und präventiv untersucht und identifiziert. Daraus wurden eine Reihe von Kompensationsmaßnahmen abgeleitet, um einen sicheren Luftraum national wie international gewährleisten zu können während die Kapazität trotz des Klimawandels gleich bleibt.

Jens Konopka: Abstände bei kapazitätsoptimaler Pistennutzung

Ein einfaches mathematisches Modell wird vorgestellt, das einen Zusammenhang herstellt zwischen der Anzahl an Flugbewegungen und der Anzahl zu erwartender staffelungsbedingter Fehlanflüge pro Zeiteinheit, um so eine Abschätzung des kapazitätsoptimalen Staffelpuffers zu ermöglichen. Die Robustheit des Modells gegenüber der Variation von Modellparametern wird erörtert und Möglichkeiten zur Erweiterung des Modells vorgestellt. Die hier getätigten Berechnungen eines kapazitätsoptimalen Staffelpuffers stellen nur einen ersten Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen mittels Echtzeitsimulationen im Rahmen des Projekts FUTURE dar.

Einer für alle – Der European ATM Master Plan Edition 2020

Ulrich Berlett

„Der Verwaltungsrat des SESAR Joint Undertaking (SJU) hat in seiner Dezembersitzung 2019 die Ausgabe 2020 des europäischen ATM-Masterplans formell gebilligt und damit den Konsens im europäischen Luftverkehrssektor signalisiert, die digitale Transformation der europäischen Luftverkehrsinfrastruktur zügig voranzutreiben und den Luftverkehr noch besser, nachhaltiger und zugänglicher für alle zu machen.“ (SJU Pressemitteilung) [8]

Dieser Artikel führt durch den Plan, genauer gesagt durch den *Executive View*, stellt wesentliche Änderungen gegenüber der Edition 2015 dar, kommentiert und interpretiert diese in Bezug auf Handlungsstränge der Deutschen Flugsicherung GmbH. Er will das aufmerksame Lesen des Plans nicht ersetzen, sondern dazu ermuntern; denn die Umsetzung dieses Plans wird die ATM-Welt in Europa grundlegend verändern.

Bedeutung

Die EU-Verordnung 409/2013 bezeichnet den European ATM Master Plan als *“the roadmap driving the modernisation of the European ATM system and connecting SESAR research and development with deployment. It shall be the key SES instrument for the seamless operation of the EATMN and the timely, coordinated and synchronised SESAR deployment.”*

Der *European ATM Master Plan* (MP) besteht aus 3 Ebenen (siehe Abbildung 1). Die beiden hierarchisch unteren, die detaillierten Level 2 und 3, dienen der Steuerung des SESAR R&D Programms bzw. der Implementierung seiner Ergebnisse. Der Level 3 ist aus dem European Single Sky Implementation Plan (ESSIP) von Eurocontrol hervorgegangen.

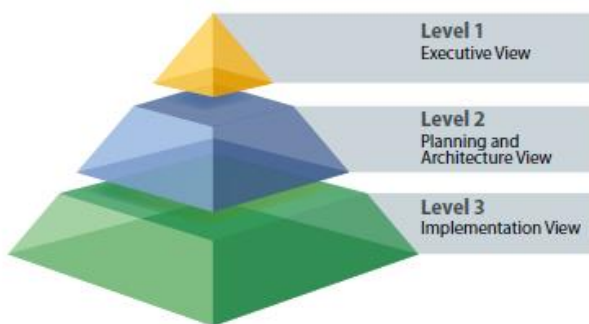


Abbildung 1: Die Ebenen des European ATM Master Plan [3].

Politisch bedeutsam ist der Level 1, der *Executive View*. Er dokumentiert die Entschlossenheit (*commitment*) aller Stakeholder auf höchster Ebene und schafft damit Planungssicherheit. Zu seiner Aktualisierung tritt im mehrjährigen Turnus unter Federführung des SJU eine repräsentative Redaktionskonferenz (Master Planning Group) mit Vertretern von SJU-Mitgliedern, Stakeholderorganisationen, Gewerkschaften, Network Manager, SESAR Deployment Manager, EUROCAE, EASA und nicht zuletzt der Europäischen Kommission als Vertreterin der EU-Mitgliedstaaten zusammen, um mit diesem Dokument die Leitlinien für die Entwicklung des europäischen ATM-Systems aufzuzeigen. Und diese beeinflussen nicht nur dessen betrieblich-technische Ausgestaltung, sondern auch die organisatorische und regulatorische, sowie die Geschäftsmodelle. Der Begriff „System“ ist hier wirklich ganzheitlich gemeint.

Aktuelle Einflüsse

Der MP 2020 hat gegenüber seinen Vorgängern deutlich an visionärer Prägnanz und Geschlossenheit gewonnen. Vor allem der veränderte Bedarf an ATM-Leistungen sowie politische Einflüsse trieben diese Änderungen. Die vier wichtigsten seien hier genannt:

- Erschienen 2015 noch die ATM-Kosten als das größte durch Produktivitätssteigerung zu mindernde Problem, drängte während der Planerstellung 2018/2019 die mangelnde Kapazität des ATM-Netzwerkes als „capacity crunch“ in den Vordergrund. Mit der zu steigenden Kapazität sollte gleichzeitig auch den zu erwartenden zusätzlichen CO₂-Emissionen mehr entgegen gesetzt werden.
- Auch im Luftverkehrssektor erwartete die EU-Politik nun eine sichtbare Ausrichtung auf den allgemeinen Trend zur Digitalisierung. Hierzu hatte sich die Branche am 8.11.2017 bei einem Gipfeltreffen in Tallin bekannt [1].
- Als große Herausforderung und große Chance gilt der erwartete Zuwachs an ferngelenkten oder gar autonom fliegenden Luftfahrzeugen und deren Integration in alle Luftraumklassen (U-Space), dargelegt in einer speziellen SJU-Studie [4].
- Das EU-Parlament hatte das SJU mit der Erstellung einer Studie zur Neugestaltung des europäischen Luftraums über alte Landes- und Luftraumgrenzen

hinweg beauftragt [5]. Der hierzu gehörende Transitionsplan [6] gab dem bis dahin stark technologisch geprägten *ATM Master Plan* plötzlich eine starke geschäftspolitische Dimension: Entgrenzung, Entkopplung von Diensten, Zentralisierung und Marktöffnung kamen (wieder) ins Spiel.

Grundriss

Den Ursprung des Masterplans bildet eine politisch getriebene Vision für den Umbau und die Defragmentierung des europäischen ATM-Geschäftes bis 2050. Diese Vision soll sowohl durch die Implementierung der im SESAR-Programm entwickelten Technologien als auch durch ergänzende oder forcierende regulative Maßnahmen erreicht werden. Die erwünschten Auswirkungen dieses Umbaus auf die wesentlichen Leistungskennzahlen werden durch eine für das Jahr 2035 geltende informelle Zielsetzung (*performance ambition*) umrissen. Die Realisierung wird in die Phasen A bis D unterteilt, und es werden zwei sich ausschließende Herangehensweisen betrachtet (Option 1 und 2, s.u.), die eher Haltungen der Beteiligten widerspiegeln und bei der Umsetzung zu unterschiedlichen Laufzeiten, Kosten und Nutzen führen. Klar favorisiert wird die schnellere Umsetzung (Option 1).

Die Umsetzung des Masterplans bis 2040/50 ist das SESAR-Szenario. Für die Kosten-Nutzen-Betrachtung wird es mit dem Non-SESAR-Szenario im Zeitraum 2012-2050 verglichen.

Vision

Die Vision betont klar das Erreichen eines ‚Digital European Sky‘ bis 2040 als das Ziel. Das ist neu und erklärungsbedürftig, und der MP 2020 liefert an dieser Stelle die Interpretation von „Digitalisierung“ oder besser „Digitaler Transformation“ für das Air Traffic Management aus Betreibersicht ([3] Kap. 2).

Auch im Masterplan 2015 waren die meisten Innovationen digitaler Art oder wurden durch digitale Systeme unterstützt. Neu am „Digital European Sky“ ist jedoch der vehemente, umfassende, ganzheitliche Anspruch, das ganze System aus nationalen Air Navigation Service Providern zu verändern und dabei deren vertikale Wertschöpfungsketten, geographische

Bindung, physikalische Bindung an Infrastrukturen sowie Art der Zusammenarbeit zum Wohle der Nutzer und der Allgemeinheit anzutasten, aufzulösen und eine Metamorphose einzuleiten ([3] Kap. 2.1.1). Über die hierzu bereits im SESAR-Programm erforschten Schlüsseltechnologien hinaus soll insbesondere die Auseinandersetzung mit bordseitiger Automatisierung, bei der Integration von autonom oder ferngelenkt fliegenden Luftfahrzeugen in den konventionellen Luftraum, ein Ideengeber für Lösungen zur bodenseitigen Automatisierung des ATM werden ([3] Kap. 2.1.4).

Die Kernelemente dieser Vision sind ([3] Kap. 2.1):

- das in seiner Kapazität voll skalierbare¹ ATM-System für bemannte und unbemannte Flüge aller Art,
- die grenzübergreifende bedarfsorientierte Kapazitätsbereitstellung,
- die Befähigung des ATC-Dienstes zur grenzübergreifenden Tätigkeit, unabhängig von politischen Grenzen,
- luftraumungebundene (virtuelle) Kontrollzentren und Rechenzentren,
- die Serviceorientierung mit der Entkopplung des ATC-Dienstes vom Datenservice und sonstigen Dienstleistungen wie Betrieb von Rechenzentren und CNS-Infrastrukturen,
- der umfassende Informationsaustausch Boden/Boden und Bord/Boden über vielfältig verbundene Netzwerke,
- die trajektorienbasierte, hochautomatisierte Vorausplanung und Staffellung,
- die volle Integration der Airports in diese Planung und die umfassende Kontrolle der Airport Abläufe selbst.

Zur zukünftigen Rolle des Lotsen/der Lotsin wird wörtlich ausgesagt:

„In phases A to C, ATC and ATFM automation developments will focus on increasing the level of system support, while the initiation of actions will always lie with the human. The breakthrough will happen in phase D, when higher automation

¹ „Voll Skalierbar“ bedeutet hier wohl nicht nur Anpassungsfähigkeit an jede Bedarfsmenge, sondern auch

„zusätzliche Kapazität ohne zusätzliche Investitionen und ohne zusätzliches Personal“.

levels will remove the human from the loop for selected ATC tasks. Human cognitive limitations will no longer limit the capacity of the airspace by design ([3] Kap. 2.2).“

Aufschlussreich ist die kompakte Darstellung dieser Innovationen auf der Zeitachse (siehe Abbildung 2), zugeordnet zu den Phasen A-D ([3] Kap. 2.3, Fig. 7). Die Phase D ist noch vollständig Vision, während A-C bereits Programm sind. Phase A wurde hauptsächlich aus dem Programm SESAR 1 gespeist, Phase B-C aus SESAR 2020. Für Phase D wird das noch zu etablierende Nachfolgeprogramm „SESAR 3“ die Lösungen liefern.

Vision; denn der Gebrauch fortschrittlicher digitaler Technologien erleichtert der Luftfahrt, neue Dienstleistungen anzubieten und bestehende zu verbessern. In Anbetracht der ringsum schnellen technischen Entwicklung und des in ATM noch nicht ausgeschöpften Potentials neuer Technologien soll die ATM-Branche durch agile und kollaborative Entwicklungsansätze schnellere Marktreife von Neuentwicklungen erreichen. Hierbei soll die Luftfahrt mit den übrigen europäischen Märkten Schritt halten, um im Sinne der *Strategie für einen digitalen Binnenmarkt für Europa* [12] die globale Wettbewerbsfähigkeit Europas zu sichern. Der MP schlägt auch vor, den Fortschritt bei der Digitalisierung dieses Marktsegmentes künftig durch den *Digital Economy and Society Index DESI* zu messen ([3] Kap. 2.2, [11]).

Performance Ambition 2035...

Die sogenannte Performance Ambition für 2035 rechnet mit einem starken Wachstum des Verkehrsvolumens und mit einer deutlich zunehmenden Diversität der Luftraumnutzer. Ferngelenkte oder gar automatisch fliegende Luftfahrzeuge werden auch im kontrollierten Luftraum in praktisch alle Luftraumklassen integriert werden müssen. Und auch der konventionelle Verkehr wird dank stärkerer Automatisierung mit nur einem Piloten an Bord fliegen und dadurch neue Anforderungen an das ATM-System stellen. Für das Jahr 2050 geht man von mehreren 10 Millionen Flügen pro Jahr aus (im Vergleich zu 11,1 Mio. in 2019), von denen der größte Teil auf neuartige Luftfahrzeuge entfallen wird. Deren starke Zunahme wird ab 2030 erwartet. Dieser Verkehr wird ohne hohe Automatisierung des Verkehrs-

managementsystems vor allem aus Sicherheitsgründen nicht zu bewältigen sein, schon die Kommunikation mit automatischen Flugsystemen erfordert dies.

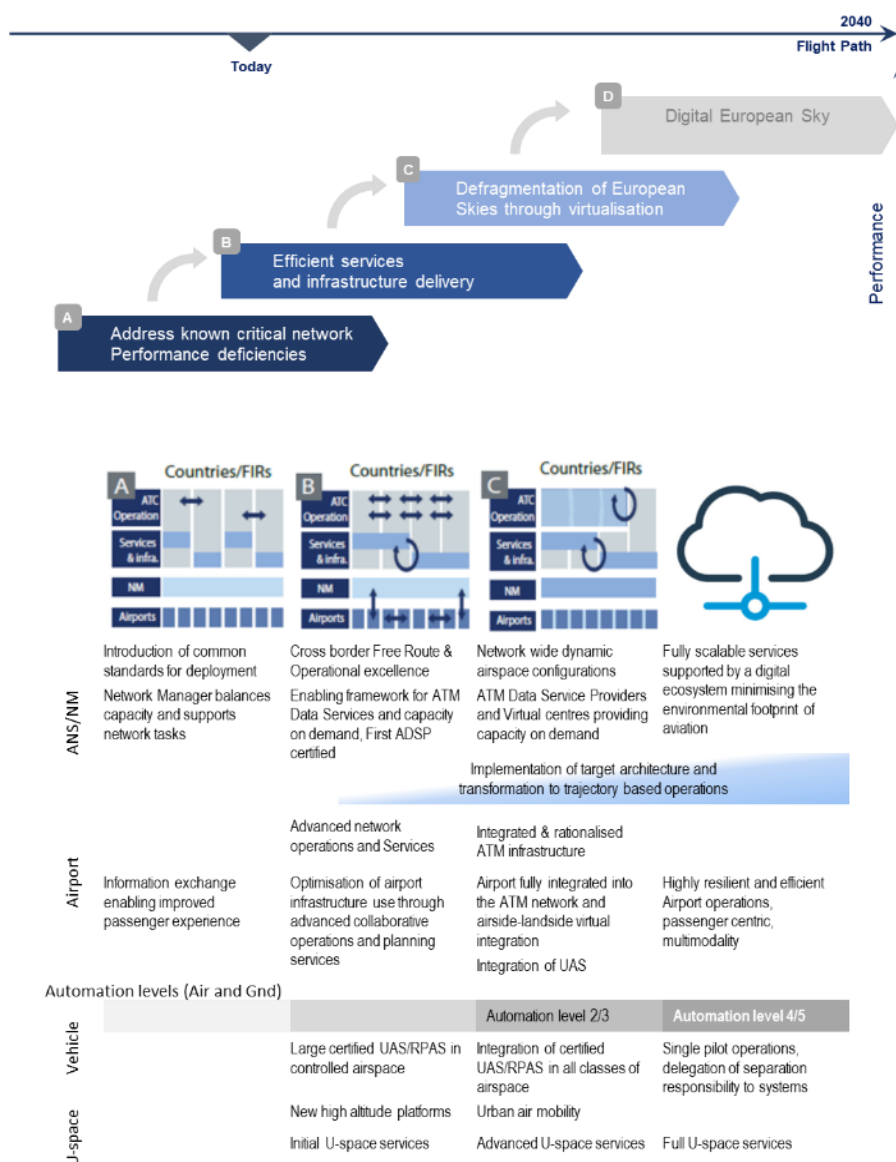


Abbildung 2: Programmphasen (Nachdruck fig. 3 aus [3]).

Digitale Transformation ist dabei kein Selbstzweck, sondern Mittel zum schnellen Erreichen der SESAR-

Für den konventionellen Verkehrsbereich bestätigt der MP 2020 die bereits 2015 für 2035 avisierten Ziele:

- Gegenüber 2012 eine Zunahme der kontrollierten Flüge um 60% auf 15 Millionen zu ermöglichen,
- die Zunahme der Starts/Landungen an den Hauptflughäfen um 5-10%, sowie
- eine Abnahme der ANS Kosten pro Flug um 30-40%.

Im Lichte der COVID-19-Krise mögen diese Prognosen und Ziele mittlerweile unrealistisch erscheinen und die Verkehrsentwicklung wird wahrscheinlich langsamer steigen als gedacht. Gleichwohl gilt es das ATM-Netzwerk auf jegliche Änderungen der Verkehrszahlen vorzubereiten und im Sinne einer digitalen Transformation weiterzuentwickeln.

Betriebliche Sicht

Eine wesentliche Neuerung im MP 2020 sind die *Essential Operational Changes*, die jetzt als roter Faden durch die gesamte Modernisierung des *European ATM Business* führen. Sie erzählen im Kapitel *Operational View* die „story“ hinter dem Gesamtvorhaben ([3] Kap. 4) und bilden eine Brücke zwischen der MP Vision und dem SESAR-Programm. Sie konkretisieren die Vision, greifen die bisher im *Target Concept* enthaltenen konzeptionellen Elemente auf und bilden damit den allgemeinen, größeren Rahmen. Gleichzeitig schaffen sie Raum für die bislang noch nicht im SESAR-Programm enthaltenen Aspekte der Vision, insbesondere die infrastrukturellen und die geschäftspolitischen. Hier sieht man den top-down Planungsanspruch des MP 2020 am deutlichsten. Die *Essential Operational Changes* werden im Folgenden kurz angerissen.

CNS infrastructure and services avisiert statt der Festlegung von Technologien die Festlegung von technischen Leistungsanforderungen sowie die Verschmelzung der Domänen Communication, Navigation und Surveillance in einem einheitlichen Service. Mindestens genauso fundamental ist die vorgeschlagene Entkopplung von ATM- und CNS-Geschäft durch geschäftliche Dienstleistungen zwischen CNS Service-Anbietern und ATM/ANS Service-Anbietern (*service-based approach*). Hierzu entsteht bereits eine Anwendung, wie sie u.a. in der Airspace Architecture Study [5] gefordert wird: Die Europäische Kommission untersucht derzeit die Schaffung der Rolle eines ATM Data Service Providers (ADSP).

ATM interconnected network führt hingegen den informationstechnischen *service-oriented approach* ein,

der auf Maschine/Maschine-Datenaustausch abzielt. Realisiert werden soll dies durch einen Satz von interoperablen Datendiensten, die insbesondere für Planungszwecke und taktische Zusammenarbeit im weitesten Sinne benutzt werden. Lösungen hierzu finden sich bereits in den SJU-Programmen SESAR 1 und SESAR 2020 unter dem Thema *System-Wide Information Management* (SWIM).

Digital AIM and MET services sind trotz ihrer Bedeutung für die „Digitalisierung“ noch wenig konkret. Es werden zwar die Gewinnung, der Austausch und die Nutzung meteorologischer Daten erwähnt, bei aeronautischen Daten ist aber bisher nur deren Austausch über Datendienste (SWIM) im Visier, obwohl gerade die aeronautischen Daten, sowohl die statischen wie auch die dynamischen, die Grundlage für die „Digitalisierung“ der ATM-Welt darstellen. Autonomes Fliegen ist beispielsweise ohne präzise interoperable aeronautische bzw. geographische Daten undenkbar, und deren Gewinnung und Bereitstellung ist alles andere als trivial und bei weitem noch nicht hinreichend technisch einheitlich und organisatorisch gelöst.

U-space services bündelt alle Dienste und Dienstleistungen rund um die Integration von unbemannten Luftfahrzeugen in den kontrollierten und in den unkontrollierten Luftraum. *U-space* meint nicht etwa einen abgegrenzten Luftraum, sondern – abstrakt – das gerade entstehende Europäische Rahmenwerk für den Betrieb von *Unmanned Aerial Systems* (UAS) in jeglichem Luftraum. Zunächst beschränkt man sich allerdings auf den bodennahen Luftraum (*very low level airspace*). Die Erbringung dieser Dienste soll von vorneherein stark an der Autonomie der Luftfahrzeuge und an Automatisierung ausgerichtet werden. Bestehende ATM-Infrastrukturen können genutzt werden, wenn sie den Anforderungen genügen. Gegenüber dem MP 2015 ist hier alles neu und von starken geschäftlichen Interessen getrieben. In der Implementierung sind bereits Basisdienste (*U1 - foundation services*) zur Identifizierung von Drohnen und deren Betreibern sowie zur Information. Implementierungsnah scheinen darüber hinaus erste Dienste zum sicheren Betrieb außerhalb der Sichtweite sowie zur ersten Anbindung an ATM/ATC und den bemannten Luftverkehr (*U2 – initial services*). Das umfasst die Flugplanung, die Genehmigungen von Missionen, die aktive Ortung, die Bereitstellung dynamischer Luftrauminformationen für Drohnenpiloten und Schnittstellen mit der Flugverkehrskontrolle (ATC). *U3 – advanced services* sowie *U4 – full services* stehen hingegen noch in weiter Ferne.

Virtualisation of service provision steht für die Trennung des Betriebs physikalischer Infrastrukturen von deren Nutzung sowie für eine flexible Zuordnung der Dienstleistung für unterschiedliche Lufträume. Hieraus bietet sich deren Konsolidierung über verschiedene Betreibergruppen hinweg an sowie die Erbringung von ATS-Diensten unabhängig vom Standort. Auch länderübergreifende Dienstleistungen (*delegation of service, capacity on demand*) sind mit entsprechenden gesetzlichen/ vertraglichen Regelungen möglich.

Airport and TMA performance hat die Start- und Landekapazität der Flughäfen im Fokus, sowohl was ihre Größe betrifft als auch ihren Erhalt unter widrigen (Wetter-) Bedingungen. Bei den für 2035 avisierten Flugzahlen würden ansonsten geschätzt 0,9 Millionen Flüge in Europa, für die Bedarf bestünde, nicht stattfinden können.

Trajectory-based operations ist der Kernbereich für Automatisierung von Vorausplanung und Staffelung des Verkehrs, der ursprüngliche Kernpunkt des *Target Concept* von SESAR.

Multimodal mobility and integration of all airspace users umfasst Änderungen, die für die verkehrsmittelübergreifenden Mobilitätsdienste und für die Integration neuartiger Luftfahrzeuge notwendig sind. Tür-zu-Tür-Verbindungen sind zwar erwähnt, konkret zeichnet sich aber nur die Integration eines IFR- Individualluftverkehrs in den konventionellen Linienverkehr im flughafennahen Bereich (TMA) ab.

The Role of the Human. Dieser äußerst bedeutsame und spannende Abschnitt beschreibt die zukünftige Mensch-Maschine-Integration im zukünftigen ATM-System in einer abstrakten Sprache. Ein „neues Arbeitssystem“ und „neue Rollen“ werden Altbekanntes ersetzen oder modifizieren. „Neue Werkzeuge“ werden nötig sein, um kontinuierlich die Kontrolle über das ATM-System zu gewährleisten. Der Mensch wird zum *human actor* an der Seite des *machine actor*. In einer systemorientierten Betrachtungsweise werden für beide Anforderungen beschrieben, die effektive Zusammenarbeit ermöglichen, unter anderem in Fällen von *collaborative, co-adaptive and joint intelligence modes of decision-making*. Der traditionelle Glaube, allein der Mensch könne in diesem System unerwartete Situationen meistern, ist nicht mehr haltbar. Vielmehr wird bereits der integrierte Entwurf des zukünftigen Mensch-Maschine (ATM)-Systems dafür Sorge tragen müssen, dass die Leistungsfähigkeit des Systems unter nominalen wie nicht-nominalen Bedingungen in den sicheren Grenzen bleibt. In einigen Fällen werden Verant-

wortungen, die bisher menschlichen Rollen zugeschrieben waren (Pilot, ATCO, ATSEP, inklusive Wartung und Überwachung), der Maschine zugeteilt werden. Menschen werden durch neue Werkzeuge in die Lage versetzt werden, mit Herausforderungen wie *cyber-attacks, new degraded modes* oder *cascade failure effects* umzugehen. Neue Gesetze werden angesichts der veränderten Aufgabenverteilung die Themen Verantwortlichkeit und Haftung neu regeln müssen ([3] Kap 4.5).

Realisierung der Vision

Insgesamt werden für die Implementierung der aus den beiden ersten SESAR-Programmen stammenden Innovationen etwa drei Regulierungsperioden veranschlagt, also dreimal 5 Jahre von 2020 bis 2035, eingeteilt in die Phasen A, B und C. Mit Phase C sollen Virtualisierungstechniken eingeführt sowie die Trennung von Flugverkehrskontrolle und Infrastrukturbetrieb erfolgt sein, was zu einer erheblichen Konsolidierung und Reduzierung der Infrastrukturen führen wird. Hiervon erwartet man einen verringerten Implementierungsaufwand für die Phase D. Diese soll die Vision vollständig umsetzen und das hochautomatisierte, skalierbare ATM-System der Zukunft realisieren. Noch in Phase C soll sich bis 2035 auch das Management der Drohnenflüge zu Routinevorgängen im ATM entwickelt haben. In den Jahren 2035+ würde dann die volle Integration des U-space in das konventionelle ATM zu einer gegenseitigen Inspiration beider Bereiche führen. Unterstützt durch neue agile Methoden, größere Offenheit und Kollaboration könnte insbesondere durch diese Zusammenarbeit die derzeit viel schnellere Innovation im Bereich Drohnen und urbane Luftmobilität auch im ATM-Bereich eine Beschleunigung bewirken, sodass die Phase D im Idealfall 2040 abgeschlossen werden könnte. Dieser Fall wird im Rollout Plan als **Option 1** bezeichnet. Option 2 ist hingegen die bisherige konventionelle Realisierung ohne solche Synergieeffekte.

Ob Option 1 oder 2 oder ein Szenario dazwischen eintritt, hängt stark davon ab, ob und in welchem Maße neue Methoden angewendet und Synergien aus dem U-space-Umfeld gehoben werden können. Dies bedeutet, nicht nur die Technik selbst zu modernisieren, sondern auch die Vorgehensweise, nicht nur bei der Entwicklung, sondern auch bei der Implementierung. Der Masterplan stellt an dieser Stelle eine gewaltige Herausforderung und Chance für alle Beteiligten bereit: Mit der Laufzeit auch die Kosten der Implementierung zu reduzieren („Option 1“). Wie das gehen könnte, ist an vielen Stellen im MP zwar angedeutet, muss aber in Praxis noch

erprobt werden. Fertig zu kaufen gibt es „Option 1“ nicht, sie will erarbeitet werden.

Das SJU entwickelt Innovationen in Form von „Lösungen“ (*Solutions*) im Rahmen von *Industrial Research and Validation*-Projekten und stellt deren Tauglichkeit zur Einführung ggf. in zusätzlichen *Very Large Scale Demonstration*-Projekten fest. Bereits 37 % dieser *Solutions* aus den beiden SESAR-Programmen haben die Validierung erfolgreich beendet und sind nun in der Implementierungsphase, die mit der Inbetriebnahme endet. Ein Gutteil wird zudem durch eine erste EU-Verordnung (*Pilot Common Project*) forciert realisiert.

Viele *Solutions* aus den SJU-Programmen SESAR 1 und SESAR 2020 (Wave 1) sind noch nicht in der Implementierung, werden aber bis Ende 2020 reif dafür sein, d.h. mindestens die Validierungsphase V3 [13] abgeschlossen haben. Für sie stellen Masterplan-Szenarien (*deployment scenario*) einen jeweils möglichen Implementierungsrahmen aus Zeit, Anwendungsgebieten und Performanceauswirkungen dar. Aus den Szenarien abgeleitete *Roadmaps* vermitteln den Arbeitsplan je Stakeholdergruppe (siehe Abbildung 3).

Die Roadmaps zeigen den Idealfall, um insgesamt die für 2035 angepeilte Performance Ambition (s.o.) zu erreichen.

Die Veränderung der CNS-Infrastruktur zeigt eine separate, stakeholderübergreifende Roadmap. Hier sind die Konzepte von Leistungsbasierung, serviceorientiertem Ansatz und Integration der drei Domänen C, N und S auf einer technologischen Plattform hervorzuheben. Etabliert wurde nun das Redundanzkonzept des Minimum Operational Network (MON), welches mit den weiter in Betrieb gehaltenen konventionellen (Alt-) Systemen, z.B. beim Ausfall von Satellitennavigation oder von integrierten CNS-Systemen, noch einen Notbetrieb zum sicheren Landen erlaubt ([3] Kap. 5.4).

Die vorgenannten Roadmaps verkörpern Grobplanungen, die mittelfristig die gleichmäßige Ausrichtung der individuellen Investitionspläne aller Beteiligten bewirken. Eine konkretere Planung für implementierungsreife *Solutions* findet nach Abschluss der Validierung und bei Aufnahme der *Solutions* in den Master Plan Level 3 statt. Deren Umsetzungsmaßnahmen sind dann dort als *Active Implementation Objective* zu finden.

Essential Operational Change (EOC)	Deployment Scenario	Stakeholder Group	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
CNS Infrastructure and Services	CNS Rationalisation	Civil	◀																
	Alternative position, navigation and timing (A-PNT): short term	Civil	◀																
ATM Interconnected Network	Airport Integration into the Network	Civil	◀																
	SWIM TI (technical infrastructure) Purple Profile for Air/Ground Advisory Information Sharing	Civil																	
Digital AIM and MET Services	Digitally Enhanced Briefing	Civil																	
	Improved MET and AIM Information and Services through Automation and Digitalisation	Civil																	
U-space Services	U-space - U1 - Foundation Services	Civil																	
	U-space - U2 - Initial Services	Civil																	
Virtualisation of Service Provision	Virtual Centre Concept	Civil																	
	Remotely Provided ATS For Multiple Aerodromes	Civil																	
Airport and TMA performance	Airport Safety Nets Vehicle	Civil																	
	Efficient Aircraft Separation during take-off and Final approach	Civil																	
	Enhanced Airport Safety Nets	Civil	◀																
	Enhanced Arrival Procedures	Civil																	
	Traffic optimisation on single and multiple runway airports	Civil																	
	Enhanced AMAN/DMAN Integration	Civil																	
Fully Dynamic and Optimised Airspace	Integrated Surface management	Civil																	
Trajectory Based Operations	High Productivity Controller Team Organisation	Civil																	
	eFPL Supporting SBT Transition to RBT	Civil																	
Multimodal Mobility and Integration of all Airspace Users	Enhanced Safety Nets	Civil	◀																
	Enhanced Rotorcraft and GA operations in the TMA	Civil																	
	Independent rotorcraft operations at Airports	Civil																	
	Optimised Low level IFR routes for Rotorcraft	Civil																	

Abbildung 3: Roadmap für ANSP (Nachdruck fig. 23 in [3]).

Der Masterplan trägt nun auch stärker als in früheren Ausgaben dem Umstand Rechnung, dass nach erfolgreicher Validierung einer Innovation (Solution) weitere erhebliche Anstrengungen bis zu deren Einsatzreife nötig sind. Hier wird häufig von „Industrialisierung“ gesprochen, was leicht mit hohen Stückzahlen assoziiert wird. Das trifft aber höchstens für die Bordsysteme und die CNS-Bodeninfrastrukturen zu. Die ATM-Bodensysteme sind quasi-Einzelanfertigungen. Einen enormen Aufwand – und ein großes Verzögerungsrisiko – bedeutet die Herstellung und Verabschiedung von international abgestimmten Normen (*Standards*) für Technik und betriebliche Prozeduren. Der Beschleunigungsbedarf wurde erkannt und die als notwendig erachteten Normungsaktivitäten aller SESAR 1 und SESAR 2020 Solutions sind als Übersicht im Masterplan enthalten ([3] Fig. 29]. Das Zustandekommen dieser Normen wird mittlerweile von den repräsentativ besetzten Koordinierungsgruppen EASCG, EUSCG und ECSCG² für die Bereiche ATM, UTM bzw. Cybersecurity verfolgt. Die in dieser Übersicht ebenfalls dargestellten regulativen Maßnahmen verkörpern den Bedarf an Hilfsmitteln zur Zertifizierung oder zum Konformitätsnachweis gegenüber Aufsichtsbehörden, in einigen Fällen aber auch den Regelungsbedarf für synchronisierte und koordinierte Einführungen. Diese regulativen Maßnahmen zur forcierten Implementierung werden in SESAR durch spezielle EU-Verordnungen, sogenannte *Common Projects* gebündelt. Die erste dieser neuen Verordnungen trägt den Namen ‚Pilot Common Project‘ (PCP) und soll demnächst in überarbeiteter Form als „Common Project 1 (CP1)“ verabschiedet werden.

Wirtschaftliche Aspekte

80 Mrd EUR könnte der direkte und indirekte Nutzen nach Umsetzung der SESAR-Vision ab 2040 betragen – jährlich.

Bemannter Luftverkehr

Der direkte und indirekte Nutzen im Jahr 2040 wird auf 64 Mrd EUR geschätzt – und wäre damit allein für dieses

Jahr schon größer als die gesamten Investitionen zur Implementierung.

Der Aufwand (*investments*)³ aller Beteiligten für die Implementierung der SESAR Phasen A – D wird auf 23-51 Mrd EUR geschätzt. – ohne die vergleichsweise geringen Forschungsaufwände (z.B. SESAR-Programm) und ohne Aufwände für Konsolidierungen bei den Unternehmen. Betriebskostenänderungen bleiben bei der Aufwandschätzung ebenfalls außen vor, werden aber zumindest teilweise implizit über die Nutzenberechnung berücksichtigt. Wie wird nun der Nutzen ermittelt? Aufschluss gibt ein Begleitpapier zum Master Plan [9].

Der monetär bewertbare Nutzen wird als Summe von Beiträgen zum Bruttoinlandsprodukt (BIP) für definierte Gruppen in und außerhalb einer definierten Wertschöpfungskette⁴ ermittelt (siehe Tabelle 1), also

- A. direkter Nutzen in der Flugverkehrs-Wertschöpfungskette
- B. indirekter Nutzen bei Zulieferern der Wertschöpfungskette
- C. indirekter Nutzen für Passagiere/EU Bürgern.

Der wesentlichste Beitragsfaktor ist, dass durch die SESAR-Innovationen die en-route-Kapazität des europäischen Luftraums über die bereits besprochene Grenze von ca. 13 Mio Flügen/Jahr angehoben werden kann, was zusätzliche Flüge, Umsätze und Zeitersparnis ermöglicht. Diese Effekte summieren sich auf ca. 48 Mrd EUR/ Jahr. Einsparungen innerhalb der Wertschöpfungskette durch bessere ATM Performance machen weitere 13 Mrd EUR /Jahr aus (s. Tabelle 1, markiert mit **). Die möglichen Einsparungen durch bessere ATCO-Produktivität sind demgegenüber mit 3 Mrd EUR / Jahr oder 4,7% des Gesamtnutzens marginal. Der Verkehr müsste bei 16,8 Mio IFR-Flügen in 2040 liegen, um diesen Gesamtnutzen zu erreichen.

² European ATM Standards Coordination Group, European UTM Standards Coordination Group bzw. European Cybersecurity Standards Coordination Group

³ Die betriebswirtschaftliche Unterscheidung zwischen Kosten und Investitionen ist hier irrelevant.

⁴ In einer Wertschöpfungskette (engl. *value chain*) wird aus Eingangsressourcen ein höherwertiges Produkt geschaffen, hier der Lufttransport von Fracht oder Personen. Zwischen den

Gliedern der Kette existieren Kunden/Lieferanten-Beziehungen. Die Kosteneinsparung des einen kann der Umsatzverlust des anderen sein. Hier wird die Kette: *AU < ANSP&NM < APT < Aircraft manufacturer < ATM equipment/avionics manufacturer* betrachtet. Das Militär ist zwar auch ein erheblicher Wirtschaftsfaktor, jedoch ist sein Anteil an der Wertschöpfungskette schwer bewertbar und wurde deshalb hier weggelassen.

Tabelle 1: Aufteilung des wirtschaftlichen Nutzens.

Nutzen im Zeitraum Jan-Dez 2040	Mrd. EUR
A Einsparung ANS cost (*)	3
A Einsparung departure delay (**)	5
A Einsparung fuel cost (**)	5
A Einsparung flight time (**)	2
A Einsparung CO2 emission tax (**)	1
A+B Zusatz-Profite durch mehr Flüge	3
A+B Zusatz-Arbeitseinkommen durch mehr Flüge ⁵	3
A+B Zusatz-Umsätze durch mehr Flüge	8
C Gesellschaftlicher Wert zusätzlicher Flüge	17
C Klimaveränderungen	-1
C Zeitersparnis der Passagiere	19
Insgesamt	64

Letztlich werden auch die direkten Vorteile der Wertschöpfungskette fast alle der (europäischen) Gesellschaft zugutekommen, denn infolge Wettbewerbes (auf Seiten der Luftraumnutzer) oder Regulierung (auf Seiten der Flugsicherungsorganisationen) kann vermutlich kaum einer der Akteure in der Wertschöpfungskette auf Dauer von seinen Kosteneinsparungen profitieren.

Unbemannter Luftverkehr

Auch die wirtschaftliche Betrachtung für den unbemannten Luftverkehr enthüllt ein attraktives Nutzen/Aufwand-Verhältnis. Die Investitionen in U-Space U1-U4 würde im Markt für Drohnenherstellung, -betrieb und -anwendung ein Potential von 140 Mrd EUR (kumuliert) bis 2035 freimachen. Den Aufwand schätzt man auf 4,5 Mrd EUR kumuliert bis 2035 und 6,5 Mrd EUR bis 2050 – ohne militärische Investitionen. Detailliertere Informationen hierzu enthält die *Drones Outlook Study* des SJU [4].

Fazit

Die Strategien zum Umbau des *European ATM Business* sind bekannt und lassen sich auch aus dem MP 2020 herauslesen: Entgrenzung, Entflechtung (vertikale und horizontale Desintegration von Geschäftsmodellen, z.B. durch Dienstleistungsmodelle), Schaffung neuer Rollen und von Wettbewerb (z.B. ADSP), Forcieren von Konsolidierungsprozessen durch Leistungsdruck, Beseitigung von Monopolen, u.a. durch Automatisierung und Virtualisierung, sowie Bereitstellung der notwendigen Technologien. Die ANSP und ihre Beschäftigten werden erheblich unter Druck gesetzt.

Dabei werden es die ANSP sein, deren zukünftige Anstrengungen eine wesentliche Grundlage für den Erfolg des Vorhabens darstellen dürften. Bei der Wandlung im Sinne der SESAR-Vision würden die ANSP samt ihrer Lufträume zu Dienstleistern werden, die praktisch jedes Verkehrsvolumen zu einem jährlichen Fixkostenbetrag abwickeln könnten und auch Lastwechsel ad hoc beherrschten. Das ist nur mit einem kleinen Personalstamm zusammen mit flexibel und ohne Zusatzkosten zuschaltbaren automatischen ATM-Mechanismen (Services) denkbar. Diese bedeutende Rolle sollte den ANSP eine selbstbewusste Haltung in diesem Umwandlungsprozess erlauben.

Die Kostenreduzierung für Airlines wird keine nachhaltige Wirkung haben, weil diese im harten Wettbewerb jegliche Kostenvorteile an den Endkunden abgeben werden.

Der Verkehrseinbruch durch die COVID-19-Abwehrmaßnahmen sollte durch eine Neuberechnung des Nutzens bedacht werden. Ohne eine erhebliche Verkehrssteigerung würde der Nutzen des ATM-Umbaus deutlich geringer ausfallen. Doch auch das wäre nur ein mögliches Szenario. Das ATM-Netzwerk sollte auf jegliche unerwartete Änderung der Verkehrszahlen vorbereitet werden.

Der Master Plan Level 1 („The Master Plan“) verkörpert den Grobplan für diesen Umbau des europäischen ATM-Geschäfts. Der Plan ist modern und ambitioniert, mit den übergeordneten Zielen im Einklang und in sich stimmig. Dementsprechend fand die Edition 2020 einhelligen Zuspruch bei den Beteiligten und Betroffenen.

⁵ Für ANSP wird angenommen, dass die höhere Produktivität für die Abwicklung des gleichermaßen gestiegenen Verkehrs benötigt wird und nicht zu Personalabbau und veränderten Arbeitseinkommen führt. Die Performance Ambition berücksichtigt dies bereits: Die Kennzahl *ANS gate-to-gate*

cost beispielsweise ist so bemessen, dass im Jahr 2035 durch gestiegene Produktivität 60% mehr IFR-Verkehr zu ANSP-Kosten von 2012 abgewickelt werden kann.

Abkürzungsverzeichnis

ADSP	ATM Data Service Provider
AIM	Aeronautical Information Management
ANSP	Air Navigation Service Provider
APT	Airport
ATC	Air Traffic Control
ATCO	Air Traffic Controller
ATFM	Air Traffic Flow Management
ATM	Air Traffic Management
ATS	Air Traffic Service
ATSEP	Air Traffic Safety Electronics Personnel
AU	Airspace User
BIP	Bruttoinlandsprodukt
CNS	Communication, Navigation, Surveillance
CO2	Kohlenstoffdioxid
COVID-19	Coronavirus Disease 2019
DESI	Digital Economy and Society Index
DS	Deployment Scenario
EASA	European Aviation Safety Agency
EATMN	European Air Traffic Management Network
EC	European Commission
EASCG	European ATM Standards Coordination Group
EUSCG	European UTM Standards Coordination Group
ECSCG	European Cybersecurity Standards Coordination Group
ESSIP	European Single Sky Implementation Plan (ehemals)
EU	Europäische Union
EUROCAE	European Organisation for Civil Aviation Equipment
IFR	Instrument Flight Rules
MET	Meteorological
MON	Minimum Operational Network
MP	European ATM Master Plan

NM	Network Manager
PCP	Pilot Common Project
SES	Single European Sky
SESAR	Single European Sky Air Traffic Management Research
SJU	SESAR Joint Undertaking
SWIM	System-Wide Information Management
TMA	Terminal Manoeuvring Area
UAS	Unmanned Aerial Systems
U-Space	Europäische Rahmenwerk für den Betrieb von Unmanned Aerial Systems (UAS)
UTM	UAS Traffic Management

Referenzen

- [1] Towards the Digital European Sky. A Joint Industry Declaration. 7. Nov. 2017
- [2] SESAR Joint Undertaking (2020). Digital European Sky – Blueprint. ISBN 978-92-9216-147-7 (Print), ISBN 978-92-9216-146-0 (PDF). URL: <https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/digital%20european%20sky%20blueprint.pdf>
- [3] SESAR Joint Undertaking (2019). EUROPEAN ATM MASTER PLAN 2020 Edition: Digitalising Europe's Aviation Infrastructure. Executive View. ISBN 978-92-9216-111-8 (Print), ISBN 978-92-9216-110-1 (PDF). URL: https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/reports/2018.6987_ATM2020-WEB2.pdf
- [4] SESAR Joint Undertaking (2016). European drones outlook study. URL: <https://www.sesarju.eu/node/2951>
- [5] SESAR Joint Undertaking (2019). A proposal for the future architecture of the European airspace. URL: <https://www.sesarju.eu/node/3253>
- [6] SESAR Joint Undertaking (2019). Future architecture of the European airspace - Transition Plan. URL: <https://www.sesarju.eu/index.php/node/3412>
- [7] ICAO Capacity & Efficiency (2016). 2016-2030 Global Air Navigation Plan (GANP). Doc 9750-AN/963, Fifth Edition – 2016.

- URL: https://www.icao.int/publications/Documents/9750_cons_en.pdf
- [8] SESAR Joint Undertaking (17.12.2019). Plan to digitalise Europe's aviation infrastructure adopted, Pressemitteilung.
URL: <https://www.sesarju.eu/news/plan-digitalise-europes-aviation-infrastructure-adopted>
 - [9] SESAR Joint Undertaking (19.09.2019). Master Plan Companion Document on the Performance Ambitions and Business View, Version 1.2.
 - [10] EUROCONTROL (2018). European Aviation in 2040 - Challenges of Growth. Edition 2.
URL: <https://www.eurocontrol.int/publication/challenges-growth-2018>.
 - [11] Europäische Kommission. The Digital Economy and Society Index (DESI).
URL: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/desi>
 - [12] Europäische Kommission. The European Digital Strategy.
URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A52015DC0192&from=EN&lang3=choose&lang2=choose&lang1=DE>
 - [13] Eurocontrol (2010). E-OCVM Version 3.0. European Operational Concept Validation Methodology. URL: <https://www.eurocontrol.int/publication/european-operational-concept-validation-methodology-eocvm>

Prädiktion von Anflugsequenzen mit Verfahren des maschinellen Lernens

Daniel Seidel

Einleitung

Um die an einem Großflughafen verfügbaren Kapazitäten optimal auszunutzen, wurden in der Vergangenheit bereits An- und Abflugplanungssysteme entwickelt, die die Lotsen bei der Zuflusssteuerung des Verkehrs auf die Start- und Landebahnen unterstützen sollen [1]. So sind in der Strecken- und Anflugkontrolle verschiedener europäischer Großflughäfen seit einigen Jahren Arrival Manager (AMAN) in Betrieb, die Anflugsequenzen und Zielzeiten für die Metering-Fixe und die Landebahnschwelle vorgeben.

Die Ermittlung der Reihenfolge und der passenden Zielzeiten im AMAN erfolgt auf der Basis geschätzter Flugzeiten (Estimates) von der jeweils aktuellen Flugzeugposition bis zu den Zielpunkten Metering-Fix oder Landebahnschwelle. Bei der Berechnung der Estimates werden die Standardanflugwege zugrunde gelegt und die jeweils früheste (Earliest) und späteste (Latest) Ankunftszeit geschätzt. Die Bildung einer geeigneten Reihenfolge geschieht dann durch Festlegung von Zielzeiten für jedes einzelne Flugzeug innerhalb ihrer geschätzten Earliest/Latest-Intervalle.

Um effektiv arbeiten zu können, verwendet der Planungsalgorithmus darüber hinaus auch interne Daten. Hierbei handelt es sich neben den Estimates um weitere Parameter zur Beschreibung der Situation und der Umgebung des einzelnen Luftfahrzeugs. Dabei sind besonders der Flugfortschritt, der Aufbau von Holdings, die auf dem Final etablierte Sequenz sowie eventuelle Lotseneingaben zu beachten.

Handelt es sich um ein adaptives Anflugplanungssystem wie den seit 2003 in Frankfurt operationell genutzten 4D-Planer [2], werden eine nicht planmäßige Führung des Anflugverkehrs automatisch erkannt und die Reihenfolge und die Zielzeiten an die neue Verkehrssituation angepasst. Die Berechnung einer plausiblen Reihenfolge ist die wichtigste Aufgabe der Anflugplanung, da deren Qualität maßgeblich zur Akzeptanz des Systems bei den Lotsen beiträgt.

Bisher musste bei der Entwicklung von Anflugplanungen die Reihenfolgeplanung immer an die speziellen operationellen Anforderungen des jeweiligen Standorts und die Arbeitsweisen der Lotsen angepasst werden. Um die korrekte Funktionsweise der Planung in einer realistischen Umgebung zu validieren, wurden

aufwendige Realzeit-Simulationen durchgeführt. Für die Anpassung an die operationellen Arbeitsweisen waren Veränderungen im Code der Anflugplanungs-Software notwendig.

Verfahren aus dem Bereich des maschinellen Lernens erlauben es nun, dass dieses Wissen nicht mehr programmiert werden muss, sondern durch selbstlernende Algorithmen aus Daten extrahiert werden kann. Das Ergebnis kann dann in einer Software zur Erstellung von Anflugsequenzen genutzt werden. Ziel ist es, den Zeitaufwand einer Implementierung zu verringern und bei mindestens gleicher Qualität der Planung die Lotsenakzeptanz zu erhöhen.

Das maschinelle Lernen (ML) führt zu einem neuen Programmierparadigma (siehe Abbildung). Bei der klassischen Programmierung werden die Regeln bzw. ein Programm und die gemäß diesen Regeln zu verarbeitenden Daten vorgegeben, was zu Antworten des Programms führt. Beim maschinellen Lernen werden sowohl die Daten als auch die dazugehörigen Antworten vorgegeben, und daraus werden die Regeln abgeleitet. Diese Regeln können dann auf neue Daten angewendet werden und liefern eigenständige Antworten.

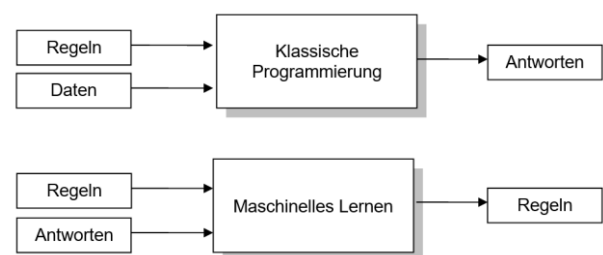


Abbildung 1: Paradigma Klassische Programmierung und maschinelles Lernen.

Konventionelle Berechnung von Anflugsequenzen in einem adaptiven AMAN

Um von der konventionellen Prädiktion von Anflugsequenzen einen Eindruck zu bekommen, soll hier die Vorgehensweise bei der Bildung von Sequenzen in einer adaptiven Anflugplanung kurz erläutert werden.

Eine wichtige Randbedingung bei der Entwicklung der Planungskomponente war die Fähigkeit des Systems, die Sequenz an das Lotsenverhalten zu adaptieren. Dabei soll eine vom Lotsen beabsichtigte Änderung der

Reihenfolge vom System automatisch erkannt und der Plan an die Absicht des Lotsen angepasst werden. Der Lotse ist in der Führung des Verkehrs nicht an die Vorschläge des Systems gebunden. Aus diesem Grund muss die Planung auch Verkehrsführungen bewältigen können, die völlig an den geplanten Vorschlägen vorbeigehen. Der gesamte Ansatz folgt der Prämisse, dass der Lotse in seiner Arbeitsweise durch das System nicht eingeschränkt wird, aber trotzdem immer eine sinnvolle Planung geliefert bekommt, nach der er den Verkehr führen könnte.

Für die Reihenfolgeplanung wurde ein mehrstufiger Ansatz gewählt, der das Problem in zwei Teilprobleme zerlegt. Zuerst werden Teilreihenfolgen für die einzelnen Anflugrichtungen gebildet und diese dann zu einer Gesamtsequenz zusammengeführt. Durch Analyse der Führung des Verkehrs durch die Lotsen stellte sich heraus, dass die Bildung der Reihenfolge für jede der Anflugrichtungen alleine relativ leicht möglich ist. Sie lässt sich mithilfe einiger weniger Regeln realisieren und spiegelt dabei die beabsichtigte Verkehrsführung wider.

Es werden zunächst für jede Anflugrichtung Einzelreihenfolgen gebildet. Das Problem für die Planung liegt in der Zusammenführung der Teilsequenzen zu einer Gesamtreihenfolge. Um die damit verbundene Problematik der Planstabilität zu lösen, wird bei der Bildung der Gesamtreihenfolge aus den Teilsequenzen, die zuletzt aktuelle Planung bei der Neuplanung wieder verwendet. Dadurch kann erreicht werden, dass man stets Planungen erhält, die so wenig wie möglich von der vorherigen Planung abweichen, aber sich dennoch an die aktuelle Verkehrssituation anpassen. Für die Entscheidung, welches Luftfahrzeug aus den zur Verfügung stehenden Teilreihenfolgen ausgewählt werden muss, sind Regeln implementiert, die das wahrscheinlich nächste Luftfahrzeug auswählen.

Zur Erstellung der Einzelreihenfolgen werden die Luftfahrzeuge zunächst aufgrund ihres Flugfortschrittes vorsortiert, der durch die Informationen

- Flugzeug befindet sich im ACC-Sektor
- Flugzeug befindet sich im Holding Stack
- Flugzeug verlässt Holding
- Flugzeug ist in der TMA

gekennzeichnet ist. Nach dieser Vorsortierung müssen die Luftfahrzeuge innerhalb dieser Zustände sortiert werden. Dabei wird insbesondere überprüft, ob die zuletzt vorhandene Reihenfolge noch haltbar ist. Notwendige Umplanungen werden auf der Basis verschiedener Abstands- und Höhenkriterien ermittelt.

Auf diese Art und Weise ergibt sich für jede der Anflugrichtungen je eine vollständige Teilreihenfolge, die zusammen den gesamten Verkehr abbilden.

Grundlage bei der Berechnung der Gesamtreihenfolge sind die Teilreihenfolgen für jede Anflugrichtung und die letzte vorangehende Planung der Gesamtsequenz. Zu jedem Update-Zyklus wird die Sequenz neu zusammengestellt. Es muss dabei entschieden werden, welches Luftfahrzeug von einer der Anflugrichtungen als Nächstes in die Gesamtsequenz einzufügen ist. Diese Auswahl erfolgt in folgenden Schritten:

- Als Erstes wird versucht, ein Luftfahrzeug, das vom Downwind im Eindrehen auf das Final ist, in die Reihenfolge einzufügen.
- Gibt es kein Luftfahrzeug mit dieser Eigenschaft, so wird versucht, das Luftfahrzeug, das im vorherigen Planungszyklus diese Position eingenommen hat, in die Reihenfolge einzufügen.
- Lässt sich dieses Luftfahrzeug ebenfalls nicht einfügen, so wird das wahrscheinlich nächste aus einer der zur Verfügung stehenden Anflugrichtungen ausgewählt.

Es werden zunächst nur diejenigen Flugzeuge berücksichtigt, die die aufgrund der Staffelnungskriterien vorgesehene Planzeit auch erreichen können. Falls aufgrund einer Verkehrslücke kein geeignetes Flugzeug zur Verfügung steht, wird die Planzeit entsprechend nach hinten verschoben. Es werden grundsätzlich keine Sequenzen generiert, die einen Überholvorgang auf dem Final erfordern würden.

Ziel ist es dabei, eine neue Gesamtreihenfolge zu erstellen, die so wenig wie möglich und so viel wie nötig von der letzten Planung abweicht.

Maschinelles Lernen

Das maschinelle Lernen führt zu einem neuen Programmierparadigma, in dem ein ML-System nicht explizit programmiert wird, sondern vielmehr trainiert. Dem System werden eine große Anzahl für die zu lösende Aufgabe relevante Beispiele bereitgestellt. In diesen Beispielen sucht das System nach einer statistischen Struktur, die ihm erlaubt, Regeln für die Automatisierung der Aufgabe zu erstellen.

Die hier gemachten Erläuterungen zum maschinellen Lernen können nur kurz gehalten werden und geben lediglich einen rudimentären Überblick über das Thema. In [3] werden die verschiedenen Verfahren und deren Implementierung mit Python und Scikit-Learn ausführlich

beschrieben. Die statistischen Hintergründe der verschiedenen Verfahren sind in [4] nachzulesen.

Das Hauptziel beim überwachten Lernen ist es, mit Trainingsdaten ein Modell zu erstellen, mit dem Prädiktionen auf neuen Daten möglich sind (siehe Abbildung 2). Der Begriff überwachtes Lernen bezieht sich dabei auf die Art der Trainingsdaten, in denen das Ergebnis für jeden Datensatz bekannt ist.

Beim überwachten Lernen gibt es vor allem zwei Arten von Problemen: Klassifizierung und Regression. Bei der Klassifizierung müssen die Elemente korrekt in eine von zwei oder mehr Klassen eingeordnet werden. Gibt es nur zwei Klassen, bezeichnet man das Problem als binäre Klassifizierung.

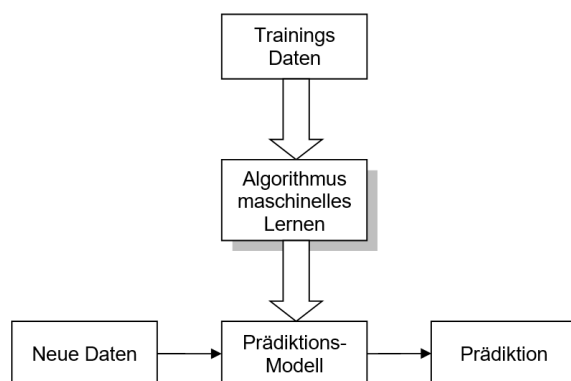


Abbildung 2: Modellbildung und Prädiktion beim überwachten maschinellen Lernen.

Das einfachste Klassifizierungsverfahren ist die logistische Regression (LR), die eine lineare Methode ist, bei der die Vorhersagen mithilfe der logistischen Funktion transformiert werden. Jede Instanz wird dann der Klasse zugeordnet, zu der sie mit der höchsten Wahrscheinlichkeit gehört.

Anstatt einer linearen Methode, kann auch ein Entscheidungsbaum verwendet werden, in dem alle Instanzen in viele Regionen segmentiert oder geschichtet werden, was durch die vorhandenen Klassen gesteuert wird. Nach erfolgter Segmentierung entspricht jede Region einer bestimmten Klasse (bei Klassifizierungsproblemen) oder einem Bereich von vorhergesagten Werten (bei Regressionsproblemen).

In der Praxis hat sich die Kombination mehrerer Modelle zu einem sogenannten „Model Ensemble“ bewährt, um die Leistungsfähigkeit zu steigern.

Das nachfolgend angewandte „Boosting“ beruht auf mehreren Entscheidungsbäumen, bei dem die Modell-erstellung sequentiell erfolgt und bei jeder Modell-erstellung die Fehler aus vorhergehenden Modellen

berücksichtigt werden. Dadurch ist es möglich, dass sich das Basislernverfahren auf die schwierigen Fälle konzentrieren kann. Von allen baumbasierten Methoden gehören Gradienten-Boosting-Maschinen (GB) zu den leistungsstärksten. Die Repräsentationen von Daten können mit neuronalen Netzen gelernt werden, die sich aus einer Eingabeschicht, mehreren verdeckten Schichten und einer Ausgabeschicht zusammensetzen. Die Eingabeschicht verwendet die Features, und die Ausgabeschicht versucht, die Antwortvariable zu treffen. Die verdeckten Schichten verkörpern eine verschachtelte Hierarchie von Konzepten – jede Schicht (oder jedes Konzept) versucht zu verstehen, wie sich die vorherige Schicht zur Ausgabeschicht verhält.

Mithilfe dieser Hierarchie von Konzepten ist ein neuronales Netz (MLP, Multi Layer Perceptron) in der Lage, komplizierte Konzepte zu lernen, indem es sie aus einfacheren Konzepten aufbaut. Neuronale Netze stellen einen der leistungsfähigsten Ansätze für die Approximation von Funktionen dar.

Mit den beschriebenen Verfahren des maschinellen Lernens ergibt sich dann die folgende Vorgehensweise zur Berechnung von Anflugsequenzen:

Trainingsdaten: Dazu werden zunächst die Landezeiten aller an einem Flughafen gelandeten LFZ ermittelt. Anschließend werden mit den Radardaten von direkt hintereinander gelandeten LFZ die Trainingsdaten erzeugt. Nehmen wir an LFZ₁ landet vor LFZ₂. Dann werden jeweils 2 Datensätze pro Radardatum erzeugt. Der erste Datensatz mit den Radardaten von LFZ₁ und LFZ₂ bekommt den Wert 1 für den positiven Fall, weil LFZ₁ vor LFZ₂ landet und der zweite Datensatz mit den Radardaten von LFZ₂ und LFZ₁ erhält den Wert 0, da LFZ₂ nicht vor LFZ₁ landet.

Prädiktionsmodell: Mit den Trainingsdaten kann mit einem der oben beschriebenen Verfahren ein Prädiktionsmodell (Lineare Regression, MLP, Gradient Boosting) zur binären Klassifikation von LFZ Paaren erstellt werden.

Prädiktion von Anflugsequenzen: Die Berechnung der Anflugsequenzen ist ein zyklischer Prozess mit den Radardaten aller sich im Anflug befindenden LFZ. Es wird mit jedem Radarupdate ein paarweiser Vergleich über alle LFZ mit dem durch die Trainingsdaten generierten Prädiktionsmodell durchgeführt. Durch Summation über das Ergebnis aller Vergleiche erhält man dann die Sequenznummer für jedes LFZ und damit die geschätzte Anflugreihenfolge.

Paarweise Klassifikation von Luftfahrzeugen

Die zuvor beschriebenen Verfahren aus dem Bereich des maschinellen Lernens sollen nun zur Klassifikation von Paaren von Luftfahrzeugen (LFZ) verwendet werden. Ziel ist es, zu entscheiden, ob ein LFZ vor einem anderen LFZ landet bzw. ob es sich in der Anflugsequenz vor einem anderen befindet.

Die Prognosen für alle Paare von Luftfahrzeugen lassen sich in einer Klassifizierungstabelle (Konfusionsmatrix, siehe Tabelle 1) zusammenstellen. In der Konfusionsmatrix wird das Ergebnis der Klassifikation mit der realen Situation verglichen.

Tabelle 1: Konfusionsmatrix.

	LFZ2 ist vor LFZ1	LFZ1 ist vor LFZ2	Summe	
Negative Klassifikation: LFZ2 vor LFZ1	n00 (richtig negativ)	n01 (falsch negativ)	n0	n00/n0 Spezifität
Positive Klassifikation: LFZ1 vor LFZ2	n10 (falsch positiv)	n11 (richtig positiv)	n1	n11/n1 Sensitivität

Trefferquote: Anteil der richtigen Prognosen an der Zahl aller Fälle $(n00+n11) / (n0 + n1)$

Sensitivität: Für die Situation LFZ_1 ist vor LFZ_2 Anteil der korrekten Prognose

Spezifität: Für die Situation LFZ_2 ist vor LFZ_1 Anteil der korrekten Prognose

Die Klassifikation soll mit verschiedenen Verfahren des maschinellen Lernens durchgeführt werden. Als Eingangsgrößen werden für jedes LFZ aus den Radar-daten die Position, Flughöhe und Übergrundgeschwindigkeit GS verwendet.

Damit ergibt sich für jedes Paar aus zwei LFZ ein Datensatz bestehend aus 8 Werten. Ist die Landezeit LT_i von LFZ_i kleiner als die Landezeit LT_j von LFZ_j bekommt das Paar den Wert 1. Die umgekehrte Kombination aus LFZ_j und LFZ_i hat dann den Wert 0. Die Klassifikationsfunktion S für ein paar von Luftfahrzeugen ist dann folgendermaßen definiert:

$$S(x_{LFZ_i}, y_{LFZ_i}, fl_{LFZ_i}, v_{LFZ_i}, x_{LFZ_j}, y_{LFZ_j}, fl_{LFZ_j}, v_{LFZ_j}) = \begin{cases} 1 & LT_{LFZ_i} < LT_{LFZ_j} \\ 0 & LT_{LFZ_i} > LT_{LFZ_j} \end{cases}$$

wenn

Es werden hier die im vorigen Kapitel beschriebenen Klassifikationsverfahren zur Beurteilung der LFZ Paare verwendet:

1. Logistische Regression (LR)
2. Neuronales Netz (MLP, Multi Layer Perceptron)
3. Gradient Boosting (GB)

Die Berechnung wurde mit Anflugdaten vom Flughafen Düsseldorf (s. Abbildung 3) durchgeführt. Dazu wurden zunächst die Landereihenfolgen aller LFZ eines Tages ermittelt. Mit diesen und den Radardaten wurde jeweils ein ML-Modell für jede Betriebsrichtung (BR) trainiert. Die Trainingsdaten basierten auf 30 Tagen und umfassten 5.311.568 Datensätze mit jeweils 8 Werten für BR23 und 2.326.676 für die BR05.

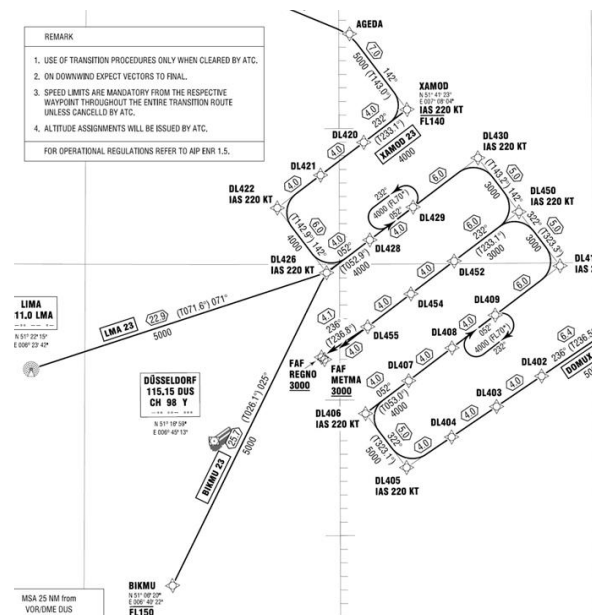


Tabelle 2: Trefferquote für verschiedene ML-Verfahren.

	Trefferquote BR 23	Trefferquote BR 05
Logistische Regression	0.759	0.801
Neuronales Netz	0.946	0.940
Gradient Boosting	0.940	0.941

Neben der Klassifikation des gesamten Verkehrs, sollen auch Teilmengen untersucht werden, um die Qualität in bestimmten Bereichen wie beispielsweise bei APP und ACC genauer beurteilen zu können. Dazu wurden die folgenden Aufteilungen in den Daten vorgenommen:

1. APP
2. ACC gesamt
3. ACC mit unterschiedlichen Metering-Fixen
4. Metering-Fix XAMOD
5. Metering-Fix DOMUX
6. Metering-Fix BIKMU
7. LFZ Paare mit einer Distanz kleiner als 50 NM

Tabelle 3: Trefferquote für verschiedene Sektoren BR23.

BR 23	Logistische Regression	Neuronales Netz	Gradient Boosting
APP	0.937	0.971	0.962
ACC	0.592	0.921	0.916
ACC versch. MF	0.584	0.908	0.902
XAMOD	0.602	0.920	0.914
DOMUX	0.591	0.960	0.954
BIKMU	0.647	0.957	0.961
Distanz<50NM	0.877	0.972	0.966

Tabelle 4: Trefferquote für verschiedene Sektoren BR05.

BR 05	Logistische Regression	Neuronales Netz	Gradient Boosting
APP	0.945	0.971	0.964
ACC	0.659	0.906	0.913
ACC versch. MF	0.660	0.889	0.899
XAMOD	0.727	0.956	0.957
DOMUX	0.654	0.941	0.939
BIKMU	0.605	0.949	0.946
Distanz<50NM	0.893	0.972	0.967

Wie Tabelle 3 und Tabelle 4 zu entnehmen ist, ist die Qualität der Logistischen Regression in einigen Bereichen ziemlich schlecht und eignet sich daher nicht zur Klassifikation. Offensichtlich handelt es sich hier um ein nicht lineares Problem. Besonders für die Klassifikation im ACC ist dieses Verfahren nicht geeignet. Sowohl das Neuronale Netz als auch das Gradient Boosting liefern in fast allen Konstellationen eine Trefferquote von ca. 0,95. Das heißt, dass mit diesen beiden Verfahren eine sehr gute Beurteilung von LFZ-Paaren bezüglich ihrer Landereihenfolge möglich ist. Es ist ebenfalls erstaunlich, dass diese hohe Güte der Klassifikation nur auf Basis von Radardaten erreicht werden kann. Dies steht im Gegensatz zu der konventionellen Berechnung von Landereihenfolgen, bei der die geschätzten Landezeiten (Estimates) eine zentrale Rolle bei der Erstellung der Sequenz spielen. Man kann aus den Ergebnissen folgern, dass zur Beurteilung und Erstellung einer Reihenfolge die Radardaten für die Lotsen bereits ausreichend sind. Aufgrund der hohen Trefferquote folgt des Weiteren, dass von den Lotsen bei der Beurteilung von Luftfahrzeug-Paaren fast immer eine eindeutige Entscheidung getroffen wird, welches LFZ die Nummer eins ist.

Erwähnenswert ist auch, dass mit dem Neuronalen Netz im APP Luftraum und für LFZ mit einer Distanz kleiner als 50 NM eine Trefferquote von 0,97 erreicht werden kann. Das heißt, dass in allen Situationen, in denen LFZ in den Kontrollbereich *eines* Lotsen fallen, sehr gute Ergebnisse bei der Klassifizierung der Reihenfolge erreicht werden. Betrachtet man dagegen die Klassifikation von LFZ im ACC über unterschiedliche Metering-Fixe, wird eine deutlich schlechtere Trefferquote von 0,88-0,90 erzielt. Für diese LFZ Paarungen sind aber immer auch Lotsen aus unterschiedlichen Sektoren zuständig.

Bei den bisherigen Untersuchungen spielte der zeitliche Landeabstand der betrachteten LFZ keine Rolle. Das Kriterium bei der Klassifikation war nur, dass die LFZ hintereinander landen. Dabei können zwischen den Landungen größere Zeitabstände liegen, sodass sich die Reihenfolge bereits über die Differenz der Estimates beider LFZ ergibt. Deshalb sollen in einem weiteren Schritt die LFZ Paare untersucht werden, deren EETA (Earliest Estimated Time of Arrival) Differenz kleiner als 120 Sekunden ist. Bei solchen Paaren können in der Regel beide LFZ eine bestimmte Position hinter einem Vorgänger erreichen. Daher ist diese Konstellation besonders interessant, weil sie zeigt, wie gut mit der Klassifikation die Arbeitsweise der Lotsen nachgebildet werden kann.

In Tabelle 5 und Tabelle 6 werden die Klassifikationsergebnisse für BR23 und BR05 mit LFZ Paaren mit einer EETA Differenz kleiner als 120 Sekunden dargestellt.

Tabelle 5: Trefferquote für verschiedene Sektoren BR23 mit EETA Differenz < 120s.

BR23	Logistische Regression	Neuronales Netz	Gradient Boosting
APP	0.89	0.94	0.92
ACC	0.59	0.78	0.76
ACC versch. MF	0.57	0.74	0.72
XAMOD	0.64	0.78	0.77
DOMUX	0.62	0.88	0.87
BIKMU	0.61	0.88	0.89
Distanz<50NM	0.87	0.94	0.93

Tabelle 6: Trefferquote für verschiedene Sektoren BR05 mit EETA Differenz < 120s.

BR05	Logistische Regression	Neuronales Netz	Gradient Boosting
APP	0.90	0.94	0.93
ACC	0.66	0.78	0.80
ACC versch. MF	0.65	0.74	0.77
XAMOD	0.81	0.89	0.88
DOMUX	0.68	0.87	0.87
BIKMU	0.50	0.85	0.85
Distanz<50NM	0.88	0.94	0.93

Bemerkenswert ist hier die Trefferquote für den ACC Verkehr über unterschiedliche Metering-Fixe, der mit 0.74 deutlich schlechter ist als die übrigen Ergebnisse. Es zeigt sich, dass bei LFZ im ACC über unterschiedliche Metering-Fixe keine gute Klassifikation möglich ist. Dadurch ergeben sich einige interessante Schlussfolgerungen über die zu erwartende Qualität der Klassifikation in Abhängigkeit von der Luftraumstruktur. Je mehr Metering-Fixe ein Flughafen hat, desto ungenauer wird die Bestimmung der ACC Reihenfolge für Verkehr über unterschiedliche Fixe. Wie man in den Daten sehen kann, ist die Trefferquote für solche Paarungen bei maximal 0.75. In Düsseldorf ist dies bei 23 % des BR23 Verkehrs über verschiedene Fixe der Fall. Wird der Anteil dieser Art von Verkehr größer, verschlechtert sich automatisch die Qualität der Klassifikation. Damit haben sowohl die Anzahl der Metering-Fixe als auch die Verkehrsmenge einen Einfluss auf die Güte der Klassifikation.

Überträgt man dies auf andere Flughäfen, so ergibt sich in Frankfurt mit 4 Metering-Fixen und 2 Landebahnen und

einem höheren Verkehrsaufkommen als in Düsseldorf, eine deutlich komplexere Konstellation, in der es oft zu der schlecht zu klassifizierenden Situation von LFZ über unterschiedliche Fixe mit dicht beieinanderliegender EETA kommen kann. In München ist die Situation durch jeweils 2 Metering-Fixe pro Bahn günstiger, da hier nur der Verkehr über jeweils 2 Fixe gemischt wird. Somit sind hier bessere Planungsergebnisse als in Frankfurt und Düsseldorf zu erwarten.

Wie bereits dargestellt wurde, ergibt sich bei einem MLP Klassifizierer eine Trefferquote von 0,94 bei direkt hintereinander landenden LFZ. Betrachtet man Paare von LFZ die einen Abstand von 2 Positionen bei der Landung haben, erhöht sich die Trefferquote auf 0,97. Das heißt, je weiter ein Paar in der Landereihenfolge auseinander liegt, desto größer wird die Trefferquote des Klassifizierers. Aus diesem Grund liefert der im folgenden Kapitel verwendete paarweise Vergleich auch bei Sequenzen mit vielen LFZ ein hinreichend gutes Ergebnis.

Prädiktion von Anflugsequenzen

Wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, ergibt sich für jedes LFZ Paar ein Datensatz mit 8 Werten. Ist die Landezeit LT_1 von LFZ_1 kleiner als die Landezeit LT_2 von LFZ_2 bekommt das Paar den Wert 1. Die umgekehrte Kombination aus LFZ_2 und LFZ_1 hat dann den Wert 0. Es werden nur direkt hintereinander landende LFZ-Paare betrachtet. Hat LFZ_1 die Landungsnummer LN, dann hat LFZ_2 die Landungsnummer LN+1.

$$S(x_{LFZ1}, y_{LFZ1}, fl_{LFZ1}, v_{LFZ1}, x_{LFZ2}, y_{LFZ2}, fl_{LFZ2}, v_{LFZ2}) = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$$

$$\text{wenn } \begin{cases} LT_{LFZ1} < LT_{LFZ2} \\ LT_{LFZ1} > LT_{LFZ2} \end{cases}$$

Mit diesen Daten kann ein Klassifizierungsverfahren trainiert werden. Beim ML-AMAN wird ein Neuronales Netz bzw. ein MLP Klassifizierer zur Klassifikation verwendet. Die Anzahl der sich im Anflug befindenden LFZ sei N. Es wird ein paarweiser Vergleich für alle Paare der Sequenz durchgeführt. Die dabei verwendete Klassifikationsfunktion K liefert für jedes Paar LFZ_i und LFZ_j die Information, ob LFZ_i in der Sequenz vor oder hinter LFZ_j liegt.

$$K(LFZ_i, LFZ_j) = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad \text{wenn } \begin{cases} LFZ_i \text{ vor } LFZ_j \\ LFZ_j \text{ vor } LFZ_i \end{cases}$$

Die durch die Klassifikation berechnete Position in der Sequenz von LFZ_k ergibt sich dann aus der Summation über alle LFZ Paare.

$$KPos(Lfz_k) = (N+1) - \sum_{i=1}^N K(Lfz_k, Lfz_i) \text{ für } k = 1, \dots, N$$

Dann wird die Sequenz nach dem Wert der Funktion KPos sortiert. Für den Fall, dass die Position von LFZ_i und LFZ_j nach der Klassifikation gleich ist, wird die Position in der Sequenz zum Zeitpunkt t-1 verwendet.

$$Seq(t) = (KPos(Lfz_1), \dots, KPos(Lfz_N))$$

$$Pos(i, t) = \begin{cases} KPos(Lfz_i) & \text{wenn } KPos(Lfz_i) \text{ eindeutig} \\ Pos(i, t-1) & \text{wenn } KPos(Lfz_i) \text{ uneindeutig} \end{cases}$$

Seq(t) ist dann die sortierte Sequenz aller Anflüge und Pos(i, t) die Sequenznummer von LFZ_i zum Zeitpunkt t.

Es werden neben dem ML-AMAN noch zwei weitere AMAN Planungsverfahren betrachtet:

- Der NetAMAN ist eine universelle Anflugplanung, die auf den Konzepten des 4D-Planers beruht und einfach und schnell für neue Flughäfen konfiguriert werden kann. Die Planung ist vollständig dynamisch und es findet kein Einfrieren der Sequenz statt.
- Das COMPAS [5] System wurde in den 1990 Jahren beim DLR entwickelt und war das Vorgängersystem des 4D-Planers in Frankfurt. Im COMPAS System wurde die Sequenz kurz nach der Erstplanung eingefroren. Das heißt, dass ab diesem Zeitpunkt die Planung nicht mehr an das aktuelle Verkehrsgeschehen angepasst wird und es dadurch zu großen Unterschieden zwischen der aktuellen Verkehrssituation und der geplanten Sequenz kommen kann.

Eine aussagekräftige Größe für die Planungsqualität ist die Vorhersagegenauigkeit der Landezeit. Dazu bestimmt man die Differenz zwischen der Landing Time (LT) und der von der Anflugplanung berechneten Scheduled Time of Arrival (STA). Die Berechnung wird für verschiedene Zeiten (10, 20, 30 Minuten) vor der Landung durchgeführt.

$$DeltaPlan(10) = LT - STA(10)$$

$$DeltaPlan(20) = LT - STA(20)$$

$$DeltaPlan(30) = LT - STA(30)$$

Dabei ist STA(t) die Planzeit, die von der Anflugplanung t Minuten vor der Landung berechnet wurde. In allgemeiner Form lautet die Formel:

$$DeltaPlan(t) = LT - STA(t)$$

Dann kann der Erwartungswert für einen Tag definiert werden. Sei N die Anzahl an Landungen des Tages, ergibt sich die folgende Formel:

$$Erw(DeltaPlan(t)) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (LT_i - STA_i(t))$$

Die Standardabweichung ist dann:

$$SPlan(t) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (STA_i(t) - Erw(DeltaPlan(t)))^2}$$

Die Metriken wurden mit 8597 Flügen nach Düsseldorf über 30 Tage berechnet.

In Tabelle 7 werden der Erwartungswert und die Standardabweichung für die Differenz der Landezeit von der STA für 600, 1200 und 1800 Sekunden für die drei Planungsverfahren dargestellt, alle Angaben in der Tabelle sind in Sekunden:

Tabelle 7: Metriken für verschiedene AMAN Systeme.

	ML AMAN	NetAMAN	COMPAS
Erw(LT-STA,t=600s)	-6.33	-32.49	12.30
Erw(LT-STA,t=1200s)	-14.68	-1.21	20.69
Erw(LT-STA,t=1800s)	4.48	19.48	22.61
SD(LT-STA,t=600s)	74.64	102.72	168.02
SD(LT-STA,t=1200s)	143.55	145.45	171.84
SD(LT-STA,t=1800s)	165.81	181.43	200.75

Der ML-AMAN liefert 600 Sekunden vor der Landung das beste Ergebnis für die STA mit der geringsten Standardabweichung. Für 1200 und 1800 Sekunden sind ML-AMAN und NetAMAN fast identisch. Das heißt, dass im ACC (20 und 30 Minuten vor der Landung) beide Verfahren sehr gute Ergebnisse für die STA liefern. Auch das COMPAS Verfahren liefert im ACC ähnliche, wenn auch etwas schlechtere Ergebnisse. Nur bei APP ist die Standardabweichung bei COMPAS mehr als doppelt so groß wie beim ML-AMAN.

Eine weitere Größe für die Qualität der Planung, ist die korrekte Vorhersage der Position eines LFZ in der Sequenz. Dazu wird für jedes LFZ bestimmt, wie lange die von der Anflugplanung berechnete Sequenz, mit der tatsächlichen Position des LFZ in der Sequenz übereingestimmt hat.

Dazu wird von jedem LFZ die Landungsnummer LN(i) bestimmt. Dabei ist Pos(i, t) die Sequenznummer von LFZ i zum Zeitpunkt t. Addiert man zu der Sequenznummer die Zahl der aktuellen Landungen LZ(t), so erhält man die geschätzte Landungsnummer.

$$DeltaPos(i, t) = Pos(i, t) + LZ(t) - LN_i$$

Dann wird vom Zeitpunkt der Landung rückwärts der Wert für DeltaPos berechnet, bis er ungleich 0 ist. Es liegen insgesamt n Planungen vor und der erste Index bei dem DeltaPos(i, t) ungleich 0 ist, sei i1. Somit ist i1+1 die letzte korrekte Position. Der Zeitpunkt dieser Planung

sei T_s . Dann berechnet sich die Zeit, für die von der Planung die korrekte Position in der Sequenz vorhergesagt wurde, folgendermaßen:

$$KPos = LT - T_s$$

Auch hier kann der Erwartungswert für ein Tag berechnet werden. Mit N als Anzahl der Landungen des Tages.

$$Erw(Pos) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (LT_i - T_{s_i})$$

In Tabelle 8 werden der Erwartungswert und die Standardabweichung für die korrekte Sequenz dargestellt. Daneben wird der Erwartungswert für die Anzahl der Umplanungen und die dazugehörige Standardabweichung gezeigt. Außerdem wird die Anzahl der Flüge mit einer korrekten Sequenz von weniger als 600 Sekunden dargestellt.

Tabelle 8: Metriken für verschiedene AMAN Systeme.

	ML AMAN	NetAMAN	COMPAS
Erw korrekte Sequenz	1410.19s	1419.99s	1071.93s
SD korrekte Sequenz	724.44s	780.36s	1046.31s
Erw Anzahl Umplanungen	0.56	0.39	0.43
SD Anzahl Umplanungen	1.42	1.00	0.89
Anzahl korrekte Sequenz < 600s	1475	1959	4360

ML-AMAN und NetAMAN haben fast identische Werte für den Erwartungswert der korrekten Sequenz. Betrachtet man allerdings die Anzahl der korrekten Sequenzen unter 600 Sekunden, so ist der ML-AMAN deutlich besser als der NetAMAN. Außerdem fällt auf, dass beim COMPAS System dieser Wert fast dreimal größer ist als beim NetAMAN. An diesem Wert zeigt sich besonders die schlechte Qualität der APP Planung des COMPAS Systems. Die Anzahl der Umplanungen ist beim ML-AMAN am größten, allerdings ist die Standardabweichung mit 1.42 immer noch sehr klein. Wie nicht anders zu erwarten war, liefert hier das COMPAS System durch Einfrieren der Sequenz den besten Wert.

In den Diagrammen in Abbildung 4, Abbildung 5 und Abbildung 6 ist die Verteilung der Zeitdauer für die korrekte Sequenz in Histogrammen für die drei unterschiedlichen Planungsverfahren dargestellt.

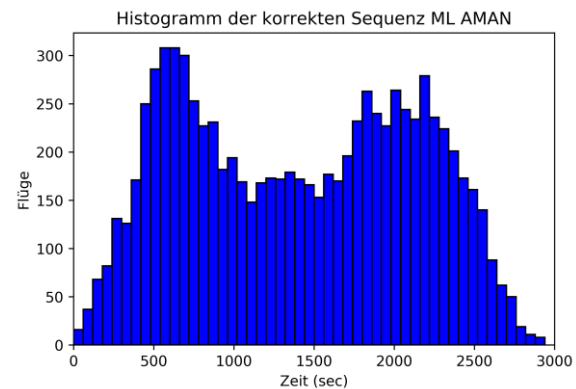


Abbildung 4: Histogramm der korrekten Sequenz ML AMAN.

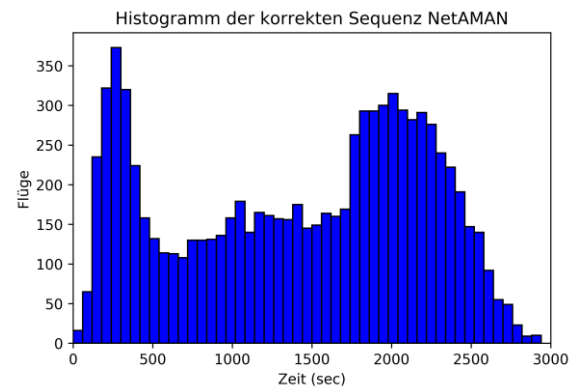


Abbildung 5: Histogramm der korrekten Sequenz NetAMAN.

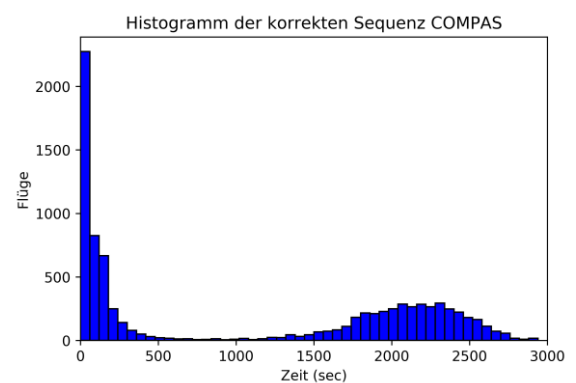


Abbildung 6: Histogramm der korrekten Sequenz COMPAS.

Eine weitere aussagekräftige Metrik ist die Trefferquote für die korrekte Landungsnummer in der Sequenz. Wie bereits beschrieben, hat ein LFZ die Landungsnummer $LN(i)$ und $Pos(i,t)$ ist die Sequenznummer zum Zeitpunkt t . Addiert man zu der Sequenznummer die Zahl der aktuellen Landungen $LZ(t)$, so erhält man die geschätzte Landungsnummer.

Für die Trefferfunktion T gilt dann:

$$T(Lfz_i, t) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } Pos(i, t) + LZ(t) = LN_i \\ 0 & \text{wenn } Pos(i, t) + LZ(t) \neq LN_i \end{cases}$$

Durch Summation von T über alle LFZ erhält man die Trefferquote.

$$TP(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T(Lfz_i, t)$$

Um die Trefferquote für APP zu bestimmen, werden nur LFZ betrachtet, die sich im APP Luftraum befinden.

Zur Berechnung der ACC Trefferquote wird für jede Anflugrichtung aus den ACC Sektoren eine auf das Metering-Fix bezogene Landungsnummer berechnet, in der nur LFZ über das jeweilige Metering-Fix enthalten sind. Für Düsseldorf sind das die Metering-Fixe DOMUX, XAMOD und BIKMU. Die Berechnung kann dann wie mit den oben beschriebenen Formeln unter Verwendung einer ACC Sequenz und einer ACC Landungsnummer durchgeführt werden.

In Tabelle 9 ist die Trefferquote für die korrekte Position in der Sequenz für unterschiedliche Sektoren dargestellt. Die folgenden Sektoren wurden betrachtet:

1. Gesamte Sequenz ALL
2. APP
3. XAMOD
4. DOMUX
5. BIKMU

Tabelle 9: Metriken für verschiedene Sektoren.

	ML AMAN	NetAMAN	COMPAS
ALL	0.76	0.74	0.53
APP	0.81	0.75	0.55
XAMOD	0.96	0.95	0.89
DOMUX	0.95	0.94	0.89
BIKMU	0.96	0.96	0.89

Auch hier zeigt sich eine nahezu identische Planungsqualität in den ACC Sektoren bei ML-AMAN und NetAMAN. Bei APP ist der ML-AMAN allerdings deutlich besser als der NetAMAN. Auch das COMPAS System liefert im ACC eine ausreichend gute Planungsqualität um die 0,9. Allerdings sind die Werte bei APP so schlecht, dass die Sequenz nur in ca. 50 % der Fälle korrekt ist.

Abschließend ist festzustellen, dass der ML-AMAN bei APP eine nochmals verbesserte Planungsqualität gegenüber dem NetAMAN liefert. Dies dürfte zu einer Erhöhung der Akzeptanz des AMAN besonders bei den APP Lotsen

führen, da mit einer korrekten Planung direkt das Vertrauen in den AMAN erhöht wird, wie sich bereits in der Vergangenheit gezeigt hat. Das COMPAS System hatte bei APP genau aus diesen Gründen Akzeptanzprobleme, die dann zur Entwicklung des 4D-Planers führten. Aufgrund der fehlerhaften Planung wurde das gesamte System von den APP Lotsen infrage gestellt. Sie argumentierten, dass aufgrund der falschen Reihenfolge bei APP das System nicht korrekt funktionieren kann und damit operationell nutzlos sei. Diese Argumentation ist unter Betrachtung einer reinen Mengensteuerung für APP allerdings nicht richtig. Wie man an den ACC Planungsergebnissen von COMPAS sieht, wird für die Metering-Fixe eine gute Planungsqualität erreicht. Das heißt, wenn im ACC mit diesen Planungen gearbeitet würde, wäre die Verkehrsmenge bei APP korrekt und dies, obwohl die APP Reihenfolge falsch ist.

Zusammenfassung

Wie man an den Metriken im vorherigen Kapitel sehen kann, werden durch das neue ML basierte Prädiktionsverfahren im ML AMAN Anflugsequenzen mit deutlich besserer Qualität als im NetAMAN berechnet. Diese höhere Güte der Planungen wird besonders bei APP deutlich. Damit ist zu erwarten, dass mit dem ML basierten Ansatz eine noch bessere Akzeptanz bei den APP Lotsen als mit dem 4D-Planer erreichen werden kann. Ein weiterer Vorteil ist, dass der ML AMAN nicht mehr durch Programmierung an einen neuen Standort angepasst werden muss. Dies geschieht ausschließlich durch die Trainingsdaten ohne weiteren Programmieraufwand. Die Implementierung für einen neuen Standort kann damit im Gegensatz zu heute, in nur wenigen Tagen durchgeführt werden. Wohingegen die Implementierung eines neuen Flughafens mit dem NetAMAN einige Wochen dauerte und mit dem 4D-Planer einige Monate.

Abkürzungsverzeichnis

ACC	Area Control Center
AMAN	Arrival Manager
APP	Approach
BR	Betriebsrichtung
COMPAS	Computer Oriented Metering Planning Advisory System
EETA	Earliest Estimated Time of Arrival
GB	Gradient Boosting
GS	Groundspeed
LFZ	Luftfahrzeug

LR	Logistische Regression
LT	Landing Time
MF	Metering Fix
MLP	Multi Layer Perceptron
ML	Machine Learning
STA	Scheduled Time of Arrival

Referenzen

- [1] Seidel, D. & Kaufhold, R. (2006). Kopplung von Arrival- und Departure-Manager im Rahmen des Projektes K-ATM. *TE im Fokus*, 2/2006, S. 10-17, Langen: DFS Deutsche Flugsicherung GmbH.
- [2] Gerling, W. & Seidel, D. (2002). Project 4D-Planner. *Scientific Seminar 2002 "The Challenges of Integration"*. Braunschweig, Germany: Institute of Flight Guidance, German Aerospace Center (DLR).
- [3] Géron, A. (2019). *Hands-on Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems* (2nd ed.). Boston, USA: O'Reilly.
- [4] Richter, S. (2019). *Statistisches und maschinelles Lernen. Gängige Verfahren im Überblick*. Berlin: Springer-Verlag.
- [5] Völckers, U. (1990). Arrival Planning and Sequencing with COMPAS-OP at the Frankfurt ATC-Center. *Proceedings of the 1990 American Control Conference*, San Diego, USA.

A novel approach to emulate and detect packet loss on surveillance radar channels

Roman Raekow (DFS), Prof. Dr. Michael Kuhn (Hochschule Darmstadt)
& Dr. Bernd-Ludwig Wenning (Cork Institute of Technology)

Einleitung

Verlässliche Kommunikation ist ein wichtiger Bestandteil der Flugsicherung. Mit einer steigenden Zahl an Applikationen und Teilnehmern auf den Radarkanälen ist auch die Wahrscheinlichkeit einer fehlerhaften Übertragung gestiegen. Für eine verlässliche Kommunikation auf diesen Kanälen ist es nötig, den Paketverlust auf diesen Kanälen zu überwachen. Bis heute gibt es aber kein System, dass die Gesamtheit aller Verluste auf diesen Kanälen beschreiben kann. Dieses Paper beschreibt einen neuen Ansatz, wie ein solches System aussehen könnte. Einige erste Messungen, die mit einem solchen System erstellt wurden, werden hier ebenfalls vorgestellt.

Introduction

Civil aviation has been experiencing a constantly growing number of flights in the already crowded airspace over the last decades. Maintaining and improving the surveillance of this airspace is one significant part of the efforts of Air Navigation Service Providers (ANSP) to keep up with this development. Precise and reliable surveillance allows dense manoeuvring and more planes in the same airspace by retaining safe and fluent traffic. This surveillance is carried out by different protocols all relying on two radio channels, 1090 MHz and 1030 MHz. However, there are several observations that these two radar channels are already very crowded and that the reliability suffers from the large number of participants, where each one of them creates a wide variety of messages [1]. The loss of data packets due to overlapping and interfering transmissions, as well as False Replies Unsynchronized with Interrogator Transmissions (FRUIT), have reached a high rate [2] and must be monitored to ensure that reliable and safe communication is still guaranteed on these channels for the ANSP applications. Civil aviation surveillance relies on cooperating targets that reply to interrogations from radar stations. Therefore, radar stations must comply to and support all worldwide standards to ensure data exchange between radar stations and aircraft. Hence, even legacy technologies must be maintained for decades in order to support all generations of avionic systems. Newer technologies can only run in parallel and must include mechanisms to fall back correctly to older

systems. It has therefore become important to monitor the load of these channels to get a deeper understanding of the types of disturbances, their frequency of occurrence, and their impact on ongoing transmissions in order to specify requirements for future systems used in air traffic control. As the availability of channel resources is safety critical, the European Union has agreed that as of January 1, 2020, all ANSPs have to monitor and log the radar frequencies. This paper proposes a concept that is able to fulfil these requirements in a cost-effective and scalable manner.

Background

The messages in civil aviation surveillance are carried on two radio frequency (RF) channels, namely 1030 MHz and 1090 MHz, which are used in frequency-division duplex mode, separating interrogator (radar station) and reply channel (aircraft). The messages are encoded in multiple telegram types that differ in modulation and timing [18].

Telegram types

All telegram types start with a pulse-pause-pattern that defines the type of the telegram, the protocol, and the transceiver type that shall reply to the interrogation. For the latest protocol Mode-S, a data block is added after the preamble.

- 1030 MHz: On the 1030 MHz channels, used for interrogations, two different modulation types are used: binary amplitude shift keying (2ASK) for the legacy Secondary Surveillance Radar (SSR) call and a mixture of 2ASK and differential phase shift keying (DPSK) for the more recent technology Mode-S. These two technologies are used by air traffic control (ATC) and the Airborne Alert and Collision Avoidance System (ACAS) to query transponders of nearby aircraft.
- 1090 MHz: The 1090 MHz channel is the reply channel on which the aircraft replies to the interrogations. The SSR reply (Mode A/C) consists of a set of pulses using 2ASK and a fixed spacing between the pulses whereas the Mode-S reply consists of a preamble and a data block with a pulse-position-modulation. The following data block has a length of either 56 Bit or 112 Bit.

Therefore, on both channels three different telegram types have to be differentiated, one SSR telegram type and two Mode-S telegrams (short or long payload).

Surveillance radar services

The four main applications in European civil aviation share these telegram structures but differ in the mode of operation and the payload contents that are carried.

- 1) SSR Intermode (Mode A/C) is the oldest version of secondary surveillance. It is only capable of querying the ID and the height of an aircraft but is still widely used and a lot of surveillance services is based on its replies.
- 2) Mode-S solves the aforementioned problem. The radar station can query single or groups of aircraft for a wide set of information, such as call-sign, rate of turn, aircraft sensor values and so forth. The data is transmitted with an identification of the following payload and can be interpreted by any listener on that channel.
- 3) Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (ADS-B) is also based on Mode-S replies to collect similar information as radar stations. In contrast to Mode-S radars the telegrams are sent periodically without interrogation by the aircraft and contain more information like the latitude and longitude of the aircraft. This system can be used by only listening to the 1090 MHz channel and requires only a single antenna.
- 4) TCAS is used by aircraft to avoid collisions with other planes. For this purpose, every plane tries to create its own surveillance of surrounding planes. It uses several mechanisms to reduce the Radio frequency (RF)-channel load, however it is a broadcast-based system that is used by every participant in the airspace.

Problem Statement

Although systems for monitoring the channel load are available, to the best of our knowledge there is no system nor a suggested approach available that is suitable to monitor the Probability of Detection (p_D) of the two surveillance radar channels fully and continuously. Current systems are either based on monitoring the channel in a waveform or pulse-oriented way, inspecting the performance of applications that rely on the channel, or they measure decodable telegrams

only. The first mentioned approach is suitable to detect all kind of disturbances and gives deep insights into the type and its impact on the data and decoding probability. The downside of this approach is that it is very data prone and hardly considers that some disturbances can be recovered by the receivers.

The second approach provides good insights into losses due to disturbances and shows the effects on the downstream system very clearly. However, it does not inspect the entire communication on those channels, but only one part of it, nor can it quantify the interference caused by other participants on these channels.

Our goal is to continuously estimate p_D for the whole communication on these channels, which requires awareness of the applications that are used on the specific channel. As of now, it is not possible to predict which telegrams should be there if the type and pattern of the communication are unknown. ADS-B is a good application to estimate p_D on the 1090 MHz channel as it follows a standardised pattern and can be monitored passively. Several publications have shown that the ADS-B updates suffer from dropouts (e.g. [1]). However, as described in the previous section, since ADS-B is only one application that relies on that channel, it does not show the whole picture for all losses. Other modes also use the same telegram structure and protocols and can also cause interference that results in packet losses. Especially the TCAS system as required in [3] has added a reasonable amount of traffic carried over these channels as each aircraft interrogates surrounding planes for their position and certain movement parameters. TCAS has led to an environment where the communication on the channels is beyond the control of ANSPs, as each aircraft is carrying out its interrogation independently causing replies from all surrounding aircraft.

To gain a deeper insight into all losses and to estimate p_D it is necessary to consider at all applications using these RF channels.

State of the Art

Over the last decades several research works have been published that describe the problem of telegram loss on the surveillance radar channels in different ways. Some research has been carried out to inspect the channel on a pulse-oriented view. The approach to measure interference on the two channels is to inspect the waveform and find disrupted pulses and telegrams. The authors of [4] describe a long-term waveform recorder used to inspect the environment for a larger period. However, the recorded time is less than a minute and

does not provide the possibility to monitor the environment continuously.

In [5] an approach to view and measure on a pulse-oriented base is shown. The idea is to count interfered telegrams in order to create a model of the communication which should allow for better simulations. This allows a deep insight into the channels but not a large-scale monitoring with a broader view on the channels.

The authors of [6] have focused on increasing the reception capabilities of ADS-B receivers. They describe the impact on single bit misshaping caused by overlaid telegrams. While the paper clearly states the character of the possible interference, it focuses more on an improved reception which is more relevant for receiver design. However, the ANSPs are required to use certified receivers that cannot be changed easily.

The channel occupancy rate has been put into place as a quality indicator by [7] and [8]. The authors inspect the number of pulses and telegrams on the SSR channels. This is very close to the approach described in this paper as it inspects the channel as a whole. The recording system was carried on a plane and allowed an offline analysis of the data. It aims at estimating the probability of interference; however, it does not take into account how many disrupted telegrams could be recovered by a standard receiver.

Another approach to measure the p_D that is commonly used is using the required update-rates for ADS-B squitter that are defined in the ICAO standards. A set of research works has been carried out to characterize and qualify different problems with ADS-B performances and its path propagation.

The authors of [9] and [10] show a large-scale approach for monitoring the 1090 MHz/ADS-B performance by using multiple receivers and a longer monitoring period. They focus on a path-based evaluation of losses by observing aircraft during flight and monitor the p_D on their path through an airspace.

The squitter update reliability is estimated by their system and takes into account certain SSR FRUIT. The described system focuses on path loss problems for the transmission instead of interfered telegrams.

Very promising results are described in [11]. The authors do almost follow the same approach as it will be described here. They investigate on the entire communication on the channels with a distributed measurement setup and inject test-telegrams into the communication. However, they are not able to recreate

the losses out of the test-telegrams as they use only a static generator that emits the telegrams constantly with a fixed level and rate.

The increasing channel occupancy has led to a requirement by the European Union to monitor the two radar frequencies with all their ongoing traffic as of January 2020 [12], [13]. It is expected to have a minimal "logging" system running from early 2020 but as of now no system that is capable to "measure" the entire telegram load has been put into place.

Proposed Concept

In order to overcome the problems of the approaches discussed before and get an estimate of p_D , a new approach is necessary to gain insights into the entire communication on the surveillance radar channels.

As discussed before, neither the pulse shape-based approach nor the telegram based approach can meet the expectations for a monitoring system that is able to monitor the channel entirely and continuously and to reliably estimate p_D . Therefore, our proposed concept is a combination of both approaches. It does not rely on the composition of application traffic, its built-in logic and the error compensation of downstream systems but does still create only an amount of data that can be handled with reasonable effort. For our problem it is neither necessary to recover any data from lost telegrams nor is it required to identify single telegrams as interfered. Our concept, however, is to statistically define and estimate the probability that a telegram is lost in a certain environment and finally estimate p_D for all telegrams on that channel. The challenge in this case is that it is very hard to tell how many telegrams were not receivable if one does neither care about the application's structure (e.g. update-rates, radar-interrogations) nor the pulse-shapes. Fortunately, the conditions under which a telegram is considered to be "decodable" is very accurately defined for avionics and ATC equipment, whereby all participants of the communication react in a common way to the same type of disturbances. The approach shown in this paper exploits this fact and describes a way to estimate the rate of lost telegrams using two major components:

- A telegram generator that can create all types of telegrams used on the two radar-channels described in [14]. For this a software-defined radio (SDR) could be used.
- A Machine learning (ML) based software that can predict/estimate the losses for all types of telegrams under known conditions and potentially extrapolate to unknown states as well.

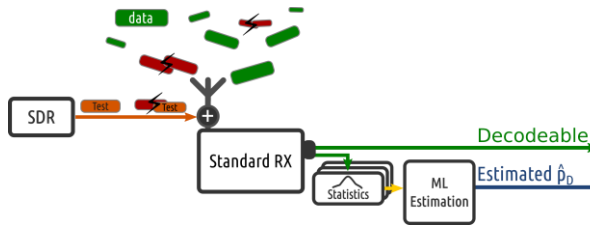


Figure 1: System principle: Injecting well-known telegrams into an unknown environment allowing to estimate its characteristics.

Figure 1 shows the principal approach: Some of the green data packets interfere with others and are not decodable anymore (red packets). They are lost for the reception process in the Standard Receiver. Artificially generated telegrams (orange) generated by the SDR are added to the received signal and will suffer from the same interference. But as the amount and timing of these telegrams are well-known, it is possible to quantify the probability of detecting the test telegrams. This probability is denoted as $\hat{p}_{Di}(L)$, where i represents the type of telegram and L its power level. Obviously, this is limited to tell the probability of detection for this specific type of telegram in this single environment. It is therefore necessary to learn and store the inspected behaviour for all types and modes of telegrams. This will allow for an estimation of all losses for all telegrams in changing RF-channel situations, if the machine has been trained for this before. Hence, the estimated probability of detection for a telegram of type i , denoted as $\hat{p}_{Di}$, is a function of the probability density functions (PDF) of the levels of telegram type i (denoted as $f_{L,i}(L)$) as well as the PDF of the levels of all other types of telegrams. Additionally, it depends on the probability of occurrence of this specific type of telegram, $p_i(i)$. Assuming N different types of telegrams, the estimated probability of detection of telegram type i can be written as

$$\hat{p}_{Di} = f(\hat{p}_{Di}(L), f_{L,j}(L), p_j(j)) \quad \forall j \in 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

Since our setup needs to be capable of estimating the “total p_D ” considering all types of telegrams in changing environments based on the individual $\hat{p}_{Di}$ the following function applies.

$$\hat{p}_D = \sum_{i=1}^N \hat{p}_{Di} \cdot p_i(i) \quad (2)$$

As there is a strong interdependence between the individual $\hat{p}_{Di}$ that is supposed to be non-linear and variant in multiple aspects it seems to be impossible to solve (1) in a closed way like an *inverse characteristic curve* but to use ML to apply different corrections for different situations. The main objective is to investigate

whether the loss of a standard receiver can be estimated and thereby a ML based model can be created that allows recovering the lost information as far as this is useful to estimate the channel load. As there is currently no method established to describe the character of the communication on these channels in a whole, this approach will also define new parameters that are suitable to characterise the state of the channels and allow an assessment of their communication capability at certain states. This presumes a detailed knowledge of the state of the channel and all relevant parameters that help to understand its states.

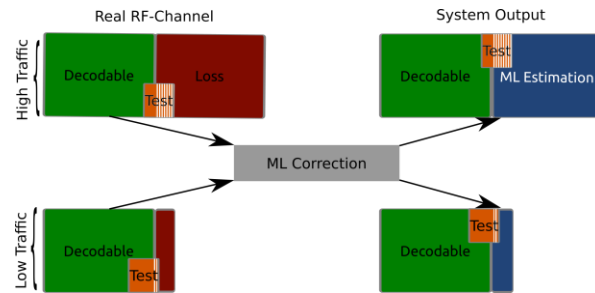


Figure 2: ML distinguishes between equal looking RF-channel loads.

A crucial part of this approach is that the number of decodable telegrams may be the same for completely different scenarios as depicted in Figure 2. The number of decodable packets (green) are the same for both, the low traffic and the high traffic scenario. However, in the high traffic scenario a lot of packets are lost (red) whereas in the low traffic scenario the number of received telegrams almost equals the amount of transmitted telegrams. The amount of lost data could be estimated by test telegrams (orange), artificially inserted at the receiver. As test data will be interfered in the same way as all telegrams, the ML algorithm should thus be able to properly estimate the correct loss for both scenarios. It is therefore very important to investigate the relevant parameters that are necessary to describe a RF situation as exactly as possible with the reduced set of information that can be retrieved from a standard ATC receiver.

This will enable the ML to distinguish between multiple similar looking scenarios and provide good estimates of the real situation. To define the loss for a certain type and mode of a telegram, the test-telegrams will be used. Following this approach, we will be able to estimate the total probability of detection of all telegrams on the two surveillance radar channels simply by monitoring the decodable subset from standard receivers. In consequence, this approach will pave the way for a cost-effective and large-scale measurement network since

these receivers can be purchased at reasonable prices and easily be integrated into an existing IT-infrastructure.

System Components and Setup

If one is interested in the traffic on the channel that can be decoded by a standard receiver like the ones used by the participants of the communication, it seems appropriate to use one of these. Unfortunately, these receivers lack any information on packets that can't be decoded. They simply discard all disturbed packets without any evidence on the receiver's output. One needs to create a method to estimate any standard receiver's behaviour in a way that it can be used as "measurement device" [14], [14]. This is done by "learning" the behaviour of the receiver without the need for knowing its implementation and error behaviour.

Equipment used in the measurement setup:

- SPB3: ADS-B/Multilateration (MLAT) Receiver from THALES that complies to aeronautical receiver standards RTCA: DO260B [19] and EUROCAE: ED102A [20].
- PC: Standard Laptop triggering the software defined radio (SDR) and receiving data from the receiver.
- SDR: An Ettus B210 SDR used to generate the RF-signals that are composed by the PC [16].
- RF-Splitter: Feeds the generated signal back into the SDR [17].

The telegrams on the channels will be created by a SDR that is connected to a PC. The generated RF-signal is then fed to the ATC receiver. The PC will then receive the decoded telegrams via Ethernet and store them in a database. All decoded data and metadata are available for later analysis. By knowing the number and payload of the sent telegrams and counting the decodable ones, $\tilde{p}_{Di}$ can be calculated.

Measurements and Results

Measurements are carried out to "learn" the behaviour of an ATC surveillance receiver concerning different types of interference. The goal is to estimate the real amount of telegrams out of the subset that were decodable using machine learning-based software which is able to extrapolate the number and losses of telegrams on the considered channels by only knowing the ones that were decodable. Measurements will therefore be conducted to generate large datasets that will be used for the training of the ML. Software that runs on the PC is not only able to create the exact telegram format but to set up a freely shaped vector. It is therefore possible to create automated test series with vectors that have the shape of e.g. overlapped telegrams, phase- or frequency offsets, fading, and other interference. This allows to identify the behaviour of the receiver regarding different types of disturbances.

The first measurements should be considered as a proof of concept. Telegrams generated by the PC are transmitted using the SDR. The RF-signal is then fed into

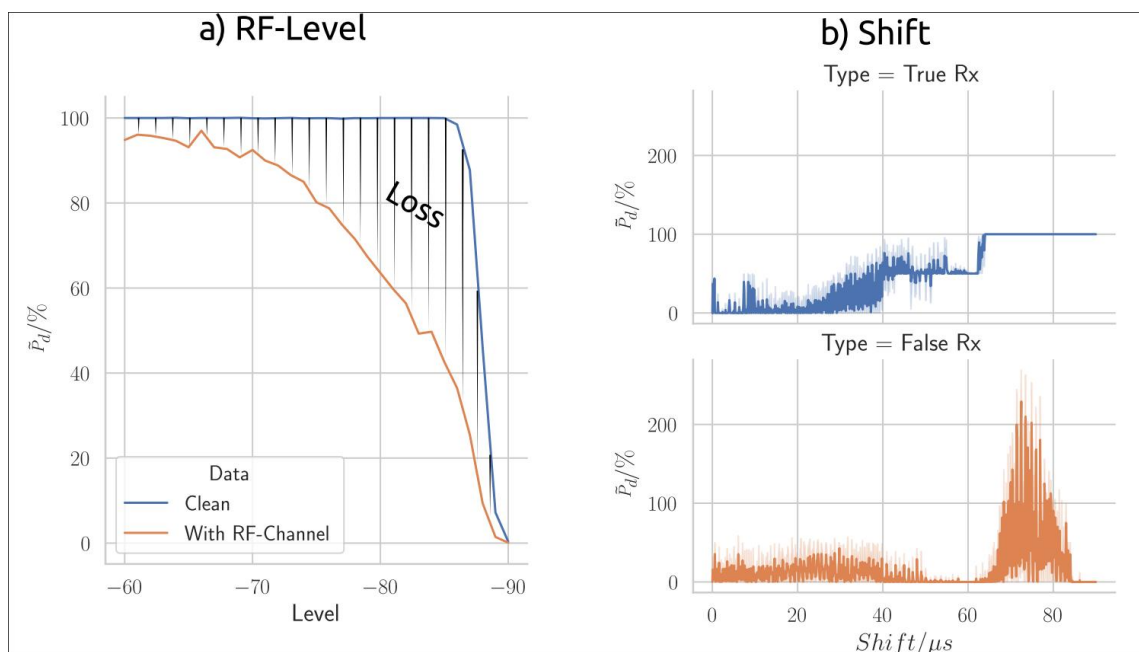


Figure 3: Examples of measurements: a) Mode S long reply (1090 MHz) w/o the loss through randomly interfering telegrams; b) Decoding probability for two intersected Mode-S replies.

the receiver where decoding - if possible - is applied. The decoded telegrams are forwarded to the PC where $\tilde{p}_D$ is calculated.

Level measurement

Firstly, a simple measurement is performed where a fixed number of telegrams is transmitted using different RF levels. Figure 3-a shows the results of the measurement over the RF level. It can be seen that telegrams with power levels between -60dBm to -84dBm can be detected with high reliability when there is no interference (blue line). This result was expected since these signals are generated outside the observation area and signals with levels below -85 dBm are typically not relevant. The red line shows $\tilde{p}_D$ for the same pattern but with a received RF-signal added to the SDR-generated signal (see Figure 1) before decoding. The red line $\tilde{p}_D$ drops for all levels and the difference increases for lower levels. The telegrams have a significantly lower $\tilde{p}_D$, if joined with a randomly picked RF-channel situation. This supports the presumption that the probability of detection of the test telegrams depends on the RF situation under which they are transmitted.

Shift measurement

For the next measurement a disturbed signal is applied to the receiver. The interference is created by combining two telegram vectors, both generated by the PC. The time shift and the relative level between the two telegrams can be freely varied. The shifts are applied from "simultaneous", i.e. $\Delta T = 0\mu s$ to "without interference", i.e. $\Delta T = 100\mu s$. By this, a wide range of collisions can be emulated and training data for the ML can be generated. Figure 3-b shows the measurement result over the delay of the second telegram. The upper (blue) plot shows the rate of correctly decoded telegrams. As soon as the two telegrams, each of length $\Delta T = 64\mu s$, start to interfere ($\Delta T = 64\mu s$), the receiver is not able to decode all telegrams anymore. $\tilde{p}_D$ highly depends on the timing between the telegrams and is very volatile. Surprisingly, the receiver outputs applied telegrams in addition to a certain amount of false telegrams. The lower graph shows the amount of telegrams that were decoded by the receiver but were not applied to its input. This means that for certain delays the receiver performs false decoding, i.e. emitting telegrams that have not been applied to the input. The telegrams do not only contain wrong payloads but are also treated as a different mode (i.e. Mode A/C telegrams are output from interfered Mode-S telegrams). It seems like the A/C and Mode-S decoding

are running in parallel both trying to decode the received RF-channel data.

Conclusion and Outlook

In this paper, we proposed a concept for a novel approach to monitor the civil aviation surveillance radar channels entirely and continuously and to estimate the probability of detection for all types of telegrams on that channels. Initial measurements were performed to investigate the impact of interfered and collided telegrams that are applied to the receiver input and have shown strong evidence that the concept is promising as all results are well reproducible and the receiver shows a stable behaviour, if a certain disruption is applied to a telegram. It has been shown that the receiver can be characterized by injecting artificially generated packets and observing the decoded output of the receiver. These results can be used to compare $\tilde{p}_D$ of every single telegram type under different conditions and thereby create a model of this receiver that can later be used to estimate the real amount of telegrams. The setup will be sufficient to create a large set of data that will be needed for ML in a second step. Furthermore, our setup can inject training telegrams into "real-world" radio fields which allows to characterise RF-situations concerning the probability of detection for all types of communication telegrams. This will enable a channel estimation for the entire surveillance radar channels regardless of aircraft, radar-station, or any other constellations. Our next steps will be to perform large scale measurements and set up a large database that will be used for the training and optimisation of machine learning algorithms.

Copyright notice: This is an updated reprint of the IEEE Publication in the Proceedings of the 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC 2020-String, Antwerp, Belgium)

Abbreviations

2ASK	Binary Amplitude Shift Keying
ADS-B	Automatic dependent surveillance – broadcast
ANSP	Air Navigation Service Provider
ATC	Air Traffic Control
DPSK	Differential Phase Shift Keying
FRUIT	False Replies Unsynchronized with Interrogator Transmissions
ICAO	International Civil Aviation Organization

IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
ML	Machine Learning
MLAT	Multilateration
Mode A/C	Legacy SSR Technology
Mode-S	Advanced SSR Technology
PDF	Probability Density Function
RF	Radio Frequency
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics
SBP3	Thales Receiver
SDR	Software Defined Radio
SSR	Secondary Surveillance Radar
ACAS	Airborne Collision Avoidance System
VTC	Vehicular Technology Conference

References

- [1] N. Allen, A. Tabassum, and W. Semke, "Data abnormalities and drop outs in North Dakota air traffic control radar," AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference - Proceedings, vol. 2017-Septe, 2017.
- [2] A. Tabassum, N. Allen, and W. Semke, "ADS-B Message Contents Evaluation and Breakdown of Anomalies," 2017 IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2017.
- [3] The European Commission, "Commission regulation laying down common airspace usage requirements and operating procedures for airborne collision avoidance," no. 1332, pp. 2008–2010, 2011.
- [4] S. Ozeki and T. Otsuyama, "Signal Environment Measurement with Long Time Waveform Recorder," Tech. Rep., 2006.
- [5] E. M. Valovage, "A method to measure the 1090 MHz interference environment," Proceedings of the 2009 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference, ICNS 2009, pp. 1–8, 2009.
- [6] M. Sopata and P. Kejik, "Enhanced techniques for improved ADS-B messages reception," AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference - Proceedings, pp. 2E11–2E18, 2015.
- [7] T. Otsuyama, J. Naganawa, J. Honda, and H. Miyazaki, "An Analysis of Signal Environment on 1030 / 1090MHz Aeronautical L-band Systems," 2017 International Symposium on Antennas and Propagation, ISAP 2017(2017) 2017-January 1-2, pp. 1–2, 2017.
- [8] T. Otsuyama, J. Honda, J. Naganawa, and H. Miyazaki, "Analysis of signal environment on 1030/1090MHz aeronautical surveillance systems," 2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC/APEMC 2018, p. 71, 2018.
- [9] J. Naganawa, J. Honda, T. Otsuyama, H. Tajima, and H. Miyazaki, "Evaluating Path Loss by Extended Squitter Signals for Aeronautical Surveillance," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 16, pp. 1353–1356, 2017.
- [10] J. Naganawa, H. Miyazaki, and H. Tajima, "Measurement-Based Evaluation on Detection Probability of Extended Squitter for Air-To-Ground Surveillance," IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017.
- [11] D.-I. J. Bredemeyer, Erik J. Wischmann, and J. Gottstein, "MOSTDONT - Final Report - Release 1.2," European Aviation Safety Agency (EASA), Tech. Rep., 2010.
- [12] T. European Commission, "Laying down requirements for the performance and the interoperability of surveillance for the single European sky," Official Journal of the European Union, no. 1207, pp. 35–52, 2011.
- [13] T. European Union, "L 59 2017/386," p. 2017/386, 2017.
- [14] R. Raekow and H. Fischer, "Funkfeldanalyse basierend auf AMOR-Netzwerkkomponenten", TE im Fokus (German), 01, 2011.
- [15] H. Fischer and S. Marquard, "Aktuelle Entwicklungen bei der Messung der Funkfeldbelastung – vom RFM zum RTRFM", Innovation im Fokus (German), 01, 2018.
- [16] Ettus B210 Manual https://files.ettus.com/manual/page_usrp_b200.html, Visited 20.05.2020.
- [17] Mini Circuits Directional Coupler ZNDC-20-2G-S+ <https://www.minicircuits.com/pdfs/ZNDC-20-2G.pdf>, Visited 30.05.2020.
- [18] ICAO, ANNEX 10 Volume IV, 2014 vol. 4.
- [19] RTCA, DO-260B, Minimum Operational Performance Standards for 1090 MHz Extended

Squitter Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B) and Traffic Information Services – Broadcast (TIS-B), 2017.

- [20] EUROCAE, ED-102A - MOPS for 1090 MHz Extended Squitter Automatic Dependant Surveillance – Broadcast (ADS-B) and Traffic Information Services – Broadcast (TIS-B) with Corrigendum 1, 2012.

Einfluss von Temperatur und Wind auf die Steigrate von Verkehrsflugzeugen

Christoph Schmand & Marvin Baudis

Einleitung

Diese Veröffentlichung beschreibt die Ergebnisse einer Datenanalyse mit dem Zweck den Einfluss der Umgebungstemperatur, der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit auf die Steigrate (engl.: rate of climb (ROC)) eines Verkehrsflugzeuges zu bestimmen und wenn möglich mit Hilfe von Regressionsverfahren untersuchen zu können. Untersucht wurden dabei Daten von Verkehrsflugzeugen der Wirbelschleppenkategorien Medium und Heavy [10]. Diese Datenanalyse unterstützt eine Studie zum maschinellen Lernen, die einen möglichen Anwendungsfall bei der Flugbahnvorhersage in der Flugsicherung beschreibt. In der Studie wurde ein neuronales Netz (hier: Deep-Feedforward-Netzwerk) verwendet, um Flughöhen für einen Zeitraum von bis zu 6 Minuten vorherzusagen [3].

Eine Möglichkeit, flugzeugbezogene meteorologische Informationen zu bekommen, ergibt sich aus den abgeleiteten Beobachtungen eines Sekundärradars, das für die Luftverkehrskontrolle verwendet wird. Diese Daten werden als Mode-S EHS (Enhanced Surveillance) bezeichnet, weil es den selektiven Abfragemodus des erweiterten Primärradars verwendet [1], [2]. Die Daten selbst werden durch das OpenSky Network [8] zur Verfügung gestellt und über die Mode-S Adresse um den Flugzeugtyp aus Flugplandaten erweitert. Das OpenSky Network ist ein gemeinnütziger Verein mit Sitz in der Schweiz. Ziel ist es, die Sicherheit, Zuverlässigkeit und Effizienz der Luftraumnutzung zu verbessern, indem der Öffentlichkeit ein offener Zugang zu Flugsicherungsdaten ermöglicht wird. Alle gesammelten Rohdaten werden in einer großen Datenbank archiviert. Die Datenbank wird hauptsächlich von Forschern aus verschiedenen Bereichen verwendet, um Technologien und Prozesse der Flugsicherung zu analysieren und zu verbessern [8].

Mode-S Sekundärradaranlagen fragen im Mittel alle 4,8 Sekunden selektiv die Flugzeuge in ihrer Reichweite eines nach dem anderen ab. Diese Nachrichten werden als Broadcast Dependent Surveillance bezeichnet. Die Binary Data Selector (BDS)-Pflichtregister, die diese Parameter für Mode-S enthalten, sind BDS 4.0, BDS 5.0 und BDS 6.0.

Tabelle 1: Downlink Aircraft Parameter (DAP) [5].

BDS Register	DAP set
BDS 4.0	Selected Altitude
BDS 5.0	Roll Angle Track Angle Rate True Track Angle True Airspeed Ground Speed
BDS 6.0	Magnetic Heading Angle Indicated Airspeed (IAS)/Mach No. Inertial Vertical Rate Barometric Altitude Rate

Der Transponder antwortet mit dem Senden der oben genannten Parameter über eine Funkverbindung an den Boden. Diese Parameter werden von der Internationalen Zivilluftfahrt-Organisation ICAO festgelegt [5]. Innerhalb des in Europa ausgewiesenen Mode-S EHS-Luftraums (z.B. Frankreich, Großbritannien und Deutschland), müssen Flugzeuge diese Informationen bei der Abfrage durch ein Mode-S EHS ATC-Radar aussenden [1], [2].

Bevor im Folgenden die Ergebnisse der Analyse beschrieben werden, erfolgt ein kurzer Exkurs zum Thema Data Mining, da die zugehörigen Methoden nicht als bekannt vorausgesetzt werden können. Hauptsächlich wurden für die Datenanalyse die Methoden Prognose und Abhängigkeitsanalyse angewendet.

Data Mining, was ist das?

„Data Mining ist die systematische Anwendung computergestützter Methoden, um in vorhandenen Datenbeständen Muster, Trends oder Zusammenhänge zu finden. Zur Wissensentdeckung eingesetzte Algorithmen basieren unter anderem auf statistischen Methoden.“ [6].

Bei der rechnergestützten Analyse von Datenbeständen werden Erkenntnisse aus den Bereichen der Informatik, Mathematik und Statistik genutzt. Auf der einen Seite werden unter anderem Verfahren der künstlichen Intelligenz eingesetzt, um große Datenbestände hinsichtlich neuer Querverbindungen, Trends oder Muster zu untersuchen. Auf der anderen Seite wird Data Mining aber auch verwendet, um zu bestimmen mit welchen Daten eine Künstliche Intelligenz (KI) trainiert

werden soll. Oft wird der Begriff Data Mining als Synonym zu „Knowledge Discovery in Databases“ (KDD) verwendet, obwohl es sich im eigentlichen Sinn nur um einen Teilbereich der KDD handelt. Im wissenschaftlichen Kontext wird ein Unterschied gemacht zwischen Knowledge Discovery in Databases und Data Mining. Danach ist KDD der allgemeinere, umfassendere Terminus und Data Mining nur ein Teil von KDD. In der Forschung wird KDD als gesamter Prozess der Wissensentdeckung bezeichnet. Data Mining ist in diesem Verständnis nur ein bestimmter Teil von KDD - nämlich das eigentliche Analyseverfahren, das konkret zur Entdeckung der Zusammenhänge führt [6].

Methoden des Data Minings

Die Aufgaben des Data Minings lassen sich in folgende Methoden aufteilen:

- Klassifikation
- Segmentierung
- Prognose
- Abhängigkeitsanalyse
- Abweichungsanalyse

Mit Hilfe der Klassifizierung werden Objekte einzelnen Klassen zugeordnet. Durch die Segmentierung werden gemeinsame Merkmale von Objekten identifiziert und dazugehörigen Gruppen zugeordnet. Alle Objekte einer Gruppe sollen dadurch möglichst homogen sein. Als Prognose bezeichnet man die Vorhersage von bisher unbekannten Merkmalen auf Basis von anderen Merkmalen oder zuvor gewonnener Erkenntnisse. Meistens wird eine Regressionsanalyse bei Prognosen und Vorhersagen eingesetzt. Sie beruht auf den Konzepten der Varianz und Kovarianz. Dabei wird zwischen linearer und logistischer Regression unterschieden. Das Ziel der Abhängigkeitsanalyse ist die Entdeckung von signifikanten Abhängigkeiten unter den Attributen eines Objektes. Dabei unterscheidet man bei der Abhängigkeitsanalyse, ob die Zieldaten und die Richtung der Kausalitätsbeziehung unter den Attributen bekannt sind oder nicht.

Im Rahmen der Abweichungsanalyse schließlich werden die Objekte ermittelt und analysiert, die für bestimmte Merkmalswerte von einer Norm oder einem erwarteten Wert abweichen. Das Ziel besteht darin, diese Abweichungen zu analysieren und zu interpretieren. Dadurch lassen sich die Ursachen für die Abweichungen finden [6].

Big Data und Data Mining

Die Begriffe Big Data und Data Mining werden oft im ähnlichen Kontext genutzt. Data Mining kommt zwar häufig bei großen Datenmengen zum Einsatz, ist aber nicht auf Big Data beschränkt. Big Data befasst sich mit besonders großen Datenmengen, die sich mit den herkömmlichen Methoden und Tools nicht effizient und in vertretbarem zeitlichem Rahmen verarbeiten lassen. Dagegen beschreibt Data Mining den eigentlichen Vorgang der Analyse von Daten in Bezug auf relevante Zusammenhänge und Erkenntnisse. Es kann auch bei einer kleineren Datenbasis zur Anwendung kommen. Während Big Data große Datenmengen liefert und die geeignete technische Plattform für eine effiziente Verarbeitung zur Verfügung stellt, kümmert sich das Data Mining um den eigentlichen Vorgang der Gewinnung von Erkenntnissen aus den vorliegenden Daten.

Zusammengefasst kann man sagen, dass Big Data und Data Mining Trendwörter sind, die auf bewährte Methoden in Kombination mit umfangreichen und teils unstrukturierten Daten setzen. Aufgrund der immer günstiger werdenden Hardware und damit steigende Hauptspeicherkapazitäten hebt die In-Memory-Technologie die Performance auf ein neues Level. Data Mining verwendet hierfür Algorithmen aus der Statistik und Verfahren der künstlichen Intelligenz, was durch die günstige Hardware ermöglicht wird. Durch die Kombination mit dem enormen Fortschritt im Bereich der Big-Data-Technologien wird die Nutzung von umfangreichen strukturierten und unstrukturierten Datenmengen von Data Mining und Big Data immer bessere Ergebnisse mit höherer Relevanz liefern [6].

Im konkreten Fall der hier beschriebenen Datenanalyse wird Data Mining genutzt, um zunächst die meteorologischen Einflussfaktoren Temperatur Windrichtung und Windgeschwindigkeit auf die Steigrate eines Verkehrsflugzeuges zu betrachten. Nach der Identifizierung der Einflussfaktoren werden diese im Weiteren einzeln betrachtet, damit die Höhe des Einflusses bestimmt werden kann und Abweichungen analysiert werden können.

Analyse des Temperatureinflusses auf die „Rate of Climb“

In diesem Teil des Artikels wird die These der Temperaturabhängigkeit der Rate of Climb (ROC) näher betrachtet. Die durch das Luftfahrzeug gemessenen Temperaturen werden nicht durch die Radaranlagen der DFS GmbH ausgewertet und auch nur durch einen geringen Anteil der Luftfahrzeuge übertragen, deshalb

wird im ersten Ansatz versucht die Umgebungstemperatur aus der übertragenen Mach-Zahl zu bestimmen. Im Allgemeinen ist die Temperatur wichtig, da bei niedrigen Temperaturen die Luftdichte höher ist als bei hohen Temperaturen. Luft mit hoher Dichte ist deutlich tragfähiger, was eine erhöhte Rate of Climb zur Folge hat. Mit den Methoden des Data Minings wird untersucht, ob dies anhand der Radardaten ersichtlich wird. Die in Tabelle 2 aufgeführten Beispieltage wurden so ausgewählt, dass die Bodentemperaturen am Frankfurter Flughafen einen möglichst hohen Unterschied im Sommer und Winter aufweisen.

Tabelle 2: Tagestemperaturen am Flughafen Frankfurt passend zu vorhandenen Daten als Download bei Wetterkontor [7].

Tagestemperatur in [°C] Flughafen Frankfurt			
Datum	Min.	Max.	Mittel
04.02.2019	-4,5	5,6	0,4
05.02.2019	-2,4	4,6	1,6
06.02.2019	-4,1	6,6	-0,1
07.02.2019	-2,3	4,1	1
08.02.2019	2,9	9	6,3
09.02.2019	5,5	10,1	7,8
11.02.2019	0,9	7,6	5,1
18.06.2019	17,1	30,9	23,8
19.06.2019	16,5	32,6	25,1
20.06.2019	15,4	26,6	20,6
21.06.2019	14,8	25,6	20
22.06.2019	15,1	28,4	20,3
23.06.2019	16,6	29,5	23,5
24.06.2019	18,5	31,8	25,6
25.06.2019	19,8	35,2	27,3

In einem ersten Schritt sollte die unbekannte Umgebungstemperatur anhand der Mach-Zahl ermittelt werden, um im Anschluss den angenommenen Zusammenhang zwischen Temperatur und Steigrate untersuchen zu können. Mit einem alternativen Ansatz wurden Temperaturänderungen über die Höhe ermittelt, um dort signifikante Änderungsbereiche der Steigrate zu identifizieren. In einem dritten Ansatz wurden Tage anhand von Wetterdaten erst in warme und kalte Tage kategorisiert, damit ein einfacher Vergleich der durchschnittlichen Steigrate je nach Tageskategorie durchgeführt werden konnte.

Die Ergebnisse aus der Untersuchung der drei unterschiedlichen Ansätze sollen im Folgenden anhand der Auswertung von abfliegenden Luftfahrzeugen aus Frankfurt beschrieben werden. Als beispielhafte Flugzeugmuster, die miteinander verglichen wurden, dienen A318, A319, A320, A321, A340, B737 und

B747. Diese Flugzeugmuster sind die gängigsten und wurden ausgewählt, damit eine hohe Datenmenge für die Untersuchung zur Verfügung steht.

Bestimmung der Umgebungstemperatur aus der Mach-Zahl

Ist die Mach-Zahl aus den Downlink Parametern des jeweiligen Luftfahrzeuges bekannt, lässt sich theoretisch aus dieser die Umgebungstemperatur bei bekannter Fluggeschwindigkeit bestimmen, siehe (1).

$$T = TAS / (Ma^2 * \kappa * R) \quad (1)$$

$$\text{mit } \kappa = 1.402 \text{ und } R = 287.058 \text{ J/(kg * K)}$$

Mit Hilfe der barometrischen Höhenformel lassen sich Luftdruck (2) und -dichte (3) zum Vergleich mit der Normatmosphäre bestimmen, um eine Aussage über die Validität der errechneten Werte machen zu können.

$$p = p_0 * e^{-\frac{g}{R*T}*h} \quad (2)$$

$$\rho = \rho_0 * e^{-\frac{g}{R*T}*h} \quad (3)$$

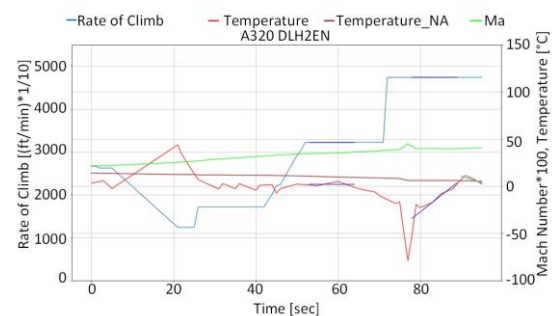


Abbildung 1: Berechnete Temperatur bis 5000ft.

Als ein Beispiel zur Visualisierung der berechneten meteorologischen Größen für alle untersuchten Tage dient ein am 04.02.2019 von Frankfurt abfliegender Airbus A320 der Lufthansa mit dem Rufzeichen DLH2EN. Abbildung zeigt, dass der Fehler bei der Bestimmung der Temperatur aus der Mach-Zahl bei $\pm 25^\circ\text{C}$ liegt. Die dunkelrote Linie zeigt die Temperatur mit Hilfe der Normatmosphäre bestimmt. Als Vergleich wurde in Rot die Temperatur aus der Mach-Zahl abgeleitet. Die grüne Kurve zeigt dabei den Verlauf der Mach-Zahl über der Zeit in Sekunden seit der ersten empfangen Transpondernachricht.

Im Vergleich zum Verlauf des Luftdrucks und der Luftdichte mit der Normatmosphäre (siehe Abbildung 2) wird ersichtlich, dass diese Werte sehr nah an denen der Normatmosphäre liegen, im Gegensatz zur Temperatur. Die berechnete Temperatur lässt sich für die weitere Untersuchung für geringe Machzahlen bis Ma 0,4 nicht verwenden.

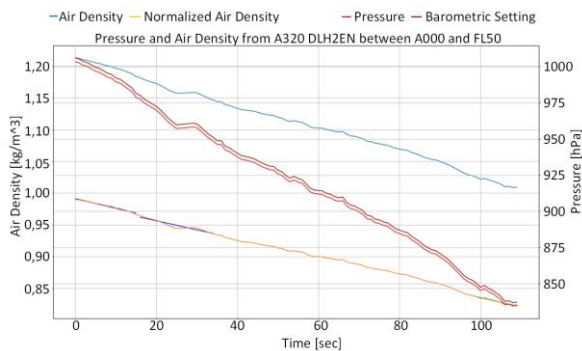


Abbildung 2: Vergleich der errechneten Werte mit Downlink Parameter Barometric Setting (dunkelrot).

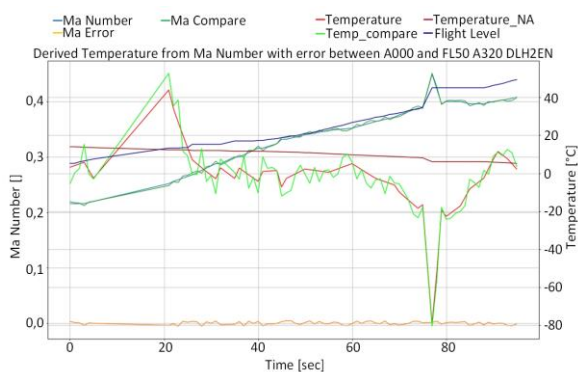


Abbildung 3: Fehlerbetrachtung bei der Bestimmung der Temperatur aus der Mach-Zahl.

Um ein Gefühl für den Fehler bei der Berechnung der Temperatur aus der Mach-Zahl zu bekommen, wird eine zufällige Zahl im Bereich von -0,005 bis +0,005 (gelbe Kurve in Abbildung 3) auf die Mach-Zahl aufaddiert und mit geplottet (grüne Kurve in Abbildung 3). An dieser Stelle wird aus Abbildung 3 im Vergleich der grünen und der roten Kurve ersichtlich, dass die dritte Nachkommastelle der Mach-Zahl einen Fehler in der Berechnung der Temperatur von ca. $\pm 10^\circ\text{C}$ ausmacht. Da bei der Temperaturbestimmung aus der Mach-Zahl diese (siehe Formel 1) quadratisch eingeht, haben geringe Schwankungen eine große Auswirkung.

Auch de Haan [1] beschreibt in seiner Untersuchung, dass die berechneten Temperaturen korrigiert werden müssen und selbst die durch Luftfahrzeuge gemessenen Temperaturen noch einen Bias aufweisen. Mode-S EHS sieht zwar die optionale Übertragung der meteorologischen Größen vor (BDS 4.4, BDS 4.5), diese werden zurzeit jedoch durch die DFS Deutsche Flugsicherung GmbH nicht abgefragt und ausgewertet. Außerdem werden diese nur von wenigen Luftfahrzeugtypen ausgesendet, z.B. nicht von Airbus und Boeing. Aus diesem Grund wird ein weiterer Ansatz untersucht, der im Folgenden beschrieben wird.

Bestimmung der Temperaturänderung über der Höhe zur Identifizierung signifikanter Bereiche der „Rate of Climb“

Bei diesem Ansatz wird nicht die Umgebungstemperatur allein betrachtet, sondern auch die Temperaturänderungen über der Höhe. Das Ergebnis bildet hierbei den Vergleich von großen und kleinen Temperaturänderungen über der Höhe an warmen und kalten Tagen ab. Hierfür wurde der Abflug in die Höhenbänder von 0 – 5000ft und von FL 50 – FL 110 eingeteilt und nach konstanter und beschleunigter Flugphase gefiltert. Diese Einteilung der Flugphasen wird vorgenommen, um einen eventuell bestehenden Einfluss der Schubhebelstellung auf die ROC zu sehen.

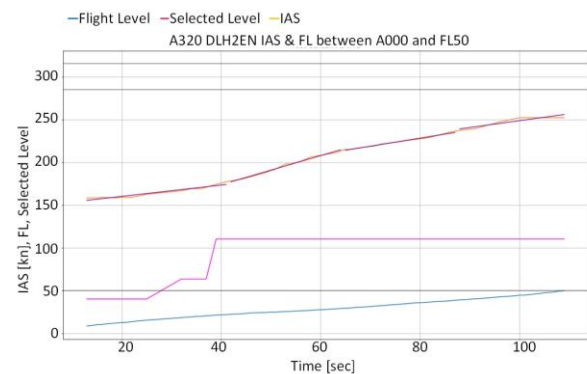


Abbildung 4: Bestimmung der Beschleunigungsphase eines Einzelfluges.

Abbildung 4 zeigt am Beispiel der DLH2EN anhand der gelben Kurve (Plot der Indicated Airspeed, IAS) und der magentafarbenen Regressionsgeraden die Bestimmung der Flugphasen über die Geschwindigkeitsänderung. Dabei wird die Beschleunigungsphase zwischen 0 und 5000ft betrachtet.

Abbildung 5 stellt den nächsten Schritt dar. Dieser ist die Identifikation relevanter Temperaturbereiche (rote Kurve) abgeleitet von den Regressionsgeraden der IAS, um letztlich eine durchschnittliche ROC (blaue Kurve) für die relevanten Zeitintervalle (Länge der Regressionsgeraden) im Verlauf des Steigfluges zu bestimmen, welche für unterschiedliche Flugzeugmuster an warmen und kalten Tagen verglichen werden. Als Randbedingung gilt eine Änderung der Temperatur kleiner 4°C als geringe und größer 9°C als große Änderung über der Höhe. Diese Temperaturänderungen werden jedoch nur in den Zeitintervallen betrachtet, die zuvor bei der Ermittlung der Flugphasen über die IAS bestimmt wurden. Die dabei identifizierten Steigraten wurden in einem Histogramm (siehe Abbildung 6) gegenübergestellt. Dieser Ansatz betrachtet nur die Änderung der

Temperatur und nicht die Absolute, da zuvor schon festgestellt wurde, dass der Fehler bei der Bestimmung der absoluten Temperatur zu groß ist.

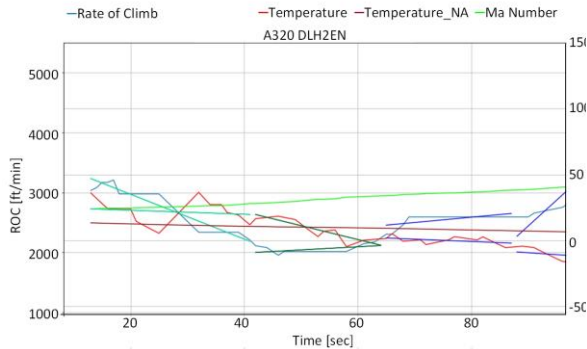


Abbildung 5: Bestimmung der relevanten Temperaturbereiche

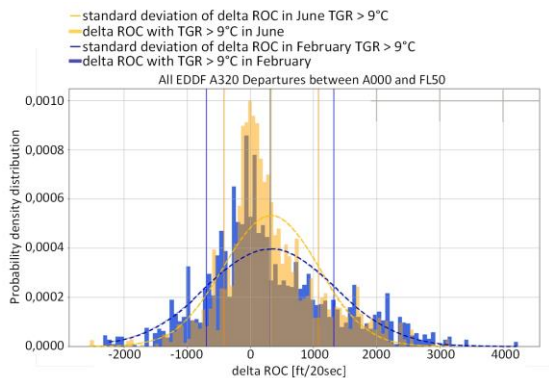


Abbildung 6: Änderung der ROC bei hohen Temperaturänderungen an warmen und kalten Tagen.

Abbildung 6 zeigt beispielhaft für den A320 in der Höhe 0ft – 5000ft ein Untersuchungsergebnis für die Verteilung von 717 Stichproben an kalten (Blau) und 1007 an warmen Tagen (Orange) bei hohen Änderungen der Temperatur. Hier wurde eine mittlere Steigrate von gerundet 200ft/min ermittelt und ein Unterschied wird nur in der Standardabweichung ersichtlich. Eine Abweichung in der Steigrate tritt bei diesem Ansatz der Untersuchung nicht auf. Dieser Effekt der Angleichung der mittleren Steigrate wird bei Erhöhung der Stichproben immer deutlicher, was hierbei allgemein für die untersuchten Flugphasen und Flugzeugmuster gilt.

Als letzter Ansatz soll im Weiteren ein einfacher Vergleich der mittleren Steigrate an warmen und kalten Tagen gemacht werden.

Vergleich der mittleren Steigrate an warmen und kalten Tagen

Für den Vergleich wurden ebenfalls die Abflüge ab Frankfurt bis Flugfläche FL250 betrachtet. Dabei wurden

einzelne Höhenbänder in den Abständen von jeweils 5000ft betrachtet. Der größte Einfluss wird dabei bei Luftfahrzeugen der Wirbelschleppen Kategorie „Medium“ in den Höhenbändern bis Flugfläche FL150 ersichtlich. Betrachtet wurden die Luftfahrzeuge A318, A319, A320, A321 und B737. Bei „Heavy Type Aircraft“ ist ein Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Steigrate nicht erkennbar.

Die im Folgenden dargestellten Illustrationen veranschaulichen am Beispiel der Airbus-Typen A318, A319 und A321, die zur Erhöhung der Anzahl n der Stichproben (Samples) zusammengefasst wurden, wie sich die ROC an kalten Tagen zu höheren Werten hin verschiebt (siehe Abbildung 7).

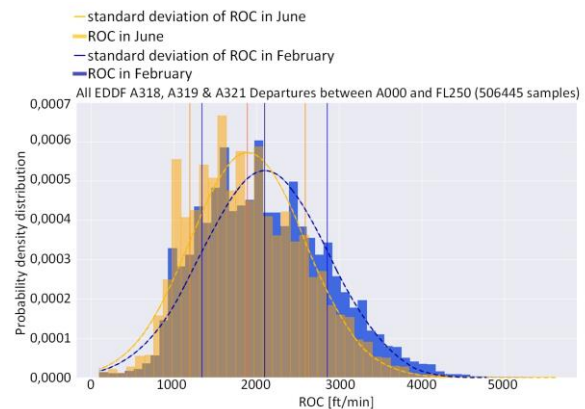


Abbildung 7: Verteilungsdichte der Steigraten im Höhenband FL000 - FL250 von A318, A319 und A321.

Im Schnitt aller „Medium Typ Aircraft“ ist diese ca. 200ft/min höher, wie an der Verschiebung des Mittelwertes zu erkennen ist. In der Summe wurden zur Erstellung von Abbildung 7 jeweils 506445 Samples für die kalten Tage (blaue Kurve) und die warmen Tage (orange Kurve) betrachtet.

Dies wird auch in der Abbildung 8 und Abbildung 9 an der Ordinate (ROC) veranschaulicht. Sie zeigen die Verteilungsdichte der Steigraten über die Zeit im Höhenband FL000 - FL250 von A318, A319 und A321. Hierbei entspricht Time der Zeit in Sekunden seit der ersten empfangenen Transpondernachricht.

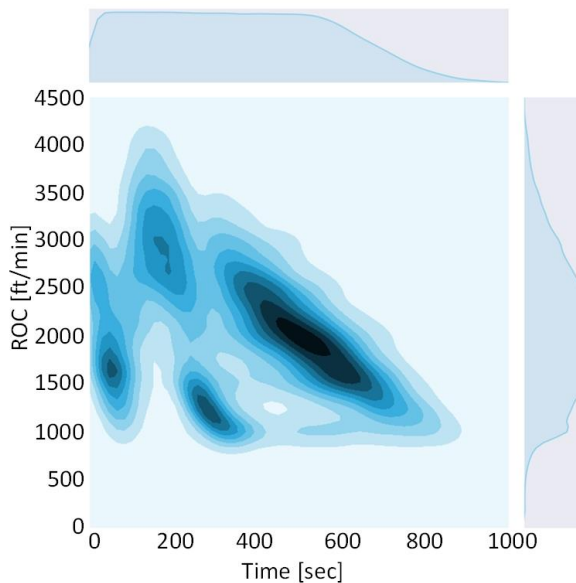


Abbildung 8: Verteilungsdichte der Steigraten im Höhenband FL000 - FL250 von A318, A319 und A321 an kalten Tagen im Februar (04. – 11.02.2019).

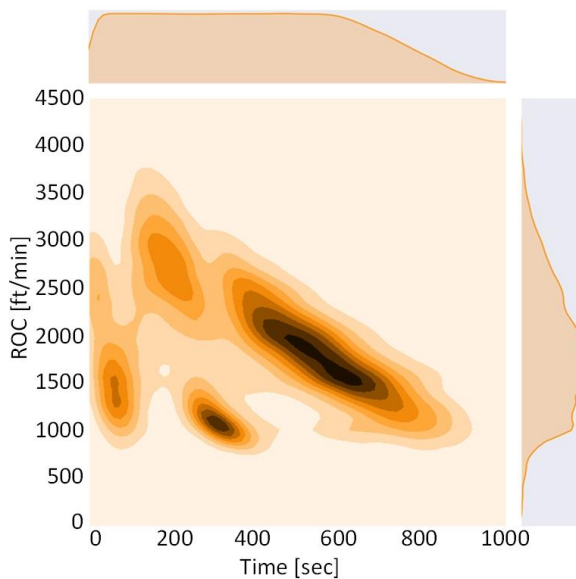


Abbildung 9: Verteilungsdichte der Steigraten im Höhenband FL000 - FL250 von A318, A319 und A321 an warmen Tagen im Juni (18. – 25.06.2019)

Außerdem werden an den höchsten Verteilungsdichten die am häufigsten geflogenen Steigraten während der Abflugsegmente ersichtlich. Diese Bereiche sind an der dunklen Schattierung zu erkennen. Werden die beiden Abbildungen miteinander verglichen, fällt auf, dass sich im kühleren Februar (Abbildung 8) die dunklen Schattierungen zu höheren Steigraten hin verschieben als im wärmeren Juni (Abbildung 9).

Bei der Untersuchung mit Hilfe der oben genannten Ansätze wurde festgestellt, dass die Bestimmung der Umgebungstemperatur aus der Mach-Zahl ungeeignet ist für die weiteren Schritte der Untersuchung, da diese Methode einen Fehler von ca. $\pm 10^\circ\text{C}$ mit sich bringt. Werden nur die Änderungen der Temperatur betrachtet, wie in Ansatz zwei, treten dabei keine aussagekräftigen Ergebnisse in den Vordergrund. Wie sich gezeigt hat, treten diese Temperaturänderungen sowohl an kalten als auch an warmen Tagen auf. Bei dieser Untersuchung hat nur Ansatz drei „Vergleich der mittleren Steigrate an warmen und kalten Tagen“ zu einem verwertbaren Ergebnis geführt. Bei diesem Ansatz wurden die auszuwertenden Tage anhand der damals vorherrschenden Bodentemperatur identifiziert und es wurde angenommen, dass die Temperaturunterschiede zwischen den warmen und kalten Tagen im Verlauf des Tages nicht stark variieren. Damit wurden höhere Steigraten an kalten Tagen anhand der untersuchten Radardaten nachgewiesen (siehe auch Vergleich der Abbildung 8 und Abbildung 9).

Analyse des Einflusses der Windrichtung und Windgeschwindigkeit auf die „Rate of Climb“

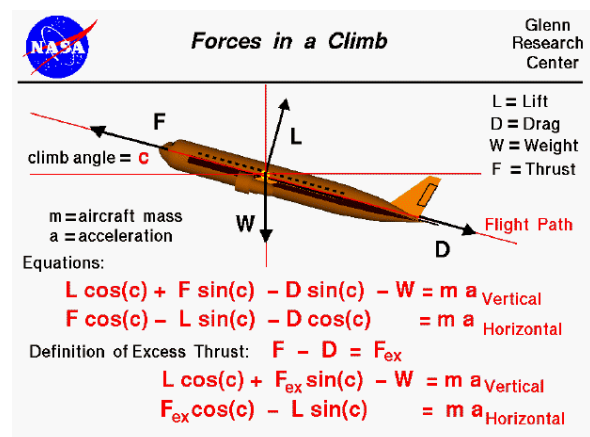


Abbildung 10: Kräfte im Steigflug, NASA Glenn Research Center [13]

$$L \cdot \cos(c) + F_{\text{ex}} \cdot \sin(c) - W = m \cdot a_{\text{Vertical}} \quad (4)$$

Im weiteren Verlauf der Datenanalyse wird untersucht, ob es zwischen der Steigrate (ROC) und der Windgeschwindigkeit eine Abhängigkeit gibt. Zur Herleitung wird zunächst die Grundlage dieser Idee erläutert. Im Steigflug entspricht die Änderung der Steigrate a_{Vertical} der Änderung der ROC laut Abbildung 10. Bei näherungsweise für Zeitintervalle von rund 30s konstanten Größen für „climb angle“ c , „Excess Thrust“ F_{ex} und Gewichtskraft W hängt die Änderung der Steigrate a_{Vertical} nur vom Auftrieb L ab. Ändert sich nun

der Auftrieb, ändert sich entsprechend auch die Steigrate. Der Auftrieb L ergibt sich nach [14] zu:

$$L = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * S * C_L \quad (5)$$

Wird ebenso für einen bestimmten Zeitraum die Luftdichte ρ , die Oberfläche der Tragflächen S und der aerodynamische Auftriebskoeffizient C_L als konstant angesehen, kann eine Steigerung des Auftriebs also durch die Änderung der Geschwindigkeit des Flugzeuges relativ zur Luft V erreicht werden.

Die untersuchte Hypothese ist, dass eine Änderung der Windgeschwindigkeit V in Flugrichtung die Steigrate beeinflusst, da die Geschwindigkeit des Flugzeuges sich relativ zur umgebenden Luftmasse verändert, wobei die Luft das Flügelprofil mit zunehmender Geschwindigkeit umfließt, was einen erhöhten Auftrieb zur Folge hat. Dies sorgt für eine Änderung der vertikalen Beschleunigung, also eine Änderung der Steigrate gemäß Gleichung (4). Zudem wird angenommen, dass dieser Effekt nicht durch das FMS oder den Piloten ausgeglichen wird. Zur späteren Berechnung des Windvektors werden die Mode S EHS Daten aus den BDS Registern 5.0 und 6.0 verwendet (siehe Tabelle 1). Da Fehler bei der Vorverarbeitung der Daten nicht ausgeschlossen werden können, müssen diese jedoch zunächst überprüft werden.

Tabelle 3: Filterkriterien

Filterkriterien Flugdaten
FL120 < FL < FL265
250 ft/min < ROC < 5000 ft/min
selected_MCP > FL + 20
track_rate < 1°/sec
50 kts < TAS < 650 kts
50 kts < GS < 850 kts
True Heading – True Track Angle < 45°

Unwägbarkeiten wie Lotsen-Freigaben gehen nicht aus den Mode S EHS Daten hervor. Level-Offs, Turns oder Beschleunigungsphasen, die allesamt einen viel größeren Einfluss auf die Steigrate haben als kurzzeitige Windschwankungen, müssen zunächst identifiziert und gefiltert werden. Um den Einfluss des Windes zu verifizieren, werden diese Faktoren im Voraus soweit wie möglich durch die in Tabelle 3, genannten Filterkriterien ausgeschlossen. Das betrachtete Höhenband erstreckt sich von FL120 bis FL265. Bis FL100 gilt maximal 250kn Indicated Airspeed (IAS), sodass in der Regel bis mindestens FL120 eine Beschleunigungsphase stattfindet, die wegen des dadurch bedingten Abfalls der Steigrate nicht betrachtet wird.

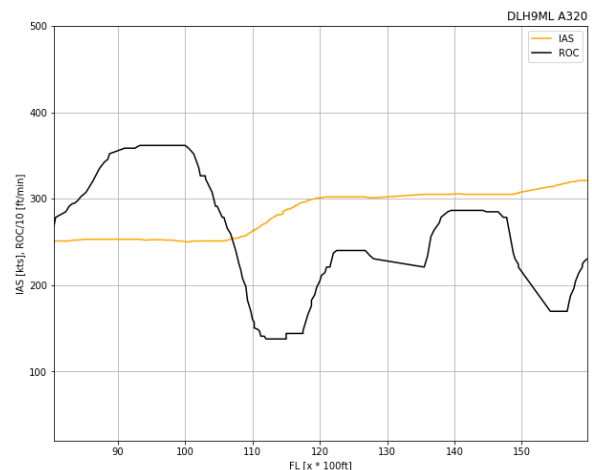


Abbildung 11: Einfluss von Beschleunigungsphasen auf die Steigrate

Abbildung 11 veranschaulicht diese Wechselwirkung von IAS (gelb) und ROC (schwarz) über dem FL aufgetragen. Beschleunigt der Flieger von 250kn auf 300kn IAS, sinkt im selben Zeitraum die Steigrate und wird erst wiederaufgebaut, nachdem der Beschleunigungsvorgang abgeschlossen ist. Die obere Grenze des Höhenbandes ist (mit Puffer) durch die „crossover altitude“ gegeben, bei der von IAS auf Mach-Zahl umgestellt wird.

Weitere Filter betreffen die Validierung der übermittelten Daten. Dabei werden z.B. Steigraten über 5000ft/min, TAS über 650kn oder GS über 850kn als fehlerhafte Übertragung eingestuft. Es werden nur Flüge untersucht, die sich im ungehinderten Steigflug bis zur Reiseflughöhe („continuous climb“) befinden (Tabelle 3, Zeile 3). Würde ein Flieger bis nach FL280 steigen, müsste aber wegen kreuzendem Verkehr auf FL180 „halt machen“, läge ein sogenanntes level-off vor. Dabei würde die ROC von 2000ft/min gegen Null sinken. Um danach den Steigflug wieder fortzusetzen, muss die Rate wieder aufgebaut werden. Während dieses gesamten Zeitintervalls hätte die Änderung der Windgeschwindigkeit also keinen - aus den Mode S Daten nachweisbaren - Einfluss auf die Steigrate. Die Auswahl bei der Analyse von kontinuierlichen Steigflügen wird sichergestellt, indem nur solche Daten des Fluges verwendet werden, in denen das nächste im Mode Control Panel (MCP) gewählte FL immer mindestens 2000ft höher ist als das aktuelle FL. Werden Kurven während des Steigfluges geflogen, kann ein Flieger sich in den Wind hinein beziehungsweise aus dem Wind herausdrehen. Während dieser Turns ist es nicht sinnvoll, die errechneten Windwerte zu nutzen, da durch die Verwirbelungen der Luft verfälschte Werte von den Staudruckröhren zurückgegeben werden. Daten können

also nur als valide eingestuft werden, wenn momentan kein Turn geflogen wird.

Der einzige Weg zur Ermittlung eines belastbaren Ergebnisses führt also über eine starke, begründete Filterung der Daten und eine Mittelung über eine Vielzahl von Flügen. Die genutzten Datensätze enthalten insgesamt Mode S EHS Daten von über 38000 Abflügen. Aus den gefilterten Mode S Daten wird dann ein zweidimensionaler Windvektor, bestehend aus Stärke und Richtung, berechnet.

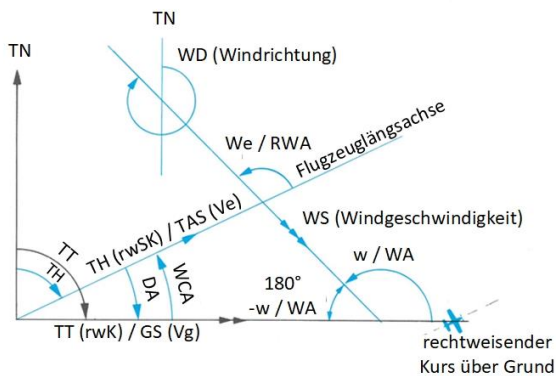


Abbildung 12: Winddreieck, Der Privatflugzeugführer Band 4A Flugnavigation (1989, Wolfgang Kühr)

Aus den in den BDS Registern 5.0 und 6.0 übertragenen Werten für Magnetic Heading (MH), True Track Angle (TTA), True Airspeed (TAS) und Groundspeed (GS) wird mit Hilfe des Cosinussatzes für allgemeine Dreiecke die Windgeschwindigkeit, also die Länge des Windvektors, bestimmt.

$$WS = \sqrt{TAS^2 + GS^2 - 2 * TAS * GS * \cos (TH - TTA)} \quad (6)$$

Hierzu wird das gelieferte Magnetic Heading in erster Näherung um die magnetische Deklination auf das True Heading korrigiert, um es mit dem TTA vergleichen zu können, da sich beide Größen auf rechtweisend Nord beziehen. Aus der errechneten Windgeschwindigkeit hat aber nur die Komponente Auswirkungen auf den Auftrieb, die auch in Richtung des Flugweges wirkt. Deswegen wird der Winkel des Windvektors relativ zur Flugrichtung bestimmt (RWA, Abbildung 12).

$$RWA = \cos^{-1} \left(\frac{TAS^2 + WS^2 - GS^2}{2 * TAS * WS} \right) \quad (7)$$

Der Cosinus dieses RWA gibt die Gewichtung der Windstärke bezogen auf den erzeugten Auftrieb an. Anschaulich betrachtet heißt das, bei Gegenwind von beispielsweise 30kn ($RWA = 0^\circ$) gewinnt das Flugzeug an relativer Geschwindigkeit im Vergleich zur Luft +30kn, bei Rückenwind ($RWA = 180^\circ$) ändert sich die

relative Geschwindigkeit um -30 kn. Dies entspricht einer Gewichtung mit dem Cosinus, da $\cos(0^\circ) = 1$ und $\cos(180^\circ) = -1$.

Der gesuchte Windvektor WV berechnet sich also zu:

$$WV = WS * \cos(RWA) \quad (8)$$

Abbildung 13 zeigt in Blau den Ausschnitt des Steigfluges von DLH7YJ von FL120 - FL210 über der Zeit. In Schwarz ist der Verlauf der Komponente der Windgeschwindigkeit in Flugrichtung, also der Windvektor WV in Knoten (kn) aufgetragen. Die ROC in Rot wird damit verglichen und auf Korrelation untersucht.

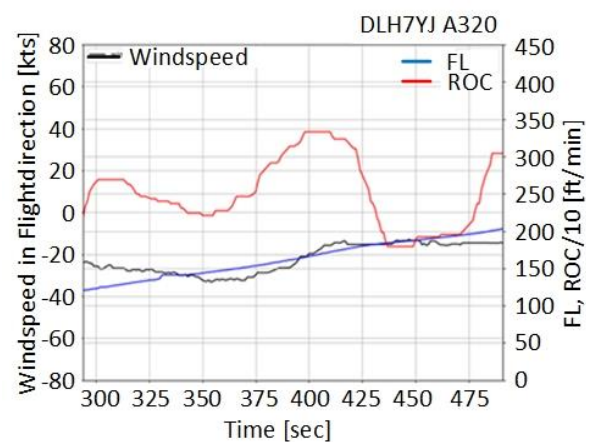


Abbildung 13: Korrelation Windgradient und ROC

Dazu werden Regressionsgeraden für die einzelnen Wertearrays mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate berechnet. Dabei wird eine Ausgleichsgerade durch alle in einem Zeitintervall befindlichen Punkte eines Vektors gelegt, sodass der Abstand zwischen dieser Ausgleichsgeraden und den Datenpunkten quadriert und aufsummiert möglichst gering wird.

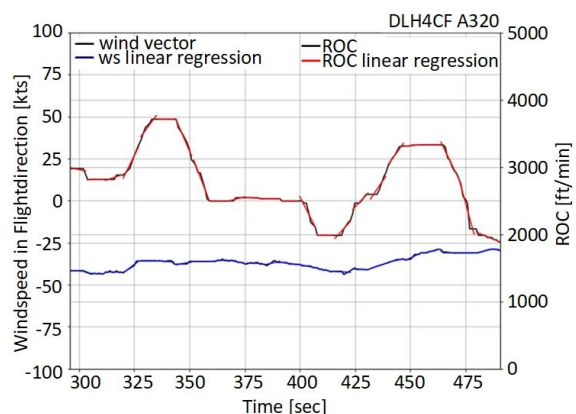


Abbildung 14: Lineare Regression

Abbildung 14 zeigt am Beispiel von DLH4CF, wie dazu

der betrachtete Flugabschnitt in Intervalle aufgeteilt wird, für die jeweils Regressionsgeraden aus den Verlaufskurven von ROC und Windvektor berechnet werden, um die Änderungen über der Zeit quantifizieren zu können. Ändert sich in einem Bereich die Windstärke in Flugrichtung signifikant, kann ein Zusammenhang mit der Änderung der Steigrate vorliegen.

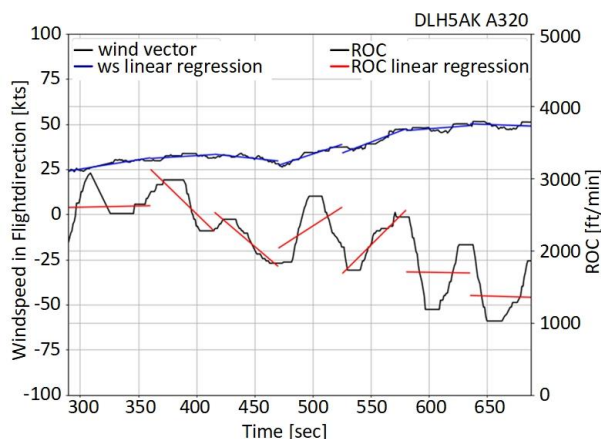


Abbildung 15: Wahl der Intervalllänge

Jedoch stellt es eine Herausforderung dar, reale Daten von tausenden Flügen in künstliche Zeitintervalle einzuteilen und daraus belastbare Statistiken zu generieren. Dies wird in Abbildung 15 dargestellt. Die Regressionsgeraden können die Daten etwa bei zu groß gewählten Zeitabschnitten nicht abbilden. Daher ist eine empirisch einzustellende Variable die Länge des Zeitintervalls. Mit Hilfe der Regressionsgeraden wird ein weiterer Faktor, der den Einfluss der Windänderung auf die Steigrate überlagert, eliminiert: die Änderung der IAS. Da der absolute Wert der IAS unerheblich ist, sondern nur die Änderung der IAS einen direkten Einfluss auf die ROC hat, ist es mit der bisher genutzten Filtermaske nicht möglich, die Daten zu filtern. Die Intervalle, in denen die Änderung der IAS über einem Schwellwert liegt, werden gefiltert. Dies betrifft einerseits Beschleunigungsphasen, in denen die IAS ansteigt, während die ROC sinkt. Andererseits sind auch Phasen auszuschließen, in denen bewusst eine hohe Steigrate gehalten wird. Diese sind am gleichzeitigen Abfall der IAS zu erkennen. In solchen Fällen soll die Windänderung nicht mit der ROC korreliert werden. Daher werden diese Intervalle gelöscht und keine Regressionsgeraden gespeichert.

Insgesamt ist eine Reihe von Variablen einzustellen, auf deren Basis ein Ergebnis errechnet wird:

- Liste der untersuchten Luftfahrzeugtypen
- Filtermaske laut Tabelle 3
- Intervalllänge

- Festlegen eines Grenzwertes für die Änderung der IAS pro Intervall
- Festlegen oberer & unterer Grenzwerte für die Windänderung pro Intervall

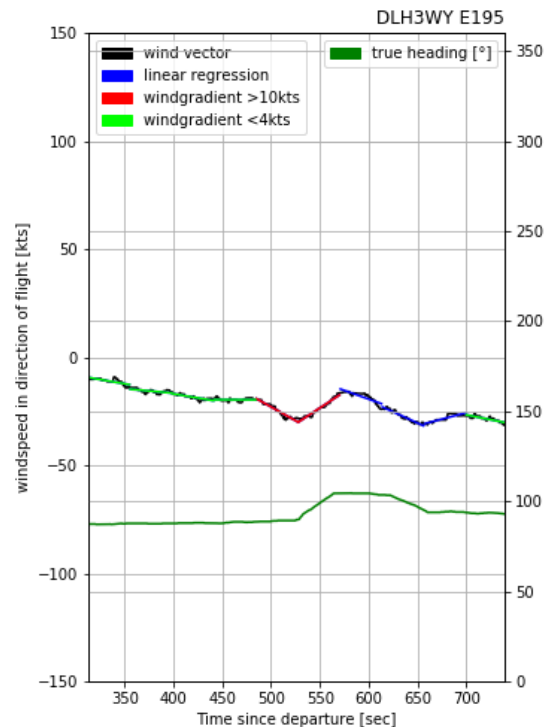


Abbildung 16: Exemplarische Korrelation von Windänderung und Steigrate - Teil Windänderung

Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigen für einen festgelegten Parametersatz die grafische Auswertung des Ergebnisses des Fluges DLH3WY. Abbildung 16 stellt die Windgeschwindigkeit in Richtung der Flugzeugachse in Knoten über der Zeit dar. Der berechnete Windvektor WV ist in Schwarz dargestellt und wird von den Regressionsgeraden überlagert. Ist der Betrag der Windänderung größer als 10kn/Intervalllänge, wird die Regression in Rot dargestellt. Ist der Betrag kleiner als 4kn, ist die Regression Hellgrün. Für alle Zwischenwerte wird die blaue Regression verwendet. Zusätzlich wird auf der rechten Achse in Grün das True Heading über der Zeit geplottet, um auf mögliche Kurven zu überprüfen.

Abbildung 17 zeichnet für denselben Flug (DLH3WY) mit der linken Achse die ROC in Grün über der Zeit auf. Die Regressionen sind entsprechend denen aus Abbildung 16 nach den Werten der Windänderung gefärbt, um die Intervalle gut miteinander zu vergleichen. Auf der rechten Achse ist die IAS in Schwarz mit oranger Regression aufgetragen. Eine relativ konstante IAS ist Voraussetzung, um Windänderung und Steigrate vergleichen zu können.

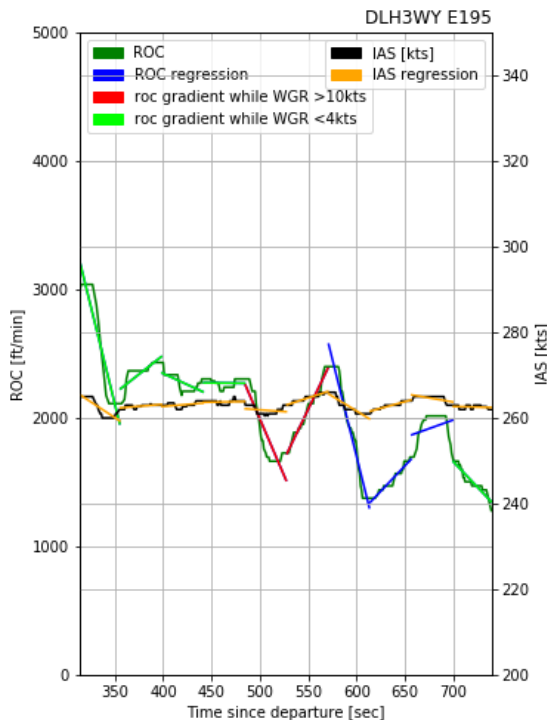


Abbildung 17: Exemplarische Korrelation von Windänderung und Steigrate - Teil Steigrate

Im ersten roten Intervall von links (ab 480s) ist zu erkennen, wie bei einer negativen Windänderung, der weniger als -10kn pro Intervall beträgt, die Steigrate ebenfalls absinkt. Im folgenden Intervall bei mehr als +10kn Windänderung steigt die ROC wieder deutlich. Dies ist der Effekt, der untersucht werden soll. In den hellgrünen Intervallen, in denen der Wind relativ konstant bleibt, ist auch die Fluktuation der ROC deutlich geringer. Auch dies würde mit der Hypothese, dass nur bei ansteigender Windstärke der Auftrieb zunimmt, übereinstimmen. Für jeden Flug im Datensatz wird die Änderung der Steigrate in den Flugintervallen, in denen die Änderung des Windvektors betragsmäßig über einem definierten Grenzwert liegt, gemessen (rote Regressionen). Diese werden verglichen mit den Steigratenänderungen in den Abschnitten, in denen sich der Windvektor wenig ändert (grüne Regressionen).

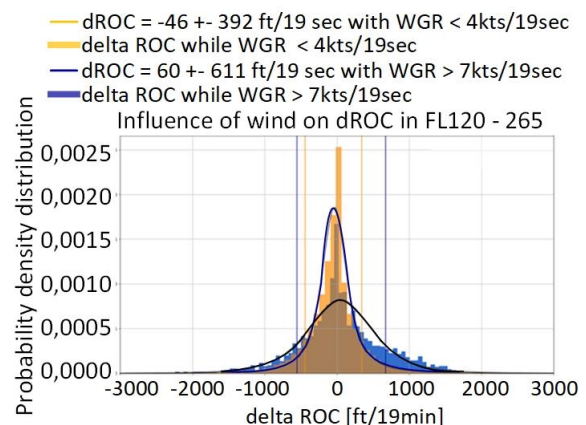


Abbildung 18: Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der Steigratenänderungen

Für die Auswertung in Abbildung 18 wurden nun folgende Parameter empirisch ermittelt und gewählt:

- Flugzeugtypen B737-, A320-Familie und E190/5
- Filtermaske laut Tabelle 3
- Intervalllänge ca. 20 Sekunden
- Grenzwert für die Änderung der IAS: $\pm 7\text{kn/Intervall}$
- Untere Grenze für Windänderung: $\pm 4\text{kn/Intervall}$
- Obere Grenze für Windänderung: $\pm 7\text{kn/Intervall}$

Es wurden insgesamt 16 verschiedene Parametersätze analysiert. Der in Abbildung 18 gegebene veranschaulicht ein repräsentatives Resultat, das im Mittelwert des Ergebnisses aller Parametersätze liegt. Das orange, normierte Histogramm in Abbildung 18 zeigt auf, um wieviel sich die Steigraten in einem Zeitintervall ändern, wenn der Windvektor um weniger als 4kn pro Intervall variiert. Das blaue Histogramm stellt dar, wie sich die ROC entwickelt, falls der Windvektor sich mit mehr als 7kn pro Intervall ändert. Anhand der größeren Standardabweichung der blauen Verteilung wird deutlich, dass ein starkes Schwanken der Windstärke in Flugrichtung einen signifikanten Einfluss auf die momentane ROC hat. Für das Ergebnis ist irrelevant, ob die Steigrate zum Positiven oder zum Negativen verändert wird, sondern nur, um wieviel sich die Steigratenänderungen bei betragsmäßig hohem und niedrigem Grenzwert der Windänderung unterscheiden.

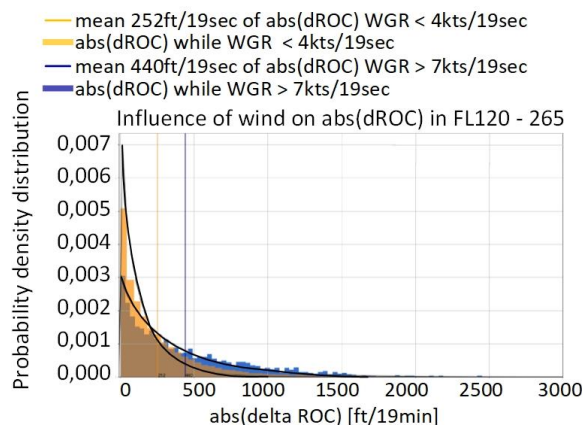


Abbildung 19: Betrag der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung

Damit ist als Ergebnis eine Kenngröße zu definieren, die eben diesen Unterschied hervorhebt. Das ist die Differenz der Mittelwerte der Beträge der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen (siehe Abbildung 19). Je nach untersuchtem Parametersatz fällt das Ergebnis ähnlich aus (150-300ft/Intervall) und kann anhand dieser Kenngröße verglichen werden. Als Referenzwert für den Einfluss der Änderung der Windgeschwindigkeit auf die Steigrate wird 200ft/20sec bestimmt, was einer Änderung der Steigrate um 600ft/min entspräche, wenn der Effekt eine Minute am Stück auftreten würde. In der Realität sind Windschwankungen zeitlich deutlich begrenzter.

Zur Einschätzung der Anwendbarkeit der gewählten Methodik und der Signifikanz der Ergebnisse kann der Vergleich mit dem Einfluss der Änderung der IAS auf die Steigrate herangezogen werden, die für jeden Flug in den Beschleunigungsphasen nachweisbar ist. In Abbildung 20 zeigt die Grafik die untere schwarze Kurve als Verlauf der ROC über der Zeit, angenähert durch die blaue Regressionsgerade bzw. die rote dort, wo die Änderung der IAS mehr als 7kn pro Intervall beträgt. Die Kurve der IAS ist orange eingezeichnet und die Regressionen sind ebenfalls bei hohen Änderungen der IAS rot gefärbt. Man sieht eine Beschleunigungsphase.

Die IAS wird von 250kn bis auf 320kn erhöht, die ROC fällt entsprechend ab. In den ersten 2 Intervallen ist die Steigratenänderung negativ, da Geschwindigkeit aufgebaut wird. In den nächsten Abschnitten zieht die Steigrate wieder an. Die Änderung der Steigrate in den rot gefärbten Abschnitten wird mit den Steigratenänderungen verglichen, in denen sich die IAS um weniger als 3kn geändert hat, wie an den hell- und dunkelgrünen Geraden zu sehen ist. Durch die Trägheit der großen Masse ist hier ein zeitlicher Verzug beobachtbar. Zur

Einordnung des Einflusses gegenüber der Windänderung wird das Höhenband FL100-140 nach einem vergleichbaren Parametersatz wie für Abbildung 18 geprüft.

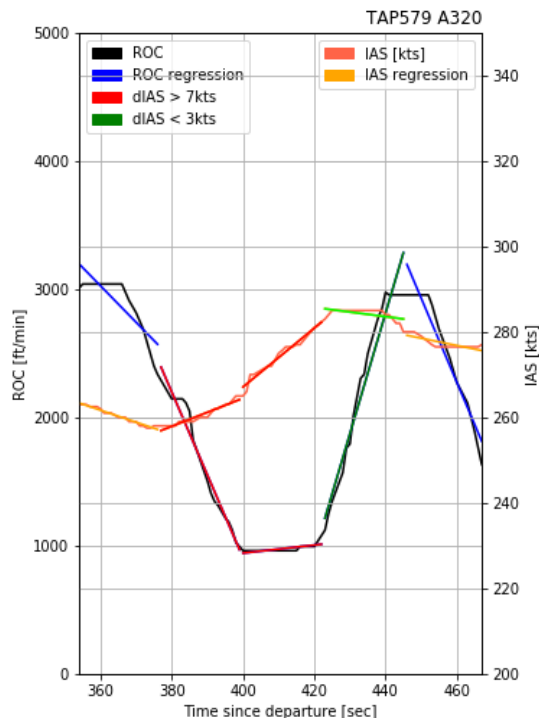


Abbildung 20: Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der Steigratenänderungen

Die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen in Abbildung 21 weichen diesmal noch deutlicher voneinander ab. Es gibt eine Tendenz zu einem Einbruch der Steigrate um bis zu 2000ft und eine anschließende Steigerung. Dies ist in Abbildung 20 nachzuvollziehen.

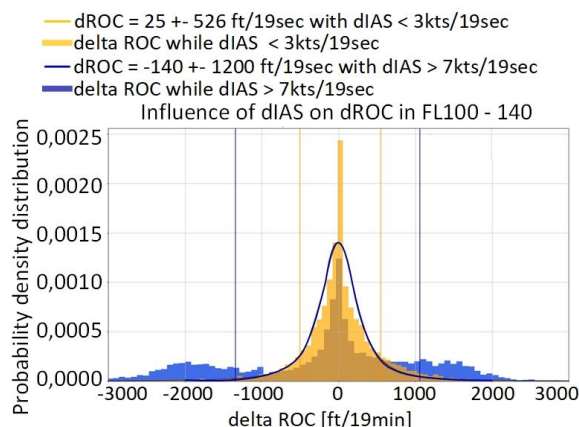


Abbildung 21: Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der Steigratenänderung in Beschleunigungsphasen

Erneut wird der Mittelwert der Betragsverteilung genutzt, um den Einfluss des Parameters, diesmal der Änderung der IAS, zu quantifizieren (siehe Abbildung 22).

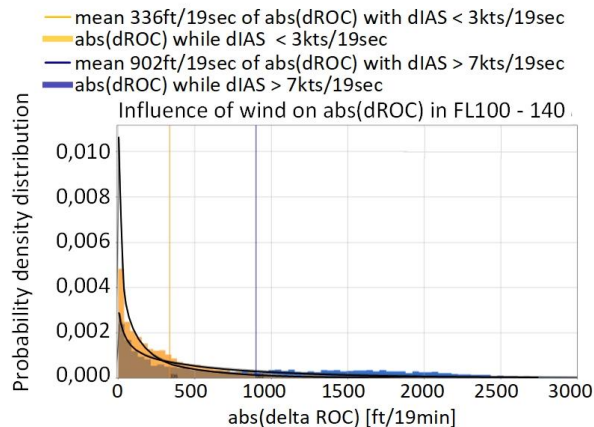


Abbildung 22: Betrag der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen der Steigratenänderung FL100-140

Das Ergebnis des Einflusses der Änderung der IAS auf die Steigrate beträgt 565ft/19sec. Dies wird als Referenz für den Einfluss der IAS genutzt. Der tatsächliche Einfluss der Windänderung beträgt hierauf bezogen also $200/565 = 35,4\%$. Dies ist ein realistisches Ergebnis, da für jeden Flug Beschleunigungsphasen auftreten, die direkt die Steigratenänderung beeinflussen. Das Auftreten starker Winde in der Atmosphäre hingegen ist nicht vorher-sagbar und tritt weniger frequent bezogen auf den Einzelflug auf.

Zusammenfassung

Letztendlich zeigt die Untersuchung, dass für einen außenstehenden Beobachter, in diesem Fall ein Sekundärradar als Empfänger der Mode S EHS Daten, Einflüsse auf die Steigrate eines Verkehrsflugzeuges mit Hilfe großer Datenmengen statistisch nachgewiesen werden können. Der Einfluss des Temperatur-unterschiedes von Sommer zu Winter kann bei Wahl einer geeigneten Methode anhand der Differenz der mittleren Steigraten belegt werden. Hierbei ist anzumerken, dass dieser Einfluss auf die Steigrate über alle Höhenbänder quasi konstant wirkt. Zeitlich begrenzte Einflüsse von Temperaturschwankungen können auf Grund der hohen Fehleranfälligkeit der Berechnung aus der übertragenen Machzahl nicht genutzt werden.

Mit der Methode der Gradientenberechnung durch lineare Regression wird gezeigt, dass sich sowohl der Einfluss von Beschleunigungsphasen ab FL100 als auch

von Änderungen der Windstärke und -richtung quantifizieren lassen. Dabei müssen Windänderungen kontinuierlich bestimmt werden, da Windrichtung und -stärke über der Höhe und der Zeit variieren. Zudem ist eine begründete vorhergehende Filterung notwendig, um die Auswertung nicht durch überlagernde Einflüsse zu verfälschen.

Diese Arbeit quantifiziert also verschiedene Einflüsse auf die Steigratenänderung eines Fluges über einen großen Datensatz. Diese können als Features für das Training des neuronalen Netzes zur Trajektorienprädiktion [3] genutzt werden. Über die Genauigkeit der Vorhersagen des neuronalen Netzes wird sich die flugsicherungs-technische Relevanz der Einflussfaktoren und die Güte der verwendeten Methoden rückwirkend einschätzen lassen.

Abkürzungsverzeichnis

ATC	Air Traffic Control
ATM	Air Traffic Management
BDS	Binary Data Selector
DAP	Downlink Aircraft Parameter
EHS	Enhanced Surveillance
FL	Flughöhe
GS	Ground Speed
MH	Magnetic Heading
IAS	Indicated Airspeed
κ	Adiabatenexponent trockener Luft
KDD	Knowledge Discovery in Databases
KI	Künstliche Intelligenz
MCP	Mode Control Panel
NN	Neuronales Netz
R	spezifische Gaskonstante für trockene Luft
ROC	Rate of climb (Steig- Sinkrate)
TAS	True Airspeed
TTA	True Track Angle
WTC	Wake Turbulence Category

Referenzen

- [1] Siebren de Haan, An improved correction method for high quality wind and temperature observations derived from Mode-S EHS, De Bilt, 2013, Technical report; TR-338.
- [2] Paul de Jong, Siebren de Haan, SESAR 2020 Task 2.2 Deriving Quality-Controlled, Corrected Meteorological Observations using Mode-S EHS Surveillance Data, KNMI; DFS 2018.
- [3] Matthias Poppe, Thomas Pütz & Roland Scharff. Improving Climb Performance Prediction in Air Traffic Control with Machine Learning and Full Flight Simulator Verification. Innovation im Fokus 01/2019.
- [4] Marvin Baudis, Bachelor Thesis, Einfluss der Änderung der Windgeschwindigkeit auf die Steigrate von Verkehrsflugzeugen. 11/2019.
- [5] ICAO Doc 9871 AN/464 Technical Provisions for Mode S Services and Extended Squitter, First Edition, 2008.
- [6] BigData Insider, Artikel: „Was ist Data Mining?“ [online], 09/2016. Verfügbar unter: <https://www.bigdata-insider.de/was-ist-data-mining-a-593421/>
- [7] WetterKontor GmbH [online]. Verfügbar unter: <https://www.wetterkontor.de/de/wetter/deutschland/rueckblick.asp>
- [8] OpenSky Network, „OpenSky Network Homepage,“ [Online], 10/2019. Verfügbar unter: <https://opensky-network.org/>
- [9] Skybrary.aero, „Mode S“ [Online], 11/2019. Verfügbar unter: https://www.skybrary.aero/index.php/Mode_S
- [10] Skybrary.aero, „ICAO Wake Turbulence Category“ [Online], 01/2020. Verfügbar unter: https://www.skybrary.aero/index.php/ICAO_Wake_Turbulence_Category
- [11] Deutscher Wetterdienst, „ICAO Standardatmosphäre (ISA),“ [Online]. Verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/S/Standardatmosphaere_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- [12] Walter Bislins Aviatik Wiki, Barometrische Höhenformel [Online], 06/2014. Verfügbar unter: <http://walter.bislins.ch/aviatik/index.asp?page=Barometrische+H%F6henformel>
- [13] NASA Glenn Research Center, „Forces in a Climb,“ 10 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/climb.html>
- [14] Anderson, John D. (2004), *Introduction to Flight* (5th ed.), McGraw-Hill, p. 260.

Klimawandelauswirkungen auf das Luftverkehrsmanagement in Deutschland und deren Kompensation

Sophia Marie Heering (Johannes-Gutenberg-Universität Mainz)

Einleitung

Bereits seit einigen Jahren häufen sich statistisch relevante Indikatoren, dass sich weltweit ein vergleichsweise rapider Klimawandel vollzieht. Das Weltwirtschaftsforum stuft den anthropogenen Klimawandel als eines der höchsten Risiken der Zukunft ein. Dabei führen vor allem die Veränderungen der Klimaparameter Temperatur, Niederschlag und Wind dazu, dass Anzahl und Ausmaß von Extremereignissen weiter zunehmen. Die Auswirkungen solcher Extremwetterlagen beeinflussen letztlich nicht nur die Natur, sondern auch die Gesellschaft. Die dadurch entstehenden Risiken und Kosten führen dazu, dass gesellschaftliche und politische Diskussionen den notwendigen Klimaschutz in den Fokus rücken [18]. Davon ausgehend wächst auch der Druck auf Unternehmen mit hohen Emissionen klimaschädlicher Treibhausgase – bevorzugt solche des Verkehrs- und Industriesektors. Auch die Luftfahrtbranche steht daher im Fokus und wird einerseits durch unternehmenseigene Klimaschutzstrategien aktiv und integriert andererseits zunehmend die potenziellen Auswirkungen des Klimawandels in die Betriebs- und Planungsprozesse.

Seit 2013 konnte ein Anstieg um 80% in den wetterbedingten Verspätungsminuten verzeichnet werden [10]. Für die Flugsicherungen stellen wetterbedingte Betriebsunterbrechungen und -einschränkungen der Flughäfen und Fluggesellschaften einen wichtigen Aspekt des Kapazitätsmanagements dar [11]. Daher ist eine frühe und präzise Vorhersage über Größe, Standort und Wahrscheinlichkeit von Wetterereignissen essenziell und dazu ein sicherheitsrelevanter Faktor [14]. Nur so kann ein sicherer Betrieb trotz der Klimaveränderungen aufrechterhalten und allen am Luftverkehr beteiligten Akteuren durch frühzeitige Planungen der bestmögliche Service geboten werden [11].

Diese Veröffentlichung basiert auf einer Masterarbeit [13], die der Frage nachgeht, wie die Flugverkehrskontrolle der Deutschen Flugsicherung und ausgewählte Partner des deutschen Luftverkehrsmanagements, der Flughafen Frankfurt am Main und die Fluggesellschaft Lufthansa, den Herausforderungen und Risiken des Klimawandels begegnen können. Anhand von Beobachtungs- und Klimaprojektionsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) werden Szenarien für

die Mitte des 21. Jahrhunderts erstellt (vgl. Abbildung 1). Auf Grundlage dieser klimatischen Annahmen für die Zukunft werden Risiken der jeweiligen Unternehmensbereiche identifiziert.



Abbildung 1: Vorgehen zur Beantwortung der Forschungsfrage (nach [5]).

Aufgrund der großen Interdependenzen im Luftverkehrsmanagement ist es unumgänglich, dabei nicht nur einen einzelnen Akteur, sondern alle beteiligten Akteure zu untersuchen, da die klimabedingten Auswirkungen immer auch Folgeeffekte auf die Partner und somit das Gesamtsystem haben. Kooperationen und Partnerschaften sind bei der Initiierung konkreter Anpassungsmaßnahmen essenziell, um neben dem Austausch interne und übergreifende Prozesse homogen gestalten und den zukünftigen Herausforderungen gemeinsam und sicher begegnen zu können.

Nachfolgend vorgestellt werden ausgewählte Ergebnisse aus der Masterarbeit „Kompensation der Auswirkungen des Klimawandels auf die operative Flugverkehrskontrolle und das Luftverkehrsmanagement in Deutschland“, welche in Kooperation mit der DFS unter Betreuung von Herrn Jörg Buxbaum entstanden ist [13].

Wie funktioniert Klima und welchen Einfluss hat der Mensch?

Das Klima der Erde wird von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst und gesteuert. Diese zu identifizieren ist wesentlich für das Verständnis des anthropogenen Klimawandels. Ebenso ist die korrekte Einordnung zukünftiger Projektionen des Klimas notwendig, um den Verkehrssektor – hier das Luftverkehrsmanagement – auf die Auswirkungen im richtigen Maß vorbereiten zu können.

Die Erde unterliegt natürlichen Klimaschwankungen, die von extra- und intraterrestrischen Ursachen ausgelöst werden. Zu den externen Einflussfaktoren zählen die spezifische Konstellation zwischen Erde und Sonne, die Strahlungsaktivität der Sonne, die Konzentration der Treibhausgase und Vulkaneruptionen. Diese stellen die wesentlichen Randbedingungen des globalen Klimasystems dar und kontrollieren die Energiezufuhr an der Erdoberfläche. Denn während durch die Reflektion ein Teil der Strahlung zurückgestrahlt wird, erwärmt sich durch Absorption die Erdatmosphäre und damit auch die Erdoberfläche [24]. Die internen Prozesse des Klimasystems, d.h. der Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre, Lithosphäre und Biosphäre, stehen miteinander in Wechselwirkung. Sie bestimmen die Energiebilanz der Erde durch die Absorption und Reflektion der langwelligen terrestrischen und solaren kurzwelligen Strahlung. Letztlich bestimmt das Verhältnis von Reflektion und Absorption die Albedo, die ausdrückt, wie viel Prozent der Einstrahlung wirksam ist und dem Klimasystem zur Verfügung steht bzw. in den Weltraum zurückgestrahlt wird. Die wichtigsten Parameter dafür sind die Verteilung von Land und Meer (Wärmespeicherkapazität), die Topographie (Ursache für lokale Luftströmungen) und ganz besonders die atmosphärisch-ozeanischen Strömungen, die zu differenzierten Ausprägungen des globalen, regionalen und lokalen Klimas der Erde führen [24].

Der *natürliche Treibhauseffekt* liegt in der Atmosphäre der Erde begründet. Hätte die Erde keine Atmosphäre, so würde durch die fehlende Absorption der langwelligen Strahlung, die von der Erde emittiert wird, die Erdtemperatur im Mittel -18 °C betragen. Die Gase in der Atmosphäre führen jedoch zur Erwärmung, da sie die langwellige terrestrische Strahlung absorbieren und reflektieren. Dadurch hat sich ein Strahlungsgleichgewicht eingestellt das eine mittlere Temperatur der Erde von 15 °C bewirkt [24]. Neben Kohlenstoffdioxid (CO₂) gehören auch Wasserdampf (H₂O), Methan (CH₄) und Ozon zu den wichtigsten Treibhausgasen. Sie haben einen unterschiedlich hohen Anteil in der Atmosphäre und auch einen unterschiedlich hohen Treibhauseffekt. Wasserdampf hat den größten Anteil am Treibhauseffekt mit ca. 60%, Kohlenstoffdioxid 26%, Methan 6% und Ozon etwa 8% [4][24].

Der Anteil am Treibhauseffekt, der durch menschliche Eingriffe bedingt ist, wird *anthropogener Treibhauseffekt* genannt. Heute sind sich die Wissenschaftler einig, dass das Klima vom Menschen seit ca. 150 Jahren, d.h. seit der Industrialisierung, beeinflusst wird. Damit werden die natürlichen Ursachen des Klimawandels künstlich

verstärkt [23]. Zu den Treibern des anthropogenen Klimawandels zählen Veränderungen der Erdoberfläche (Vegetation, Schnee- und Eisbedeckung), die wiederum die physikalischen Eigenschaften wie die Strahlungsbilanz, Wärmekapazität und Rauigkeit verändern. Auch daraus resultierende Eingriffe in den Wärme- und Energiehaushalt sowie Eingriffe in den Wasserhaushalt (Grundwasser, Ozeane) oder die atmosphärische Zusammensetzung fördern die Dysbalance des Erdklimas. All das wird seit einiger Zeit in immer intensiverem Maße durch die Umwandlung von Natur- in Kulturlandschaften, Waldrodungen, Bebauung, Abwärme, Wassernutzung, Energienutzung, Verkehr, Emissionen durch Industrie und Landwirtschaft sowie Brandrodung vorangetrieben. Die anthropogenen Eingriffe haben vielfältige Ausprägungen und Folgeerscheinungen. Gerade durch Vernetzungen und Rückkopplungen, bspw. im Zuge der atmosphärisch-ozeanischen Zirkulation, gewinnt das System Klima erheblich an Komplexität [23].

Messbar ist der anthropogene Klimawandel bspw. über den Gehalt des atmosphärischen CO₂. Die Konzentration ist in den letzten 150 Jahren von ca. 280 ppm auf ca. 415 ppm angestiegen (vgl. Abbildung 2), was bereits eine Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur um 0,85 °C bewirkt hat [24].

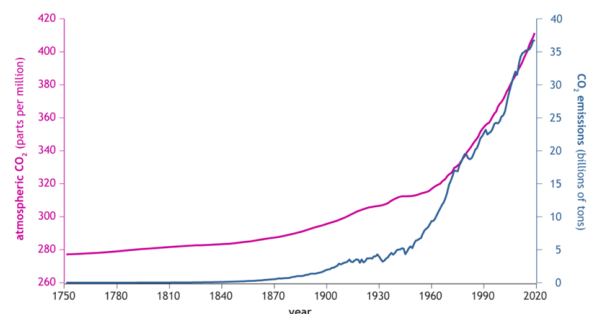


Abbildung 2: Nahezu paralleler Anstieg der CO₂-Emissionen (blau) und CO₂-Konzentration (pink) in der Atmosphäre seit Beginn der Industrialisierung [21].

Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ist sich sicher, dass die Hauptursache des Klimawandels der Mensch mit der Verbrennung von Gas, Kohle und Öl ist, da sich die Veränderungen sonst nicht erklären lassen [17].

Wie gelingt der Blick in die Zukunft des Klimas?

Die Auswirkungen auf die Umwelt und Menschen, die bei einem bestimmten Niveau des Ungleichgewichts der Energiebilanz der Erde zu erwarten sind [16], können beschrieben und somit projiziert werden. In komplexen

Rechenmodellen werden dafür die Parameter und Prozesse der Atmosphäre auf Basis der Änderung des Strahlungsantriebs (RF) nachgebildet [8]. Darüber hinaus berücksichtigen die Modelle die Änderung der Treibhausgaskonzentrationen und der Landnutzung [9]. In vier Szenarien – sog. repräsentativen Konzentrationspfaden (RCPs) – wird die Entwicklung der Oberflächentemperatur beschrieben (RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5, die jeweils einem zusätzlichen Strahlungsantrieb in W/m^2 entsprechen) (vgl. Abbildung 3).

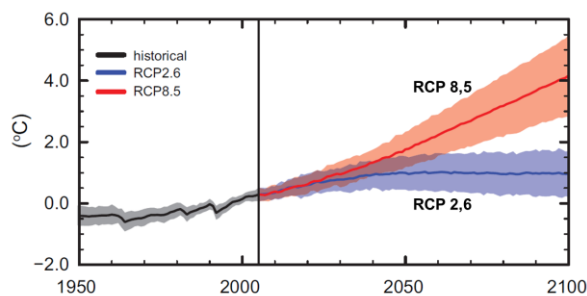


Abbildung 3: Simulierte Zeitreihen von 1950 bis 2100 für die Änderung der globalen jährlichen Mitteltemperatur relativ zum Zeitraum 1986-2005 im Szenario RCP 2.6 und RCP 8.5 (Verändert nach Kirtmann et al. 2013: [17]).

Das Szenario RCP 8.5 ist bspw. durch einen zusätzlichen Strahlungsantrieb von 8.5 W/m^2 im Jahr 2100 mit Bezug zum vorindustriellen Stand Mitte des 19. Jahrhunderts gekennzeichnet [16] [19]. Damit einhergehend wird bis 2100 eine Zunahme der globalen Oberflächentemperatur von mindestens 4°C gegenüber dem Zeitraum 1850-1900 projiziert [12]. Die Klimaprojektionen des RCP 8.5-Szenarios repräsentieren auf Grundlage der aktuellen Entwicklung der Treibhausgase in der Atmosphäre ein „business as usual“-Szenario, das gleichzeitig als realistisches „bad case“-Szenario gilt.

Welche Klimadaten werden hier ausgewertet?

Zu den quantitativen Methoden zählt die Bearbeitung und Analyse hochaufgelöster Klimabeobachtungs- und projektionsdaten, die jeweils für 30-jährige Zeiträume vorliegen. Damit wird der von der World Meteorological Organization (WMO) festgelegten Definition von Klima entsprochen. Innerhalb des RCP 8.5-Szenarios (für den Zeitraum 2031-2060) werden sog. Perzentile betrachtet, um die Bandbreite abzubilden. Das 15. Perzentil beschreibt, dass 15% der Projektionen die dargestellten oder niedrigere und 85% der Projektionen höhere Änderungsraten projizieren. Das 85. Perzentil hingegen drückt aus, dass 85% des Ensembles die dargestellten oder niedrigere Änderungsraten und 15% höhere Änderungsraten projizieren [25]. Zusammen mit

den zugrunde liegenden HYRAS-Beobachtungsdaten (Hydrologischer Rasterdatensatz) (1971-2000) und zusätzlich herangezogenen CDC-Beobachtungsdaten (1990-2019) können Klimatrends nahezu lückenlos für ganz Deutschland mit einer Auflösung von $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ im Rasterdatenformat nachvollzogen werden. Die relevantesten Klimaparameter für den Luftverkehr stellen der Niederschlag, die Meeresspiegellhöhe, die Temperatur, der Wind und Extremereignisse dar. Die vorliegenden Daten lassen allerdings lediglich Rückschlüsse auf die Parameter Niederschlag, Temperatur und Wind zu. Daher werden Annahmen über die Eintrittswahrscheinlichkeit der Änderung anhand der Literatur ergänzt.

Wie sieht das Klima der Zukunft in Deutschland aus?

Der *Niederschlag* in Deutschland liegt in der Jahressumme des Zeitraums 1971-2000 im Mittel bei 774 mm , im 15. Perzentil des RCP 8.5-Szenarios bei 767 mm und im 85. Perzentil bei 848 mm . Im HYRAS-Zeitraum sowie auch im 15. Perzentil kommen in Deutschland am häufigsten Niederschlagssummen von 500 mm bis 800 mm vor, wobei im 85. Perzentil eine deutliche Zunahme auf Werte über 800 mm verzeichnet werden kann. Die geographische Betrachtung der Jahresniederschlagsverteilung Deutschlands zeigt, dass die Mittel- und Hochgebirgsregionen sowohl im beobachteten als auch im projizierten Zeitraum die größten Niederschlagssummen aufweisen. Dabei unterscheiden sich die Ergebnisse des HYRAS-Zeitraums und die des 15. Perzentils kaum, wohingegen im 85. Perzentil insbesondere im Nordosten und Osten höhere Niederschlagssummen erkennbar sind (vgl. Abbildung 4). Tage mit Niederschlagssummen $\geq 20 \text{ mm}$, also *Tage mit Starkniederschlag*, deuten in der Projektion des 85. Perzentils auf eine Zunahme besonders in den Regionen der Nordseeküste und in Südwestdeutschland hin. In den Mittelgebirgsregionen wird sich die ohnehin höhere Anzahl im Vergleich zum Rest von Deutschland in Zukunft weiter potenzieren.

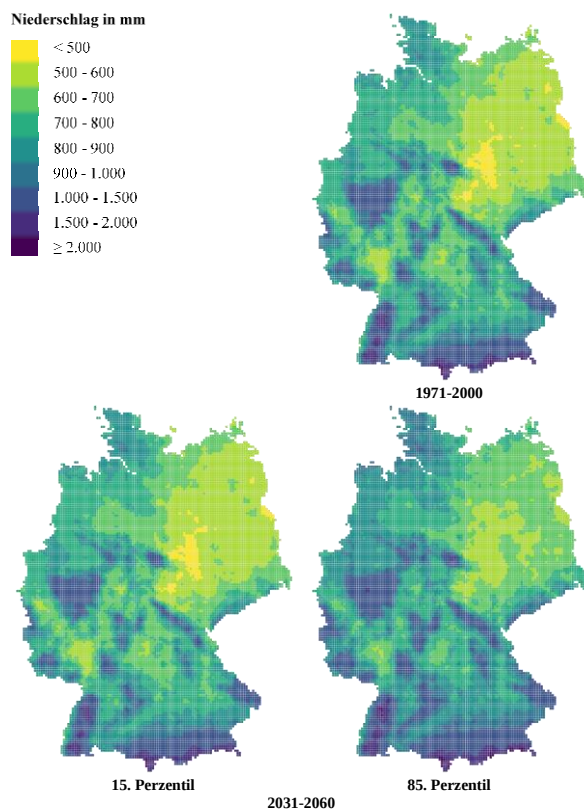


Abbildung 4: Karte der beobachteten und projizierten Niederschlagsverteilung im Jahresmittel.

Die projizierten Mittelwerte der *Temperatur* liegen im Jahresmittel bei 10 °C und 10,8 °C für das 15. und 85. Perzentil. Im Vergleich dazu liegt der Jahresmittelwert des HYRAS-Zeitraums bei 8,6 °C in Deutschland. Die Mittelrheinregion fällt bereits in den beobachteten Daten durch überdurchschnittliche Temperaturen im Jahresmittel auf. Eine Zunahme der jährlichen Durchschnittstemperatur ist teilweise für den Südosten, v.a. jedoch für den gesamten Norden zu erwarten (vgl. Abbildung 5). Dies gilt für die Szenarien beider Perzentile, stärker ausgeprägt ist dieser Effekt im 85. Perzentil.

Im Zuge des Temperaturanstiegs wird die jährliche *Anzahl der Eistage* (Höchsttemperatur geringer 0 °C) weniger. Während über den Zeitraum 1971-2000 im Mittel 21 Eistage verzeichnet wurden, sind es im 15. Perzentil des RCP 8.5-Szenario 15 Tage und im 85. Perzentil lediglich sieben Tage. Insbesondere der Westen Deutschlands ist betroffen, wohingegen der Osten v.a. in den Mittelgebirgslagen noch einige Eistage mehr verzeichnen kann. Die *Anzahl der heißen Tage* (Höchsttemperatur übersteigt 30 °C) steigt von vier Tagen pro Jahr im Durchschnitt der HYRAS-Daten auf neun Tage im 15. Perzentil und 15 Tage im 85. Perzentil an.

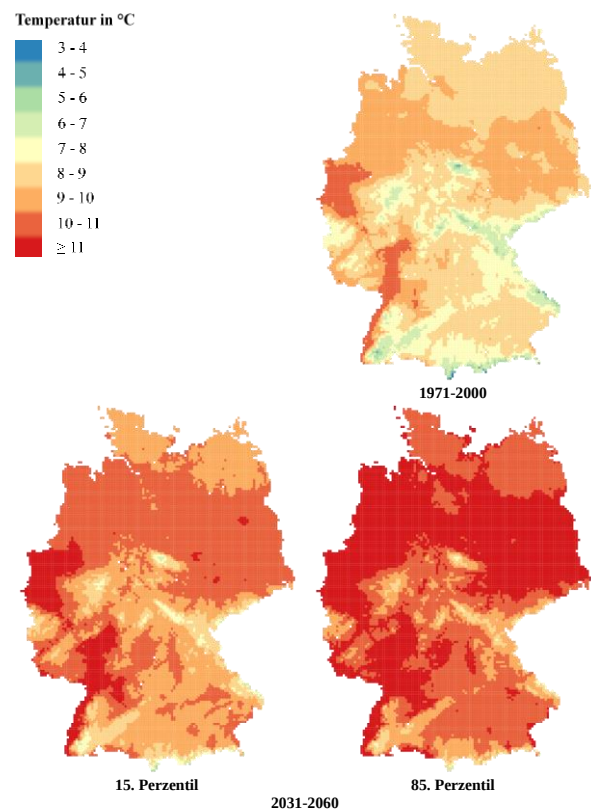


Abbildung 5: Karte der beobachteten und projizierten Temperaturverteilung im Jahresmittel.

Auffallend ist die Zunahme im Mittelrheingebiet und Ostdeutschland. Jedoch sind häufigere heiße Tage abzüglich der höheren Mittelgebirgslagen auch in großen Teilen Mittel- und Süddeutschlands zu erkennen.

Wie hat sich das Klima an den größten Flughafenstandorten bereits verändert?

Für die fünf größten deutschen Flughafenstandorte (Berlin, Düsseldorf, Frankfurt, Hamburg, München) sind weitergehende Untersuchungen der Parameter Temperatur (Fokus auf Sommermonate) und Windgeschwindigkeit- und Windrichtung (Fokus auf ganzes Jahr) durchgeführt worden.

Für die Anzahl der Tage mit *Niederschlagsmengen* ≥ 20 mm pro Tag ist in Frankfurt über 30 Jahre ein leicht positiver Trend erkennbar. Über die Analyse der Variabilität im Jahresverlauf wird deutlich, dass Starkniederschlagsereignisse besonders zwischen Mai und August auftreten.

Bereits im Zeitraum 1990-2019 kann eine *Temperaturerhöhung* an allen Standorten verzeichnet werden. Der höchste Anstieg wird in Berlin mit durchschnittlich 0,07 °C pro Jahr gemessen. Frankfurt ist insgesamt der

wärmste Standort und Hamburg der kühlsste. Im Juni ist die Temperaturzunahme am Größten. Die Anzahl der heißen Tage nimmt zu; beispielsweise ist in Frankfurt die Zunahme zwischen dem Zeitraum 2000-2009 und 2010-2019 höher als zwischen 1990-1999 und 2000-2009. Das deutet darauf hin, dass die Temperatur besonders in den letzten zehn Jahren angestiegen ist. Vergleicht man die beobachteten mit den projizierten Werten kann festgestellt werden, dass manche Städte bereits heute Temperaturen verzeichnen, die im 15. Perzentil des RCP 8.5-Szenarios erst ab 2031 projiziert werden.

Die Messungen der *Windgeschwindigkeit* zeigen, dass an allen Standorten kaum Veränderung im betrachteten Zeitraum festgestellt werden können. Lediglich in Hamburg ist eine Zunahme der Windgeschwindigkeit zu beobachten. Bzgl. der *Windrichtung* ist festzustellen, dass an allen Standorten Südwestwind dominiert. An den Standorten Frankfurt und München ist zusätzlich (Nord-) Ostwindeinfluss zu erkennen (vgl. Abbildung 6).

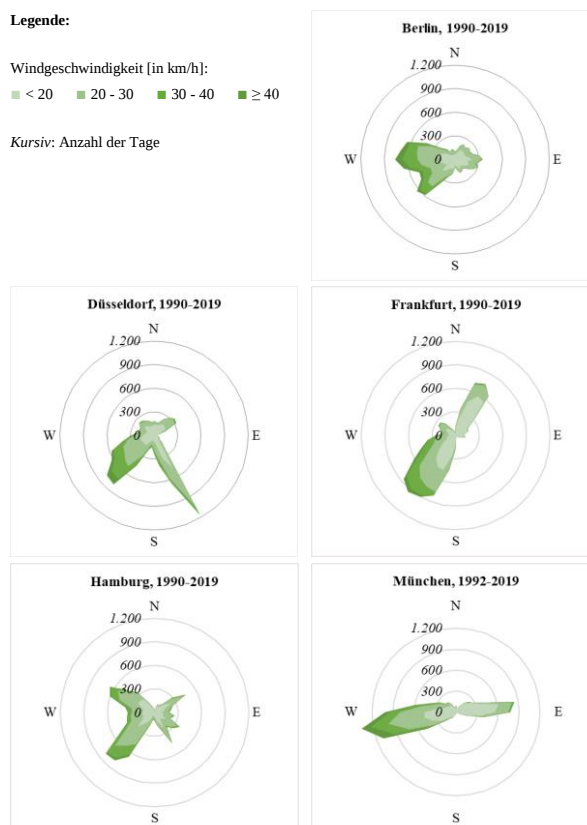


Abbildung 6: Karte der beobachteten und projizierten Windrichtung und -geschwindigkeit im Jahresmittel.

Für die Untersuchung der *Windstärke* sind besonders die beiden Klassen der Beaufort-Skala mit den höchsten Windgeschwindigkeiten, Sturm (75-117 km/h) und Orkan (≥ 118 km/h) von Interesse. Die Ergebnisse zeigen, dass

in Hamburg und Berlin höhere Windspitzen verzeichnet werden als in Frankfurt. In allen Betrachtungen ist kein Trend ablesbar. Dies gilt für alle Klassen der Windgeschwindigkeiten.

Welche erwarteten Klimaänderungen beeinflussen das ATM?

Zur Vorbereitung auf die Risikoanalyse wird der direkte Einfluss der Klimaparameter auf das jeweilige Untersuchungsgebiet auf Grundlage des RCP 8.5-Szenarios ermittelt. Dazu werden die Auswirkungen deutlich gemacht, die mittels der Klimaveränderung eintreten können. Je nach Klimaparameter können unterschiedliche Veränderungen und Eintrittswahrscheinlichkeiten bestimmt werden (vgl. Abbildung 7).



Abbildung 7: Eintrittswahrscheinlichkeiten der Änderung der relevanten Klimaparameter (gering, mittel, hoch).

Niederschlagsmengen können sich durch Veränderungen der großräumigen Strömungsmuster verändern, wenn z.B. stabile Wetterlagen länger andauern. Der DWD rechnet vorerst nicht mit einer Änderung der mittleren Jahressumme des Niederschlags. Die Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Änderung wird daher als gering eingeschätzt.

Für den *Meeresspiegel* der deutschen Küsten wird bis Ende des 21. Jahrhunderts zwar ein Anstieg von deutlich über einem Meter angegeben, allerdings fehlen in den Berechnungen der eventuelle Kollaps der Eisschilde der Arktis und Antarktis und ihre genaue Wirkung auf den Meeresspiegel [7]. Die Eintrittswahrscheinlichkeit bis Mitte des Jahrhunderts kann dennoch als hoch eingeschätzt werden.

Für die durchschnittliche *Temperatur* ist sowohl durch die beobachtete Entwicklung als auch durch Modellrechnungen mit einer weiteren Zunahme zu rechnen. Infolgedessen ist auch die Wahrscheinlichkeit hoch, dass sich Tage mit sehr hohen Temperaturen häufen und vermehrt Hitzeperioden auftreten werden. Umgekehrt ist die Wahrscheinlichkeit für weniger Eistage hoch [7].

Ein Trend über die *Geschwindigkeit des ageostrophischen Windes* (am Boden in 10 m Höhe gemessen) ist kaum erkennbar. Dazu tragen auch kleinräumige und lokale Windmuster bei, die die Umgebung und letztlich die Ergebnisse der Messstandorte beeinflussen. Daher weisen die Messreihen

große Inhomogenitäten auf und erlauben keine Aussagen über eine zukünftige Änderung. Allerdings können Rückschlüsse auf den ageostrophischen Wind durch den *geostrophischen Wind* (Höhenwind) gezogen werden, da sie miteinander verknüpft sind. In der Zeitreihe des geostrophischen Windes zeigen sich zwar multi-dekadische Schwankungen, jedoch kein Langzeittrend [7]. Die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Änderung der ageostrophischen und geostrophischen Windgeschwindigkeit wird folglich als gering eingeschätzt [7].

Die Ausprägungen von *Extremereignissen* variiert je nach Parameter. Für die Anzahl der Stürme ist der Trend der Vergangenheit nur schwach und eher abfallend, jedoch statistisch nicht signifikant [3]. Über die Entwicklungstendenzen bei Hagel, Tornado und Gewitter lassen die Beobachtungsdaten keine Aussagen zu. Allerdings können über Konvektionsparameter indirekt auf Hagelereignisse, Tornadointensitäten und die Gewitterbildung Rückschlüsse gezogen werden. Statistische Analysen dieser Parameter ergeben für die letzten 20-30 Jahre eine leichte Zunahme, jedoch sind daraus keine Aussagen zu zukünftigen Tendenzen ableitbar [7]. Bzgl. der Tornados kann es allerdings aufgrund des erhöhten Energiepotenzials in der Atmosphäre zu einer stärkeren Ausprägung kommen [7]. Daher wird eine mittlere Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Änderung angegeben.

Wie werden konkrete Risiken für die ATM-Unternehmen in der vorliegenden Arbeit identifiziert?

Die zu erwartenden klimatischen Ausprägungen haben abhängig vom jeweiligen Akteur des Luftverkehrsmanagements ein unterschiedliches Gewicht. Und auch innerhalb der Unternehmen werden erneut Schwerpunkte der beeinflussten Organisationsbereiche und Prozesse gesetzt, in denen ggf. Anpassungsmaßnahmen notwendig sind. Im Rahmen der hier beschriebenen Untersuchung werden zunächst umfassende Untersuchungen der Zuständigkeiten und Aufgaben, sowie Abschätzungen über die Wetterabhängigkeit oder -beeinflussung sowohl in die positive als auch die negative Richtung angestellt. Erreicht wird das mittels umfassender Literaturrecherchen, Expertengesprächen mit Mitarbeitern der DFS, des Flughafens Frankfurt und der Fluggesellschaft Lufthansa sowie über einen Fragebogen an die Fluglotsen der DFS. Die Ergebnisse mit Bezug zu den beiden letztgenannten Unternehmen sind in [13] nachzulesen.

Vor dem Versand des Fragebogens sind mit vielen im operativen Bereich tätigen Mitarbeitern ausführliche

Gespräche geführt worden. In den Expertengesprächen bei der DFS haben sich fünf Schwerpunktbereiche herauskristallisiert, die in ihrer Organisation, bzw. in ihren derzeitigen Abläufen, durch die sich verändernden Klimaparameter im Zuge des Klimawandels beeinflusst werden können. Dazu zählen die Kommunikation mit dem Supervisor, den angrenzenden Sektoren und Fluggesellschaften, die Routen- und Verfahrensplanung, die Personaleinsatzplanung, die Automatisierung der Systeme und die Wetterdaten des DWD.

Der Fragebogen diskutiert zwei Klimaparameter, die die Größe des Luftraums, insb. im Sinne seiner Nichtverfügbarkeit, auf unterschiedliche Weise beeinflussen [2]. Zum einen sind das die Veränderung der Intensität und Muster von Gewittern (kleinräumig, Szenario 1) und zum anderen die des geostrophischen Windes bzw. Jet Streams für Deutschland (großräumig, Szenario 2).

Innerhalb des Zeitraums vom 09.04.2020 bis 11.05.2020 sind insgesamt 18 Fragebögen beantwortet worden. Um die Umgangsweisen mit bestimmten Wetterereignissen auf einen der drei Zuständigkeitsbereiche (TWR, APP, ENR Control) zurückführen zu können, werden diese zu Anfang abgefragt. Da Fluglotsen teilweise in mehreren Bereichen tätig sind, ist in einem Fragebogen jeder der drei Zuständigkeitsbereiche ausgewählt worden und in weiteren drei Fragebögen je APP und ENR. So ergeben sich in Summe 23 Rückmeldungen mit je sieben Antworten für TWR sowie APP und neun Antworten für ENR.

Wie ist die Risikoanalyse aufgebaut?

Die Risikoanalyse kombiniert die Klimaänderungen mit der unternehmenseigenen Infrastruktur und den internen Verfahren, um daraus das Schadensausmaß abschätzen und dem entgegenwirken zu können. Ziel dabei ist es, die Betriebsabläufe konstant sicher zu gestalten, mögliche Schäden an Menschen, der Umwelt und den betriebswirtschaftlichen Umsätzen zu vermeiden und die rechtlichen Anforderungen zu erfüllen [6].

Zur Erstellung von Risikomatrizen werden aus den Änderungen der Klimaparameter die Risiken für die Unternehmen abgeleitet. Die Grundlage für die Einschätzung des Risikos stellt die Wahrscheinlichkeit der Klimaänderung dar, die angibt, inwiefern sich ein Klimaparameter bis Mitte des 21. Jahrhunderts ändert. Auf der Y-Achse kann davon ausgehend die Eintrittswahrscheinlichkeit des Risikos aufgetragen werden (gering, mittel, hoch). Diese beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass ein operatives Risiko ausgehend von der Änderung des Klimaparameters eintritt. Dem gegenüber liegt auf

der X-Achse das Schadensausmaß (gering, mittel, hoch), welches die Auswirkungen für das Unternehmen bei Eintritt des Risikos angibt. Jedes Risiko wird mit einem Kürzel versehen; die Anfangsbuchstaben spiegeln dabei den sich verändernden Klimaparameter wider (z.B. EHi1 = 1. Risiko aus Extremereignis Hitzeperiode).

Was sind die Erkenntnisse aus der Risikoanalyse für die DFS?

Über die Zusammenfassung der Ergebnisse aus den o.g. Expertengesprächen, dem Fragebogen und der Literaturrecherche wurden Risikoanalysen für die operative Flugverkehrskontrolle sowie die Infrastruktur der DFS durchgeführt. Bei der Betrachtung der operativen Flugverkehrskontrollen wurden aufgrund der Ähnlichkeit der Auswirkungen des Wetters TWR und APP zusammengefasst (vgl. Abbildung 8). Für TWR, APP und ENR der DFS liegen keine Risiken im Bereich des mittleren oder hohen Schadensausmaßes vor, lediglich in einem Bereich mit geringem Schadensausmaß).

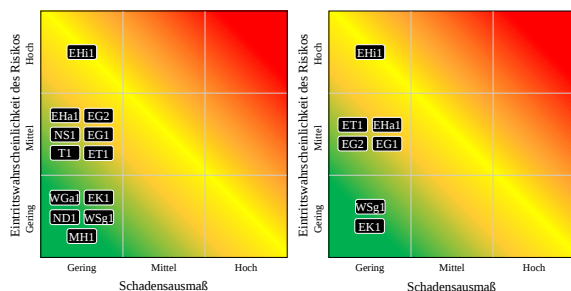


Abbildung 8: Risikomatrix Tower und Approach Control (links); Risikomatrix En Route Control (rechts).

Für die Bewertung der Wetter- und Klimaresistenz des technischen Equipments werden zunächst alle von der DFS betriebenen Geräte zusammengestellt und auf ihre Toleranz in Bezug auf die mögliche Veränderung der Klimaparameter untersucht. Die Infrastruktur der DFS lässt sich dabei in die Bereiche der CNS-Infrastruktur im Innen- und Außenbereich, sowie in die Gebäude (Tower, Center, Unternehmensstandorte) unterteilen. Während die technischen Geräte im Außenbereich einen direkten Kontakt mit dem Wetter haben, werden die Geräte in Innenräumen und die Raumtemperatur der Gebäude über die Klimatisierung in einem optimalen Betriebsklima gehalten. Daher können wesentlich mehr Risiken für die Infrastruktur identifiziert werden, die in direkten Kontakt mit dem Wetter kommt als jene, die in Gebäuden und Containern untergebracht sind (vgl. Abbildung 9).

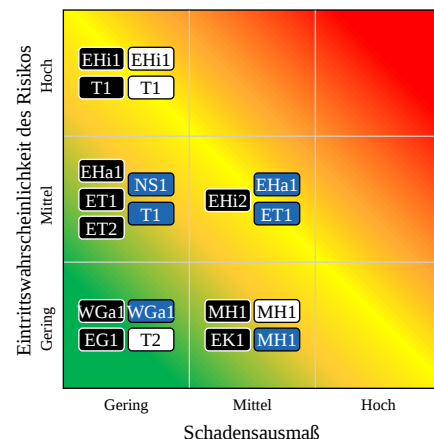


Abbildung 9: Risikomatrix der CNS-Infrastruktur und Gebäude (Außenanlagen schwarz, Innenbereich weiß, Gebäude blau).

Im Vergleich zu den Risikomatrizen der operativen Flugverkehrskontrolle können hier auch Risiken mittleren Schadensausmaßes festgestellt werden. Detaillierte Ergebnisse – auch in Bezug auf die Ergebnisse der Risikoanalyse für die nationalen ATM-Partner – können in [13] nachgelesen werden.

Welche Kompensationsmaßnahmen kann die DFS ergreifen?

Der Austausch mit operativen Mitarbeitern zeigt, dass es zur Kompensation grundsätzlich keine wetter-spezifischen Verfahren gibt, sondern diverse Mittel und Möglichkeiten bei der Fluglotsentätigkeit existieren [1]. Die Maßnahmen werden also nicht wetterereignis-spezifisch, sondern universal einsetzbar sein, je nach Größe des nicht verfügbaren Luftraums. Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen eine Übersicht verschiedener Maßnahmen über einen Zeitraum von 12 Jahren für zwei verschiedene Szenarien (s. o. Szenario 1: Gewitter/ kleinräumig, Szenario 2: Jet Stream/ großräumig). Die Maßnahmen IDs auf der Y-Achse sind in fünf zuvor identifizierte betroffene Bereiche eingeteilt worden (z.B. KM1 = 1. Maßnahme des Bereichs Kommunikation).

Im Vergleich zum Szenario 1 (s. Abbildung 11) sind für das Szenario 2 (s. Abbildung 12) weniger Maßnahmen identifiziert worden. Dennoch sind in beiden Szenarien in allen fünf Bereichen Anpassungen festgestellt worden.

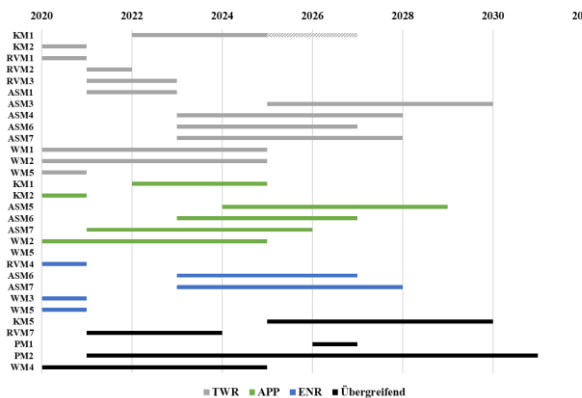


Abbildung 10: Mögliche Startzeitpunkte und Umsetzungszeiträume der identifizierten Maßnahmen des Szenario 1.

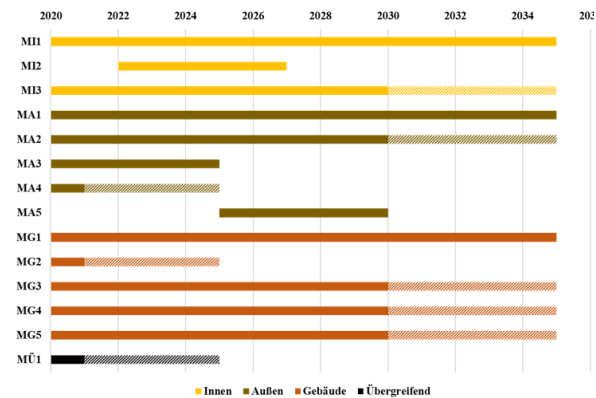


Abbildung 12: Startzeitpunkt und Umsetzungszeitraum der identifizierten Infrastrukturmaßnahmen der DFS.

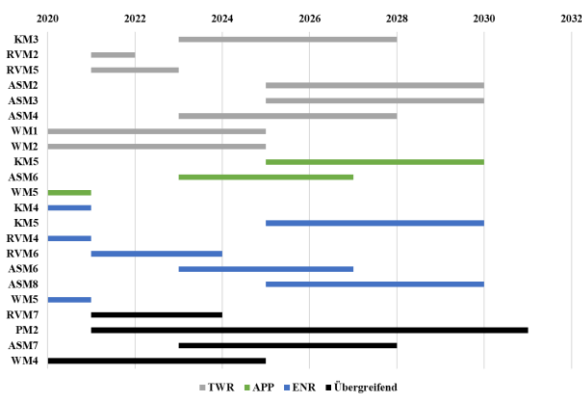


Abbildung 11: Mögliche Startzeitpunkte und Umsetzungszeiträume der identifizierten Maßnahmen des Szenario 2.

Anhand von mindestens einem exemplarischen System der innen- wie der außenstehenden CNS-Infrastruktur sowie an Gebäuden ist mittels der Risikoanalyse die Widerstandsfähigkeit gegenüber verschiedenen Klimaparametern getestet worden. Daran anschließend werden Maßnahmen identifiziert, die die Funktionalität und Sicherheit auch bei Klimaveränderungen garantieren sollen. Die Vorschläge resultieren aus der Literatur und aus Expertengesprächen.

Welche Kompensationsmaßnahmen können die nationalen ATM-Partner ergreifen?

Auf Grundlage der identifizierten Betriebsbereiche, die aufgrund sich verändernder Klimaparameter potentiell Risiken ausgesetzt sind, werden Gegenmaßnahmen entwickelt, die auf der einen Seite die Sicherheit der Infrastruktur und des Personals und auf der anderen Seite einen nahezu gleichbleibenden Durchsatz bzw. eine stabile Kapazität gewährleisten sollen. Die Maßnahmen wurden auf Grundlage von Literatur und Expertengesprächen entwickelt und nicht mit einem Zeitrahmen versehen. Details sind in [13] nachzulesen.

Welche Kompensationsmaßnahmen können generell ergriffen werden?

Zusammenfassend können einige Maßnahmen festgehalten werden, durch deren Implementierung alle Partner des ATM in Deutschland den Folgen des Klimawandels begegnen können. Unternehmensintern ist es empfehlenswert, stets aktualisierte Klima-Risikokataloge zu führen, um sicherzustellen, dass die technische Ausrüstung und die unternehmenseigene Strategie angemessen auf die sich ändernden Wetterbedingungen reagieren können. Zum Schutz der Infrastruktur sollten gerade bei Neubauten die aktuellen Klimaprojektionen miteinbezogen werden, damit angepasste Materialien eingesetzt und angemessene Konstruktionsstandards angewandt werden [15]. Insbesondere bei bereits bestehenden Infrastrukturen kann es empfehlenswert sein, die Inspektions-, Reparatur- und Wartungsroutinen anzupassen [20]. Dazu ist mehr Personal für eine häufigere Kontrolle der ATC-Systeme, Rollwege, Start- und Landebahnen und der Flugzeuge notwendig. Und auch dem Bewusstsein des Personals kommt in der Umsetzung von neuen Strategien eine bedeutsame Rolle zu. Denn eine erfol-

greiche Adaption ist maßgeblich vom unternehmens-internen Dialog mit den Mitarbeitern, von Schulungen und Weiterbildungen, sowie von der Möglichkeit zur aktiven Partizipation abhängig. All das sind Voraussetzungen für technische Anpassungen und organisatorische Erweiterungen von (Notfall-) Plänen, die vor allem bei extremen Wetterereignissen erforderlich sein können [22].

Unternehmensübergreifend ist die Zusammenarbeit der ATM-Akteure entscheidend dafür, dass die spezifischen Adaptionsziele erfolgreich umgesetzt werden können. Dafür ist insbesondere eine gemeinsame Datenbasis notwendig, um ausgehend davon Maßnahmen ableiten zu können. Zur Erreichung der gemeinsamen Datengrundlage sollte in die meteorologische Infrastruktur und Kompetenz der Mitarbeiter investiert werden. Des Weiteren sollte der Austausch von flugzeuggestützten, bodengestützten und Fernerkundungsdaten gewährleistet werden. Und nicht zuletzt ist es für die langfristige Planung sehr wichtig, Ergebnisse aus der Wissenschaft noch schneller in die Praxis zu übertragen, damit diese sich der zunehmenden Variabilität früher, wirtschaftlicher und langfristiger anpassen kann [11].

Was können nächste Schritte der DFS sein?

Die DFS sollte Priorisierungen der im Rahmen dieser ersten Untersuchung erhobenen Maßnahmen vornehmen, um diese zeitlich den aktuellen Umständen anzupassen. Dabei kann die Priorisierung über die damit einhergehenden Kosten, der Änderungsgeschwindigkeit der relevanten Klimaparameter und der daraus resultierenden Dringlichkeit ermittelt werden. Zur internen Bearbeitung der Thematik kann es sinnvoll sein, in den betroffenen Bereichen der DFS Mitarbeiter auszuwählen, die die Maßnahmen ihres Bereichs verwalten und diese während der Umsetzung betreuen. Nicht zuletzt ist eine ständige Überprüfung der wissenschaftlichen Grundlagen des anthropogenen Klimawandels wichtig, mit Hilfe derer die Risiken und Maßnahmen auf dem aktuellen Stand gehalten werden.

Resümee und Ausblick

Der anthropogene Klimawandel wird seit vielen Jahrzehnten wissenschaftlich untersucht. Dabei wird die globale Erwärmung auf die anthropogen verursachte Anreicherung strahlungsaktiver Spurengase in der Atmosphäre zurückgeführt. Verschiedene Klimamodelle projizieren ein Fortschreiten und eine Verstärkung dieses Trends im Laufe des 21. Jahrhunderts durch diverse Rückkopplungsprozesse. Die Auswirkungen können bereits heute deutschlandweit aufgezeichnet werden, variieren jedoch auf regionaler und lokaler Ebene je nach

Art des Klimaparameters bzw. Wetterereignisses. Insbesondere für Unwetter- und Extremereignisse wird eine potenzielle Zunahme der Häufigkeit und Größe erwartet. Gleichzeitig nimmt die Vorhersagbarkeit von ebendiesen kleinräumig und kurzfristig auftretenden Wetterereignissen ab. Der Klimawandel und die damit einhergehenden Unsicherheiten stellen ein zunehmendes Risiko für die Akteure des ATM in Deutschland dar. Da sich die Planung, Konstruktion und Nutzung des ATM über Jahrzehnte erstreckt, ist es umso wichtiger, frühzeitig Entscheidungen für passende Vorsorge-maßnahmen zu treffen, damit das System „Luftverkehr“ auch in Zukunft sicher bleibt.

Mit diesem Ziel ist hier der ATM-Sektor in Deutschland – speziell die Deutsche Flugsicherung, der Flughafen Frankfurt und die Fluggesellschaft Lufthansa – genauer untersucht worden. Die Verbindung der aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnisse mit dem operativen Fachwissen und der anschließenden Umsetzung stellte dabei eine besondere Herausforderung dar. Dabei ist es insbesondere wichtig das Bewusstsein der am Luftverkehr beteiligten Akteure für die langfristigen Veränderungen zu sensibilisieren. Nur so kann für die Zukunft gewährleistet werden, dass mittels einer schnellen Kommunikation, standardisierter Prozesse und Verfahren sowie flexibler Vorgehensweisen auf spontane und lokale Wetterereignisse reagiert werden kann und gleichzeitig die Kapazität weitestgehend erhalten bleibt. Dies im deutschen Luftraum – einem der verkehrsreichsten der Welt – zu erreichen, erfordert die Erfassung möglicher klimatischer Veränderungen mittels Klimaprojektionen. Anhand dieser werden Abschätzungen darüber möglich, welche Auswirkungen zu erwarten sind, welche spezifischen Risiken diese mit sich bringen und welche Adaptionsstrategien die Resilienz des Systems erhöhen können. Eine genaue Betrachtung möglicher Auswirkungen auf jeden Akteur, das gesamte ATM in Deutschland und die Entwicklung von Kompensationsmaßnahmen ist essenziell und umso wirksamer, je frühzeitiger damit begonnen wird und je progressiver und konsequenter diese umgesetzt werden. Die Kooperation der einzelnen Unternehmen ist insbesondere bei komplexen Wettersituationen erfolgs-entscheidend, da das Potenzial des Gesamtsystems unmittelbar von den Leistungen der Einzelnen abhängt.

Disclaimer

Die Ergebnisse der Untersuchungen basieren auf einem regulären Flugverkehrsaufkommen und berücksichtigen nicht die Einschränkungen aufgrund der COVID-19-Pandemie. Für jeden Untersuchungsbereich der CNS-Infrastruktur der DFS sind exemplarische Beispiele

herangezogen worden. Die Untersuchung der Flugverkehrskontrolle ist nicht allumfassend, da Experteninterviews nicht die Meinungen und Bedürfnisse aller darstellen. Die veranschlagten Umsetzungszeiträume sind ebenso als Impuls zu betrachten.

Es handelt sich bei den Ergebnissen um eine Analyse aus der Außenperspektive, die in Zusammenarbeit mit der Flugsicherung und weiteren Luftfahrtunternehmen eingehend geprüft werden kann.

Abkürzungsverzeichnis

APP	Approach Control
ATM	Air Traffic Management
ATC	Air Traffic Control
CAT	Clear Air Turbulence
Cb	Cumulonimbuswolke
CDC	Climate Data Center
CNS	Communication, Navigation, Surveillance
DWD	Deutscher Wetterdienst
ENR	En Route Control
FABEC	Functional Airspace Block Europe Central
FL	Flight Level
HYRAS	Hydrologischer Rasterdatensatz
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JJA	Juni, Juli, August
ppm	parts per million
RCP	Representative Concentration Pathways
RF	Radiative Forcing
TWR	Tower Control
WMO	World Meteorological Organization

Referenzen

- [1] L. T. Bendixen, (persönliche Kommunikation, 7. Juli 2020)
- [2] M. Biedermann (persönliche Kommunikation, 2. Juli 2020)

- [3] Brauch, J., Fuchs, P., Leps, N. & Walter, A. (2019). Potentielle Forschungsthemen und Stand des DWD hinsichtlich Klimaveränderungen mit Bezug Luftfahrt. Vortrag. Karlsruhe. (28.10.2019).
- [4] Brönnimann, S. (2018). Klimatologie. Bern. Haupt Verlag.
- [5] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2017). Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen. Feinkonzept des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertenetzwerk Wissen – Können – Handeln.
- [6] Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (2017). Schutz Kritischer Infrastrukturen – Risiko- und Krisenmanagement Leitfaden für Unternehmen und Behörden.
- [7] DWD (2017). Nationaler Klimareport. Offenbach am Main.
- [8] DWD (2020a). Klimaszenarien (Zukunft). Aufgerufen am 02.06.2020. Verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimaszenarien/klimaszenarien_home_node.html
- [9] DWD (2020b). RCP-Szenarien. Aufgerufen am 03.06.2020. Verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimaszenarien/rcp-szenarien_node.html
- [10] FABEC (2018a). Aviation Facts – Changing Weather Patterns.
- [11] FABEC (2018b). Weather Volatility – Adapting To The New Normal. Air Traffic Management, S.1-8.
- [12] Field, C. B., Barros, V. R., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Ebi, K. L., Estrada, Y. O., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., MacCracken, S., Mastrandrea, P. R. & White, L. L. (2014). Summary for policymakers. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (S. 1-32).
- [13] Heering, S. M. (2020). Kompensation der Auswirkungen des Klimawandels auf die operative Flugverkehrskontrolle und das Luftverkehrsmanagement in Deutschland. Masterarbeit, Johannes-Gutenberg-Universität Mainz.

- [14] ICAO (2016). Air Traffic Management. Procedures for Air Traffic Services. Doc 4444.
- [15] ICAO (2018). Climate Adaptation Synthesis. Montréal.
- [16] IIASA (2014). Representative Concentration Pathways Database. Aufgerufen am 03.06.2020. Verfügbar unter: <https://iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/TransitionstoNewTechnologies/RCP.en.html>
- [17] Kirtman, B., Power, S. B., Adedoyin, J. A., Boer, G. J., Bojariu, R., Camilloni, I., Do-Blas-Reyes, F. J., Fiore, A. M., Kimoto, M., Meehl, G. A., Prather, M., Sarr, A., Schär, C., Sutton, R., Van Oldenborgh, G. J., Vecchi, G. & Wang, H. J. (2013). Near-term Climate Change: Projections and Predictability. In T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P. M. Midgley (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. 953-1028).
- [18] Meyr, J., Stechemesser, K. & Günther, E. (2014). Herausforderung Klimawandel?! Die Zukunft neu denken mit der Szenarioanalysemethode. In Mohammadzadeh, M., Bardt, H., Biebeler, H., Chrischilles, E. & Striebeck, J. (Hrsg.), *Unternehmens-strategien zur Anpassung an den Klimawandel Theoretische Zugänge und empirische Befunde. Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten* (S. 51-62). München.
- [19] Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P. & Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, S. 747-756.
- [20] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2012). *Airport Climate Adaptation and Resilience. A Synthesis of Airport Practice*. Washington.
- [21] NOAA (2020). Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide. Aufgerufen am 13.07.2020. Verfügbar unter: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>
- [22] Prutsch, A., Felderer, A., Balas, M., König, M., Clar, C. & Steurer, R. (2014). *Methods and Tools for Adaptation to Climate Change. A Handbook for Provinces, Regions and Cities*. Wien.
- [23] Schönwiese, C.-D. (2013). *Klimatologie*. Stuttgart. Ulmer Verlag.
- [24] Sirocko, F., Kromer, B. & Wernli, H. (2012). Ursachen von Klimavariabilität in der Vergangenheit. In Sirocko, F. (Hrsg.), *Wetter, Klima, Menschheitsentwicklung: von der Eiszeit bis ins 21. Jahrhundert* (S. 53-59). Darmstadt.
- [25] Umweltbundesamt (2017). *Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen. Empfehlungen der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassung an den Klimawandel der Bundesregierung*.

Abstände bei kapazitätsoptimaler Pistennutzung

Dr. Jens Konopka

Einleitung

Moderne Flugverkehrskontrolle ist häufig geprägt durch das Herstellen einer Balance zwischen nicht zur Disposition stehenden Sicherheitsanforderungen und der Zurverfügungstellung ausreichender Kapazität, um den Bedarf an Verkehr in der Luft und an den Flughäfen abzuwickeln [1] - [3].

Ein wesentliches Element, um Sicherheit zu gewährleisten sind Staffellingsminima, deren Größe abhängig von der Navigations- und Überwachungsinfrastruktur, den Umgebungsbedingungen sowie den involvierten Luftfahrzeugen sind. Staffellung kann durch Einhaltung eines vertikalen oder horizontalen Mindestabstands aber auch durch einen zeitlichen Abstand hergestellt werden [4].

Da Geschwindigkeiten und Beschleunigungen von Flugzeugen sehr unterschiedlich ausfallen können und Luftverkehr zudem von sich zeitlich und räumlich ändernden Windverhältnissen beeinflusst wird, ist es nicht möglich regelmäßig exakt die vorgeschriebenen Mindestabstände herzustellen, was jedoch aus Sicht der Kapazität erstrebenswert wäre.

Besonders herausfordernd ist die Sicherstellung der Staffellung im Anflug, wo die Luftfahrzeuge stark abgebremst werden müssen, was mit geringer werdenden Abständen einhergeht, und wo sie sich in wechselnden Richtungen relativ zum vorherrschenden Wind bewegen. Das von der Bundesregierung im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms V [5] geförderte Projekt FUTURE (Fluglotsen-Unterstützung Endanflug) [6], [7] beschäftigt sich unter anderem mit der Entwicklung von Unterstützungssystemen, die den Fluglotsen die Erfüllung dieser Aufgabe erleichtern sollen.

Da sich festgelegte Abstände lediglich mit einer statistischen Unsicherheit herstellen lassen, ist ein Puffer erforderlich, damit im Falle von Abweichungen zu kleineren Werten hin, das erlaubte Minimum keinesfalls unterschritten wird bzw. die zusätzlichen Maßnahmen, die vom Lotsen dann ergriffen werden müssen, wenn sich eine solche Situation abzeichnet, nur selten auftreten.

Eine zentrale Frage ist dabei, wie groß der Puffer zu wählen ist, damit eine optimale Balance zwischen der erreichbaren Kapazität und der Häufigkeit solcher Sondersituationen gewährleistet wird. In vorliegendem

Artikel wird ein einfaches analytisches Modell vorgestellt, das es erlaubt, diese Frage unter gewissen Randbedingungen und Annahmen zu beantworten.

Engpass Landebahn

Die Pistensysteme der Verkehrsflughäfen stellen schon einfach deshalb besondere Herausforderungen dar, da dort der Verkehr von zwei bzw. drei Dimensionen auf eine kanalisiert werden muss [8]. Dieser Umstand ist selbst im Jahr 2020 mit seiner beispiellosen globalen Pandemiesituation und drastischen Einbrüchen insbesondere im Passagierverkehr [9] relevant, da die Nachfrage nach Kapazität an einigen Luftfrachtdrehkreuzen nach wie vor besteht bzw. sogar anzieht [10].

Die Bedingungen an den Flughäfen in Deutschland und erst recht weltweit können sehr verschieden ausfallen. Die geographische Lage, die vorherrschenden Wetterbedingungen, die Art des Luftverkehrs und die Zusammensetzung der an dem jeweiligen Flughafen operierenden Flotten, tägliche oder saisonale Nachfrageverläufe sind Beispiele dafür, dass Einzelfallbetrachtungen erforderlich und Generalisierungen nur auf einem sehr hohen Abstraktionsniveau möglich sind.

Zudem spielt es eine große Rolle, welcher Verkehr auf der Piste abgewickelt wird, nur Starts, nur Landungen oder wird die Piste im sog. Mixed Mode betrieben, bei der sowohl Starts als auch Landungen auf der Bahn durchgeführt werden. In vorliegendem Artikel werden vereinfachend nur Landungen betrachtet, die eine ähnliche Aufsetzgeschwindigkeit haben und für alle Paare der gleiche Staffellingsmindestwert gilt.

Ein einfaches mathematisches Modell wird vorgestellt, das einen Zusammenhang herstellt zwischen der Anzahl an Flugbewegungen und der Anzahl zu erwartender staffellingsbedingter Fehlanflüge pro Zeiteinheit und so die Abschätzung der Größenordnung des kapazitätsoptimalen Staffellingspuffers ermöglicht. Die Robustheit des Modells gegenüber der Variation von Modellparametern wird erörtert und Möglichkeiten zur Erweiterung des Modells vorgestellt.

Einfaches Landesequenzmodell

Erste Analysen der Kapazität von Landebahnen gehen zurück bis auf die 1950er Jahre [11]. Auch wurden die Unsicherheiten z.B. in [12] und Sicherheitsaspekte, hier vor allem das Kollisionsrisiko [13], bereits in früheren

Studien berücksichtigt. Das hier vorgestellte Modell verknüpft Kapazitäts- und Sicherheitsaspekte in einer geschlossen darstellbaren Form, so dass ein praktisch erreichbares Kapazitätsoptimum berechnet werden kann. Das Modell basiert auf den nun zu erläuternden Annahmen.

Auf eine nur für Landungen benutzte Piste fliegen stetig Flugzeuge mit ähnlichen Eigenschaften an. Die Landegeschwindigkeit v gegenüber dem Boden variiert nur geringfügig zwischen einzelnen Luftfahrzeugen. Die vorgeschriebene Mindeststaffelung zwischen je zwei Landungen sei $d_{\min}$, dann beträgt das minimale zeitliche Interarrivalintervall

$$t_{\min} = \frac{d_{\min}}{v}. \quad (1)$$

Staffelungsminima sind in der Regel als vertikale und horizontale Abstände definiert, für die Berechnung von Landeraten oder auch eine spätere Erweiterung zur Berücksichtigung unterschiedlicher Staffelungswerte zwischen zwei Flugbewegungen sowie von Abflügen, ist eine zeitliche Betrachtung zweckmäßig.

Wie die Herstellung eines bestimmten lateralen Abstandes ist auch das Erreichen eines vorgegebenen zeitlichen Interarrivalintervalls mit einer gewissen Unsicherheit behaftet [14]. Zu diesen Schwankungen tragen unterschiedlichste Effekte bei: Wind, Flugeigenschaften der jeweiligen Flugzeugmuster, der Zeitpunkt zu dem Lotsen Kontrollanweisungen erteilen, Reaktionszeiten der Piloten. Es handelt sich nicht um systematische Abweichungen.

Bei Betrachtung einer großen Zahl ähnlicher Ereignisse können diese Abweichungen somit als zufällig betrachtet werden. Da eine ganze Reihe von Einzeleffekten beitragen, kann in Anlehnung an den zentralen Grenzwertsatz (engl. Central Limit Theorem) [15] von einer Gaußverteilung der letztlich resultierenden Interarrivalintervalle ausgegangen werden. Die Verteilung der Interarrivalintervalle ist somit durch zwei Parameter gekennzeichnet, einem mittleren zeitlichen Abstand zwischen zwei Flugbewegungen τ und einer Schwankungsbreite σ um diesen Mittelwert

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-\tau)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (2)$$

Bei einer von Null verschiedenen Schwankungsbreite σ hat die Hälfte aller Paarungen einen zeitlichen Abstand, der geringer ist als der Mittelwert τ . D.h. gegenüber dem minimal zulässigen zeitlichen Abstand $t_{\min}$ muss ein um den zeitlichen Puffer b erhöhter zeitlicher Abstand

$$\tau = t_{\min} + b \quad (3)$$

angestrebt werden, damit möglichst wenige Paarungen vorkommen, deren zeitlicher Abstand geringer als das zulässige Minimum $t_{\min}$ ist. Würden alle aufeinanderfolgenden Luftfahrzeuge paarweise mit einem zeitlichen Abstand von τ landen, dann ergäbe sich eine stündliche Anzahl von Landungen

$$N_{\text{ideal}} = \frac{3600\text{s}}{\tau} = \frac{3600\text{s}}{t_{\min} + b}. \quad (4)$$

Die dunkelgrüne Kurve in Abbildung zeigt die Modellfunktion beispielhaft für $d_{\min} = 3$ NM, $v = 140$ kt, $b \approx 10$ s und $\sigma = 5$ s.

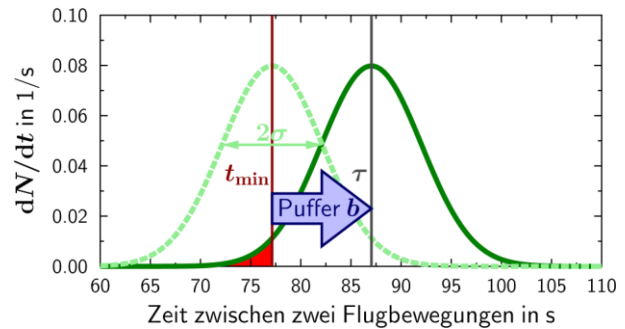


Abbildung 1: Einfaches Modell zur Verteilung der Zeit zwischen zwei Landungen bei hohem Demand (dunkelgrüne Kurve). Die mittlere Zeit τ ist gegenüber der zum Staffelungsminimum korrespondierenden Zeit $t_{\min}$ um einen Puffer b verschoben. Damit ergibt sich ein Anteil drohender Staffelungsunterschreitungen, der der rot markierten Fläche unter der Kurve entspricht.

In der Praxis sind diese Verteilungen unter den gegebenen Voraussetzungen nur schwer zu ermitteln. Der Strom der Luftfahrzeuge ist inhomogen, die Nachfrage schwankt, Nutzung der Piste im Mixed Mode oder für kreuzenden Rollverkehr, Inspektionsfahrten etc. beeinflussen empirisch gewonnene Verteilungen 0 - [18].

Mit der Modellfunktion aus Gleichung 2 lässt sich der Anteil der Luftfahrzeuge berechnen, die ohne Lotseneingriff, z.B. durch Anweisen eines Fehlanflugs oder Radarvectoring, mit einer geringeren als der vorgeschriebenen Mindeststaffelung landen würden

$$p_{\text{MA}} = \int_0^{t_{\min}} f(t) dt. \quad (5)$$

Die N_{ideal} Flugbewegungen pro Stunde aus Gleichung 4 lassen sich jedoch nur realisieren, wenn keiner der Anflüge einen Fehlanflug durchführen muss. Die Wahrscheinlichkeit eines staffelungsbedingten Fehlanflugs wurde in Gleichung 5 berechnet, so dass die Anzahl der stündlichen staffelungsbedingten Fehlanflüge

$$N_{\text{MA}} = N_{\text{ideal}} p_{\text{MA}} \quad (6)$$

beträgt und somit die erreichbare Anzahl von Landungen als

$$N = N_{\text{ideal}} - N_{\text{MA}} = N_{\text{ideal}}(1 - p_{\text{MA}}) \quad (7)$$

angeben lässt.

Mit der Gaussfunktion aus Gleichung 2 lässt sich p_{MA} leicht berechnen

$$\begin{aligned} p_{\text{MA}} &= \int_0^{t_{\text{min}}} f(t) dt \\ &\approx \int_{-\infty}^{t_{\text{min}}} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-t_{\text{min}}-b)^2}{2\sigma^2}\right) dt \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{b}{\sqrt{2}\sigma}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

wobei erfc die komplementäre Fehlerfunktion ist [19].

Kapazitätsoptimaler Staffelpuffer

Aus Gleichung 4 ist ersichtlich, dass N_{ideal} mit wachsendem Puffer b allmählich fällt. Der Anteil der staffelungsbedingten Fehlanflüge, entsprechend der roten Fläche unter der Kurve in Abbildung 3 hingegen wird sehr schnell kleiner, je weiter die Verteilung durch einen größeren Puffer zu längeren Zeiten verschoben wird. Somit sinkt auch N_{MA} rasch mit wachsendem b . Damit muss die Anzahl der realisierbaren Landungen pro Stunde N bei einer Puffergröße ein Maximum aufweisen.

Abbildung 2 zeigt N , N_{ideal} und N_{MA} als Funktion der Puffergröße für dieselben Parameter, die auch für Abbildung 3 verwendet wurden. N weist hierbei bei einem Puffer von knapp 10 s ein Maximum mit etwas mehr als 40 Landungen pro Stunde auf, die gemäß dieses Modells realisiert würden, wenn pro Stunde ungefähr ein staffelungsbedingter Fehlanflug toleriert würde.

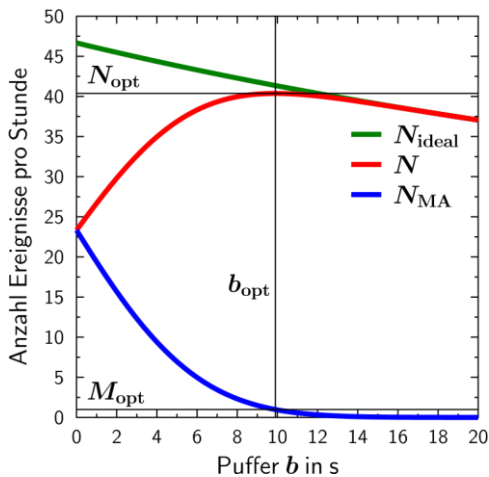


Abbildung 2: Bestimmung des kapazitätsoptimalen Staffelpuffers b_{opt} mit einem einfachen Modell. Die Differenz der idealerweise erreichbaren Anzahl an Flugbewegungen N_{ideal} (dunkelgrüne Linie) und der Anzahl der staffelungsbedingten Fehlanflüge (blaue Linie) ergibt die rote Kurve, die bei einem Puffer von knapp 10 s ein Maximum aufweist.

Einfluss auf Sicherheit und Kapazität

Ein Puffer von einer Sekunde bei einer Geschwindigkeit von 140 kt entspricht einer Flugstrecke oder zusätzlichen Distanz von 72 m, so dass der kapazitätsoptimale Puffer von 10 s ungefähr 0.4 NM kurz vor der Landung entspricht. Nun kann es jedoch aus anderen Gründen erstrebenswert sein, die Anzahl der Fehlanflüge sehr gering zu halten. Möglicherweise reduziert der eine Fehlanflug pro Stunde die erreichbare Zahl an Landungen nicht nur um eine Landung, sondern reduziert die Kapazität darüber hinaus, weil das Abarbeiten beim Fluglotsen noch mehr Ressourcen bindet als zwei normale Anflüge. Oder ein Sicherheitsziel führt zu einem geringeren Zielwert für solche Fälle.

Um den Einfluss eines größeren Puffers besser als in Abbildung 2 beurteilen zu können ist in Abbildung 3 der im Vergleich zum Optimum zusätzliche Kapazitätsverlust und die Anzahl der stündlichen staffelungsbedingten Fehlanflüge als Funktion des Puffers b aufgetragen. Eine Erhöhung des Puffers um weitere 4 s verringert die Anzahl N der Flugbewegungen pro Stunde um eins, ein kapazitätsbedingter Fehlanflug wäre dann statistisch aber nur noch alle zehn Stunden zu erwarten, eine weitere Sekunde auf den Puffer würde diese Rate noch einmal halbieren.

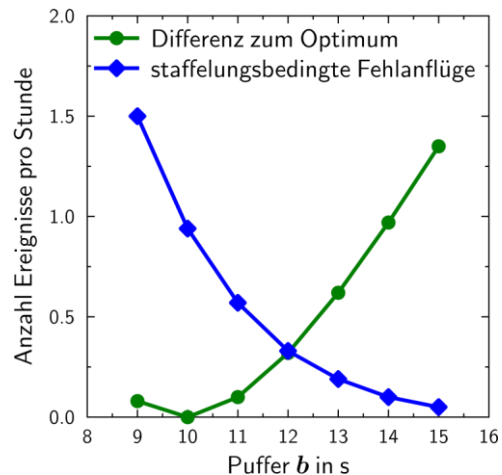


Abbildung 3: Einfluss des Puffers auf die Rate staffelungsbedingter Fehlanflüge (blaue Rauten) und die Differenz zum Kapazitätsoptimum des Modells (grüne Kreise). In diesem Beispiel ergibt die Erhöhung des Puffers um ca. 5 s auf 14 s eine Einbuße von einer Bewegung pro Stunde bei gleichzeitiger Reduktion der Rate von staffelungsbedingten Fehlanflügen auf ca. ein Zehntel des Wertes im Kapazitätsoptimum.

Trotz seiner Einfachheit liefert das Modell belastbare Aussagen hinsichtlich der Existenz eines solchen Kapazitätsoptimums und wie der beeinflussbare Puffer auf Sicherheit und Kapazität wirkt. Die genauen

Zahlenwerte sind abhängig von den gewählten Modellparametern, wie zum Beispiel der Fluggeschwindigkeit bzw. der Verteilung der zeitlichen Abstände zwischen je zwei Flugbewegungen.

Abbildung 4 illustriert, welchen Einfluss die Breite σ der Verteilung der zeitlichen Abstände auf das Kapazitätsoptimum hat. Es ist unmittelbar einleuchtend, dass eine schmalere Verteilung kleinere Puffer ermöglichen wird, was wiederum eine höhere Kapazität bedingen würde bei einer geringeren Rate an staffelungsbedingten Fehlanflügen. In dem betrachteten Bereich von $\sigma = 2$ s bis 8 s steigt der Staffelungspuffer im Kapazitätsoptimum nahezu linear von $b_{\text{opt}} = 5$ s auf 14 s an. Die Anzahl der erreichbaren Flugbewegungen pro Stunde sinkt ebenfalls näherungsweise linear von 43.6 auf nur noch 37.9.

Während bei einer engen Verteilung ($\sigma = 2$ s) nur 0.4 staffelungsbedingte Fehlanflüge pro Stunde im Kapazitätsoptimum toleriert werden müssten, wären es bei der breitesten betrachteten Verteilung bereits 1.5 solcher Ereignisse in einer Stunde.

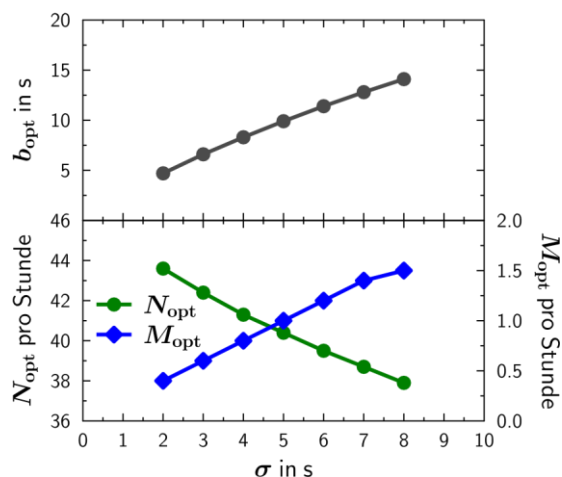


Abbildung 4: Einfluss der Breite der Verteilung der Zeit zwischen zwei Flugbewegungen σ auf die Parameter des Kapazitätsoptimums in einem einfachen Modell. Wie der Puffer b (graue Kreise im oberen Teilbild) steigt auch die Anzahl der zu tolerierenden staffelungsbedingten Fehlanflüge (blaue Rauten, rechte Skala im unteren Teilbild), wenn das Kapazitätsoptimum des Modells erreicht werden soll. Die Anzahl der stündlichen Flugbewegungen (grüne Kreise, linke Skala im unteren Teilbild) fällt mit größer werdendem σ .

Quantitativ hängen die Resultate von den gewählten Parametern und insbesondere auch von der Form der Verteilung der zeitlichen Abstände ab. Für die Balance zwischen dem Tolerieren von Fehlanflügen und Maximierung des Durchsatzes ist vor allem die ansteigende Flanke von Bedeutung [20].

Zusammenfassung und Erweiterungsmöglichkeiten

Ein einfaches Modell zur Optimierung der Pistennutzung wurde vorgestellt. Es gestattet in strukturierter Weise zwischen einer erwünschten Maximierung des Durchsatzes und dem damit einhergehenden unerwünschten Effekt einer höheren Auftretenswahrscheinlichkeit sich entwickelnder Staffellungsunterschreitungen zu vermitteln.

Mit den verwendeten Modellannahmen ergibt sich bei einer optimalen Auslastung einer Piste mit ca. 40 Landungen pro Stunde etwa ein staffelungsbedingter Fehlanflug, der zu tolerieren wäre, um dieses Optimum zu erreichen. Der Einfluss der erreichbaren Staffellungs-genauigkeit und des Staffelungspuffers auf das Optimum wurde quantitativ erörtert.

Allerdings ist einschränkend zu erwähnen, dass Fehlanflüge über den Verlust einer Landemöglichkeit noch weitere unerwünschte Effekte mit sich bringen, die in diesem eindimensionalen, rein auf den Durchsatz bezogenen Modell nicht betrachtet worden sind. Eine Möglichkeit dies zu berücksichtigen wäre die Einführung einer Optimierungsfunktion, die die Fehlanflüge stärker (negativ) gewichtet, was jedoch zu Lasten der einfachen Interpretierbarkeit dieser Funktion ginge.

Zusätzliche Erweiterungsmöglichkeiten umfassen z.B. die Berücksichtigung verschiedener Luftfahrzeuge mit variierenden Landegeschwindigkeiten und unterschiedlichen Staffelungswerten (Staffelungsmatrix) abhängig von den jeweils vorausfliegenden und nachfolgenden Luftfahrzeugen. Dies würde auf Kosten der einfachen analytischen Berechenbarkeit mittels einer Monte-Carlo-Simulation [21] umgesetzt werden können. Diese Technik wiederum hätte jedoch den zusätzlichen Vorteil, dass auch andere, z.B. schiefssymmetrische Verteilungen [22], [23] für das Interarrivalintervall genutzt werden können.

Schließlich könnten auch zusätzlich noch Abflüge von derselben Piste miteinbezogen werden (Mixed Mode). Die Tatsache, dass hier statt auf einer räumlichen bereits auf einer zeitlichen Basis gerechnet wurde, würde diesen Schritt erleichtern. Jedoch ist anzumerken, dass die Verteilung der Zeitintervalle, wenn die zweite Flugbewegung ein Start ist, eine andere sein muss: Bei einem Start kann man die Einhaltung eines zeitlichen Mindestabstands einfach sicherstellen, indem die Freigabe durch den Lotsen nicht vor Ablauf dieses minimalen Zeitintervalls gegeben werden darf. Zweckmäßigerweise käme auch hierfür wieder ein Monte-Carlo Verfahren zum Einsatz.

Die hier getätigten Berechnungen eines kapazitäts-optimalen Staffelpuffers stellen nur einen ersten Anhalts- und Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen dar. Mittels Echtzeitsimulationen im Rahmen des Projekts FUTURE soll neben anderen Aspekten auch die Größe des Puffers validiert werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Peter Brooker. "SESAR and NextGen: investing in new paradigms". In: Journal of Navigation 61 (Apr. 2008), S. 195–208. DOI: [10.1017/S0373463307004596](https://doi.org/10.1017/S0373463307004596).
- [2] SESAR Joint Undertaking. European ATM Master Plan Executive View. ISBN 978-929216-134-1. 2020. DOI: [10.2829/695700](https://doi.org/10.2829/695700).
- [3] Federal Aviation Administration. NextGen Implementation Plan 2018-2019. 2018. URL: <https://www.faa.gov/nextgen/media/NextGenImplementationPlan201819.pdf>.
- [4] International Civil Aviation Organization. Doc 4444, Procedures for Air Navigation Services, Air Traffic Management. Sixteenth Edition. 2016.
- [5] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Bekanntmachung zur Förderung von Forschungs- und Technologievorhaben im Rahmen des fünften nationalen zivilen Luftfahrtforschungsprogramms, Dritter Programmaufruf. Bundesanzeiger BAnz AT 01.09.2016 B2. URL: https://www.dlr.de/pt-lf/Portaldata/50/Resources/dokumente/lufohttps://www.dlr.de/pt-lf/Portaldata/50/Resources/dokumente/lufo-v/Bekanntmachung_LuFo_V-3.pdfv/Bekanntmachung_LuFo_V-3.pdf.
- [6] FUTURE Verbundpartner. Gesamtvorhabenbeschreibung FUTURE. Version 1.0 vom 23.06.2017.
- [7] DFS FUTURE Team. Fluglotsen-Unterstützung Endanflug, Vorhabenbeschreibung der DFS (AZK6). Version 1.0 vom 23.06.2017.
- [8] Konstantinos G. Zografos, Miltos A. Stamatopoulos und Amedeo R. Odoni. "An Analytical Model for Runway System Capacity Analysis". In: IFAC Proceedings Volumes 30.8 (1997), S. 29–34. DOI: [10.1016/S14746670\(17\)43796-7](https://doi.org/10.1016/S14746670(17)43796-7).
- [9] EUROCONTROL. COVID19 Impact on European Air Traffic. EUROCONTROL Comprehensive Assessment for Wednesday, 21 October 2020, abgerufen am 27.10.2020. URL: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2020-10/covid19-eurocontrol-comprehensiveair-traffic-assessment-21102020.pdf>.
- [10] Mitteldeutsche Flughafen AG. Leipzig/Halle Airport (LEJ): Frachtaufkommen an Europas fünftgrößtem Cargo-Airport wächst erneut zweistellig. abgerufen am 27.10.2020. URL: <https://www.mdf-ag.com/presse/pressemitteilungen/details/leipzig-halle-airporthttps://www.mdf-ag.com/presse/pressemitteilungen/details/leipzig-halle-airport-lei-frachtaufkommen-an-europas-fuenftgroesstem-cargo-airport-waechst-erneut-zweistellig/leifrachtaufkommen-an-europasfuenftgroesstem-cargo-airporthttps://www.mdf-ag.com/presse/pressemitteilungen/details/leipzig-halle-airport-lei-frachtaufkommen-an-europas-fuenftgroesstem-cargo-airport-waechst-erneut-zweistellig/waechst-erneut-zweistellig/>.
- [11] Alfred Blumenstein. "The landing capacity of a runway". In: Operations Research 7.1 (1959), S. 752–763. DOI: [10.1287/opre.7.6.752](https://doi.org/10.1287/opre.7.6.752).
- [12] Gustaf Solveling, Senay Solak, John-Paul Clarke und Ellis Johnson. "Runway Operations Optimization in the Presence of Uncertainties". In: Journal of Guidance, Control, and Dynamics 34.5 (2011), S. 1373–1382. DOI: [10.2514/1.52481](https://doi.org/10.2514/1.52481).
- [13] John F. Shortle, Yue Xie, C. H. Chen und George L. Donohue. "Simulating Collision Probabilities of Landing Airplanes at Nontowered Airports". In: SIMULATION 80.1 (2004), S. 21–31. DOI: [10.1177/0037549704042028](https://doi.org/10.1177/0037549704042028).
- [14] Lance Sherry, John Shortle und Oleksandra Snisarevska. "Design of a Control Law for an Autonomous Approach and Landing Spacing System". In: 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. DOI: [10.2514/6.2018-3983](https://doi.org/10.2514/6.2018-3983).
- [15] Georg Pólya. "Über den zentralen Grenzwertsatz der Wahrscheinlichkeitsrechnung und das Momentenproblem". In: Mathematische Zeitschrift 8 (1920), S. 171–181.

- [16] Klaus Platz und Ulrich Brokof. "Optimising Air Traffic Flow at Airports". In: Advanced Technologies for Air Traffic Flow Management. Springer, 1994, S. 153–190.
- [17] Mark Ballin und Heinz Erzberger. An analysis of landing rates and separations at the Dallas/Fort Worth International Airport. NASA Technical Memorandum 110397. Juli 1996.
- [18] John Andrews und John Robinson III. "Radarbased analysis of the efficiency of runway use". In: AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. 2001. DOI: [10.2514/6.2001-4359](https://doi.org/10.2514/6.2001-4359).
- [19] Milton Abramowitz und Irene A. Stegun. Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. Ninth ed. Dover printing, tenth ed. GPO printing. New York: Dover, 1964.
- [20] Oleksandra Snisarevska, L. Sherry, J. Shortle und G. Donohue. "Balancing throughput and safety: An autonomous approach and landing system (AALS)". In: Integrated Communications, Navigation, Surveillance Conference (ICNS) (2018), 3B1–1–3B1–8.
- [21] N. Metropolis, A. Rosenbluth, M. Rosenbluth, A. Teller und E. Teller. "Equation of State Calculations by Fast Computing Machines". In: J. Chem. Phys. 21 (1953), S. 1087.
- [22] John F. Shortle, Yimin Zhang und Juan Wang. "Statistical Characteristics of Aircraft Arrival Tracks". In: Transportation Research Record 2177.1 (2010), S. 98–104. DOI: [10.3141/2177-12](https://doi.org/10.3141/2177-12).
- [23] Horst Stöcker. Taschenbuch mathematischer Formeln und moderner Verfahren. Harri Deutsch, 2007. ISBN: 9783817118113.

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. 90 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: 13.11.2020

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 © 2020 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, Bereichsleitung
Planung & Innovation;

Redaktion:

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

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

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

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

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

Anschrift der Redaktion:

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

Nachdruck nur mit Genehmigung.

