





---

## Inhaltsverzeichnis

Übersicht der Artikel in diesem Heft .....	4
Entwicklung Multiple Remote Tower Arbeitsplatz.....	6
Dr. Rainer Kaufhold, Dr. Benjamin Weiß & Dr. Felix Schmitt	
Mass Estimation for Climbing Aircraft .....	12
Matthias Poppe, Thomas Pütz, Andrea Bach, Longbiao Ma*, Wei-Yu Jiang*, Yang Zhang*, Yun-Gang Tian* & Ying-Chao Xiao* (* State Key Laboratory of Air Traffic Management, System and Technology, NanJing JiangSu, China)	
Betrachtung des DFS Data Centers und Beurteilung seiner Fehlerumgehungstools .....	25
Philip Heidenreich	
Packet Injection System to Estimate Transmission Loss on Surveillance Radar Channels .....	35
Harald Fischer, Roman Raekow, Prof. Dr. Michael Kuhn (Hochschule Darmstadt) & Dr. Bernd-Ludwig Wenning (Munster Technological University)	
Höhenkonversionsdienst im Flugsicherungskontext .....	43
Markus Mänche, Janus Weil, Janis Wojtusich & Kristijan Caprdja	
Untersuchungen zur Stabilität von VOR-Anlagen - ein Beitrag zur Energiewende .....	51
Dr. Ralf Eichhorn & Marc Radermacher (BAF)	
Die digitale Plattform für die unbemannte Luftfahrt .....	59
Ralf Heidger, Kristijan Caprdja, Stephan Schuricht & Vincent Lambercy	
Impressum .....	67

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

### **Dr. Rainer Kaufhold, Dr. Benjamin Weiß & Dr. Felix Schmitt: Entwicklung Multiple Remote Tower Arbeitsplatz**

– Beim Remote Tower Control wird die Sicht des Lotsen aus den Fenstern der Kanzel durch Kamerabilder, die auf Monitoren dargestellt werden, ersetzt. Die Flugverkehrskontrolle kann damit ortsunabhängig erbracht werden und damit auch für mehrere Tower von einem Standort aus erfolgen. Während der Lotse beim Single Remote Tower immer nur die Flugverkehrsdienste für einen Tower zu einer Zeit erbringt, kann der Lotse beim Multiple Remote Tower die Flugverkehrsdienste zeitgleich für zwei oder drei Tower erbringen. Das Konzept dafür, die Entwicklung von Prototypen, die Arbeitsplatzgestaltung und Unterstützungsfunktionen werden beschrieben.

### **Matthias Poppe, Thomas Pütz, Andrea Bach, Longbiao Ma\*, Wei-Yu Jiang\*, Yang Zhang\*, Yun-Gang Tian\* & Ying-Chao Xiao\* (\* State Key Laboratory of Air Traffic Management, System and Technology, NanJing JiangSu, China): Mass Estimation for Climbing Aircraft**

– Die Flugzeugmasse ist ein wichtiger Parameter, der einen großen Einfluss auf das Steigprofil hat. Dieser Artikel stellt eine Methode zur Schätzung der Flugzeugmasse aus der beobachteten Trajektorie vor, basierend auf den Mode S Enhanced Surveillance Daten. Verglichen mit der tatsächlichen Masse, die von qualifizierten Airbus Full Flight Simulatoren der Lufthansa erhalten wurde, ist die Abweichung der geschätzten Masse immer besser als 6 %. Der Einfluss der Temperatur mit zusätzlichem Gaußschen Rauschen auf die geschätzte Masse liegt im Bereich von zwei bis vier Prozent gegenüber dem ursprünglichen Wert. Analysiert wurden Abflüge von Baiyun (China) und München. Die resultierende Massenverteilung für 348 Abflüge aus München und 100 Abflüge aus Baiyun erscheint plausibel mit einem Mittelwert dieser Verteilung, der nahe an der BADA-Referenzmasse liegt. Abschließend wird skizziert, wie diese erhaltene Masse für die Flugbahnvorhersage verwendet werden kann, entweder basierend auf den derzeit verfügbaren Mode-S-Daten oder basierend auf zukünftigen ADS-C-Daten.

### **Philip Heidenreich: Betrachtung des DFS Data Centers und Beurteilung seiner Fehlerumgehungstools**

– Um einen sicheren Betrieb des Flugverkehrs zu gewährleisten, werden von der Deutschen Flugsicherung (DFS) zurzeit mehrere verschiedene Flugsicherungsapplikationen verwendet, die überwiegend auf ihrer eigenen physischen Hardware (HW) laufen. Mit dem Ziel der Modernisierung soll eine grundlegende Umgestaltung der Systemlandschaft vorgenommen werden. Die Basis dafür soll eine Plattform namens Data Center sein, auf der sukzessive der Großteil der Flugsicherungsapplikationen laufen und die benutzte HW geteilt werden soll, indem diese in verschiedener Weise virtualisiert wird. In einer Bachelorarbeit wurde darauf eingegangen, welche Implikationen die Virtualisierung von Applikationen hat, welche Möglichkeiten es gibt, in der Vergangenheit aufgetretene Fehler durch Funktionen des DC zu beheben und ob durch die neue Art des Applikationsbetriebs sowie der Fehlerbehebung bzw. -umgehung neue Probleme zu erwarten sind. Im Rahmen dieses Artikels wird ein Teil der gewonnenen Ergebnisse veröffentlicht.

### **Harald Fischer, Roman Raekow, Prof. Dr. Michael Kuhn (Hochschule Darmstadt) & Dr. Bernd-Ludwig Wenning (Munster Technological University): Packet Injection System to Estimate Transmission Loss on Surveillance Radar Channels**

– Die zuverlässige Ortung von Flugzeugen ist eine Schlüsselkomponente für die sichere und flüssige Abwicklung des Luftverkehrs in dicht beflogenen Lufträumen. Derzeit basiert diese kritische Komponente der modernen Flugsicherung auf der Nutzung von zwei Funkkanälen (1030/1090MHz). In den zurückliegenden Dekaden wurden diese Kanäle durch den stetig ansteigenden Luftverkehr aber auch durch neue Dienste, die diese Kanäle nutzen, zusätzlich belastet. Aus diesem Grund wird es zunehmend wichtiger, die Auslastung dieser begrenzten Ressource zu beobachten, um rechtzeitig geeignete Maßnahmen ergreifen und eine Überlastung der Kanäle verhindern zu können. Eine Situation, die alle Kanalnutzer betreffen und letztlich zu einer Einschränkung der Ortungsfunktionalität führen würde. Dieser Artikel beschreibt einen schlanken und zuverlässigen Ansatz zur Kanalmessung, der in einem weiten Bereich anwendbar ist und Signalverluste zuverlässig erkennt. Unterstützt wird die Beschreibung durch einen Messaufbau, mit dem ein weiter Bereich von Kanalauslastungen erzeugt werden kann und der Ansatz überprüft wird.

---

**Markus Mänche, Janus Weil, Janis Wojtusich & Kristijan Caprdja: Höhenkonversionsdienst im Flugsicherungskontext** – Höhendaten im Flugsicherungskontext entspringen nicht nur sehr unterschiedlichen Höhenbestimmungsarten wie zum Beispiel Radar, Navigationssatellitensystemen, Luftdruck und anderen, sondern sie sind darüber hinaus relativ zu verschiedenen Bezugssystemen definiert. Die Umrechnung der Höhenwerte zwischen verschiedenen Bezugssystemen ist aufgrund von fehlenden Bezugssystemparametern nicht trivial. In der Praxis besteht daher die ständige Gefahr von unzulässigen Vergleichen zwischen Höhenwerten in unterschiedlichen oder falsch konvertierten Bezugssystemen. In diesem Artikel stellen die Autoren das Konzept und die prototypenhafte Implementierung für einen Webdienst zur Höhenkonversion vor, der verschiedene Höhenbezugssysteme effizient und zuverlässig konvertieren kann. Ein solcher Dienst kann dazu beitragen, die Arbeit mit Höhendaten deutlich zu vereinfachen und Fehlinterpretationen vorzubeugen. Für viele Anwendungen, die Höhendaten aus unterschiedlichen Quellen verarbeiten - wie beispielsweise zwei- oder dreidimensionale Luftlagedarstellungen - ließe sich damit der Entwicklungsaufwand deutlich reduzieren und die Verwendung der Bezugssysteme vereinheitlichen. Als Anwendungsbeispiel für den Höhenkonversionsdienst wird ein Prototyp für eine 3D-Luftlagedarstellung vorgestellt.

**Dr. Ralf Eichhorn & Marc Radermacher (BAF): Untersuchungen zur Stabilität von VOR-Anlagen - ein Beitrag zur Energiewende** – Die Deutsche Flugsicherung (DFS) betreibt in Deutschland zurzeit 54 VOR (VHF Omnidirectional Radio Range) Anlagen, die die Luftraumnutzer bei der Navigation unterstützen. In der Vergangenheit standen Bedenken bezüglich der Signalqualität der VORs und der damit verbundenen navigatorischen Genauigkeit häufig dem Ausbau der Windenergie entgegen. So können Reflexionen der Radiosignale an den Windenergieanlagen (WEA) zu unerwünschten Störungen führen. Dieser Beitrag beschreibt nun eine der Maßnahmen, welche die DFS ergriffen hat, um den Zielkonflikt zwischen Luftfahrt und Energiewirtschaft zu entschärfen. Durch eine sorgfältige Analyse konnten diese Bedenken reduziert werden, wodurch die DFS einen weiteren Beitrag zur Energiewende in Deutschland leisten kann.

**Ralf Heidger, Kristijan Caprdja, Stephan Schuricht & Vincent Lambercy: Die digitale Plattform für die unbemannte Luftfahrt** – Laut dem Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft (BDL) sind in Deutschland aktuell über 430.000 Drohnen im Umlauf. Um den sicheren Betrieb von unbemannten Luftfahrzeugen zu gewährleisten, hat die Europäische Union 2019 eine Durchführungsverordnung veröffentlicht. Für deren Umsetzung hat das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) die DFS mit der Entwicklung der digitalen Plattform Unbemannte Luftfahrt, kurz „dipul“, beauftragt. Die dipul ist dabei als zentrale Plattform für Drohnenbetreiber gedacht, die erstmals alle relevanten Geodaten, fachlichen Informationen und rechtlichen Regeln für die unbemannte Luftfahrt nach der deutschen Luftverkehrsordnung auf einer Webseite bündelt. Der Artikel beschreibt die Entwicklung, die technischen Hintergründe sowie Funktionalitäten und Nutzung von dipul.

# Entwicklung Multiple Remote Tower Arbeitsplatz

Dr. Rainer Kaufhold, Dr. Benjamin Weiß & Dr. Felix Schmitt

## Einleitung

### **Single Remote Tower**

Beim Single Remote Tower Control (RTC) wird die Sicht des Lotsen aus den Fenstern der Kanzel durch Kamerabilder, die dem Lotsen auf Monitoren dargestellt werden, ersetzt. Die Flugverkehrskontrolle kann damit ortsunabhängig erbracht werden und damit auch für mehrere Tower von einem Remote Tower Center Standort aus erfolgen. Seit Dezember 2018 wird der Flughafen Saarbrücken vom Remote Tower Center Standort Leipzig aus kontrolliert. Im April 2022 soll der Flughafen Erfurt folgen. Damit einher geht die Kreuzausbildung der Lotsen für Saarbrücken und Erfurt, die den Einsatz der Lotsen an den beiden Standorten erlaubt. Der Flughafen Dresden soll dann im Jahr 2023 das RTC-Cluster komplettieren. Durch eine Implementierung des Remote Tower Konzeptes an Flughäfen mit geringem Verkehrsaufkommen kann das Personal effizienter eingesetzt und können Kosten bei der Infrastruktur reduziert werden.

### **Multiple Remote Tower**

Während der Lotse beim Single Remote Tower immer nur die Flugverkehrsdienste für einen Tower zu einer Zeit erbringt, kann der Lotse beim Multiple Remote Tower die Flugverkehrsdienste zeitgleich für zwei oder drei Tower erbringen. (Bei Single Remote Tower ist es nur möglich, dass der Lotse nacheinander die Flugverkehrskontrolle für unterschiedliche Tower erbringt.) Im folgenden Artikel wird das Konzept für Multiple Remote Tower Control (MRTC) beschrieben.

Abhängig von der Verkehrsmenge können an einem Tower heute Rollen wie zum Beispiel Platz- und Rolllotse an einem Arbeitsplatz zusammengelegt und bei Bedarf auch wieder aufgeteilt werden. Mit dem Multiple Remote Tower können Rollen abhängig von der Arbeitslast auch über Flughäfen hinweg zeitlich begrenzt zusammengelegt werden. Im Rahmen von SESAR wird die Zusammenlegung von bis zu drei Tower untersucht.

Durch die Zusammenlegung von Rollen über mehrere Flughäfen hinweg kann die Arbeitsbelastung zwischen Arbeitsplätzen ausbalanciert und die Produktivität der Lotsen erhöht werden. Verkehrsspitzen können besser abgefangen und Zeiten mit minimaler Belastung reduziert werden.

Beim Multiple Remote Tower Concept kann entweder ein Lotse allein die Flugverkehrskontrolle für mehrere Flughäfen bereitstellen, oder bedarfsweise noch durch einen weiteren Lotsen unterstützt werden (z.B. als Clearance Delivery). Die Zusammenlegung oder Aufteilung von Flughäfen kann abhängig von der Verkehrslast dynamisch angepasst werden.

## **SESAR-Forschungsprojekt PJ05**

Das Multiple Remote Tower Konzept wird im Rahmen des SESAR-Forschungsprojektes (für weitere Informationen siehe [3]) von mehreren europäischen Flugsicherungsorganisationen zusammen mit der Luftfahrtindustrie und Forschungseinrichtungen mit unterschiedlichen Prototypen und für eine Vielzahl von Flughäfen untersucht.

### **Arbeitsplatz**

Eine grundlegende Voraussetzung für die Zusammenlegung von Rollen über mehrere Flughäfen hinweg ist die Bereitstellung der erforderlichen Informationen an einem MRTC-Arbeitsplatz. Der Entwurf dieses Arbeitsplatzes ist der zentrale Forschungsgegenstand im SESAR-Projekt PJ05 „Remote Tower for Multiple Airports“, an dem die DFS beteiligt ist. Dabei soll untersucht werden, wie ein Lotsen Arbeitsplatz gestaltet sein sollte, damit sie den Fluglotsen bei der gleichzeitigen Arbeit an mehreren Flughäfen optimal unterstützt (d.h. die Arbeitslast reduziert und das Situationsbewusstsein erhöht) und welche Verkehrsmengen in diesem Aufbau sicher bewältigt werden können.

### **Aufbau des Arbeitsplatzes der SESAR-Partner**

Dabei verfolgen die SESAR-Partner durchaus unterschiedliche Ansätze, da die Gestaltung eines Multiple Remote Arbeitsplatzes immer sehr nutzerspezifisch und anwendungsorientiert ist. Deutlich zu erkennen ist das an den Prototypen, die einerseits von der DFS und andererseits von den anderen SESAR-Partnern entwickelt wurden.

Die SESAR-Partner fügen die Monitore der Systeme der einzelnen Tower am Multiple Remote Tower Arbeitsplatz zusammen, so dass die Panoramen für die Flughäfen alle neben- oder übereinander großflächig dargestellt werden. Schon durch die Vielzahl der Monitore wird deutlich, dass das Auffinden von Informationen für den Lotsen aufwändiger wird als an einem Arbeitsplatz für nur einen Tower.

Die DFS verfolgt daher einen darüber hinausgehenden Ansatz, um das Monitoring und den Erhalt des Situationsbewusstseins des Lotsen zu vereinfachen. Der DFS-Prototyp eines Arbeitsplatzes ist dadurch gekennzeichnet, dass für jeden Tower die Anzeigen aller relevanten Systeme auf jeweils einem Monitor integriert dargestellt werden und der Lotse durch ein Assistenzsystem unterstützt wird. Dieser Prototyp wird im Folgenden detaillierter beschrieben.

## Surveillance

Um die Unterstützungsfunktionen zur Verbesserung des Situationsbewusstseins und die Safety Net Funktionalität zur Verfügung stellen zu können, ist eine Bodenlageinformation (Ortung am Boden) erforderlich.

Da ein vollumfängliches Advanced Surface Movement Guidance and Control System (A-SMGCS) für die Tower mit geringem Verkehrsaufkommen zu kostenaufwändig ist, wird im Rahmen von SESAR eine ‚einfache‘ Surveillance basierend auf ADS-B und MLAT Sensorik untersucht, deren Informationen vom Lotsen zwar über die Sichtdarstellung verifiziert werden müssen, aber dennoch ausreichend genau sind, um spezielle Sicherheitsnetze zu bedienen.

Die entsprechende prototypische MLAT/ADS-B Sensorik wurde von der Firma Thales am Flughafen

Erfurt installiert und zusammen mit dem DFS-Systemhaus (PHOENIX Tracker) auf den Betrieb im Zusammenspiel mit dem Multiple Remote Tower Konzept optimiert.

## Gestaltung des MRTC-Arbeitsplatzes

### Grundsätzlicher Aufbau des Arbeitsplatzes

Der Arbeitsplatz des DFS-Prototypen (siehe Abbildung 1) ist dadurch gekennzeichnet, dass für jeden Tower die Anzeigen aller relevanten Systeme auf einem 4K-Monitor mit 42 Zoll Bildschirmdiagonale integriert dargestellt werden (siehe Abbildung 2). Neben Panorama- und PTZ-Darstellung (PTZ: Pan Tilt Zoom Kamera) sind auch Luft- und Bodenlage eingebettet.

Darüber hinaus ist ein zentraler Bildschirm verfügbar, über den alle Interaktionen mit dem System erfolgen (siehe Abbildung 3). Auf diesem Bildschirm sind die Flugplaninformationen für alle kontrollierten Flughäfen nebeneinander dargestellt. Abhängig vom selektierten Flugplan wird die entsprechende kombinierte Boden- und Luftlage und die PTZ-Kamera des jeweiligen Towers dargestellt.

Dadurch soll zum einen die Suche nach Informationen erleichtert werden und zum anderen können Interaktionen mit diesen Systemen, wie z.B.



Abbildung 1: Arbeitsplatz des DFS Multiple Remote Tower Prototypen.

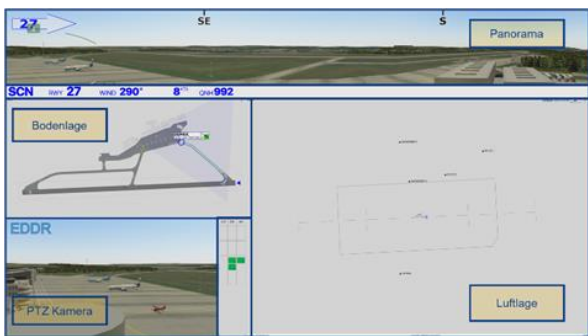


Abbildung 2: Übersicht Monitor je Flughafen.



Abbildung 3: Zentraler Eingabe-Monitor.

Ausrichtung und Zoom der PTZ-Kamera oder Anpassung einer Rollroute, durchgeführt werden.

Für die Kommunikation mit den Piloten werden die Flugsicherungs-Frequenzen der betroffenen Tower zusammengelegt, so dass der Lotse bei einem Funkgespräch nicht auswählen muss, an welchem Flughafen die Kommunikation erfolgt. Da die Piloten dadurch die Kommunikation von allen zusammengelegten Tower mithören, wird in der Phraseologie der jeweilige Tower zu Beginn des Funkgesprächs mit aufgeführt.

## Flugzentrierte Informationsbereitstellung

Um die Suche des Lotsen nach Informationen für einen Flug zu vereinfachen, greifen die folgenden Automatismen:

- Das Label eines selektierten Flugs wird auf allen Monitoren und in allen Systemen automatisch hervorgehoben dargestellt (TFDPS sowie Luft- und Bodenlage).
- Die PTZ wird automatisch auf den selektierten Flug ausgerichtet und das visuelle Tracking für diesen Flug aktiviert.
- Die Bodenlage und die PTZ-Kamera auf dem zentralen Eingabe-Monitor werden automatisch auf den relevanten Tower umgeschaltet.

## Unterstützungsfunktionen für den Lotsen

Am Arbeitsplatz des Lotsen werden die sogenannten Events generiert. Diese stellen Systemhinweise auf anstehende Ereignisse oder erforderliche Aktivitäten wie zum Beispiel Freigaben oder Situationen dar, die eine erhöhte Aufmerksamkeit erfordern und so das Situationsbewusstsein der Lotsen unterstützen

Sobald die Bedingungen für ein Event erfüllt sind, wird ein entsprechendes Event für den Lotsen generiert. Für ein „Landing Clearance Event“ ist es beispielsweise erforderlich, dass sich das entsprechende Luftfahrzeug in einem definierten Abstand auf dem Endanflug befindet und die Piste (inklusive des Schutzbereiches) frei von anderen Luft- und Bodenfahrzeugen ist.

Das Event verschwindet wieder, sobald die Bedingungen für das Event nicht mehr vorliegen (z.B. wenn die Landing Clearance im TFDPS eingegeben wurde). Alternativ kann der Lotse das Event jederzeit „wegklicken“, wenn er es als nicht relevant erachtet. Ein Event verschwindet auch dann automatisch, wenn sich die Bedingungen für die Freigabe verändert haben. Z.B. verschwindet ein „Takeoff Clearance Event“, sobald sich ein im Anflug befindendes Flugzeug zu nahe auf dem Endanflug befindet.

Bei den Events handelt es sich um Hinweise, die den Lotsen unterstützen sollen. Die Durchführbarkeit einer durch ein Event nahegelegten Aktion muss vom Lotsen aber immer separat verifiziert werden. Die Verantwortung verbleibt beim Lotsen.

Der Lotse kann auch weitestgehend unabhängig von den Events arbeiten. Insbesondere kann er den Freigabe-Events voraus arbeiten, um den Durchsatz zu erhöhen oder seinen Arbeitsablauf zu optimieren. Erteilt der Lotse eine Freigabe, bevor die im System hinterlegten Bedingungen erfüllt sind, wird auch kein Event generiert. Wird z.B. eine Landing Clearance schon weit draußen auf dem Endanflug erteilt, dann erscheint kein Landing Clearance Event mehr. Die Events werden dem Lotsen sowohl auf dem Flugstreifen als auch im Radarlabel zur Anzeige gebracht. In dem Beispielbild in Abbildung 4 ist ein Taxi Event für einen Anflug dargestellt.



Abbildung 4: Taxi-Event im Flugstreifen (hellgrüner Balken).

Darüber hinaus gibt es eine Übersicht der Events aller kontrollierten Flughäfen (siehe Abbildung 5). Das ermöglicht dem Lotsen den Überblick zu behalten,



auch wenn er gerade auf eine Situation an einem Flughafen konzentriert und damit auf nur einen der Bildschirme fokussiert ist.

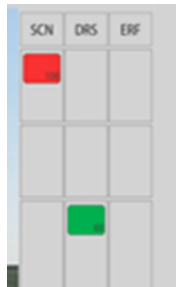


Abbildung 5: Darstellung der Events in der Übersicht.

Die unterschiedliche Priorität der Events wird farblich codiert dargestellt, so dass leicht ersichtlich ist, auf welchen Flughafen die Aufmerksamkeit als nächstes liegen sollte.

Im Folgenden werden unterschiedliche Event-Arten vorgestellt.

## Events – Clearances

Einige Events dienen dazu, den Lotsen auf anstehende Clearances hinzuweisen. Durch die Kombination aus der Position der Flugzeuge (basierend auf Luft- und Bodenlage) mit der aktuellen Clearance aus dem TFDPS werden die möglichen, anstehenden Clearances vom System ermittelt. Falls die Verkehrssituation eine folgende Freigabe zulässt, wird diese dann in Form eines anstehenden Events vorgeschlagen.

Für ein Takeoff Clearance Event ist es beispielsweise erforderlich, dass sich das entsprechende Luftfahrzeug kurz vor dem Rollhalt befindet, die Piste (inklusive der Runway Protected Area) frei von anderen Luft- und Bodenfahrzeugen ist und sich in einem definierten Abstand auf dem Endanflug kein Anflug befindet. Die Konfiguration der entsprechenden Parameter wurde sehr konservativ gewählt, um ausreichende Staffelung gewährleisten zu können.

Weiterhin wurde beispielsweise ein „Taxi Event“ zur Verfügung gestellt, das für Anflüge generiert wird, wenn sich das Luftfahrzeug auf der Piste befindet und eine definierte Geschwindigkeit unterschritten hat. Auch VFR-spezifische Events finden Berücksichtigung. So wird beispielsweise ein „Entry Event“ generiert, wenn sich ein Anflug in einem definierten Abstand vor der Kontrollzone befindet.

## Events – Reminder

Sogenannte Reminder Events werden eingesetzt, um den Lotsen auf Situationen hinzuweisen, die eine

erhöhte Aufmerksamkeit erfordern und um damit das Situationsbewusstsein zu unterstützen.

So weisen die Reminder Events im Endanflug nochmal auf die bevorstehende Landung bzw. beim Startlauf auf den Beginn des bevorstehenden Takeoffs hin.

## Events – Safety Nets

Neben den Events, die reguläre operationelle Abläufe unterstützen, werden zusätzlich Safety Events generiert, wenn vom System sicherheitsrelevante Situationen erkannt werden. Diese sogenannten Airport Safety Nets wurden im Rahmen von SESAR im Hinblick auf einen Einsatz an hochfrequentierten Hub-Flughäfen entwickelt. Im Kontext des Multiple Remote Tower können diese Safety Nets ebenfalls sinnvoll eingesetzt werden, um den Lotsen frühzeitig auf mögliche Gefahrensituationen hinzuweisen.

Bei den Safety Nets werden die folgenden Kategorien unterschieden:

- **Conflicting Clearances**  
Der Lotse wird auf Clearances hingewiesen, die im Widerspruch zueinanderstehen, wie z.B. die gleichzeitige Erteilung einer Lande- und einer Startfreigabe für Flugzeuge auf einer Piste.
- **Conformance Monitoring**  
Der Lotse wird auf Abweichungen von erteilten Clearances hingewiesen, wie z.B. Verlassen der freigegebenen Rollroute, Aufrollen auf die Piste ohne entsprechende Freigabe, oder der Beginn des Startlaufs ohne eine Startfreigabe.
- **Runway Monitoring Conflict Alerting**  
Der Lotse wird auf einen Konflikt zwischen einem startenden oder landenden Luftfahrzeug und einem weiteren Luft- oder Bodenfahrzeug auf der Piste hingewiesen.

## Prototyping und bisherige Ergebnisse

Der MRTC-Prototyp wurde durch das DFS-Systemhaus, basierend auf den Systemen TFDPS, SMAN und PHOENIX entwickelt. Darüber hinaus wurde das im Single Remote Tower eingesetzte SmartVision Produkt der Firma Frequentis integriert und auf die Multiple Remote Tower Anforderungen angepasst. In einer Reihe von Simulationen wurde der MRTC Prototyp an einem vom DFS-Simulatorzentrum bereitgestellten Realzeitsimulator mit einem Kernteam von vier Lotsen aus Saarbrücken, Erfurt, Dresden und Leipzig unter der Leitung des betrieblichen Tower Managements der DFS iterativ entwickelt, erprobt und optimiert. Die Entwicklung startete in 2016 und dauert derzeit noch an.

In einer zweiwöchigen Simulationskampagne (siehe [1][2]) wurde in 2018 das Multiple Remote Tower Konzept von insgesamt 8 Towerlotsen intensiv validiert. Hierbei zeigte sich vor allem bei den vorher noch nicht mit Remote Tower vertrauten Lotsen eine ausgesprochen steile Lernkurve. Die Szenarien enthielten 24 Flugbewegungen pro Stunde verteilt auf alle drei Flughäfen, wobei bis zu 6 Bewegungen gleichzeitig stattfanden. Diese sehr hohe Verkehrslast spiegelt kein Szenario wider, das ein Lotse operativ bearbeiten soll. Die hohe Verkehrslast wurde gewählt, um eine hohe Arbeitslast zu generieren und dabei zu erkennen, welche Systemfunktionalität den Lotsen am besten unterstützen kann. In den meisten Szenarien wurde die Flugverkehrskontrolle für drei Flughäfen erbracht. Die in der Simulationskampagne bewerteten Szenarien betrachteten Aspekte wie:

- Gleichmäßige Verteilung der Verkehrslast über die drei Flughäfen im Vergleich zu einer hohen Verkehrslast an nur einem Flughafen bei wenig Verkehr an den beiden anderen Flughäfen
- Ähnliche Betriebsrichtung an allen drei Flughäfen (Anflugrichtung nach Westen) im Vergleich zu entgegengesetzten Betriebsrichtungen (ein Flughafen mit Anflug nach Osten)
- Blick vom Tower (Kamera) auf die Piste von Norden an einem Flughafen und von Süden auf den anderen Flughäfen
- Überwiegend IFR-Verkehr im Vergleich zu einem Szenario mit höherem VFR-Verkehrsaufkommen
- Vorkommen von Sondersituationen (Runway Incursion, Probleme mit dem Fahrwerk beim Landeanflug)
- Gleichzeitige Landungen und Starts an den verschiedenen Flughäfen
- Übergabe eines Flughafens an einen anderen Arbeitsplatz

Die Simulationen haben gezeigt, dass die Lotsen Verkehr für drei Flughäfen mit angemessener Workload sicher kontrollieren konnten und dabei über ausreichendes Situationsbewusstsein verfügten. Die Lotsen haben dabei angemerkt, dass das Bewusstsein dafür geschärft werden muss, dass bei Multiple Remote Tower Betrieb ggf. in bestimmten Situationen die Effizienz der Flugführung zu Gunsten der Sicherheit reduziert werden sollte. D.h. die Lotsen entschieden sich teilweise für eine konservative Herangehensweise und vermieden es ‚enge‘ Situationen herbeizuführen. Die unterschiedlichen Szenarien konnten alle gleichermaßen gut bearbeitet werden. Obwohl die Szenarien sehr anspruchsvoll waren, zeigte sich kein signifikanter Unterschied in

der Bearbeitung. Die Lotsen wurden angehalten, sich auf das Arbeiten mit den Events einzulassen und konnten die Events nach einiger Übung auch gut nutzen. Insbesondere die Unterstützung durch die Safety Events sowie die Reminder für Takeoff und Landing wurden von den Lotsen positiv hervorgehoben.

Es zeigte sich erwartungsgemäß, dass die Belastung in dem Szenario mit erhöhtem VFR Aufkommen im Vergleich zu den anderen Szenarien anstieg. Die Lotsen gaben in den Simulationen aber auch wertvolle Hinweise zu möglichen Verbesserungen in der Gestaltung des Arbeitsplatzes. Diese wurden umgesetzt und in einer zweiten Simulationskampagne im Sommer dieses Jahres wiederum in der Realzeit-Simulationsumgebung validiert. Hierbei erwies sich der Arbeitsplatz als sehr ausgereift und die Lotsen hatten nur noch wenige Verbesserungsvorschläge. Bis Mitte des nächsten Jahres wird der detaillierte SESAR Validierungsreport erstellt. Hierin werden dann neben der DFS Validierung auch die Untersuchungen aus vier weiteren Validierungsumgebungen der SESAR Partner dokumentiert.

### Zusammenfassung und Ausblick

Das Multiple Remote Tower Konzept ermöglicht es, die an verschiedenen Tovern anliegende Arbeitslast besser über die verfügbaren Arbeitsplätze zu verteilen und damit eine Produktivitätssteigerung zu erzielen. Mit der vorgestellten Gestaltung des Arbeitsplatzes wurden mit den Events sowie mit der Verknüpfung der Systeme (elektronische Flugstreifen - TFDPS / Luft- und Bodenlage / Kameras) zur situationsspezifischen Informationsbereitstellung Funktionalitäten zur Reduktion der Beanspruchung und zur bestmöglichen Unterstützung des Situationsbewusstseins entwickelt und in iterativen Realzeitsimulationen erfolgreich validiert. Die Validierung des Multiple Remote Tower Konzepts wurde ermöglicht durch die ausgesprochen konstruktive und teamorientierte Zusammenarbeit der DFS-Kollegen aus den Bereichen Systemhaus, Produktmanagement Towersimulatoren und Lotsen aus dem Cluster Ost in Verbindung mit den Kollegen von Frequentis und Thales.

Anfang 2022 ist eine weitergehende Bewertung der Bodenlage in Erfurt geplant. Basierend auf den erzielten Ergebnissen und dem Fortschritt der Remote Tower Implementierung in Leipzig für Erfurt und Dresden wird im nächsten Jahr über die weiteren Schritte entschieden werden.

*Hinweise zur Veröffentlichung: Dieser Artikel berichtet zu Daten, die im Rahmen eines vom SESAR Joint Undertaking geförderten Projektes (Grant Agreement Nummer 874470, PJ05-35 'Multiple Remote Tower and Remote Tower Centre') im Horizon 2020 Forschungs- und Entwicklungsprogramm der Europäischen Union erhoben wurden. Dieser Artikel stellt nur die Sichtweise der Autoren dar. Das SESAR JU ist nicht verantwortlich für jegliche Art der Weiterverwendung von Informationen, die dieser Artikel enthält.*

## Abkürzungsverzeichnis

A-SMGCS	Advanced Surface Movement Guidance and Control System
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance Broadcast
FDPS	Flight Data Processing System
IFR	Instrument Flight Rules
MLAT	Multilateration
MRTC	Multiple Remote Tower Control
PHOENIX	Radardatenverarbeitungs- und Darstellungssystem
PTZ Camera	Pan Tilt Zoom Camera
RTC	Remote Tower Control
SESAR	Single European Sky ATM Research
SMAN	Surface Manager
TFDPS	Tower Flight Data Processing System
VFR	Visual Flight Rules

## Referenzen

- [1] SESAR 2020; PJ05-35 D2.1.001- OSED Operational Service and Environment Document 'Remote Tower for Multiple Airports'; Edition 00.01.03, Dated 17/12/2020.
- [2] SESAR 2020; PJ05-35 D2.2.003 - VALR Validation Report - 'Remote Tower for Multiple Airports'; Edition 00.01.00, Dated 30/06/2022.
- [3] Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (2022). Aufgerufen am 17.01.2022. Verfügbar unter URL: <http://www.remote-tower.eu>.

## Mass Estimation for Climbing Aircraft

Matthias Poppe, Thomas Pütz, Andrea Bach, Longbiao Ma\*, Wei-Yu Jiang\*, Yang Zhang\*, Yun-Gang Tian\* & Ying-Chao Xiao\* (\* State Key Laboratory of Air Traffic Management, System and Technology, NanJing JiangSu, China)

### Deutsche Zusammenfassung

Die Flugzeugmasse ist ein wichtiger Parameter, der einen großen Einfluss auf das Steigprofil hat. Dieser Artikel stellt eine Methode zur Schätzung der Flugzeugmasse aus der beobachteten Trajektorie vor, basierend auf den Mode S Enhanced Surveillance Daten. Verglichen mit der tatsächlichen Masse, die von qualifizierten Airbus Full Flight Simulatoren der Lufthansa erhalten wurde, ist die Abweichung der geschätzten Masse immer besser als 6 %. Der Einfluss der Temperatur mit zusätzlichem Gaußschen Rauschen auf die geschätzte Masse liegt im Bereich von zwei bis vier Prozent gegenüber dem ursprünglichen Wert. Analysiert wurden Abflüge von Baiyun (China) und München. Die resultierende Massenverteilung für 348 Abflüge aus München und 100 Abflüge aus Baiyun erscheint plausibel mit einem Mittelwert dieser Verteilung, der nahe an der BADA-Referenzmasse liegt. Abschließend wird skizziert, wie diese erhaltene Masse für die Flugbahnvorhersage verwendet werden kann, entweder basierend auf den derzeit verfügbaren Mode-S-Daten oder basierend auf zukünftigen ADS-C-Daten.

### Abstract

The aircraft mass is an important parameter which has a major impact on the aircraft performance and on the climb profile. This paper presents a method to estimate aircraft mass from the observed trajectory and shows the results obtained. Compared to the actual mass obtained from a qualified Full Flight Simulator, the discrepancy of the estimated mass is always better than 6%. The impact of the temperature with added Gaussian noise to the estimated mass is in the range of two to four percent compared to the original value. The estimated mass of departure flights from Baiyun and Munich were analyzed. The resulting mass distribution seems to be plausible, with a mean of this distribution that is close to the BADA reference mass. Finally, how to use this obtained mass for trajectory prediction is outlined, either based on currently available Mode S data or based on future ADS-C data.

**Keywords** - Air Traffic Control, mass estimation, least square method, climb profiles, trajectory prediction

### Introduction

The aircraft performance and the prediction of the aircraft trajectory are key enablers for future ATM trajectory-based operations. The lateral and vertical profile depends on many factors of different nature, being it the aircraft intent, the aircraft current state, the atmospheric conditions, and last but not least human air traffic controller and pilot interventions. This results in an operational and technical uncertainty [1] where many of these factors are not known or can only be estimated roughly.

The most obvious factors with rather high impact are:

- Technical uncertainties (e.g. Take off weight and fuel flow related mass change during flight progress is not known to ATC as well as the engine type)
- Physical uncertainties (e.g. the atmospheric conditions like wind, temperature, turbulences, vorticity)
- Operational Uncertainties like Cost index of the flight, manual intervention by the pilot and mixed autopilot modes (selected autopilot guidance and managed autopilot), clearances of the air traffic controller.

As the aircraft mass is a critical factor and one of the major uncertainties to the climb performance, several attempts have been made to estimate the aircraft take off mass (e.g. [2][3][4]). With a better and more accurate mass estimate, parametric approaches like Base of Aircraft Data (BADA) [10] will provide more accurate climb trajectories. Alternatively, non-parametric approaches [11][13] try to evaluate and estimate the aircraft trajectory not only in the climb phase. In [12][14] clustering has been used to find common patterns.

Despite all the progress made during the last years, the resulting uncertainty may still be too high for certain safety critical applications like Conflict Detection or other Controller Decision Support tools.

In DFS, currently BADA is used for the modelling of the planning trajectory in the upper airspace. The reference mass for specific aircraft types is modified to match the average aircraft performance behavior. This was done by statistical analysis together with the controller consolidated expert view. However, due to several reasons outlined below, the resulting trajectory prediction is yet not always sufficient, in particular for climbing aircraft.

In this study, the focus is on addressing one of the technical uncertainties, i.e. estimating and validating the mass of the aircraft during the climb phase in order to improve the resulting trajectory prediction in the short term prediction horizon.

## General Approach

### Model Description

The approach follows in general the large-scale multi-airport study from R. Alligier [8]. This is in the view of the authors one of the most comprehensive studies in the recent years. Here, the focus was on two busy major hub airports, Baiyun (ZGGG) in China and Munich (EDDM) in Germany for validation and application of this approach.

Figure 1 shows the model for the trajectory prediction. This paper describes the part highlighted in blue color with mass estimation of individual flights using the Least Square method. The other parts that are required for the trajectory prediction, are still to be developed and integrated.

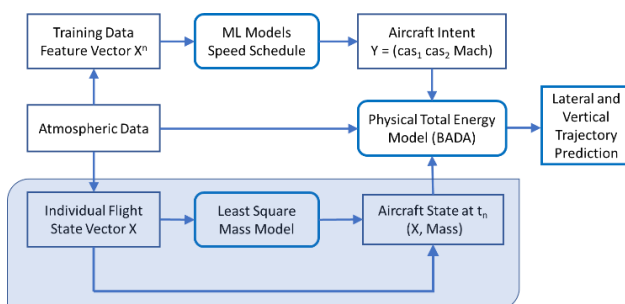


Figure 1: Trajectory Prediction Model.

The main idea is to predict the trajectory in lateral and vertical dimensions, based on a physical Total Energy Model (TEM). The Base of Aircraft Data (BADA) from EUROCONTROL [10] is one of the most prominent representatives and was also used in this study. The best knowledge of the current aircraft state (time  $t_0$ ) and the intent of the aircraft is important for accuracy of the TEM and the TP. This intent can be described by the speed schedule with the constant speed values of the Calibrated

Airspeed (CAS) and the Mach number. The current state can be described by the mass, the speed(s), the altitude & climb rate and the track and roll angles.

This approach is based on the assumption that only today available data for the vast majority of commercial flights shall be used. To obtain the current aircraft state including the mass, Mode S Enhanced Surveillance data plus radar data and flight plan data will be used. The mass can be estimated at early flight stages by applying the *Least Square* method (refer to [6][8]). The speed intent for each individual flight will be obtained from statistical data by training a Machine Learning model. The atmospheric data sources are the forecast values of the meteorological provider. All data will be used to initialize the TEM and to predict the trajectory for the next five to 15 minutes.

### Scope of this Paper

In section "Data Preparation", the available data and some characteristics of climb profiles is presented. The section "The Energy Model and Least Square Estimation" explains the theoretical background of the used point-mass model and the least square mass estimation and how the algorithm has been modified. In the section "Results", the validation results of the mass estimations with Full Flight Simulator trials as well as the temperature sensitivity is shown. The following section presents the performance calculator, which will be used for the trajectory prediction. It also discusses how the availability of ADS-C EPP will change the approach.

The summary and outlook in the last section concludes this study.

## Data Preparation

### Data Sources

Flight Plan data, radar data and Mode S data were the main sources used for this analysis. The current Mode S equipage rate for IFR flights is more than 98% in Germany and about 80% in China. The Mode-S EHS data contain the Comm-B Data Selector (BDS) number with the available register. Further details of the BDS register can be obtained from [18]. The original Mode S and ADS-B data were extracted and downloaded with the 'traffic' toolbox [19] from the OpenSky [20][21] website during summer 2019. Table 1 provides the data items and the sources.

Table 1: Data Sources.

	Data Item	Source
1	Date & Time, Callsign, Mode S 24 bit address, Flight Level	Mode S data
2	ADEP, ADES, A/C Type Standard Instrument Departure (SID) route	Flight Plan FPL
3	MCP/FCU selected altitude, barometric pressure	BDS 4.0 Register - Selected Vertical Intention
4	Roll angle, track angle, Ground Speed, True Airspeed	BDS 5.0 - Track and Turn Report
5	Heading, Indicated Airspeed, MACH number, Vertical rate.	BDS 6.0 - Heading and Speed Report
6	Radar / track data Position Lat/Long	ADS-B reports
7	Wind vector, temperature, vorticity (not yet available)	Re-analysis data (ERA5)
8	Controller Clearances (not available)	ATM-System

Due to the sensitivity of the data, controller clearances were not available. As a work around, the difference between actual Flight Level (FL) and MCP/FCU selected altitude has been used to make an “educated guess” about the availability of a vertical controller clearance<sup>1</sup>.

In addition to [8], all available flight profiles have been selected for the analysis, not only continuously climbing flights. The pre-processing was limited to filter obvious outliers (e.g. no full set of BDS register available) and to smooth the raw radar and Mode-S data with a convolutional filter.

For the validation, it was intended to use Atmospheric Re-analysis data from the European Centre for Medium range Weather Forecasts (ECMWF)[22]. They contain hourly atmospheric information at a horizontal resolution of 0.25°×0.25° (around 30km) globally and at 137 vertical levels.

The atmospheric data have not been used yet for the mass estimation (refer also to Figure 1).

<sup>1</sup> If the difference between actual FL and Selected Altitude is less than a pre-defined threshold (e.g. 400 feet), it can be assumed that a vertical clearance has

Instead, International Standard Atmosphere (ISA) conditions were assumed [23].

## Climb Characteristics

Since no filtering of climbing flights took place, the number of level off segments (i.e. no altitude change for a certain period) for both EDDM and ZGGG departures were analyzed. Level off segments may cause problems with the mass estimation because the least square algorithm has been applied yet to unconstrained continuously climbing flights.

As it can be seen from Figure 2 and Figure 3, there are differences between both airports. The figures show the number of level off segments from take-off up to FL300 which are longer than 30 seconds (ca. 2000 flights, EDDM: July 2019, ZGGG: May 2021).

In Munich, the majority of the flights (more than 80%) during this period had no restrictions during their climb. About 10% of all departing flights had one level off segments, and only very few flights faced two or more level off segments. At Baiyun airport, about 60% of all departing flights had one or two level off segments with a duration of more than 30 seconds. Also, three or more level off segments could be observed for about 1/3 of the flights. This illustrates the need to ensure that the algorithms used are robust enough to cope with level off segments.

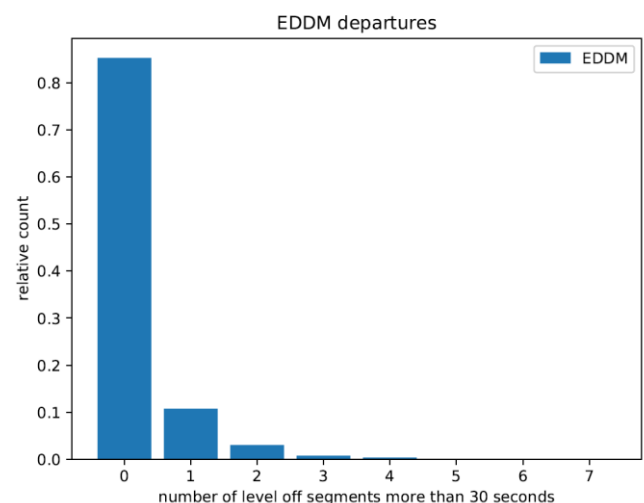


Figure 2: Level Off segments EDDM departures.

been given to the pilot before and the flight has been leveled off.

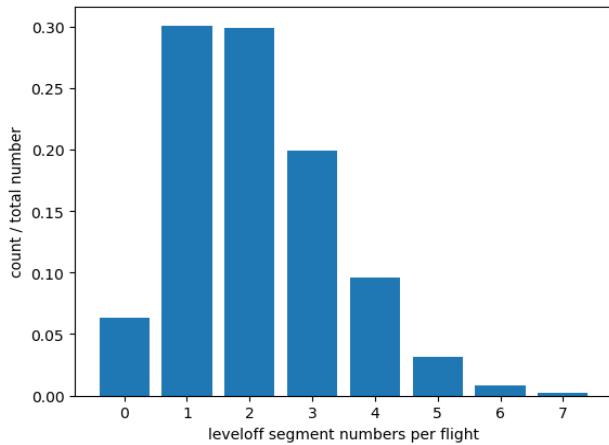


Figure 3: Level Off segments ZGGG departures.

## The Energy Model and Least Square Estimation

The aircraft performance model used is the Total Energy Model (TEM) based on a mass-varying, kinetic approach. This approach models an aircraft as a point and requires the modelling of underlying forces that cause aircraft motion [16]. It relates to the geometrical, kinematic and kinetic aspects of the aircraft motion, allowing the aircraft performances and trajectory to be calculated. TEM equates the rate of work done by forces acting on the aircraft to the rate of increase in potential and kinetic energy including the wind [16]. It can be expressed as:

$$\frac{Thr - D}{m} V_a = g_0 \frac{T}{T_{ISA}} \frac{dH_p}{dt} + V_a \frac{dV_a}{dt} + \frac{d\vec{W}}{dt} \vec{V}_a \quad (1)$$

The forces are the thrust  $Thr$  and the drag  $D$ , related to the mass  $m$  on the left side of equation (1), multiplied with the True Airspeed  $V_a$ . This modeled power needs to equal the observed energy variation on the right side:  $H_p$  is the altitude,  $T$  the temperature and  $d\vec{W}$  the wind vector. The ISA temperature  $T_{ISA}$  and gravity  $g_0$  are constants.

$n$  past points of the observed trajectory at time  $t_n$  were used to estimate the mass (refer also to Figure 4). At point  $i$ ,  $1 \leq i \leq n$ , from (1) the power  $P_i$  and energy variation  $E_{vi}$ , was obtained related to the mass  $m_i$ :

$$\frac{P_i}{m_i} := \frac{Thr_i - D_i}{m_i} V_{ai} \quad (2)$$

$$\frac{E_{vi}}{m_i} := g_0 \frac{T}{T_{ISA}} \frac{dH_p}{dt} + V_a \frac{dV_a}{dt} + \frac{d\vec{W}}{dt} \vec{V}_a \quad (3)$$

The mass at time  $t_n$  can be computed by finding the best match of equations (2) and (3) to the last  $n$  trajectory points. This is done by minimizing the sum of squared errors (with the mass as free variable) and finding a solution to the least square minimization problem:

$$m_n = \operatorname{argmin}_{m_n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{P_i(H_{pi}, V_{ai}, T_i, m_i)}{m_i} - \frac{E_{vi}}{m_i} \right)^2 \quad (4)$$

by taking into account the decreasing mass due to the fuel flow with:

$$m_{i+1} = m_i - ff(V_a, H_p, T)(t_{i+1} - t_i) \quad (5)$$

The mass  $m_n$  refers to time  $t_n$ . The function  $ff$  as well as the models and coefficients for thrust and drag were obtained from the BADA User Manual [10]. Further details of the approach are explained in [6][15]. More sophisticated fuel flow models can be found in [9] but have not been considered here.

In this work, equation (4) was solved directly with the Python *numpy* library and the *scalar.minimize()* function.

The number  $n$  of trajectory points, which was used for the mass estimation, was set to a constant in [6][8]. The higher the number, the more stable the mass estimate will be on average, and there is less variation. A smaller number provides an earlier estimation. It was decided to let  $n$  be a linear function of the flight level:  $n$  increases with the flight level.

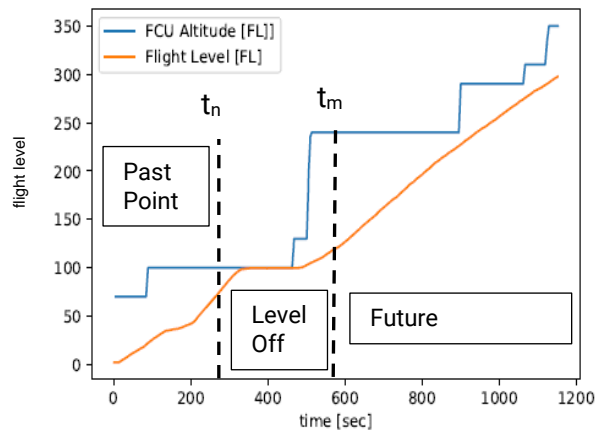


Figure 4: Climb profile with level off segment.

Figure 5 shows the minimization function of equation (4) at different flight levels for a climbing departure flight. This was a Full Flight Simulator experiment<sup>2</sup> with aircraft type A319, simulating a Frankfurt EDDF departure in ISA weather conditions.

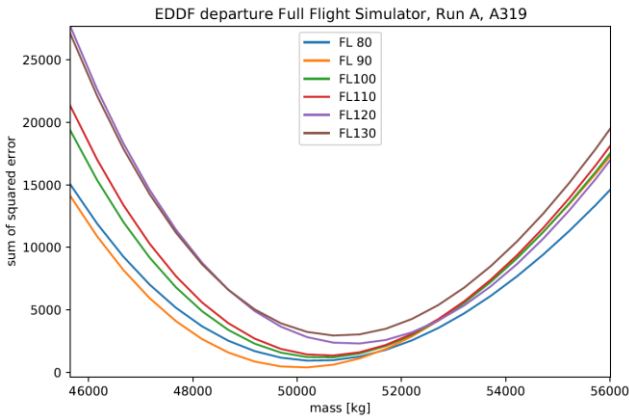


Figure 5: Squared error minimization.

At all flight level, a minimum of the sum of squared error in the range of 50 tons was observed. Table 2 shows the mass estimate for flight levels from 80 to 130 and the corresponding least square minimum values. The least square (LS) minimum is increasing towards higher flight levels because more trajectory points were used for the estimate (it does not mean that the prediction is more inaccurate).

Table 2: Sum of squared error function values.

FL	Mass estimate [tons]	LS Minimum at
80	50.18	906
90	49.88	374
100	50.28	1157
110	50.37	1324
120	50.85	2278
130	50.63	2923

A problem occurred with the mass estimate when it was applied for flights with level off segments. During the level off, the potential energy difference is zero and equation (1) yields unrealistically high mass estimates. In Figure 6, a typical example is

shown for a flight with two level off segments during 200 and 400 seconds after Take Off. Thus a mass estimation shall be avoided where some of the trajectory points fall within or are close to a level off segment.

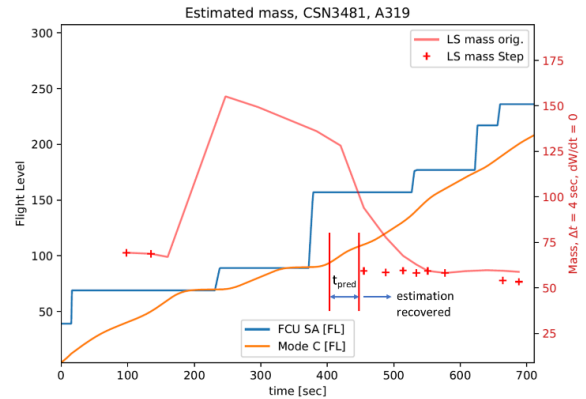


Figure 6: Mass estimation with optimized LS minimization.

Therefore, the original algorithm has been changed: the trajectory point was discarded if the difference between flight level and Selected Altitude is less than a threshold value (here 1000 feet). While a shorter prediction time provides earlier recovery from level off, it adds more noise to individual estimates. The red crosses in Figure 6 show the mass estimation with the modified algorithm which avoids the overshoot in mass estimation during level off periods.

## Results

### Mass Estimations with Full Flight Simulator

In 2019 and 2020, the project team carried out simulation runs in a qualified Full Flight Simulator from Lufthansa Aviation Training. Four scenarios were conducted with the A343 and eight scenarios with the A319 aircraft type. All flights took off either from Frankfurt EDDF or from Düsseldorf EDDL and climbed up to FL300 and above. While the environment was set to ISA conditions, the Take Off weight and the Cost Index were varied among the runs.

Aircraft data were recorded and made available for analysis after the experiments. The recordings comprised among others the different speeds of the aircraft (CAS, TAS, Ground Speed, Mach),

<sup>2</sup> Qualified Full Flight Simulator at Lufthansa Aviation Training in Frankfurt.



heading, track, thrust, altitude and also actual mass with a time resolution of less than one second.

Using only the Mode S data of our recordings, the least square method for mass estimation was applied and compared to the actual mass of the aircraft. This was done from FL40 to FL260 in steps of 5 FL and derived the mean value and standard deviation per flight

Figure 7 shows a typical example for the A319. The estimated mass fluctuates between 65 tons and 68 tons while the actual (true) mass is decreasing steadily from 68 tons to 66 tons between FL 40 and FL 250.

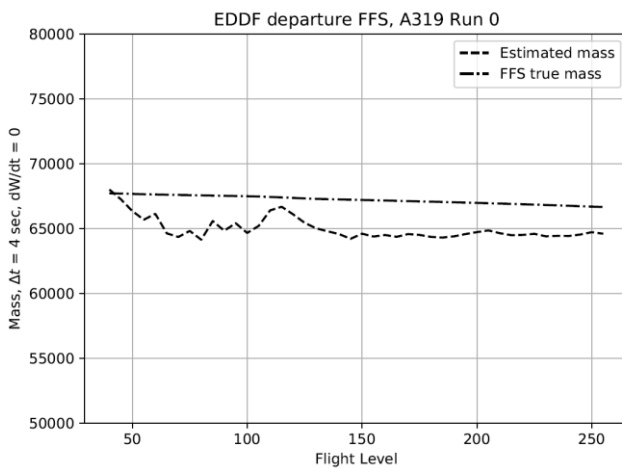


Figure 7: Mass estimation with Full Flight Simulator.

The detailed results for each of the scenarios are shown in Table 3 and Table 4. The true mass value is an average value between Take Off mass and (decreased) mass in FL260. The mean and standard deviation values are related to the least square mass estimation between FL40 and FL260. The relative error in % is the difference between mean and true mass, related to the true mass.

Table 3: A343 mass statistics.

True Mass [tons]	Mean [tons]	Std.Dev [tons]	Relative Error %	Notes
270.0	260.8	8.4	3.4	CI 0
270.0	281.7	3.4	4.3	CI 99
190.0	192.1	5.9	1.1	CI 0
190.0	191.8	4.6	0.9	CI 99

The A343 mass estimation shows an error of about 4% for the maximum Take Off weight while the error is around 1% for the lower Take Off weight. In these scenarios, the Cost Index does not seem to impact the mass estimation error.

Table 4: A319 mass statistics.

True Mass [tons]	Mean [tons]	Std.Dev [tons]	Relative Error %	Notes
57.0 TA	56.2	1.1	1.4	CI 20
67.0 R0	65.8	0.9	1.8	CI 0
67.0 R1	64.9	1.1	3.1	CI 99
41.0 R2	38.6	0.5	5.9	CI 0
67.0 R6	64.7	0.5	3.4	CI 35
54.0 R7	53.2	0.4	1.5	CI 65
54.0 R8	53.0	0.5	1.9	CI 0
41.0 R14	38.7	0.4	5.6	CI 65
67.0 R6	64.7	0.5	3.4	CI 35

For the A319, the results of the mass estimation are not as accurate as for the A343. The relative error is in the magnitude of 5%. Again, no correlation to the Cost Index (CI) could be observed. The CI is always translated into a speed profile. As long as the speed profile is known, there is no further impact by the CI. From **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, it is noticeable that all mean mass estimations are well below the true mass. Moreover, the standard deviation of these estimations was quite low. That means that the estimation is rather stable. These two observations may be an indicator that there was some systematic bias (assumption: derated thrust) which seem not to be the case for the A343 aircraft type.

A possible explanation is the thrust model of BADA that can be significantly different from the real engine characteristics. Moreover, previous experiments have shown [13] that the wind effect, stimulated in the FFS simulator, has an impact to the climb performance. This may be more obvious for the A319 because of the lower aircraft weight.

## Mass Estimations Operational Flights

While the exact aircraft mass from the Full Flight Simulator is known, this information is not available for commercial flights. For this reason, a plausibility check was performed to look at the distribution of the estimated mass for departure flights from two different airports: Munich (EDDM) in Germany and Baiyun (ZGGG) in China. The mean of this distribution was compared with the BADA reference mass and with the estimated mass to the Maximum Take Off Weight (MTOW). The most frequent aircraft types have been chosen for this analysis at each airport: the A320 for EDDM and the A319 for ZGGG.

## EDDM

For departures from EDDM, the mass was computed from FL50 to FL210 in steps of 10 FL (in total, 17 mass estimations for each departure flight). The mean value and the standard deviation for each flight was derived. Figure 8 shows the resulting mass distribution for 348 flights in August 2019. The majority of the mass lies in the range between 60 and a bit under 80 tons. The Maximum Take Off Weight for the A320 is 78 tons. Compared to this value, the distribution seems to be plausible and this mass estimate for the climb performance calculation can be used well.

The mean of this distribution was at 65.8 tons. If compared to the BADA reference value of 64.0 tons, a slightly higher value was observed. However, the mean of the found distribution and the BADA reference mass are quite close together which is an indicator of the validity of this approach<sup>3</sup>.

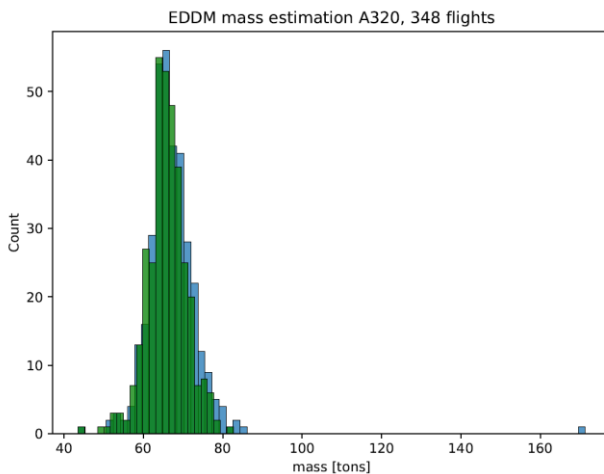


Figure 8: Mass distribution EDDM departures A320 (blue: original algorithm, green: optimized algorithm).

Figure 9 shows the standard deviation which correspond to the mass distribution. The one-sigma value is in most of the estimations below five tons. This is an indicator of the fluctuation of the individual mass estimates although one need to be careful here because of the (low) number of estimates per flight.

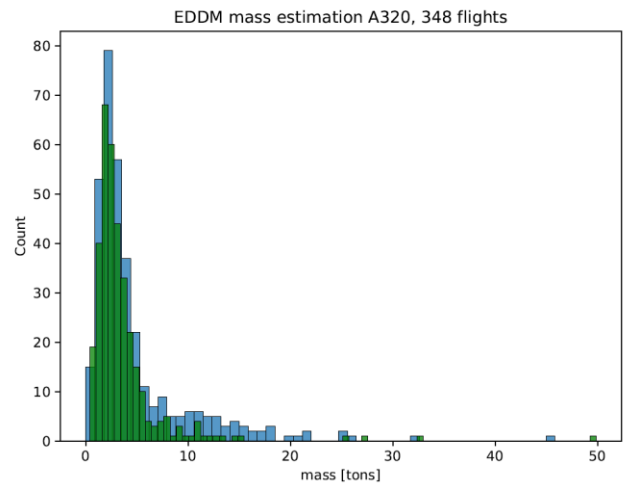


Figure 9: Standard Deviation EDDM departures A320 (blue: original algorithm, green: optimized algorithm).

One may observe some (minor) shift of the distributions if the temperature deviations to the ISA conditions and the wind vector are taken into account. However, it is assumed that for this aircraft type the excess power of the engines is high enough to compensate for higher than ISA temperatures profiles.

## ZGGG

For 100 departure flights from ZGGG in May 2021, the mass was computed at an interval of 10 FL for each departure flight. The mean value and the standard deviation were derived for each flight. The resulting mass distribution is shown in Figure 10. The blue distribution denotes the case that the level off segments are not filtered out. In this case, the majority of the mass estimations lies in the range between 60 and 95 tons. The Maximum Take Off Weight for the A319 is 75.5 tons. Compared to this value, the results of blue distribution are unreasonable. The green distribution denotes the case that the level off segments are filtered out. In this case, the majority of the mass lies in the range between 60 and 80 tons. The estimated mass falls in the reasonable range (mass\_min = 40.00 t, mass\_max = 70.00 t, mass\_ref = 60.00 t).

The main reason for the difference between blue and green distribution is that there are many flight restrictions during the climb process in ZGGG airport, resulting in a large number of level off

<sup>3</sup> The mass distribution of A319 was computed in the same way. While the BADA reference mass is 60.0 tons, the mean of the mass distribution is 62.7 tons.

segments.

As can be seen from figure 10, the large number of level off segments has a negative impact on the mass estimation.

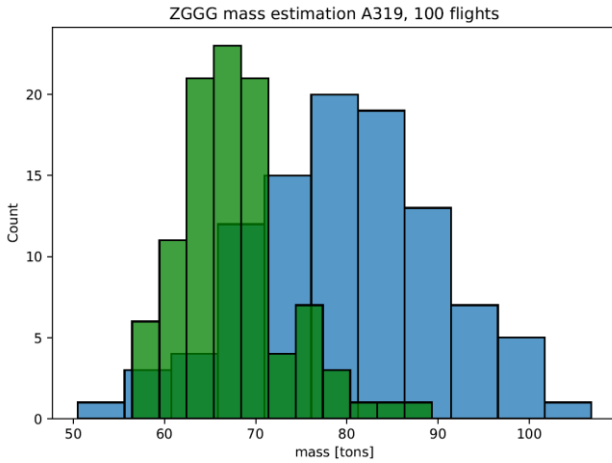


Figure 10: Mass distribution ZGGG departures A319 (blue: original algorithm, green: optimized algorithm).

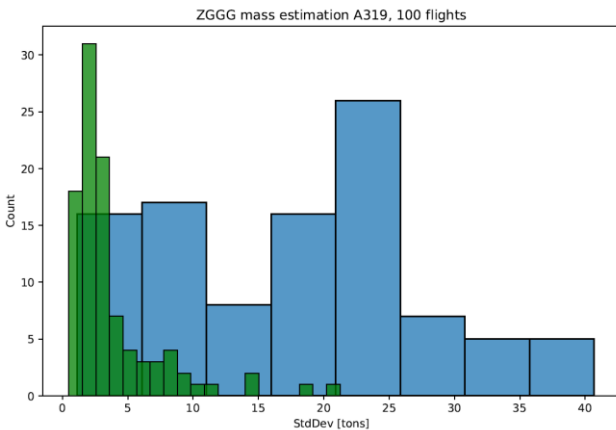


Figure 11: Standard Deviation ZGGG departures A319 (blue: original algorithm, green: optimized algorithm).

Figure 11 shows the standard deviation which correspond to the mass distribution. In the figure, it is observed that the blue bars are scattered in a large range, while the green bars concentrate on the small values. This demonstrates that it is beneficial for flight mass estimation to filter out level off segments.

### Temperature Sensitivity

The departure flights in this calculating example come from ZGGG of May, 2021. The temperature was obtained from re-analysis data ERA5 ECMWF [22]. To find out how temperature influences the calculation of mass estimation, Gaussian noise was added to the temperature associated to each

trajectory point, where  $\mu$  and  $\sigma$  denote the expectation and standard deviation of Gaussian noise, respectively.

$$T \sim N(\mu, \sigma^2) \quad \mu = 0$$

$$(6) \quad \sigma \in [1,10]$$

The root mean square error (RSME) was used to describe the standard deviation of estimated mass, where  $mass_{actual}$  denotes the actual mass and  $mass_{estimated}$  denotes the estimated mass.

$$\frac{mass_{estimated} - mass_{actual}}{mass_{actual}}$$

The actual mass is obtained with the temperature from ERA5 ECMWF, and the estimated mass was obtained with the temperature adding a standard deviation of Gaussian noise shown as in the following formula

$$T + \sigma \quad (7)$$

where  $\sigma = nK, n = 1,2,3 \dots 10$ , K denotes Kelvin, T denotes the temperature from ERA5 ECMWF without Gaussian noise, i.e.  $T = T + 5nK$  with  $n = 0$ .

Figure 12 illustrates the RMSE of B738 with zero mean and the sigma of Gaussian noise temperature ranges from 0K to 10K. Despite several outliers, the estimated mass is related to the noise in temperature. As the standard deviation sigma increases, the error is greater.

As shown in Figure 13, the RMSE of 10 typical aircraft types was calculated with Gaussian noise (mean = 0K, sigma = 5K) in temperature. Comparing the RMSE of the chosen aircraft types, it's obvious that all errors remain in a range of a few percent and there are hardly any differences between the short-range aircraft and the long-range aircraft.

### The Performance Calculator

#### Description

Various real and simulated scenarios can be re-emulated by a performance calculation. The Performance Calculator presented here can be used to cross-check other trajectory predictions. It is based on the TEM with a state vector consisting of air distance, ground distance, true airspeed, pressure height, and fuel consumption. Initialized with a start state (containing the information of the

start mass) and - based on a specific aircraft performance model (BADA for instance), a flown trajectory is predicted.

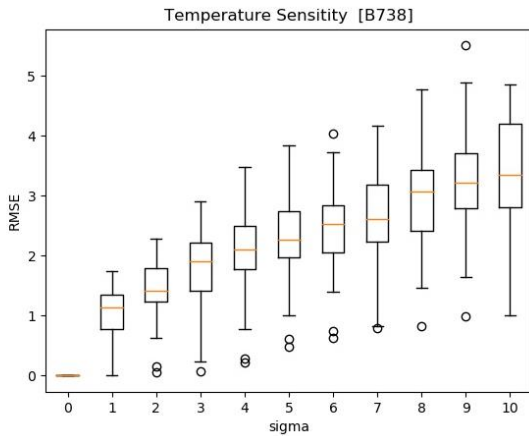


Figure 12: RMSE mass estimate for different sigma.

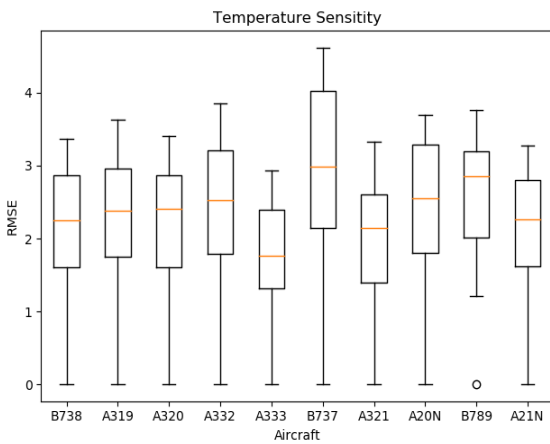


Figure 13: RMSE mass estimate for different aircraft types.

The Performance Calculator can use atmosphere data for its trajectory prediction like temperature, pressure differences from standard atmosphere, and wind data to see the effects on the trajectory when a given true track has to be maintained. The performance model can be varied in several ways. It can integrate control cycles (like const-CAS-Mach changes of the pressure height or maintaining a constant ROCD) or it can vary its control parameters like thrust, drag, fuel flow, or Energy Share Factor<sup>4</sup> (the contribution of the applied forces to the change in potential energy). The different effects of different input data on the

<sup>4</sup> “This energy share factor ... specifies how much of the available power is allocated to climb as opposed to

trajectory prediction can be evaluated and visualized. Usability and flexibility have been a major goal for the design. The Performance Calculator can be run offline as a desktop application or online as an HTTP service in the cloud. It is easy to configure, and it executes fast with a few seconds computation time for one hour of flight.

## Emulations

To demonstrate the impact of thrust and mass uncertainty, several scenarios of an A332 were analyzed and re-emulated with different mass and thrust settings. After several runs of the Performance Calculator, it became clear that the knowledge of the exact mass is not sufficient. The same aircraft type can be operated with different engines and different thrust settings. The drag can vary as well. A variation of thrust can have the same magnitude of uncertainty in the prediction of the top of climb as the variation of mass, in some circumstances the effects of both variations cancel each other out.

In Figure 14 the climb of an A332 modeled according to BADA with the given reference mass (190t) and the default speed settings (320/300 kts for the CAS and 0.82 MACH) is displayed.

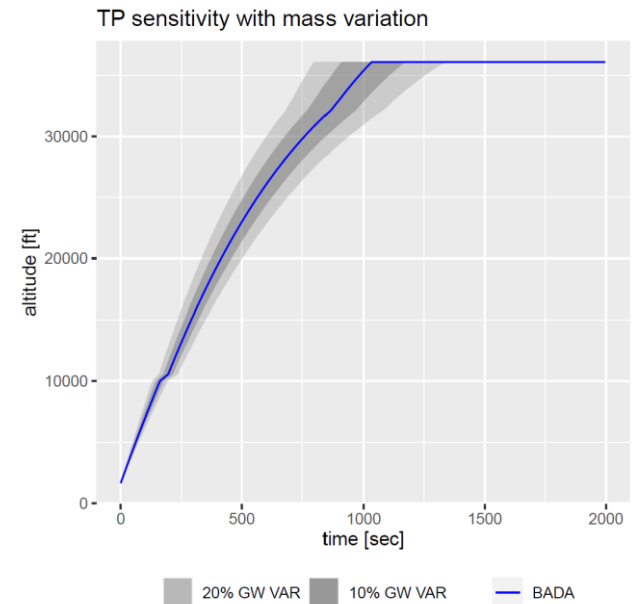


Figure 14: Mass variation of TP with the Performance Calculator.

acceleration while following a selected speed profile during climb.” [10]

Here the effect on the Top of Climb (TOC) is seen when the reference mass is varied about +/-10% and +/-20%. Also thrust variation (cf. Figure 15) by +/-10% or +/-20% influences the TOC while the reference mass stays the same.

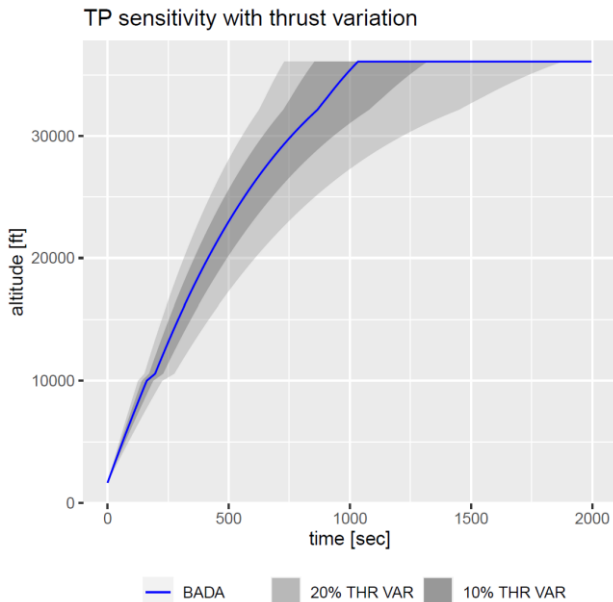


Figure 15: Thrust variation of TP in the Performance Calculator.

Now mass and thrust variation can be combined (cf. Figure 16) and there is an overall effect on the TOC of the trajectory. Looking at the trajectory where the initial reference mass is varied by -10% this trajectory can vary again by +/-20% thrust and the effect on the TOC is almost canceled out.

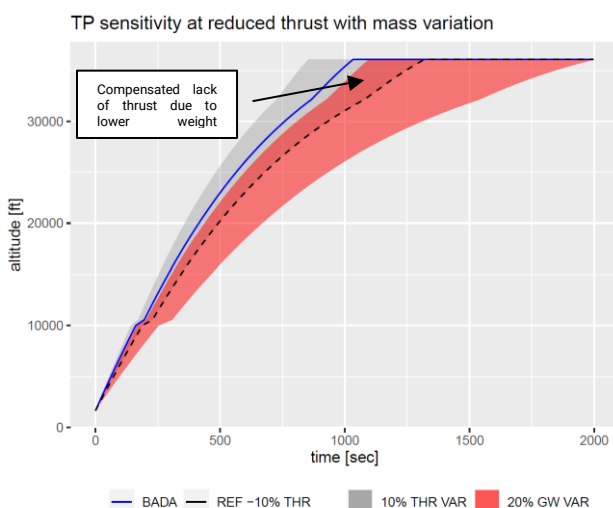


Figure 16: Combined mass and thrust variation in the Performance Calculator.

The different effects of different input parameters – mass, speed, thrust – may compensate the deviations mutually. It is necessary to have a knowledge of all those control parameters. The knowledge of mass and speeds alone is not sufficient.

Whereas speed may be observed or known from the flight plan, the lack of knowledge of mass or thrust is more critical for an accurate trajectory prediction.

Automatic Dependent Surveillance based on a datalink Contract (ADS-C) as part of a new datalink standard provides a technical solution to transmit the planned aircraft trajectory with the predicted 4D position including additional information to the ground. The respective datalink report is called Extended Projected Profile (EPP). RTCA/EUROCAE working group (WG-78/SC-214) defined the new ATS Baseline 2 datalink standard providing this type of information from air to the ground. First aircraft fleets of different airlines have been equipped so far. EPP availability on ground as a technological solution is a first step towards a full ground-air trajectory synchronization required for the implementation of the targeted Trajectory-Based Operations (TBO). Specific parameters like mass and speed (speed profile and the speed schedule, i.e., climb CAS, climb/cruise Mach and descend Mach/CAS) will help to improve the trajectory prediction, at least for certain flight phases as well as certain aircraft. Nevertheless, a certain degree of mixed traffic has to be assumed even in a future development.

Figure 17 shows a possible integration of the ADS-C EPP reports used for trajectory prediction. Certain parameters from ADS-C EPP are taken as the Aircraft Intent. Moreover, ADS-C provides a local meteorological report for local temperature and wind. This allows to assess and adjust the environmental conditions. The atmospheric data is recognized as corrected atmospheric data in the total-energy model and defines the state vector of the aircraft at time  $t_n$  more accurately. Together with the aircraft intent the BADA model is able to predict the future positions with a lower uncertainty, depending on the accuracy of the input information.

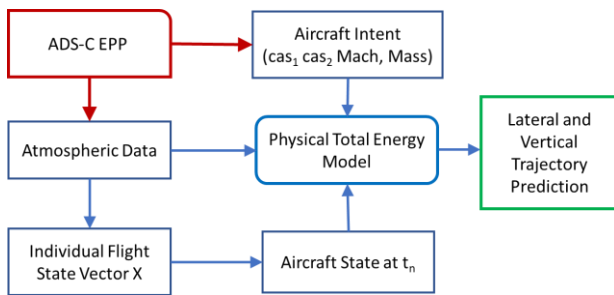


Figure 17: Integration of ADS-C EPP to the TP model.

Another potential improvement may be reached via a better modelling of thrust. EPP trajectory information can be used to identify corrective coefficients that can be applied in the BADA model. It can further reduce the gap between flown trajectory and its prediction. This approach is not part of this study/paper and is subject to future investigations. It is not reflected in the given model.

## Conclusions and Outlook

The method of Least Square estimation to derive the mass of departing aircraft was applied. For this estimation, only today's available Mode S EHS data were used. The comparison to qualified Full Flight Simulator trials shows an accuracy of better than 6%. The mass distribution at ZGGG and EDDM for selected aircraft types shows a Gaussian-shaped curve with a mean close to BADA reference values. The temperature sensitivity analysis reveals that the root mean square error of the aircraft mass is always less than a few percent. With the performance calculator, the sensitivity of the mass and the thrust to the trajectory prediction during the departure phase up to the Top of Climb was analyzed.

The next steps will be the integration of meteorological data to the trajectory. A neural network will be developed to learn the speed schedule or aircraft intent from the observed Mode S, flight plan and mass data. This information will then be used to finalize the trajectory predictor (refer Figure 1). In the future, with the availability of ADS-C EPP data, the aircraft intent as well as the current atmospheric data can be obtained directly from the aircraft. It is expected that the accuracy of the ground trajectory prediction can be further increased with this data. Subject to future research could be a comparison of the TP accuracy with Mode S data only and with complementary ADS-C EPP data.

*Acknowledgements: This work is supported by the National Key Research and Development Program (No. 2018YFE0208700) of China and the Research and Development Cooperation Project in Trajectory Based Operation and Free Route Airspace between NRIIE and DFS Aviation Services (No. AS-2019-020).*

## Abbreviations

ADS-B	Automatic Dependent Surveillance Broadcast
ADS-C EPP	Automatic Dependent Surveillance – Contract Extended Projected Profile
ATC	Air Traffic Control
ATM	Air Traffic Management
ATS	Air Traffic System
BADA	Base of Aircraft Data
BDS	Comm-B Data Selector
CAS	Calibrated Airspeed
CI	Cost Index
DFS	Deutsche Flugsicherung GmbH
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EDDF	Frankfurt Airport
EDDL	Düsseldorf Airport
EDDM	Munich Airport
EHS	Enhanced Surveillance
EPP	Extended Projected Profile
ERA5	ECMWF Re-analysis v5
ESF	Energy Share Factor
EUROCAE	European Organization for Civil Aviation Equipment
FFS	Full Flight Simulator
FL	Flight Level
ISA	International Standard Atmosphere
LS	Least Square
MCP/FCU	Mode Control Panel / Flight Control Unit

MTOW	Maximum Take Off Weight
RMSE	Root Mean Squared Error
ROCD	Rate of Climb and Descend
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics
TAS	True Airspeed
TEM	Total Energy Model
TOC	Top of Climb
TP	Trajectory Prediction
ZGGG	Guangzhou Baiyun International Airport

**References**

[1] Common Trajectory Prediction Capability for Decision Support Tools, Sip Swierstra, EUROCONTROL HQ, Brussels & Steven M. Green, National Aeronautics and Space Administration, Ames Research Center, Moffett Field, CA, 5th USA-Europe ATM Seminar, Budapest, June 2003.

[2] Bayesian inference of aircraft initial mass, Junzi Sun, J. Ellerbroek & J. Hoekstra, in 'Proceedings of the 12th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar', FAA/ EUROCONTROL, 2017.

[3] Machine Learning and Mass Estimation Methods for Ground-Based Aircraft Climb Prediction. Richard Alligier, David Gianza & Nicolas Durand. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, IEEE, 2015, pp.1-12.

[4] Statistical Modelling of Aircraft Takeoff Weight. Y.S. Chati & H. Balakrishnan. 12th USA/Europe ATM Research and Development Seminar ATM 2017.

[5] Adaptive Trajectory Prediction Algorithm for Climbing flights. Charles A. Schulz, David Thipphavong & Heinz Erzberger. American Institute of Aeronautics and Astronautics. Aug. 2012.

[6] Ground Based Estimation of Aircraft Mass. Adaptive vs. Least Square Method. Richard Alligier. June 2013.

[7] Real Time Predictor Calibration through EPP Profile Down-Link. Jesper Broonsvoort. ATM2015 Seminar.

[8] Learning aircraft operational factors to improve aircraft climb prediction: A large scale multi-airport study. Richard Alligier. Sept. 2018.

[9] Fuel Consumption Model of the Climbing Phase of Departure Aircraft Based on Flight Data Analysis. Ming Zhang et.al., Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, China 2019.

[10] User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA), Revision 3.15, EEC Technical /Scientific Report No. 19/03/18-45. May 2019.

[11] Flight Level Prediction with a Deep Feedforward Network. Matthias Poppe, Deborah Fieberg & Roland Scharff. SESAR Innovation Days Salzburg, December 2018.

[12] Review & Perspective for Distance Based Trajectory Clustering. Philippe Besse, Brendan Giullouet et al. arXiv: 1508.04904v1. August 2015.

[13] Improving Climb Performance Prediction in Air Traffic Control with Machine Learning and Full Flight Simulator Verification. Matthias Poppe, Thomas Pütz & Roland Scharff. DIGITAL AVIONICS SYSTEMS CONFERENCE, San Diego, USA 2019.

[14] Clustering Climb Profiles for Vertical Trajectory Analysis. Matthias Poppe & Jörg Buxbaum. SESAR Innovation Days, December 2020.

[15] Aircraft mass parameter estimation method based on mode S data, Long-Biao Ma, Wei-yu Jiang, Yang Zhang, Yun-Gang Tian & Matthias Poppe, 2021.

[16] BADA: An advanced aircraft performance model for present and future ATM systems, Angela Nuic, Damir Poles & Vincent Mouillet, EUROCONTROL. International Journal of adaptive control and signal processing, 2010.

[17] Least squares quantization in pcm. S. Lloyd. IEEE transactions on information theory, vol. 28, no. 2, pp 129-137. 1982.

[18] ICAO Doc 9871 AN/464 Technical Provisions for Mode S Services and Extended Squitter, First Edition, 2008.

[19] Traffic, a toolbox for processing and analysing air traffic data. Xavier Olive. Journal of Open Software, Vol. 4, 2019

- [20] Bringing up OpenSky: A large-scale ADS-B sensor network for research. Matthias Schäfer, Martin Strohmeier, Vincent Lenders, Ivan Martinovic & Matthias Wilhelm. ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks, April 2014.
- [21] The OpenSky Network, <http://www.opensky-network.org>
- [22] ECWMF ERA5 re-analysis data, <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>
- [23] International Organization for Standardization, Standard Atmosphere, ISO 2533:1975, 1975.



## Betrachtung des DFS Data Centers und Beurteilung seiner Fehlerumgehungstools

Philip Heidenreich

### Einleitung

Um einen sicheren Betrieb des Flugverkehrs zu gewährleisten, werden von der Deutschen Flugsicherung (DFS) zurzeit mehrere verschiedene Flugsicherungsapplikationen verwendet, die überwiegend auf ihrer eigenen physischen Hardware (HW) laufen. Mit dem Ziel der Modernisierung hat die DFS ein Programm aufgelegt, um eine grundlegende Umgestaltung ihrer Systemlandschaft vorzunehmen. Die Basis für diese neue Systemlandschaft soll eine Plattform sein, auf der sukzessive der Großteil der Flugsicherungsapplikationen laufen soll. Die Applikationen teilen sich dabei die benutzte HW, indem sie in verschiedener Weise virtualisiert werden. Diese neue Plattform wird auch als „Data Center“ bezeichnet. Die mit der Einführung eines Data Centers (DC) einhergehenden Maßnahmen wie Automatisierung, automatische Fehlerumgehung bzw. -behebung etc. sollen einen sichereren Betrieb von Applikationen gewährleisten. Es wird außerdem davon ausgegangen, dass die Flugsicherungsapplikationen zum Teil leichter zu warten und testen sein werden, sowie sich einfacher bereitstellen lassen.

In der originalen Version der diesem Artikel zugrundeliegenden Bachelorarbeit (BA) [1] wurde darauf eingegangen, wie sich dadurch das Aufgabenspektrum für Abteilungen ändern wird, die Applikationen im DC betreiben. Dabei war auch von Interesse, welche Implikationen die Virtualisierung von Applikationen auf die Applikationen selber hat, welche Möglichkeiten es gibt, in der Vergangenheit aufgetretene Fehler durch Funktionen des DC zu beheben und ob durch die neue Art des Applikationsbetriebs sowie der Fehlerbehebung bzw. -umgehung neue Probleme zu erwarten sind. Im Rahmen dieses Artikels wird ein Teil der gewonnenen Ergebnisse veröffentlicht.

### Plattform des Data Centers

Der Betrieb von mehreren Applikationen auf einem Server ist i. d. R. nicht möglich, ohne dass die Applikationen innerhalb eines Betriebssystems ausgeführt werden. In der DFS werden historisch bedingt viele Flugsicherungsapplikationen (FS-

Applikationen) verwendet, die auf für sie zugeschnittenen Betriebssystemen entwickelt wurden, was das Zusammenfassen von Applikationen auf ein Betriebssystem erschwert. Da sich Applikationen, welche gemeinsam auf einem Betriebssystem ausgeführt werden, außerdem gegenseitig beeinflussen können, ist diese Art des Betriebs nicht empfehlenswert.

Um viele verschiedene Applikationen in einem DC gemeinsam auszuführen, wird unter anderem eine Technik namens „Voll-Virtualisierung“ (s. Abschnitt „Infrastructure as a Service“) verwendet. Diese Art der Virtualisierung ermöglicht es, verschiedene Instanzen von Betriebssystemen und die auf ihnen laufenden Applikationen auf einem Server zu hosten. Um diese Virtualisierung im DC zu ermöglichen, wird der Produktstack des Unternehmens VMware verwendet, welches verschiedene Produkte für den virtualisierten Betrieb von Applikationen/Betriebssystemen und das Betreiben von Rechenzentren anbietet.

### Produktstack des Data Centers

Im Folgenden werden zwei der wichtigsten VMware Softwareprodukte vorgestellt, welche im DC zum Einsatz kommen. Durch diese Produkte ist es möglich, virtualisierte Applikationen im DC zu hosten und zu steuern.

Auf jedem Server des DC ist eine Software (SW) namens VMware vSphere installiert. Durch diese SW wird den Servern die „Voll-Virtualisierung“ von Betriebssystem-Instanzen möglich, was das Hosten von vielen Betriebssystemen/Applikationen gleichzeitig ermöglicht. vSphere erlaubt dabei das Überwachen und Steuern aller gehosteten Betriebssystem-Instanzen. Es lässt sich so z. B. anzeigen, ob die Instanz momentan an- oder ausgeschaltet ist und wieviel Systemressourcen jede Instanz beansprucht. Es ist außerdem möglich, die Hardwarekonfiguration jeder Betriebssystem-Instanz zu verändern, z. B. die ihr zur Verfügung gestellte Rechenleistung und die Anzahl der (virtuellen) Netzwerkkarten. Um mit Betriebssystem-Instanzen interagieren zu können, kann eine Funktion von vSphere genutzt werden, die den Bildschirminhalt jeder Instanz auf einer Webseite zur Verfügung stellt. Dies ermöglicht Interaktionen mit Betriebssystem-Instanzen als

wären diese auf einem dedizierten Computer installiert. Über diese Funktion wurde die Interaktion mit den Applikationen möglich und dadurch folglich auch die Messungen, welche für diese BA durchgeführt wurden.

Eine weitere SW die im DC zum Einsatz kommt ist VMware vCenter. In das vCenter können alle betriebenen vSphere-Server eingebunden werden, was die getrennt operierenden Server zu einem funktionalen Cluster kombiniert und so das zentrale Verwalten aller Server ermöglicht. Das Webinterface vom vCenter wird für die DC-Administratoren eine zentrale Anlaufstelle sein, um den Betrieb des DC und der Applikationen zu steuern bzw. überwachen.

## Cloudmodelle

Mit der Übertragung der Applikation eines Kunden auf diese Plattform entsteht, was die Sicherstellung der Verfügbarkeit des Dienstes angeht, eine geteilte Verantwortung. Diese Aufteilung der Verantwortung spiegelt sich in den Cloudmodellen wider, die eine Trennung der Zuständigkeitsbereiche erzeugen, indem der Kunde sich bei der Wahl des Cloudmodells dafür entscheidet, welche Anteile der SW bzw. der Plattform er selbst bereitstellt bzw. einrichtet und betreibt und für welche Anteile der DC Betreiber zuständig ist (siehe Tabelle 1 für eine Gegenüberstellung). Diese Trennung der Zuständigkeitsbereiche ist ein weiteres Ziel beim Betreiben von Applikationen im DC, da sich für die Applikation zuständige Teams nur noch auf die Weiterentwicklung und Inbetriebhaltung der SW fokussieren können, während sich der DC Betreiber um die Inbetriebhaltung der Plattform kümmert. Die benötigte HW, im Sinne von Rechenkapazität, und je nach Cloudmodell auch Teile der SW werden vom Dienstleister, meist per Virtualisierung, zur Verfügung gestellt [2].

### Infrastructure as a Service

„Infrastructure as a Service“ (IaaS) ist ein Modell, welches gewählt werden kann, wenn man eine Plattform benötigt, auf der man komplett für die Bereitstellung der benötigten SW inkl. des Betriebssystems zuständig ist. Der Dienstleister stellt in diesem Fall nur (virtualisierte) HW zur Verfügung, auf der dann eine durch die Leistung der HW beschränkte Anzahl von virtuellen Maschinen laufen können [3].

Eine virtuelle Maschine (VM) beschreibt die Umgebung, innerhalb derer ein Betriebssystem und die jeweiligen Applikationen installiert und

betrieben werden können. Eine VM bietet die Funktionalitäten eines ganzen normalen Computersystems an, wird aber durch Virtualisierung zur Verfügung gestellt [4].

*Tabelle 1: Zuständigkeiten in verschiedenen Cloudmodellen (Blau markiert: Bereitstellung durch DC Betreiber; Weiß markiert: Bereitstellung durch Applikationsteam).*

Dedizierte HW (derzeitiger Betrieb)	Infrastructure as a Service	Container as a Service
Applikationsdaten	Applikationsdaten	Applikationsdaten
Applikation	Applikation	Applikation
Middleware	Middleware	Middleware
(Container-Verwaltungs-SW, falls nötig)	(Container-Verwaltungs-SW, falls nötig)	Container-Verwaltungs-SW)
Betriebssystem	Betriebssystem	Betriebssystem
(Virtualisierung, falls nötig)	Virtualisierung	Virtualisierung
Server-HW	Server-HW	Server-HW
Speicher	Speicher	Speicher
Netzwerk-Infrastruktur	Netzwerk-Infrastruktur	Netzwerk-Infrastruktur

Um eine VM betreiben zu können muss ihr Betriebssystem in der Lage sein, so mit der Server-HW zu kommunizieren, als ständen ihm sämtliche Ressourcen alleinig zur Verfügung. Dies ist nötig, da VMs z. B. Daten an die gleiche (virtuelle) Arbeitsspeicheradresse schreiben können müssen, ohne dass sie ihre Daten gegenseitig überschreiben. Die Technik, mittels der diese Anforderungen erfüllt werden können, heißt Voll-Virtualisierung. Die Voll-Virtualisierung wird möglich, indem der Hypervisor des Servers (ein Teil von VMware vSphere) die vom VM-Betriebssystem gestellten Anfragen auf Maschinencode-Ebene so übersetzt, dass ein für die VM erwartetes Verhalten resultiert. In Bezug auf das Beispiel würde der Hypervisor die Arbeitsspeicheradressen so verändern, dass die VMs auf unterschiedliche physikalische Arbeitsspeicherbereiche zugreifen [5].

Da die Voll-Virtualisierung dem VM-Betriebssystem vortäuscht, dass es alleinig auf einem Computersystem betrieben wird, kann so fast jedes moderne Betriebssystem virtualisiert werden [6].

### Container as a Service

Bei „Container as a Service“ (CaaS) möchte man, wie bei IaaS, eine Plattform schaffen, auf der Kunden ihre Applikationen betreiben können. Der Dienstleister des DC ist, wie bei IaaS, für die Bereitstellung der HW verantwortlich, übernimmt nun aber auch die Bereitstellung des Betriebssystems und der SW, die das Hosten von sogenannten Containern ermöglicht. Der Kunde muss für den Betrieb seiner Applikation nun nur noch die Applikation selbst, in Form eines Containers, auf diese Plattform aufspielen. Die Applikation ist zumeist so konfiguriert, dass sie ohne Änderung der Konfiguration lauffähig ist [7].

Bei CaaS wird nicht wie bei IaaS für jede Applikation eine eigenständige Plattform inkl. virtualisierter HW geschaffen. Dies wäre ineffizient, da man für jede Applikation eine eigenständige Betriebssystem-Instanz benötigen würde, die, für sich selbst genommen, Rechenkapazität verbrauchen. Alle Applikationen auf einem Betriebssystem laufen zu lassen wäre zwar eine effizientere Option, allerdings mit der Problematik, dass Applikationen so nicht isoliert voneinander laufen würden, was gewollt ist, um eine gegenseitige Störung der Applikationen zu verhindern. Um diese Anforderungen zu erfüllen wird Shared-Kernel-Virtualisierung verwendet. Dabei wird jeder Applikation innerhalb des Betriebssystems, in dem sie ausgeführt werden sollen, eine isolierte Betriebssystemumgebung zur Verfügung gestellt, in der Applikationen wie gewohnt arbeiten und auf Betriebssystemfunktionalitäten zugreifen können, ohne dass sie von anderen Applikationen beeinflusst werden können. Da das Starten einer Applikation so nicht mehr mit dem Booten eines Betriebssystems verknüpft ist, sind die Startzeiten sog. containerisierter Applikationen geringer [8].

Container bezeichnen den Rahmen bzw. die Umgebung, in dem die auszuführenden Applikationen zusammen mit ihren Abhängigkeiten zur Laufzeit gespeichert sind und ausgeführt werden. Im Kontext der Shared-Kernel Virtualisierung entspricht ein Container einer Betriebssystemumgebung [9]. Die Funktionalität von Containern kann auf die in ihm gespeicherten Applikationen bzw. Daten zurückgeführt werden. Würde daher eine Kopie aller in ihm gespeicherten Daten gemacht werden, so wäre dies ein Abbild des Containers an sich, weshalb diese Art von Abbild „Container-Image“ genannt wird. Mittels eines Container-Images, welches eine einfache Datei ist, lassen sich beliebig viele Kopien von

Containern erstellen, welche, unter der Bedingung von gleichen Host-Betriebssystem-Kernel Funktionen, identisch operieren, selbst wenn sie auf unterschiedlicher, aber dennoch kompatibler HW gestartet werden. Aufgrund dieser einfachen Möglichkeit, Container zu einem anderen Host zu transportieren und zu hosten, werden Container-Images oft als Mittel verwendet, um neue Container einer Applikation zu erstellen [10].

### Analyse von Fehlerumgehungsmethoden des DC

Im Folgenden werden Fehlerumgehungstools des DC auf den Betrieb einer Applikation angewendet, welche sich in verschiedene Fehlerszenarien befindet. Das Ziel ist zu beurteilen, ob diese Fehlerumgehungstools im Vergleich zur manuellen Fehlerbehebung eine Verbesserung darstellen. Die Art der Fehler, die auftreten können, stammen dabei aus einer Personenumfrage, die im Rahmen der BA durchgeführt wurde [1]. Um den Umfang dieses Artikels einzugrenzen, wird auf eine detaillierte Darstellung verzichtet. Zu jeder Kombination aus Fehlerszenario und (nicht) angewendeter Fehlerumgehungsmaßnahme wurden vier Messungen durchgeführt. Die später vorgestellten Messergebnisse sind der Durchschnitt aller Messungen.

Für die Messungen wird eine Referenzapplikation benötigt, welche sich wie eine typische Flugsicherungsapplikation verhält, sie umfasst daher Module zur Datenverarbeitung, Speicherung von Daten und Netzwerkkommunikation. Ein typischer Vertreter einer solchen ist „Phoenix TWR“, welches u. a. mittels empfangener Radar-daten die räumliche Lage von Flugzeugen berechnet und darstellt. Die Referenzapplikation soll sich funktional ähnlich verhalten und wurde daher aus zwei Teilen gebaut. Der Client-Teil der Referenzapplikation sendet zufällige Daten an den Server und empfängt die „verarbeiteten“ Daten von diesem. Der Server-Teil empfängt die zufälligen Daten des Clients, macht auf ihrer Grundlage eine rechenintensive Berechnung, speichert die Daten ab und schickt die „verarbeiteten“ Daten zurück zum Client. Der Client- und Server-Teil dieser Referenzapplikation werden im Folgenden im DC betrieben, nur auf den Server-Teil werden aber die Fehlerszenarien und Fehlerumgehungstools angewendet.

Um die Anwendbarkeit der Fehlerumgehungsmaßnahmen beurteilen zu können benötigt man Messwerte der Applikation. Ein Messwert, der sich

gut eignet, ist die Round-Trip-Zeit (RT-Zeit), welche widerspiegelt, wie viel Zeit für den Client-Teil vergeht vom Abschicken von Daten bis zum Empfangen der entsprechenden „verarbeiteten“ Daten. Diese Zeiten wurden vom Client-Teil gemessen und nach jeder Messung gespeichert.

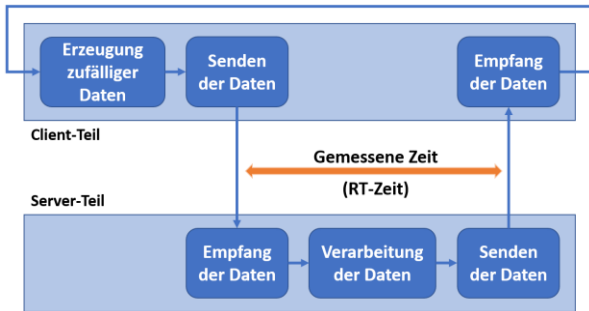


Abbildung 1: Ablaufdiagramm der Referenzapplikation.

## Betrachtete Fehlerumgehungstools

### Distributed Resource Scheduler

Der „Distributed Resource Scheduler“ (DRS) ist ein Tool von VMware, welches es erlaubt dauerhaft die Auslastung von vCenter Clustern zu überwachen. Sollte das Cluster ungleichmäßig beansprucht werden, so kann DRS automatisiert die laufenden VMs im Cluster so verschieben, dass eine gleichmäßige Auslastung der Hosts entsteht [11]. Diese Technik erlaubt es zu verhindern, dass ein Host übermäßig stark beansprucht wird, was den Applikationen einen potenziell Fehler-freieren Betrieb erlaubt.

### Proactive High-Availability

Die Funktion namens „Proactive High-Availability“ (Proactive HA) überwacht ständig den Hardwarezustand der Hosts im Cluster. Dabei achtet Proactive HA auf alle Anzeichen, die auf einen baldigen Ausfall des Hosts hindeuten könnten, z. B. den Gesundheitszustand des Arbeitsspeichers, der Stromversorgung und der Lüfter sowie auf Defekte redundanter Komponenten. Im Falle eines erwarteten Ausfalls können die VMs, die auf dem betroffenen Host eines Clusters laufen, innerhalb des Clusters proaktiv auf einen anderen Host migriert werden, wodurch die Chance des Ausfalls dieser VMs verringert wird [12].

### vSphere High-Availability

„vSphere High-Availability“ (vSphere HA) überwacht die Hosts des Clusters ständig auf Funktionsfähigkeit, indem die Hosts auf ein sog. Heartbeat-Netzwerkpaket antworten. Das Empfangen eines Heartbeat-Pakets eines Hosts

dient als Bestätigung dafür, dass der entsprechende Host noch lauffähig ist. Sollte es dazu kommen, dass ein Host nicht antwortet, wird davon ausgegangen, dass er nicht mehr funktioniert. Alle ursprünglich auf ihm laufenden VMs werden danach, sollte genug freie Rechenleistung verfügbar sein, auf den restlichen Hosts des Clusters neu gestartet [13]. Somit ist die Ausfallzeit der VMs nur so groß wie die Zeit, die sie zum Starten des Betriebssystems und der Applikation benötigen, plus die Zeit, die vSphere benötigt, um den Ausfall des Hosts zu erkennen.

### Sicherungspunkte

VMs sind im Wesentlichen eine Ansammlung von Daten, bestehend aus Applikationsdaten, Betriebssystemdaten und sonstigen Daten, von denen eine Kopie erzeugt werden kann. Die Kopie dieser Daten ist dadurch auch ein Abbild der ganzen VM selbst. Sicherungspunkte sind ein Konzept von VMware, welches es ermöglicht, ein solches Abbild einer VM zu erzeugen, wobei auch der Zustand des Arbeitsspeichers gesichert werden kann. Da somit ein komplettes Abbild einer laufenden VM zur Verfügung steht, ist es möglich, anhand eines Sicherungspunktes eine VM so zurückzusetzen, dass sie sich im gleichen Zustand befindet wie in dem Moment, in dem der Sicherungspunkt erzeugt wurde. Dieser Zustand beinhaltet alle zum Zeitpunkt der Sicherung vorhandenen Daten und Zustände, auch die der ausgeführten Programme [14]. Sicherungspunkte können genutzt werden, um VMs z. B. nach einem fehlgeschlagenen Update wieder in einen lauffähigen Zustand zurückzusetzen oder schnell hochzufahren, da das Betriebssystem nicht zuerst gestartet werden muss.

### vSphere Fault Tolerance

„vSphere Fault Tolerance“ (vSphere FT) ist ein Tool, das eine Fehlerumgehung für VMs ermöglicht, die auf einem Host laufen, der ausfällt. Um dies zu erreichen, wird von dieser VM (primär) eine zweite Instanz (sekundär) erstellt, welche eine komplette Kopie der primären ist. vSphere FT sorgt nun dafür, dass beide Instanzen zu jeder Zeit komplett identisch sind, sowohl was Arbeitsspeicherinhalt als auch ausgeführte CPU-Instruktionen angeht. Um dies zu erreichen, werden von der primären VM alle nicht-deterministischen, asynchronen Events (Maus-, Tastatureingabe, Netzwerkpaketempfang etc.) vom Hypervisor aufgezeichnet und zusammen mit der Information, wann diese auftraten, zur sekundären geschickt. Die sekundäre VM führt alle deterministischen CPU-

Instruktionen wie auch die primäre aus. Sobald ein aufgezeichnetes, nicht-deterministisches Event auf der sekundären VM auftreten sollte, wird dieses Event vom Hypervisor simuliert, wodurch die Events der sekundären VM zur Verfügung gestellt werden. Daher ist die sekundäre VM mit der primären dauerhaft synchron, wenn auch ein wenig zeitversetzt. Daher kann die sekundäre VM zu jedem Zeitpunkt die Funktion der primären übernehmen. Auf benötigte Datenträger können die beiden VMs, aufgrund der Beschaffenheit des Clusters, ständig zugreifen [15].

### **Containerisierung von Anwendungen**

Die Containerisierung einer Anwendung ist keine Fehlerumgehungsmaßnahme im eigentlichen Sinn, der vom Container angebotene Service kann aber um Fehlerumgehungsmaßnahmen erweitert werden. Für die folgenden Messungen wurde der Server-Teil so containerisiert, dass eine einzelne Container-Instanz von ihm voll funktionsfähig ist. Wird aber ein Loadbalancer eingesetzt, welcher die ankommenden Anfragen auf mehrere Container aufteilt, so können auch mehrere Container benutzt werden, um jeweils einen Teil der Datenverarbeitung zu bewältigen.

In den Messungen werden zwei Betriebsmodi verglichen, zum einen der ‚1-Host-Betrieb‘, in dem zwei Container auf einem Host betrieben werden, und zum anderen der ‚2-Host-Betrieb‘, in dem zwei Container auf zwei Hosts betrieben werden. Der Datenverkehr wird auf beide Container über einen Loadbalancer aufgeteilt. Hier entspricht der Betrieb von Containern auf mehreren Hosts der Fehlerumgehungsmaßnahme.

## **Ergebnisse**

### **Distributed Resource Scheduler**

In der Praxis kann es dazu kommen, dass aufgrund von schwankendem Flugverkehrsaufkommen eine variierende Menge Rechenleistung von Servern an Applikationen bereitgestellt werden kann. Es wurde eine vergleichende Messung zwischen dem Betrieb der Referenzapplikation auf einem nicht-als auch auf einem ausgelasteten Host durchgeführt, mit dem Ergebnis, dass die RT-Zeit auf dem ausgelasteten Server um ~60% höher ist als auf dem anderen. Dies ist so, obwohl auf dem ausgelasteten Server eine Rechenleistungs-reservierung für die Referenzapplikation vorliegt. Die Verwendung von DRS bringt hier also den Vorteil mit sich, dass die Antwortzeiten von Applikationen konstant bleiben, egal wie

ausgelastet einzelne Hosts sind. Es folgt daraus, dass diese Fehlerumgehungsmaßnahme besonders für den Betrieb von zeitkritischen Anwendungen zu empfehlen ist. Es gilt aber zu beachten, dass DRS funktioniert, indem eine laufende VM auf einem anderen Host migriert wird. Diese Migration sorgt für ein kurzes Anhalten der VM und daraus folgend auch für eine kurze Verschlechterung der RT-Zeit. In der Messung verschlechterte sich die RT-Zeit während der Migration von ~0.90 s (ausgelasteter Host) auf ~1.20 s, was eine Differenz von ~0.3 s ergibt.

Inwiefern DRS später sinnvoll genutzt werden kann ist noch unklar, da z. B. die Größe der migrierenden VM und die Auslastung des Clusters einen Einfluss auf das Ergebnis haben.

### **Proactive High-Availability**

Proactive HA hat zum Ziel VMs von einem ausfallgefährdeten Host herunter zu migrieren, noch bevor dieser ausfällt. Es ist daher in diesem Fall nicht sinnvoll möglich einen Vergleich zwischen manueller Fehlerbehebung und automatisierter Fehlerbehandlung aufzustellen, da es im Cluster, in welchem diese Messungen durchgeführt werden, keine praktische Möglichkeit gibt verschiedene Hostausfälle frühzeitig zu erkennen bzw. zu simulieren. Da sowohl die manuelle Migration als auch die Proactive HA Migration auf „vMotion“, einer Migrationstechnik von VMware, basieren, wurde die Migration im Folgenden manuell gestartet [16].

Es wurde daher eine Messung gemacht, in der die Applikation auf einem gesunden Host betrieben und manuell auf einen anderen Host migriert wurde. Diese Messung ergab, dass die RT-Zeiten im Durchschnitt bei ~0.56 s liegen, während der Migration diese aber auf ein Maximum von ~1.10 s anstiegen.

Proactive HA ist ein passives Tool, das den regulären Betrieb von VMs nicht beeinflusst. Es wird erst dann aktiv, wenn ein Host ausfallgefährdet ist, und löst diese Situation pro VM mit einer Migration. Vergleicht man die kurzzeitige Erhöhung der RT-Zeit von ~0.5 s mit den ~94 s, die die VM für einen regulären Neustart nach einem Hostausfall benötigt (s. nächster Abschnitt), so ist die Nutzung von Proactive HA zu empfehlen.

### **vSphere High-Availability**

Für die vSphere HA Messungen wird verglichen, wie lange das manuelle Neustarten einer VM braucht im Vergleich zum, durch vSphere HA,

automatisierten Neustart. Um vSphere HA zu testen wurde die Stromversorgung des entsprechenden Servers unterbrochen, woraufhin die ausgefallene VM automatisch auf einem anderen Host neugestartet wurde. Das Aktivieren von vSphere HA zeigte keinen nennenswerten Einfluss auf die RT-Zeiten der Referenzapplikation. Mithilfe von vSphere HA lag die maximale RT-Zeit der VM bei 94.4 s, durch manuelles Neustarten konnte aber eine Zeit von nur 52.1 s erreicht werden. Diese Ergebnisse zeigen, dass sich durch ein manuelles Neustarten von VMs Zeit sparen lässt. Es zeigte sich aber auch, dass ein manuelles Neustarten der VM in manchen Fällen zu Verbindungsschwierigkeiten zwischen Client- und Server-Teil der Referenzapplikation führte, was für kritische Applikationen wie flugsicherungs-technische nicht akzeptabel ist. Eine Analyse zu diesem Fehlverhalten steht noch aus.

Es zeigte sich daher, dass die Anwendung von vSphere HA trotz der schlechteren Worst-Case RT-Zeiten die präferierte Wahl ist gegenüber einem manuellen Neustart der VM.

### **Sicherungspunkte**

Sicherungspunkte können eine VM in einen gespeicherten Zustand zurückführen, daher können zwei Fehlerszenarien betrachtet werden.

#### **Szenario Applikationsausfall**

Für den Fall, dass die Applikation in einen Fehler läuft, wurden zwei Fehlerbehandlungen verglichen. Zum einen der automatische Programmneustart, welcher das Programm über ein Bash-Skript nach einer Weile beendet und danach neustartet, und zum anderen ein Programmneustart über Sicherungspunkte, wobei auch hier das Programm nach einiger Zeit beendet wird um es danach neustarten zu können. Während das Bash-Skript für eine maximale RT-Zeit von ~1.3 s sorgte, so konnten über die Anwendung von Sicherungspunkten nur ~12.2 s erreicht werden.

Das Anwenden von Sicherungspunkte lohnt sich in diesem Falle nicht, da die Startzeit der Applikation kurz genug ist. Ob Sicherungspunkte sinnvoll bei anderen Applikationen beim Programmausfall benutzt werden können, muss für jeden Einzelfall entschieden werden.

#### **Szenario VM-Ausfall**

Für das VM-Ausfall Szenario wurde die Server-VM mittels einer Kernel-Panic seines Betriebssystems zum Absturz gebracht. In den Messungen wurde der manuelle Neustart der VM mit dem

Widerherstellen über Sicherungspunkte verglichen. Beim manuellen Neustarten der VM lag die maximale RT-Zeit bei ~19.3 s, beim Neustarten über Sicherungspunkte lag diese Zeit allerdings nur bei ~11.0 s.

Es zeigt sich hier, dass Sicherungspunkte bei einem kompletten VM Ausfall gut geeignet sind, die VM neu zu starten. Dies liegt insbesondere daran, dass sich durch Sicherungspunkte die Startzeiten der Betriebssysteme umgehen lassen. Sicherungspunkte sind wahrscheinlich ein gutes Mittel, um VMs neu zu starten. Dies ist allerdings vom verwendeten Betriebssystem und den installierten Applikationen abhängig, daher muss diese Messung für jede VM, auf die Sicherungspunkte angewendet werden sollen, wiederholt werden.

### **vSphere Fault Tolerance**

Folgende Messungen betrachten, inwieweit sich vSphere FT auf den Betrieb der VMs auswirkt im Vergleich zum Betrieb ohne vSphere FT. Da in den Messungen auch betrachtet werden soll, wie der Betrieb von der primären zu der sekundären VM umschwingt, wurde der Ausfall der primären VM über einen Stromausfall des sie hostenden Servers simuliert.

Die Messungen ergaben, dass ohne aktiviertes vSphere FT die RT-Zeit bei ~0.56 s lag. Mit aktiviertem vSphere FT stieg diese Zeit auf ~0.61 s an und erreichte das Maximum in dem Moment, in dem der Betrieb auf die sekundäre VM umschwenkte. Hier lag die RT-Zeit bei ~2.90 s, sie sank nach dem Umschwenken aber wieder auf ~0.56 s, da es nun keine sekundäre VM mehr gab, die mit der nun primären VM synchron gehalten werden musste. Es zeigte sich außerdem, dass ohne vSphere FT ein Ping vom Client zum Server ~2.5 ms benötigt, mit aktiviertem vSphere FT stieg diese Zeit allerdings auf ~7.9 ms an.

vSphere FT sorgt für schlechtere RT- und Ping-Zeiten, selbst wenn die primäre VM fehlerfrei läuft. Dies ist zwar im Best-Case Szenario schlecht, doch im Falle eines Hostausfalls kann der Betrieb so innerhalb von wenigen Sekunden normal weitergeführt werden. Der Betrieb von vSphere FT lohnt sich also besonders für VMs, welche besonders kritische Applikationen beinhalten.

### **Containerisierung von Anwendungen**

Bei dieser Containerisierung der Referenzapplikation kommen 2 Container zum Einsatz, welche auf dem gleichen Server bzw. auf unterschiedlichen Servern laufen. Im folgenden

Szenario wird untersucht, inwieweit sich Container- und Hostausfälle umgehen lassen durch den 2-Node-Betrieb. Es werden zwei Szenarien getrennt betrachtet, zum einen der Ausfall von Containern, zum anderen der Ausfall der, die Container hostenden, VM.

### Szenario Container-Ausfall

Der Fall eines Container-Ausfalls wurde über das Kommando „`kubectl delete PODNAME --force --grace-period=0`“ simuliert, welches dafür sorgt, dass der Container sofort angehalten und gelöscht wird. Das Programm, welches den Betrieb der Container steuert und in diesem Fall die Löschung ausführt, erstellt automatisch nach der Löschung wieder äquivalente Container.

Beim Ausfall nur eines Containers waren die Auswirkungen gering. Die RT-Zeiten im 1- und 2-Node-Betrieb lagen konstant bei ~0.58 s. Im Moment des Ausfalls eines Containers stieg diese Zeit kurzzeitig auf ~1.07 s an, bevor sie wieder auf ~0.58 s abfielen. Beim Ausfall von beiden Containern waren die Auswirkungen größer. Die RT-Zeiten lagen am Anfang bei ~0.57 s, stiegen im Moment des Ausfalls für den 1- bzw. 2-Node-Betrieb auf 16.98 s bzw. 16.24 s und sanken danach wieder auf ~0.57 s.

### Szenario Host-VM-Ausfall

Die betrachteten Container werden auf einem Betriebssystem betrieben, welches innerhalb einer VM läuft. Insofern entspricht ein Host-VM-Ausfall hier entweder dem Abstürzen des Betriebssystems oder der VM. Im folgenden Szenario wurde der Host-VM-Ausfall durch das Auslösen einer Kernel-Panic auf dem Betriebssystem simuliert. In diesem Szenario zeigte sich der größte Unterschied zwischen den beiden Betriebsmodi. Vor dem Ausfall lag die durchschnittliche RT-Zeit bei ~0.57 s, stieg während des Ausfalls für den 1- bzw. 2-Node-Betrieb aber auf ~90.25 s bzw. ~1.08 s. Nach dem Ausfall sank die RT-Zeit wieder auf ~0.57 s.

Es zeigte sich, dass der Betrieb von Containern mit einem Loadbalancer viele Vorteile birgt, wobei der größte die Ausfallsicherheit ist. Es zeigte sich, dass der Ausfall eines Containers in dieser Messung fast keine Auswirkungen hatte, da der andere Container seine Aufgabe übernehmen kann. Durch die Fehlerumgehungsmaßnahme 2-Node-Betrieb konnte es außerdem noch erreicht werden, dass ein gleichzeitiger Ausfall beider Container unwahrscheinlicher wird, da hier alle hostenden VMs ausfallen müssten, um alle Container

anzuhalten. Selbst im Fall, dass beide Container ausfallen, konnte der Betrieb schnell wieder fortgesetzt werden, da die Startzeit von Containern im Vergleich zu VMs klein ist.

### Zusammenfassung

Auf der folgenden Seite sind zusammenfassend alle Messergebnisse zu finden, wobei in jeder Zeile eine Gegenüberstellung der Messergebnisse mit bzw. ohne angewendete(n) Fehlerumgehungstools stattfindet. Es werden dabei jeweils die durchschnittlichen und die maximalen RT-Zeiten verglichen. Die Ergebnisse wurde hinsichtlich des angewendeten Cloudmodells auf zwei Tabellen aufgeteilt.

### Fazit und Ausblick

Alle vorgestellten Messreihenergebnisse stellen dar, um wieviel sich die Ausfallsicherheit und -zeit der Referenzapplikation verbessern kann, unter Ausschöpfung der Möglichkeiten des DC. Die Referenzapplikation ist einer tatsächlichen FS Applikation allerdings lediglich nachempfunden, weshalb die Messergebnisse nur ein Indiz für andere FS Applikationen darstellen. Da im DC aber sukzessive viele FS Applikationen betrieben werden sollen, sind die hier vorgestellten Messergebnisse eine gute Basis für weitergehende, applikationsspezifische Messungen, um das Verbesserungspotential für jede einzelne dieser Applikationen zu bestimmen und dabei zu prüfen, ob die Anwendung von diesen Fehlerumgehungsmechanismen vorteilhaft ist.

Eine weitere interessante Betrachtung betrifft die Kombination mehrerer Fehlerumgehungsmaßnahmen. In der vorliegenden Arbeit wurde zunächst bestimmt, ob jede Maßnahme für sich gesehen eine Verbesserung erzeugen kann, doch ob sich die Verbesserungen parallel angewendeter Maßnahmen gegenseitig beeinflussen, bedarf weiterer Untersuchungen. Insofern handelt es sich bei dieser Arbeit um den Beginn einer Untersuchung, mit dem Ziel sich ein ganzheitliches Bild über die Anwendbarkeit und die daraus folgenden Verbesserungspotentiale von Fehlerumgehungsmaßnahmen im DFS DC zu verschaffen.

Tabelle 2: Zusammenfassung IaaS Messergebnisse.

Fehlerumgehungs- tools	Messwerttyp	Ohne Anwendung Fehlerumgehungstools	Nach/Bei Anwendung Fehlerumgehungstools	Bemerkung
DRS	∅	~ 0.9 s	~ 0.6 s	
	max.	~ 0.9 s	~ 1.2 s	
Proactive HA	∅	~ 0.6 s	~ 0.6 s	
	max.	-	~ 1.1 s	Ohne Anwendung von Proactive HA ist die Chance größer, dass der Host abstürzt.
vSphere HA	∅	~ 0.6 s	~ 0.6 s	
	max.	~ 52 s	~ 94 s	Ohne Anwendung von vSphere HA besteht die Gefahr, dass die Applikation Netzwerkprobleme bekommt.
Sicherungspunkte: Szenario Applikationsausfall	∅	~ 0.6 s	~ 0.6 s	
	max.	~ 1.3 s	~ 12.2 s	Keine Anwendung von Fehlerumgehungstools entspricht hier einem automatischen Applikationsneustart über ein Bash Skript.
Sicherungspunkte: Szenario VM- Ausfall	∅	~ 0.6 s	~ 0.6 s	
	max.	~ 19 s	~ 11 s	Keine Anwendung von Fehlerumgehungstools entspricht hier einem manuellen Neustart der VM nach ihrem Ausfall.
vSphere FT	∅	~ 0.56 s	~ 0.61 s	
	max.	-	~ 2.9 s	Ohne Anwendung von vSphere FT stürzt die VM ab und muss neu gestartet werden.

Tabelle 3: Zusammenfassung CaaS Messergebnisse.

Fehlerumgehungstools	Messwerttyp	1-Node-Betrieb	2-Node-Betrieb
Containerisierung: Szenario Container- Ausfall	∅	~ 0.6 s	~ 0.6 s
	max.	~ 17.0 s	~ 16.2 s
Containerisierung: Szenario VM-Ausfall	∅	~ 0.6 s	~ 0.6 s
	max.	~ 90 s	~ 1.1 s



Dieser Artikel beruht auf einer Arbeit mit dem Titel „Das DFS Data Center: Eine theoretische Betrachtung des Rechenzentrums und praktische Messungen zur Bewertung des Verbesserungspotenzials seiner Fehlerumgehungstools“ zur Erlangung des Bachelors in Elektro- und Informationstechnik an der Hochschule Darmstadt.

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
BA	Bachelorarbeit
CaaS	Container as a Service
DC	Data Center
DFS	Deutsche Flugsicherung
DRS	Dynamic Resource Scheduler
FS	Flugsicherung
FT	Fault Tolerance
HA	High-Availability
HW	Hardware
IaaS	Infrastructure as a Service
RT-Zeit	Round-Trip-Zeit
SW	Software
VM	Virtuelle Maschine

## Referenzen

- [1] Heidenreich, P. (2021) „Das DFS Data Center: Eine theoretische Betrachtung des Rechenzentrums und praktische Messungen zur Bewertung des Verbesserungspotenzials seiner Fehlerumgehungstools“, unveröffentlichte Bachelorarbeit, Darmstadt: Hochschule-Darmstadt.
- [2] Red Hat. What are cloud services. <https://www.redhat.com/en/topics/cloud-computing/what-are-cloud-services> (Zugriff am 29.07.2021).
- [3] Boisvert, M., Bigelow, S.J. & Chai, W.(2020). Infrastructure as a Service (IaaS). <https://searchcloudcomputing.techtarget.com/definition/Infrastructure-as-a-Service-IaaS> (Zugriff am 26.07.2021).
- [4] VMware. Virtuelle Maschine. <https://www.vmware.com/de/topics/glos-sary/content/virtual-machine.html> (Zugriff am 23.07.2021).
- [5] VMware (2007). „Understanding Full Virtualization, Paravirtualization, and Hardware Assist.“ VMware. [https://www.vmware.com/content/dam/digitalmarketing/vmware/en/pdf/techpaper/VMware\\_paravirtualization.pdf](https://www.vmware.com/content/dam/digitalmarketing/vmware/en/pdf/techpaper/VMware_paravirtualization.pdf) (Zugriff am 26.07.2021), S. 4, 8.
- [6] Barrett, D. & Kipper, G. (2010). Full Virtualization. <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/full-virtualization> (Zugriff am 24.07.2021).
- [7] Luber, S. (2019). Was ist Container as a Service (CaaS)? <https://www.cloudcomputing-insider.de/was-ist-container-as-a-service-caas-a-852566/> (Zugriff am 16.08.2021).
- [8] Eder, M. (2016). „Hypervisor- vs. Container-based Virtualization“ Chair of Network Architectures and Services. [https://www.net.in.tum.de/fileadmin/TUM/NET/NET-2016-07-1/NET-2016-07-1\\_01.pdf](https://www.net.in.tum.de/fileadmin/TUM/NET/NET-2016-07-1/NET-2016-07-1_01.pdf) (Zugriff am 25.07.2021), S. 2-3.
- [9] Sánchez, R.J. (2014). „Dynamic Deployment of Specialized ESB instances in the Cloud.“ Universität Stuttgart. [https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/3541/1/MS-TR\\_3671.pdf](https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/3541/1/MS-TR_3671.pdf) (Zugriff am 07.08.2021), S. 18-19.
- [10] Gillis, A.S. (2021). Docker Image. <https://searchitoperations.techtarget.com/definition/Docker-image> (Zugriff am 10.08.2021).
- [11] VMware. Distributed Resource Scheduler. VMware. <https://www.vmware.com/de/products/vsphere/drs-dpm.html> (Zugriff am 14.04.2022).
- [12] VMware (2019). „vSphere Availability“ VMware. <https://docs.vmware.com/en/VMware-vSphere/6.7/vsphere-esxi-vcenter-server-671-availability-guide.pdf> (Zugriff am 27.08.2021), S. 13-14.
- [13] VMware (2006). „Automating High Availability (HA) Services with VMware HA“ VMware. [https://www.vmware.com/pdf/vmware\\_ha\\_wp.pdf](https://www.vmware.com/pdf/vmware_ha_wp.pdf) (Zugriff am 02.08.2021), S. 8.
- [14] VMware (2021). „VMware vSphere Snapshots: Performance and Best Practices“ VMware.

- <https://www.vmware.com/content/dam/digitalmarketing/vmware/en/pdf/techpaper/performance/vsphere-vm-snapshots-perf.pdf> (Zugriff am 29.07.2021), S. 3.
- [15] VMware (2009). „VMware vSphere 4 Fault Tolerance: Architecture and Performance.“ VMware.  
[https://www.vmware.com/content/dam/digitalmarketing/vmware/en/pdf/techpaper/perf-vsphere-fault\\_tolerance.pdf](https://www.vmware.com/content/dam/digitalmarketing/vmware/en/pdf/techpaper/perf-vsphere-fault_tolerance.pdf) (Zugriff am 29.07.2021), S. 3-4.
- [16] Drilling, T. (2018). vSphere Proactive HA, Quarantäne-Modus und DRS mit vFlash.  
<https://www.windowspro.de/thomas-drilling/vsphere-proactive-ha-quarantaene-modus-drs-vflash/> (Zugriff am 14.04.2022).

# Packet Injection System to Estimate Transmission Loss on Surveillance Radar Channels

Harald Fischer, Roman Raekow, Prof. Dr. Michael Kuhn (Hochschule Darmstadt) & Dr. Bernd-Ludwig Wenning (Munster Technological University)

## Deutsche Zusammenfassung

Die zuverlässige Ortung von Flugzeugen ist eine Schlüsselkomponente für die sichere und flüssige Abwicklung des Luftverkehrs in dicht beflogenen Lufträumen. Derzeit basiert diese kritische Komponente der modernen Flugsicherung auf der Nutzung von zwei Funkkanälen (1030/1090MHz). In den zurückliegenden Dekaden wurden diese Kanäle durch den stetig ansteigenden Luftverkehr aber auch durch neue Dienste, die diese Kanäle nutzen, zusätzlich belastet. Aus diesem Grund wird es zunehmend wichtiger, die Auslastung dieser begrenzten Ressource zu beobachten, um rechtzeitig geeignete Maßnahmen ergreifen und eine Überlastung der Kanäle verhindern zu können. Eine Situation, die alle Kanalnutzer betreffen und letztlich zu einer Einschränkung der Ortungsfunktionalität führen würde. Dieser Artikel beschreibt einen schlanken und zuverlässigen Ansatz zur Kanalmessung, der in einem weiten Bereich anwendbar ist und Signalverluste zuverlässig erkennt. Unterstützt wird die Beschreibung durch einen Messaufbau, mit dem ein weiter Bereich von Kanalauslastungen erzeugt werden kann und der Ansatz überprüft wird.

## Introduction

Reliable surveillance data is a key factor to fluent and safe air traffic management in dense airspaces. Today, all modern civil aviation surveillance relies on communication that is operated on two channels. The transmissions on channels suffer from an increasing amount of traffic and applications which have accumulated over the past decades. Therefore, it becomes more and more important to continuously monitor the total channel load in order to develop effective counter actions that prevent the channels from becoming saturated and thereby degrade all applications' performances, possibly leading to less safe surveillance data. This paper presents an affordable and reliable monitoring approach that on the one hand generalizes well across changing environments and different applications, but is very accurate in detecting the losses on those channels on the other hand.

The presented approach is backed up by a novel measurement setup that is able to create all possible channel loads and constellations with an artificial packet generator.

## Background

Civil aviation surveillance has gone a long way in the last eighty years and has kept up with the growing number of aircraft by maintaining the highest level of safety. However, from the first day until now all surveillance applications operate on two channels on 1030MHz and 1090MHz. They are burdened by the fact that they need to support legacy technologies like the Mode A/C for almost a century now, as well as to integrate new demands regarding number and type of participants, data and update-rates. As with most technologies in civil aviation, these changes have to be applied worldwide while still remaining backwards compatible to all previous communication protocols [1].

The channel that is relevant for this paper is the 1090 MHz channel which is used for replies of aircraft to interrogations that are sent on the 1030 MHz channels. All applications use any of three different packet types to transmit their payload.

- The Mode A/C is the simplest packet that is able to encode the barometric altitude or an ID of an aircraft. It is a legacy protocol that is still commonly used worldwide and has the highest rate of compatible aircraft and radar stations. One packet of this protocol occupies the channel for 20.3 microseconds and consists of 2 to 15 pulses to encode the payload.
- Mode-S short packets are utilised data frames that are able to carry 56 Bit of information together with a unique ID of an aircraft and a checksum. The content is to be defined by the application using this packet type. The packet is amplitude shift-keyed and has a length of 64 microseconds.
- Mode-S long packets are an extended version of Mode-S short and are able to carry 112 Bits of information. They occupy the channel for 120 microseconds using the same keying as Mode-S Short.

Different applications like surveillance radar or safety systems use these packet formats and are operated independently of each other. However, different so-called downlink formats are defined to declare the content of the packets within the first bits of the payload. This allows a wide range of information to be transmitted by the aircraft like the call-sign, speed, rate of turn, and many more.

The access to the channel is neither restricted nor explicitly managed. The applications are sending information either pseudo-spontaneous like Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (ADS-B), event-related air-to-air communication like the Traffic Alert and Collision Avoidance System (TCAS), or in response to an interrogation from the ground from a surveillance radar station. However, all these applications run independently and are not aware of each other. With increasing traffic, the need for coordination, position updates, and also retransmissions due to packet collision increases causing an even higher load. This mixture of packet types and applications together with a wide range of hardware and software implementations create a complex environment for an Air Navigation Service Provider (ANSP) to meet their requirements for surveillance. Several modern air traffic control (ATC) concepts like reduced horizontal separation minima (RHSM) [2] depend on specific surveillance radar performance parameters (i.e. precision as well as update rates) and are widely used in order to keep the traffic fluent in an increasingly denser airspace.

Furthermore, no general channel occupancy rates are defined in international regulation documents such as [1] or [3]. Only single applications like Multilateration (MLAT) or Mode-S Radar stations [4] are regulated as well as transponder-reply-rates for each aircraft. The European civil aviation organization EUROCONTROL is currently setting up a system that shall be able to monitor the decodable traffic on the 1090 MHz channel as a whole, which might lead to further regulation at a later stage.

This paper evaluates the current state of the art in surveillance radar channel measurements. Secondly, a channel measurement setup is presented that allows full control of the RF environment. Finally, first results of this setup that prove the value and validity of this method are given.

### State of the Art

Some research results regarding single applications [5] and industry studies like [6] and [7] have shown that the traffic on these channels has grown to a degree that leads to high rates of losses which have

an impact on the surveillance systems of ANSP that might result in total loss of detection for a single aircraft. In general, former and current research is assessing the processes on the surveillance radar channels either on the physical layer, by developing channel models, or by assessing single application performances.

The research in [8] is investigating on disturbances and overlays of packets and shows that there is an alarming amount of errors for single applications (i.e. up to 70% error rate for ADS-B) leading to high channel occupancies that can be seen on a regular basis. The authors also state that it is very hard to track the channel using IQ-Samples from a decoding software defined radio (SDR) as this results in very large data sets (four gigabytes per minute) so that a continuous and live monitoring seems impractical. Another interesting aspect is the fact that even significantly lower channel occupancies can lead to a high loss of decodable packets, as shown in [9] and [10]. The authors state that even at a Frequency Occupancy Rate (FOR) of around 5% only 2500 out of 7500 possible packets per seconds could be decoded. So even at a very low FOR a significant amount of packets might be undecodable.

The most common approach to get an insight into the processes on the channel is to create channel models. In this particular case, one has to differentiate between the air-to-air (A2A) and the air-to-ground (A2G) model. Even though research has been carried out for the A2A channel like [11]-[13] the authors focus on the upcoming inter-unmanned aerial vehicle (UAV) communication which utilizes IEEE 802.11 based communication and not 1030/1090 MHz surveillance communication. The A2G channel models in [14]-[16] are more relevant for surveillance applications and focus on disturbances caused by geometries, ground surfaces, buildings and so forth and achieve impressive results.

However, the constraints analyzed in [14]-[16] cannot be changed for the ANSP that needs to carry out the surveillance for a specific area. Furthermore, the complexity prevents a large scale real-time simulation, not to mention the variety of implementations and aircraft specific characteristics that add even more parameters to consider. Single applications that run on the channel pair 1030/1090 MHz have been assessed for their performances, like in [17]-[19], and have shown that, especially in Europe and the U.S., single applications like ADS-B suffer from a crowded channel. However, to the best of our knowledge, no approach has been undertaken to create a system that is capable of continuously monitoring the entire channel performance and

losses independently of the operated applications and participants.

As described in a previous work [20], [21] we showed an approach that uses well-known test packets that are injected into the RF channel in order to estimate the losses of the given type of packets. It has been shown that the decoding probability has strong dependencies in terms of environment, type, level, timing, and even minor changes in this setup can have a high impact in the Probability of Detection ( $p_D$ ) of a certain packet.

### Proposed Estimation Concept

The proposal aims at creating a real-time channel monitoring that is able to estimate the FOR and the  $p_D$  and thereby giving two key values for the traffic load surveillance radar channels. This is done by using a minimal amount of data and picking a set of relevant parameters while still maintaining an accurate picture of the activities on the channel. Relevant parameters that have been identified so far are the type of packet:  $M$  (e.g.  $M_{SS}$  = Mode - S Short Reply) and the received RF Level  $L$  in dBm. There is a wide set of further parameters that also influences the decoding probability like interference, disturbances, doppler effects, frequency, and phase offsets. However, as this proposed approach aims at creating a real-time monitoring of the entire channel communication, a significant reduction of parameters is necessary in order to make this approach real-time capable. Nevertheless, this approach is open to integrate more parameters if this seems necessary at a later stage.

The proposed concept utilizes the set of given output parameters from an AX680 from THALES S.A., a commercial off-the-shelf (COTS) certified ANSP receiver. These receivers are used in operational civil aviation surveillance setups for decoding payload from the channel and are not intended for RF measurements. The decoding attributes are very stable and predictable, and the receivers are designed for high throughput and a wide range of RF levels. Therefore, it seems to be a good approach to use these to create reproducible results in changing environments. The concept aims at creating estimations for  $p_D$  by using the output of the AX680 and injected test packets. All the decoding and error correction is done by the receiver.

Decodable packets are then sent via a UDP packet to a PC that hosts the evaluation software. Here, we present a full evaluation platform to verify this approach (see Figure ).

To estimate a  $p_D$  for an unknown channel load, test packets with a known payload need to be sent to the receiver. By counting the "surviving" packets on the output for a given time period  $T$  the system can estimate  $\hat{p}_D(M, L, T)$  for each packet type  $M$  with respect to its RF level  $L$ .

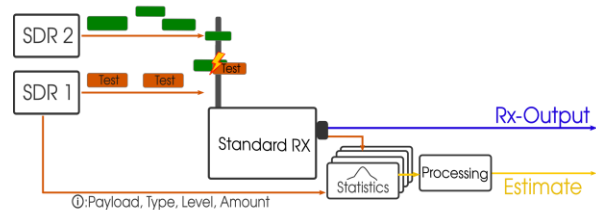


Figure 1: System principle: Injecting test packets into a known environment allowing to estimate the characteristics of the entire reception chain.

In order to gain insights into the channel, it seems suitable to not only control the test packets but also the entire channel content so that the interaction of channel, packet types, levels, and receiver can be evaluated under changing conditions. In a real-world scenario, the receiver will not be aware about the packets that were sent on the channel beforehand. Our proposed concept to monitor the processes on the channel uses two SDRs and a receiver to create an artificial channel setup as shown in Figure 1.

SDR 1 is used to send the well-known test packets (orange in Figure ) through the channel that are received, identified, and counted on the output of the AX680 receiver. These test packets are the base for calculating the losses on the channel, as their RF-Level, type, and amount per timeframe are known to the evaluation software. The packets are identified by their payload. SDR 2 creates changing environments (green in Figure ) through which the test packets are sent so that variant degrees of disturbances can be applied. These environments consist of a known number of packets with random payload per level and allow the creation of a wide range of artificial channel loads and constellations that can reflect different airspace or surveillance setups. It allows the recreation of formerly recorded RF environments as well as the creation of new scenarios, like an increasing number of participants in the airspace, the impact of dropping legacy support for older aircraft avionics or deploying newer surveillance technologies like MLAT. However, the system that calculates the losses in the channel is only aware of the test packets sent by SDR 1. Changing the packet density in different environments will result in changing losses on the test packets, of which SDR 1 sends a small amount per type and level. By this, the total amount of packets  $\hat{N}_{Tx}(M, L, T)$  that were sent

beforehand over a time period  $T$  can be estimated. The advantage is that the characteristics of the complete reception chain like antennas, receivers and network is taken into account when estimating the losses. Only herewith, a fully qualified estimation on the channel saturation is possible, regarding the consideration of all channel parameters.

To estimate the total  $p_D$  for a given environment the system counts each received packet in terms of type  $M$  and level  $L$  over a given time period  $T$ . Test packets are identified by their payload and are counted individually. The estimation of  $\hat{p}_D$  is done by first counting the test packets  $\dot{N}_{Rx}(M, L, T)$ . In parallel, the number of all received packets  $N_{Rx}(M, L, T)$  is counted the same way by taking into account all packets, so that  $\dot{N}_{Rx} \subseteq N_{Rx}$ .  $p_D$  of a single time period  $T$  can then be estimated with the known number of test packets of that type and level that have been sent during this period  $\dot{N}_{Tx}(M, L, T)$ :

$$\hat{p}_D(M, L, T) = \frac{\dot{N}_{Rx}(M, L, T)}{\dot{N}_{Tx}(M, L, T)}$$

In order to estimate the total amount of packets of that type and level  $\hat{N}_{Tx}(M, L, T)$  this  $\hat{p}_D$  can be used so that

$$\hat{N}_{Tx}(M, L, T) = \frac{N_{Rx}(M, L, T)}{\hat{p}_D(M, L, T)}$$

$\hat{N}_{Tx}(M, L, T)$  is the estimated number of packets sent on the channel for a given type and level. In order to verify this approach, it is necessary to evaluate the stability and reproducibility of this correction.

## Measurement and Results

To calculate the losses of the reception chain, a measurement session is created that sends packets to the receiver over a time period of approximately 24 hours. In total, around 306 million packets are sent equally distributed across all three packet types with levels ranging from -90 dBm to -60 dBm. The success rates are calculated every 32 seconds based on at least 300 packets per type and level. These success rates are then averaged in 5 minutes blocks for this evaluation.

The setup uses SDR 2 to send pseudo random environments that consist of a constant amount of packets per second for each message type *Mode A/C*, *Mode-S short*, and *Mode-S long*. Only the timing of the packets is varied so that different constellations of disturbances are created. In order to assess the performance of the estimator, five scenarios with different channel loads have been created, each with an increasing amount of packets

on the channel resulting in a higher rate of disrupted signals and a higher likelihood of false or undecodable packets. For each scenario, the number of decoded test and other packets are counted. Furthermore, the estimator tries to guess the number of packets that were actually sent  $\hat{N}_{Tx}(M, L, T)$ .

As our proposed concept is aware of the exact amount of all packets on the receiver's input  $N_{Tx}(M, L, T)$ , one can calculate the actual loss rates. For an overall comparison of the performance we use the total receiver loss  $\delta_{Rx}$ , estimated loss  $\hat{\delta}_{Rx}$  and the estimation error  $\delta_{Est}$ . These parameters are calculated for each scenario.

$$\delta_{Rx} = \frac{N_{Tx} - N_{Rx}}{N_{Tx}}$$

$$\hat{\delta}_{Rx} = \frac{\hat{N}_{Tx} - N_{Rx}}{N_{Tx}}$$

$$\delta_{Est} = \frac{N_{Tx} - \hat{N}_{Rx}}{N_{Tx}}$$

The results are shown in Table 5 for all packet types in a level range of  $-88 \text{ dBm} \leq L \leq -67 \text{ dBm}$ .

Table 1: Overall Receiver vs. Estimator Deviation.

Id	Total Packets/s	Receiver Loss	Estimator Loss	Error
1	1,614	14,0%	12,5%	1.5pp
2	2,730	23,6%	24,4%	-0.8pp
3	4,218	29,6%	22,2%	7.4pp
4	6,822	36,0%	33,3%	2.7pp
5	10,170	43,1%	46,7%	-3.6pp

Each scenario is representing a different environment ranging from low to very high number of packets per second. The actual number of packets for each scenario has been derived from previous measurements as shown in [21]. The first scenario represents a low channel load with around 1,600 packets per second which equals to a FOR of approximately 10% and shows that the receiver is performing very well in low disturbance environments. Only 14% of the packets are lost due to simultaneous transmissions. The estimation of the loss is very close to the real value with around 12.5%. The second scenario is close to a real world example in remote regions with around 2700 packets per second ( $\approx 19\%$  FOR) and already shows a significant amount of losses especially for very low levelled packets.

The third scenario with 4,200 packets per second ( $\approx 28\%$  FOR) represents a dense airspace in central Europe during daytime. Almost 30% of the packets were lost. In this scenario the estimator is performing relatively bad. With an estimation of 22% loss it is around 7 percentage points (pp) off of the real losses. Around 6,000 packets per second are sent in the fourth scenario resulting in a FOR of  $\approx 46\%$ . This represents a very dense and busy airspace in the area of an airport. These rates are very rare in real world applications. However, the estimation of 33% losses is still very accurate with the real losses being around 36%. The fifth scenario acts as a blocked channel scenario. With a calculated FOR of  $\approx 69\%$  the losses are expected to be very high. Actually, the receiver loses around 43% of the packets while the estimator calculates around 47% of loss which is a very good result for this artificial edge case.

In general, with rising channel loads, the receiver is dropping an increasing amount of packets from 14% up to 43% in the worst case. In contrast to that, the proposed approach is able to keep a stable and accurate channel input estimation which never differs more than 7.4 pp of the amount of packets that were actually sent. Negative errors indicate that the system is overestimating the amount of sent packets where it estimates a higher channel load than the one that was actually applied. The presented results are quite promising since the setup is able to estimate the sent amount of packets only by counting the decodable packets and calculating the success rate from the small amount of test packets. Although the overall performance is reasonably good the results vary for each packet type during the measurement session. Therefore, a more detailed analysis for each packet type is appropriate.

Figure 2 shows the results for packets of the type Mode-S Short and a given level of  $-80 \text{ dBm} \pm 1 \text{ dBm}$ . The green line indicates the number of packets sent through the channel and is the "solution" for the estimation. The five scenarios, with increasing packet loads can be seen here. The first two steps with low packet loads show that the receiver is performing very well with only a few disturbances. The receiver output  $N_{\text{Rx}}(M_{\text{SS}}, -80, T)$  (blue line) is almost as high as the input. However, with rising packet loads, the losses increase and the estimated  $p_D$  drops as shown in the lower subplot (black). The estimated amount of packets on the input  $\hat{N}_{\text{Tx}}(M_{\text{SS}}, -80, T)$  (yellow) is starting to differ from the received amount of packets. The red line represents the average of estimations for each section of this scenario.

Although the estimated amount of packets (yellow) is starting to become more volatile with increasing

loads, in average the estimator performs very well even in the most demanding scenario. The middle plot shows the root mean squared error (RMSE) of the receiver (blue) and the estimator (yellow) and shows, that the estimator is able to reduce the error for almost all scenarios. Nevertheless, in two cases in the last scenario, the estimated amount of packets is worse than the receiver losses, shown in the red areas in the middle RMSE plot on the morning of July the 23rd.

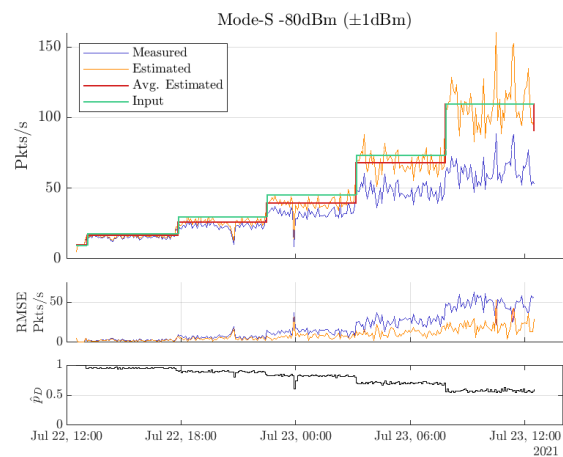


Figure 2: Mode-S Short packets with a level of  $-80\text{dBm}$  and the estimation.

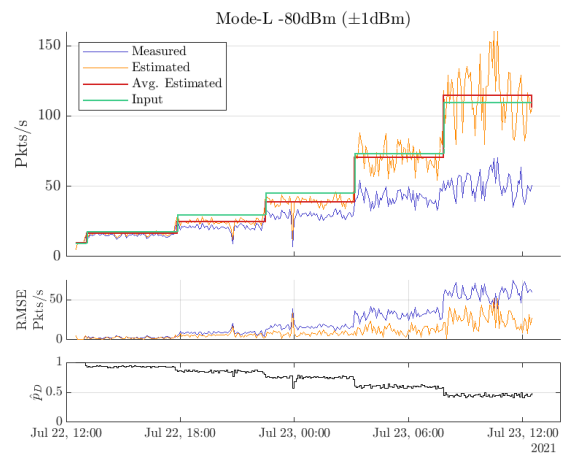


Figure 3: Mode-S Long packets with a level of  $-80\text{dBm}$ : Small over-estimation.

Figure 3 shows the results for Mode-S Long packets with a level of  $-80 \text{ dBm} \pm 1 \text{ dBm}$ . It shows a similar behaviour of the estimator as Figure 2, but the estimation is even more volatile and is in average overestimating for very high packet loads.

This can be backed up by the fact that this packet type has the longest time on the channel and is more vulnerable to disruption. However, for this packet

type it is almost impossible to distinguish between the fourth and the last scenario by the output of the receiver (blue). The output is almost identical in both scenarios and would suggest that there is almost no increase in the number of packets on the channel. Using the proposed estimation, it is possible to detect the 50% packet loss (lower chart) and to estimate the real amount of packets for that type and level.

Figure 4 finally shows the results for the legacy Mode-A/C packets with a level of  $-80 \text{ dBm} \pm 1 \text{ dBm}$ .

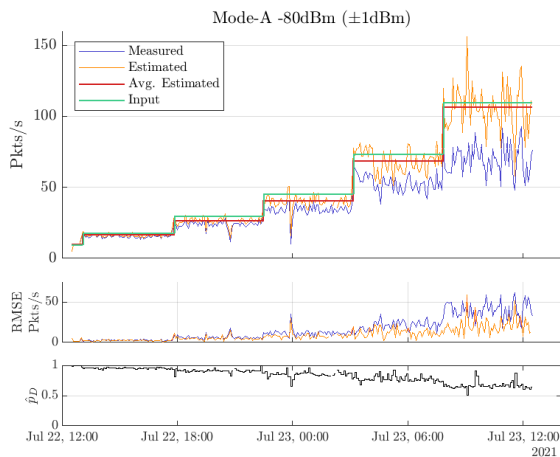


Figure 4: Mode-A/C packets with a level of  $-80 \text{ dBm}$ : With an unstable calculation.

Again, the channel estimation is reducing the RMSE for all scenarios, though it is underestimating  $\hat{N}_{Tx}(M_{AC}, -80, T)$  throughout all scenarios. For this packet type, the estimation of  $\hat{p}_D$  is not as stable as for the two Mode-S packet types and is sometimes not even possible. This is due to the structure of the packet types that might prevent a recognition of the test packets on the output of the receiver. In all cases, there is a drop in the reception rate around midnight on July the 23rd. At that time, the receiver did not deliver any packets for around 4 minutes. This might be due to a reset of the receiver during that time and will be investigated. This estimation improves the insights into the channel performances by injecting test packets into the channel communication and evaluating their losses. The results of these measurements were verified in a second measurement session that led to the same results.

## Conclusion and Outlook

With the shown approach, it is possible to calculate the losses on the surveillance radar channel with a certified COTS ANSP receiver. The approach allows gaining information on the reception conditions by the injection of test packets into a known RF

environment. This allows a simple and cost-effective packet loss estimation and enhances the area of application for these COTS receivers. As this approach is able to create all possible RF environments, it allows an accurate assessment of the achieved results.

The estimated packet loads lead to increasing accuracy in almost all cases and allow an adequate insight into the losses under changing environments. This is especially true for high load scenarios with a saturated channel, where this system is able to estimate the real amount of packets, although the output of the receiver does not change significantly. The estimations do also take into account the reception chain like receiver, antenna, cables, and network as they use the entire losses to calculate the estimation which allows this approach to be easily deployed into the heterogeneous ANSP environment. The system is capable of using real world data and does neither rely on simulations that would require a lot of predefined scope conditions and assumptions, nor does it use RF-radio equipment to inspect small time slots on the channel in order to rate the disturbances. Instead, it uses existing infrastructure like antennas, receivers, and networks that have already been deployed by the German ANSP. This can be enhanced using standard SDR hardware to achieve the presented results.

Therefore, in a next step, the approach can be switched to an unknown real-world environment. The performance and loss rates on the real channel can then be estimated continuously in an easy, reliable, and cost-effective way. This approach works regardless of the airspace, radar station setup, and applied applications on the channel and does therefore adapt very well across various locations. Nevertheless, there remain further challenges: The estimated loads are highly volatile and only show accurate results in average over a longer time period. Secondly, the accuracy of the estimation is changing for each level, type, and channel load.

The stability and accuracy should be increased, which might be possible by merging the estimation over a wide set of levels and channel loads by maintaining the distinction between packet types. In order to achieve this, several machine learning algorithms will be assessed and compared against each other. Furthermore, the potential of compressed sensing similar as shown in [22] will be assessed. In contrast to the pulse-based detection, a packet-based approach will be taken as it promises a good insight into the processes on the channel by a small set of measurements (i.e. test packets).



All this can be done with a significantly decreased amount of data, as no IQ-samples are needed for this analysis, though it allows a precise assessment of the physical channel and reception chain independently of applications in a real-world environment. The current architecture and status of the setup, however, allows a widespread multi point measurement network distributed over a large area in an easy, comprehensible, data sparse, yet precise way.

*Copyright notice: This is a reprint of the IEEE Publication in the Proceedings of the 2021 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET), DOI: 10.1109/ICECET52533.2021.9698590.*

*This report has been written as part of a doctoral thesis at Munster-Technological University and in cooperation with Hochschule Darmstadt, University of Applied Sciences. The author Roman Raekow works as a systems engineer at DFS.*

## Abbreviations

ADS-B	Automatic Dependent Surveillance - Broadcast
ANSP	Air Navigation Service Provider
ATC	Air Traffic Control
COTS	Commercial Off-The-Shelf
FOR	Frequency Occupancy Rate
IQ	Inphase Quadraturephase
MLAT	Multilateration
PC	Personal Computer
pD	Probability of Detection
RF	Radio Frequency
RHS	Reduced Horizontal Separation Minima
SDR	Software Defined Radio
UDP	User Datagram Protocol

## References

- [1] ICAO, "Annex 10 - Aeronautical Telecommunications: Volume IV - Surveillance and Collision Avoidance Systems", Tech. Rep., 2014.
- [2] EUROCONTROL, "EUROCONTROL Specification for ATM Surveillance System

- Performance (Volume 1), 2015, vol. 1, no. September.
- [3] 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.
- [4] EUROCONTROL, "European Mode S Station Functional Specification", pp. 1–104, 2005. Available (Visited: 31.03.2022): <https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-specification-european-mode-s-station-ems>.
- [5] S. Pleninger & M. Strouhal, "Activities for 1030/1090 MHz Spectrum Saturation Alleviation", Magazine of Aviation Development, 2013.
- [6] D.-I. J. Bredemeyer, E. J. Wischmann & J. Gottstein, "MOSTDONT - Final Report - Release 1.2", European Aviation Safety Agency (EASA), Tech. Rep., 2010.
- [7] Federal Aviation Administration and EUROCONTROL, "1090 MHz Extended Squitter Assessment Report June 2002", Tech. Rep. June, 2002.
- [8] J. Sun & J. M. Hoekstra, "Analyzing Aircraft Surveillance Signal Quality at the 1090 Megahertz Radio Frequency", in ICRAT 2020 Proceedings, vol. 4, 2020, pp. 1–8.
- [9] 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, pp. 1-2
- [10] T. Otsuyama, J. Honda, J. Naganawa & H. Miyazaki, "Analysis of signal environment on 1030/1090MHz aeronautical surveillance systems", in 2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC/APEMC 2018. IEEE, 2018, p. 71.
- [11] N. Goddemeier & C. Wietfeld, "Investigation of air-to-air channel characteristics and a UAV specific extension to the rice model", in 2015 IEEE Globecom Workshops, GC Workshops 2015 - Proceedings. IEEE, 2015.
- [12] M. A. Bellido-Manganell & M. Schnell, "Towards Modern Air-toAir Communications: The LDACS A2A Mode", in AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference - Proceedings, vol. 2019-September, 2019.

- [13] Z. Ma, B. Ai, R. He & Z. Zhong, "A 3D air-to-air wideband nonstationary channel model of UAV communications", in IEEE Vehicular Technology Conference, vol. 2019-September, 2019, pp. 3–7.
- [14] J. Naganawa, H. Miyazaki, T. Otsuyama & J. Honda, "Initial results on narrowband air-ground propagation channel modeling using opportunistic ADS-B measurement for coverage design", in ICNS 2018 - Integrated Communications, Navigation, Surveillance Conference. IEEE, 2018, pp. 4F31–4F310.
- [15] N. Schneckenburger, "A Wide-Band Air-Ground Channel Model", Ph.D. dissertation, TU Ilmenau, 2018. [Online]. Available: <https://elib.dlr.de/125748/>  
Visited: 31.03.2022
- [16] D. W. Matolak, "Air-ground channels & models: Comprehensive review and considerations for unmanned aircraft systems", in IEEE Aerospace Conference Proceedings. IEEE, 2012.
- [17] R. S. Raghavan, "Performance Analysis of 1090 MHz Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) using opnet modeller", in Proceedings. The 21st Digital Avionics Systems Conference, 2002.
- [18] M. Strohmeier, M. Schafer, V. Lenders & I. Martinovic, "Realities and challenges of nextgen air traffic management: The case of ADS-B", IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 5, pp. 111–118, 2014.
- [19] M. Schafer, M. Strohmeier, V. Lenders, I. Martinovic & M. Wilhelm, "Bringing up OpenSky: A large-scale ADS-B sensor network for research", in IPSN 2014 - Proceedings of the 13th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (Part of CPS Week), 2014, pp. 83–94.
- [20] R. Raekow, M. Kuhn & B. L. Wenning, "A novel approach to emulate and detect packet loss on surveillance radar channels," in IEEE Vehicular Technology Conference, vol. 2020-May, 2020.
- [21] R. Raekow, M. Kuhn & B. L. Wenning, "A close look on the corona impact on surveillance radar channel loads," in CEUR Workshop Proceedings, vol. 2815, 2020, pp. 275–292.
- [22] V. Chandrakanth & S. N. Merchant, "Compressed sensing-based range detection and Doppler estimation for portable surveillance radar", in Proceedings International Radar Symposium, vol. 2016-June, no. c. IEEE, 2016, pp. 0–4.

## Höhenkonversionsdienst im Flugsicherungskontext

Markus Mänche, Janus Weil, Janis Wojtusich & Kristijan Caprdja

### Einleitung

Höhendaten im Flugsicherungskontext entspringen nicht nur sehr unterschiedlichen Höhenbestimmungsarten wie zum Beispiel Radar, Navigationssatellitensystemen, Luftdruck und anderen, sie sind darüber hinaus relativ zu verschiedenen Bezugssystemen definiert: So gibt es beispielsweise die Höhe über dem Meeresspiegel, die Höhe über Grund, die Flugfläche und Weitere. Die Umrechnung der Höhenwerte zwischen verschiedenen Bezugssystemen ist aufgrund von fehlenden Bezugssystemparametern nicht trivial. In der Praxis besteht daher die ständige Gefahr von unzulässigen Vergleichen zwischen Höhenwerten in unterschiedlichen oder falsch konvertierten Bezugssystemen.

In diesem Artikel stellen die Autoren das Konzept und die prototypenartige Implementierung für einen Webdienst zur Höhenkonversion vor, der verschiedene Höhenbezugssysteme effizient und zuverlässig konvertieren kann. Ein solcher Dienst kann dazu beitragen, die Arbeit mit Höhendaten deutlich zu vereinfachen und Fehlinterpretationen vorzubeugen. Für viele Anwendungen, die Höhendaten aus unterschiedlichen Quellen verarbeiten - wie beispielsweise zwei- oder dreidimensionale Luftlagedarstellungen - ließe sich damit der Entwicklungsaufwand deutlich reduzieren und die Verwendung der Bezugssysteme vereinheitlichen.

Als Anwendungsbeispiel für den Höhenkonversionsdienst wird ein Prototyp für eine 3D-Luftlagedarstellung vorgestellt. Herkömmliche Luftlagedarstellungen arbeiten typischerweise zweidimensional und stellen die Höhe von Flugobjekten in der Regel numerisch dar. Dadurch gehen Informationen verloren und beschränken die intuitive Wahrnehmung der Luftlage. Bei einer 3D-Luftlagedarstellung sind Unterschiede in den Höhendaten direkt erfassbar, was eine präzise und einheitliche Bestimmung dieser Daten absolut erforderlich macht. Für die Umsetzung des Prototyps werden die jüngsten Weiterentwicklungen von Technologien wie Augmented Reality (AR) und Virtual Reality (VR) genutzt, um drei virtuelle Dimensionen darstellen zu können.

### Grundlagen

Es gibt viele verschiedene konvertierbare Höhenreferenzsysteme. Einige Datenquellen wie globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) liefern beispielsweise eine Höhe über Ellipsoid. Das Erdellipsoid gilt als „[...] mathematisch einfach beherrschbare Referenzfläche [...]“ ([1], S. 3) und wird durch zwei Radien parametrisiert.

Da die „[...] Richtung der Schwere an jedem Punkt [...] durch die Gestalt des festen Teils der Erde und seine ungleiche Dichtigkeit bestimmt [...]“ ([2], S. 19) wird, resultiert die tatsächliche Erdfigur in einer unregelmäßigen Form aufgrund der Erdgravitation selbst. Daraus folgt die Erkenntnis, dass keine mathematisch geschlossene Formel die Erdfigur korrekt beschreiben kann. Daher stellt das Ellipsoid ein geometrisch vereinfachtes Erdmodell dar, welches in zahlreichen Verfahren genutzt wird. Das Geoid nimmt währenddessen die Rolle des approximierenden tatsächlichen Erdmodells ein ([2], S. 22f).

Die Geoidhöhe oder auch Geoidundulation beschreibt die Höhendifferenz zwischen dem Erdellipsoid und dem Erdgeoid. Da das Erdgeoid unförmig ist, unterscheidet sich die Geoidhöhe maßgeblich an verschiedenen Orten, weshalb sie auch Undulation genannt wird ([1], S. 125f). In Abbildung 1 wird dies deutlich: Es ist sowohl eine Erdoberfläche, als auch die Form des gleichförmigen Ellipsoids und des unregelmäßigen Geoids zu sehen. Die Undulation  $N$  wird nun durch die Differenz von Ellipsoid und Geoid beschrieben, welche in Abhängigkeit zum Erdschwerefeld stark variieren kann. Die Höhe zum Referenzgeoid wird mit  $H$  dargestellt und die Höhe zum Referenzellipsoid mit  $h$ . Da die Äquipotentialflächen des Erdschwerefeldes genau wie das Geoid lokale Verzerrungen aufweisen können, ist auch die natürliche Lotrichtung, die senkrecht auf den Potentialflächen steht, nicht notwendigerweise eine gerade Linie.

Die Undulation stellt damit den ersten Konversionsbedarf dar. Weitere Konversionen sind notwendig zwischen der Höhe über Grund (AGL) und der Höhe über Meeresspiegel (AMSL) beziehungsweise über Geoid. Dieser Unterschied wird in Abbildung 2 in Blau und Grün dargestellt.

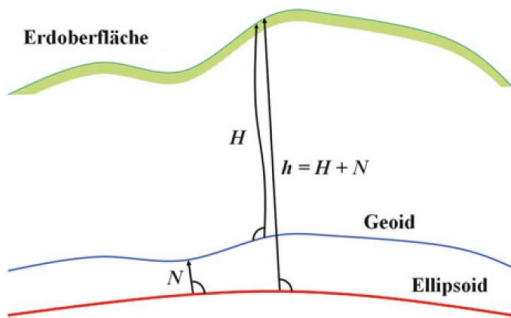


Abbildung 1: Visualisierung der Geoidundulation ([1], S. 125).

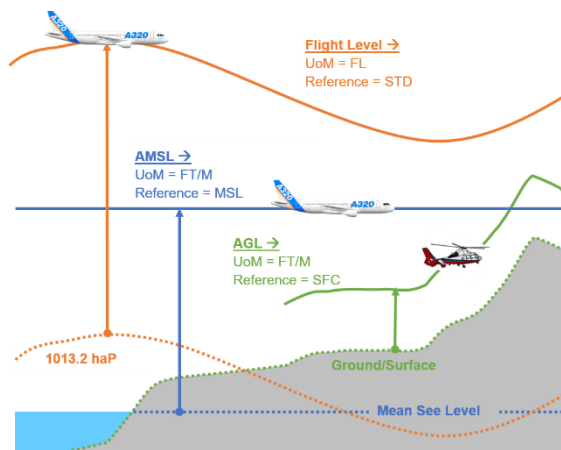


Abbildung 2: Höhe über Grund, Höhe über Meeresspiegel und Flight Level [3].

Des Weiteren geht aus der Abbildung in Orange das Prinzip der Flight Level (FL) bzw. Flugflächen hervor. Diese nutzen die sogenannte ICAO-Standardatmosphäre [4] als Referenz, welche am Meeresspiegel einen Luftdruck von 1013,2 hPa annimmt. Da diese Annahme selten dem tatsächlichen Luftdruckwert am Meeresspiegel entspricht, sind Flugflächen atmosphärischen Schwankungen ausgesetzt.

Bei barometrischen Höhenberechnungen ist immer ein Referenzdruck notwendig. Es können sowohl sehr exakte Höhen über dem Flughafen bestimmt werden, indem der gemessene Luftdruck am Flughafen, der QFE, als Referenzwert genutzt wird, da dessen Temperatur und Höhe üblicherweise bekannt sind. Andererseits können Flugflächen für den oberen Luftraum anhand des abgeleiteten Referenzwertes QNH bestimmt werden. Der QNH basiert auf einer Luftdruckmessung des nächstgelegenen Flughafens und der Reduktion dessen auf Meeresspiegelhöhe mithilfe

der Standardatmosphäre. Dies wird in Abbildung 3 deutlich gemacht. Während der QFE dem gemessenen Luftdruck am Flughafen auf Bodenhöhe entspricht, ist der QFF der reduzierte Luftdruck auf Meeresspiegelhöhe anhand der gemessenen Temperatur. Da diese nicht immer vorliegt, wird zur Bestimmung des QNH die ICAO-Standardatmosphäre zur Reduktion herangezogen.

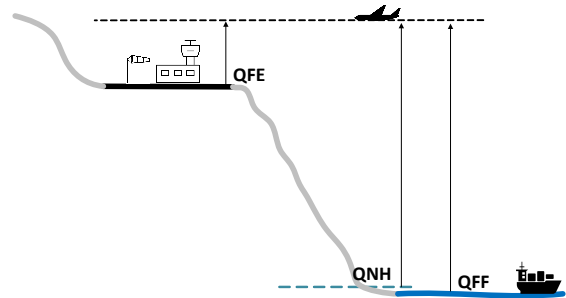


Abbildung 3: Q-Codes für die barometrische Höhenbestimmung.

Die Berechnung von Flugflächen mithilfe des QNH resultiert aufgrund großer atmosphärischer Schwankungen in unpräzisen absoluten Höhenwerten. Relativ sind die Flugflächen aber dennoch sehr robust und nützlich um Höhendifferenzen zu bestimmen und vertikalen Sicherheitsabstand im Luftverkehr einzuhalten. Aus diesem Grund kommen sie besonders im oberen Luftraum zum Einsatz.

Derartige barometrische Höhenberechnungen erfolgen anhand der in (1) dargestellten barometrischen Höhenformel. Hierbei entspricht  $z$  der Höhe in Metern,  $p$  dem zugehörigen Luftdruck in Pascal und  $T$  der Temperatur in Kelvin.

$$z_2 - z_1 = 29,27 \cdot T \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (1)$$

Für einen Höhenkonversionsdienst sind also auch barometrische Konversionen denkbar, welche beispielsweise anhand von gemessenen Luftdruckwerten die Flugfläche bestimmen oder weitere Datenquellen heranziehen, um präzisere absolute Höhenwerte barometrisch zu berechnen.

## Konzept

Folgende Funktionalitäten umfasst der eingangs beschriebene Höhenkonversionsdienst:

- Der Dienst erlaubt Höhenkonversionen von AMSL zu AGL und umgekehrt. Für diese Konversionen ist die Einbindung von Geländehöhedaten erforderlich.

- Außerdem ist die Konversion von Ellipsoidhöhe zu Geoidhöhe und umgekehrt anhand von Undulationsdaten möglich.
- Des Weiteren können Flugflächen und AMSL und auch Flugflächen und AGL ineinander konvertiert werden
- Der Dienst ermittelt die Höhe des Geländes an gegebenen Koordinaten und liefert diese zurück. Zusätzlich kann anhand von zwei Eckkoordinaten eines Rechtecks ein digitales Geländemodell erstellt und zurückgeliefert werden. Für diese Funktionalitäten sind Höhendaten über die Erdoberfläche notwendig. Diese werden vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) in einem Datengitter mit 10 Metern Gitterweite zur Verfügung gestellt. Um eine möglichst hohe Genauigkeit erzielen zu können, wird für jede Höhenanfrage eine bilineare Interpolation zwischen den vier nächstgelegenen Gitterwerten durchgeführt.
- Der Dienst verarbeitet nicht jede eingehende Anfrage vollständig, sondern authentifiziert zu Beginn die anfragende Instanz und stellt sicher, dass diese auch die Berechtigung besitzt, den gewählten Endpunkt zu nutzen. So gibt es bestimmte Nutzerrollen mit unterschiedlichen Berechtigungen.
- Der Dienst erfüllt gewisse Performanzziele und ist so effizient wie möglich aufgebaut. Das liegt an der Menge und Häufigkeit der zu erwartenden Anfragen. Eine Luftlagendarstellung, welche alle ihre Flugobjekte beispielsweise mehrmals pro Sekunde aktualisiert, müsste demnach bei notwendigen Konvertierungen auch mehrmals pro Sekunde eine Anfrage mit hunderten Datensätzen an den Dienst stellen. Das hier angesetzte Performanzziel beträgt für eine sichere Abdeckung aller im Durchschnitt aktiven Ziele im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland einen Durchsatz von circa 3000 Anfragen beziehungsweise Datensätzen pro Sekunde.
- Der Dienst ist ausfallsicher skalierbar, indem er dauerhaft auf mindestens zwei parallelen Server-Instanzen läuft. Die Verteilung von Anfragen auf die verschiedenen Instanzen wird per Lastverteilung absolviert, was

gleichzeitig auch die Performanz verbessert. Bei starkem Anwachsen der Anfragenmenge kann die Performanz durch Schaltung weiterer Server-Instanzen zusätzlich erhöht werden.

## Umsetzung

Für die Umsetzung des Dienstes wurde die Programmiersprache Java mit dem Framework Vert.x<sup>1</sup> ausgewählt. Zusätzliche Bibliotheken wie GDAL<sup>2</sup> und GeographicLib<sup>3</sup> werden hierbei unterstützend für die Geodatenverarbeitung eingebunden. Die Umsetzung der funktionalen Anforderungen erfolgt anhand von drei grundlegenden Endpunkten:

- Endpunkt A stellt Höhendaten bereit. Es sollen Koordinaten gesendet werden, woraufhin die Geländehöhe zurückgeliefert wird. Aus Gründen der Skalierbarkeit können hier beliebig viele Koordinaten mit einer Anfrage verarbeitet werden.
- Endpunkt B stellt Höhenkonversionen bereit. Hier muss übertragen werden, in welche Höhenreferenz und -einheit die Höhenwerte konvertiert werden sollen. Außerdem kann eine Liste an Koordinaten und Höhenwerten in beliebigen vorher definierten Höhenreferenzsystemen übertragen werden. In der Antwort werden dann alle Höhenwerte im Zielhöhenreferenzsystem mit ihren Koordinaten zurückgeliefert.
- Endpunkt C stellt ein digitales Geländemodell für eine definierte Region zur Verfügung. Dazu müssen durch den Benutzer zwei Eckkoordinaten eines rechteckigen Kartenausschnitts sowie die Angabe des gewünschten Dateiformats und der gewünschten horizontalen Auflösung angegeben werden. Daraufhin berechnet der Dienst alle benötigten Höhendaten und baut das digitale Geländemodell im gewünschten Dateiformat auf.

Im Folgenden wird die Hauptfunktionalität der Höhenkonversionen genauer beschrieben. Für die AGL-AMSL-Konversionen sind Elevation-Daten vom BKG notwendig. Um diese Daten auszulesen, kommt die Bibliothek GDAL zum Einsatz. Nach der Extraktion der Nachbargitterpunkte aus der Datenquelle kann durch eine bilineare Interpolation

---

<sup>1</sup> <https://vertx.io/> (Abgerufen am 21.04.2022)

<sup>2</sup> <https://gdal.org/> (Abgerufen am 21.04.2022)

<sup>3</sup> <https://geographiclib.sourceforge.io/> (Abgerufen am 21.04.2022)

ein angenäherter Höhenwert für den durch Latitude (Lat) und Longitude (Long) definierten Punkt berechnet werden. Dieser kommt in einer der folgenden Konversionsformeln zum Einsatz:

$$\begin{aligned} \blacksquare \quad & AGL = AMSL - \\ & Elevation(Lat, Long) \\ \blacksquare \quad & AMSL = AGL + \\ & Elevation(Lat, Long) \end{aligned} \quad (2)$$

Die Ellipsoid-Geoid-Konversionen sind sehr ähnlich und nur die Datenquellen unterscheiden sich hierbei. Anhand der Koordinaten muss die Undulation aus Gitterdaten bestimmt werden. Sowohl bei der Nachbardatenextraktion als auch der bilinearen Interpolation wird durch die GeographicLib Library unterstützt. Die Berechnung erfolgt dann anhand einer der folgenden beiden Formeln:

$$\begin{aligned} \blacksquare \quad & h = H - N(Lat, Long) \\ \blacksquare \quad & H = h + N(Lat, Long) \end{aligned} \quad (3)$$

N steht hierbei analog zu Abbildung für die Undulation, h für die Höhe zum Referenzellipsoid und H für die Höhe zum Referenzgeoid.

Grundsätzlich anders funktionieren barometrische Konversionen, welche die Höhe durch Angabe des Luftdrucks bestimmen. Das Wettermodell ICON-D2 [5] des Deutschen Wetterdienstes (DWD), welches Luftdruckdaten am Meeresspiegel für den gesamten deutschen Raum bereitstellt, bietet dafür die notwendige Datengrundlage. Die Gittergröße beträgt circa 2 Kilometer, sodass deutlich präzisere barometrische Höhenwerte bestimmt werden können als im Vergleich zur Nutzung des QNH. Außerdem stellt das Wettermodell zeitabhängige Prognosedaten für die nahe Zukunft zur Verfügung, sodass bei einer Datenextraktion drei Parameter mit Latitude, Longitude und Zeit notwendig sind. Dies sorgt für eine Extraktion von acht Gitternachbarnpunkten, woraufhin eine trilineare Interpolation die Präzision verbessern kann. Für die eigentliche Konversion wird die bereits vorgestellte barometrische Höhenformel (Formel 1) verwendet.

Die Generierung von digitalen Geländemodellen erfolgt in drei Schritten:

1. Der gewählte Kartenausschnitt muss je nach gewünschter Auflösung in Gitterpunkte zerlegt werden, um so anhand der BKG-Datenquelle für alle Gitterpunkte die Elevation zu bestimmen.

2. Mithilfe der resultierenden Punktwolke aus dreidimensionalen Koordinaten lassen sich Dreiecke zwischen allen Punkten aufspannen, um so das Geländemodell zu generieren.
3. Das Geländemodell wird abschließend in Form eines 3D-Modellformates wie STL oder OBJ gespeichert und ausgeliefert.

## Ungenauigkeiten

Alle Höhenbestimmungsarten haben selbst bereits gewisse Ungenauigkeiten. Die Präzision bei einem GNSS wie GPS ist beispielsweise abhängig von der Anordnung und Anzahl der genutzten Satelliten. Je weniger und näher sie beieinanderstehen, desto unpräziser ist die Messung [6]. Aufgrund dieser und vieler weiterer Fehlerquellen spricht man GPS in der Regel eine Ungenauigkeit von bis zu 10 Metern zu.

Bei Konversionen zwischen AGL und AMSL liegt eine mögliche Fehlerquelle in den Geländedaten. Zusätzlich zu der Interpolationsungenauigkeit zwischen den Gitterpunkten nennt das BKG Messungenauigkeiten in den Gitterdaten in einer Höhe von 3 bis 10 Metern und in der Lage von bis zu 5 Metern [7].

Bei Konversionen zwischen Geoid und Ellipsoid sind Ungenauigkeiten abhängig von der Parametrisierung der Erdfigur. Moderne Erdfigurparametrisierungen geben eine Ungenauigkeit im Zentimeterbereich an ([2], S.52f). Allerdings muss hierbei erwähnt werden, dass das bestimmbare Quasigeoid selbst einer Ungenauigkeit im Vergleich zum größtenteils unbekanntem tatsächlichen Geoid unterliegt. Dies sorgt auch bei diesen Konversionen für eine Ungenauigkeit von bis zu 1-2 Metern ([1], S. 126f).

Barometrische Höhendaten gehen üblicherweise mit den größten Ungenauigkeiten einher, da hierbei einige physikalische Effekte und Wetterphänomene die Ergebnisse beeinträchtigen. Einerseits kann eine mangelhafte Höhenmessung und schlechte Temperaturkompensation zu Abweichungen von bis zu 15 Metern führen, welche häufig in Luftfahrzeughandbüchern beschrieben sind. Andererseits können Messgeräte durch Reibungswärme an der Flugzeugoberfläche und durch die eigene Bewegungsgeschwindigkeit falsche Luftdruckmessergebnisse erhalten. Zugelassen ist hierbei eine Abweichung von bis zu 10 Metern pro 100 Knoten Geschwindigkeit. Da die hier beschriebenen Fehlerquellen additiv und nicht

vollständig sind, kann es bei einer barometrischen Höhenmessung und damit auch -konversion aus diesen Gründen schon zu Ungenauigkeiten von mehr als 55 Metern kommen [8].

Aufgrund der überwiegenden Verwendung des QNH im oberen Luftraum für die Höhenbestimmung, welches nur sehr selten den realen Wetterbedingungen entspricht, entstehen aber deutlich größere barometrische Fehler. Denn die größte Fehlerquelle bei der barometrischen Höhenbestimmung liegt in den atmosphärischen Schwankungen. Obwohl bei der klassischen barometrischen Höhenbestimmung mit 1013,25 hPa gerechnet wird, zeigen Luftdruckkarten vom DWD Schwankungen von circa 960 bis 1035 hPa auf Meeresspiegelhöhe auf. Schwankungen dieser Größenordnung sorgen für Ungenauigkeiten in der Höhenbestimmung von bis zu 450 Metern. Dies betrifft durch die einheitliche Verwendung desselben Referenzwertes aber alle benachbarten Luftfahrzeuge gleichermaßen, sodass Staffellängenabstände sehr präzise eingehalten werden können. Durch präzisere individuelle Referenzwerte, wie die zuvor beschriebenen DWD-Luftdruckdaten, lässt sich in Zukunft also potenziell der Einfluss der größten Fehlerquelle bei der barometrischen Höhenbestimmung umgehen beziehungsweise zumindest stark reduzieren. Dies ist besonders wichtig für das an Relevanz gewinnende Thema der unbemannten Flugobjekte, welche typischerweise bodennah operieren und damit auf sehr genaue Höhenangaben angewiesen sind.

## Anwendungsfall

Herkömmliche Luftlagedarstellungen sind zweidimensional aufgebaut. Über einer Karte sind typischerweise Flugobjekte projiziert, deren Positionen regelmäßig aktualisiert werden. Per eingeblendetem Text wird in der Regel angegeben welche Kennung jedes Flugobjekt besitzt und in welcher Höhe es sich befindet. Ein Screenshot aus der Luftlagedarstellung STANLY Track [9] ist in Abbildung 4 zu sehen.

Mit dreidimensionalen Visualisierungstechnologien wie Augmented Reality (AR) oder Virtual Reality (VR) lassen sich mehr Informationen ohne Textfelder in Luftlagedarstellungen einbetten.

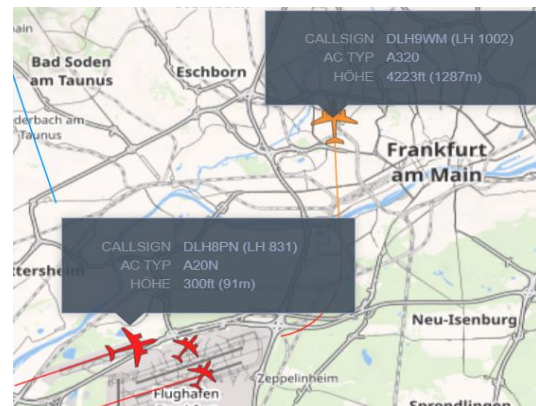


Abbildung 4: Screenshot der öffentlich zugänglichen Luftlagedarstellung STANLY Track [9].

Aus diesem Grund wird eine 3D-Luftlagedarstellung als erster Anwendungsfall für den Höhenkonversionsdienst betrachtet. Diese Luftlagedarstellung soll für die AR-Brille Microsoft HoloLens umgesetzt werden, welche in Abbildung 5 dargestellt ist.



Abbildung 5: Beispieldarstellung einer Microsoft HoloLens der 1. Generation.

Die Entwicklung der 3D-Luftlagedarstellung beruht auf drei grundlegenden Datenquellen. Einerseits müssen die Flugpositionsdaten empfangen und verarbeitet werden. Diese stammen aus dem UTM-System<sup>4</sup> von Droniq und DFS Deutsche Flugsicherung GmbH. Nach einer Berechnung der realen Koordinaten in virtuelle Koordinaten können Modelle von Flugobjekten virtuell in den Raum projiziert werden. Damit Nutzer auch wissen wo sich die Flugobjekte befinden, sind zwei weitere Datenquellen notwendig. Einerseits soll eine Karte geladen und angezeigt werden, welche außerdem auf einem digitalen Geländemodell abgebildet werden soll. Während ein Kartenausschnitt durch den Dienst des BKG anhand von Eckkoordinaten bezogen werden kann, müssen für ein digitales

<sup>4</sup> <https://utm.dfs.de> (Abgerufen am 21.04.2022)

Geländemodell einige Berechnungen durchgeführt werden, welche der Höhenkonversionsdienst übernehmen kann. Wie eine solche dreidimensionale Darstellung aussieht, ist in Abbildung 6 erkennbar.

Damit der Kartenausschnitt der Anwendung änderbar ist, werden vier Bedienelemente in alle Himmelsrichtungen für eine Bewegung und ein Schieberegler für den Zoom implementiert.

Der Prototyp bietet neben der reinen Luftlagedarstellung eine weitere Funktionalität, die in Abbildung 7 dargestellt ist. Beim Fokussieren eines Flugobjekts werden die Kennung, der aufgezeichnete Flugverlauf seit dem Start der Anwendung und ein projizierter Zukunftsvektor für die voraussichtliche Position in 60 Sekunden dargestellt.



Abbildung 6: Ansicht der 3D-Luftlagedarstellung durch die AR-Brille.

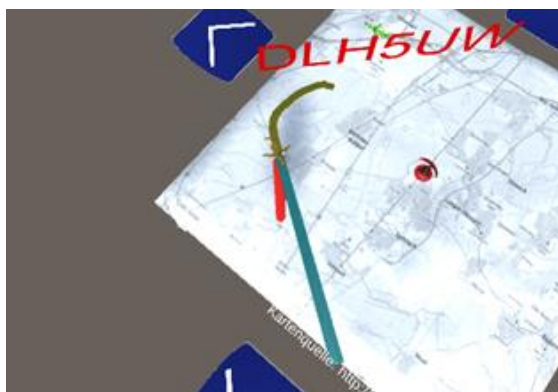


Abbildung 7: Screenshot der 3D-Luftlagedarstellung aus der Entwicklungsumgebung mit fokussiertem Flugobjekt.

## Fazit

Der in diesem Artikel vorgestellte Webdienst zur Höhenkonversion erlaubt eine performante Konversion zwischen Höhendaten aus verschiedenen Bestimmungsarten und mit unter-

schiedlichen Bezugssystemen sowie die Generierung von digitalen Geländemodellen. In der Praxis kann damit die Verwendung und Interpretation von verschiedenartigen Höhendaten deutlich vereinfacht werden. Dies erhöht die Vergleichbarkeit und Sicherheit in Anwendungen der zweidimensionalen und dreidimensionalen Luftlagedarstellung. Für dreidimensionale Luftlagedarstellungen kann je nach Herkunft der verwendeten Daten darüber hinaus die zuverlässige und präzise Konversion unterschiedlicher Höhendaten eine notwendige Voraussetzung für eine qualifizierte Projektion in die dritte Dimension sein. Die Möglichkeit digitale Geländemodelle mit den Geländehöhen für beliebige Koordinaten in Deutschland generieren zu können, erlaubt darüber hinaus eine realitätsnahe und immersive dreidimensionale Darstellung der angrenzenden Umgebung.

Der Dienst kann insbesondere auch mit Hinblick auf die wachsende Zahl von unbemannten Flugsystemen eine sinnvolle Ergänzung zu bestehenden oder neuartigen Flugsicherungssystemen bilden. Durch die bei UAS typischen bodennahen Flughöhen werden bisher kaum verwendete Höhendaten wie beispielsweise die Höhe über Grund (AGL) stark an Bedeutung gewinnen. Für eine sichere Integration dieser Flugobjekte in eine allgemeine Luftlagedarstellung ist eine zuverlässige Konversion und Konsolidierung der unterschiedlichen Höhendaten erforderlich.

Wichtige Qualitätsmerkmale des Dienstes sind die Genauigkeit der Konversionen und die Performanz, da schon eine einzige Luftlagedarstellung eine hohe Anzahl von Anfragen erzeugen kann. Hierbei sind besonders große Datenmengen wie Höhendaten des BKG, Undulationsdaten und DWD-Daten, welche im Verlauf der Konversion weiterverarbeitet werden müssen, als kritische Performanzfaktoren ausgemacht worden. Beim Thema Genauigkeit muss man sich zum aktuellen Zeitpunkt noch mit einigen Einschränkungen auseinandersetzen, da die technische Infrastruktur der Flugsicherung typischerweise nicht für eine exakte absolute Höhenbestimmung im oberen Luftraum ausgelegt ist. Bei dreidimensionalen Luftlagedarstellungen können dadurch Ungenauigkeiten bis zu einem dreistelligen Meterbereich entstehen. Die Beseitigung dieser Einschränkungen stellen ein erhebliches Verbesserungspotenzial dar, welches durch die Verwendung von Wettermodellen bereits adressiert wird.



Der vorgestellte Prototyp für eine 3D-Luftlagedarstellung in augmentierter Realität stellt einen ersten Anwendungsfall für den Höhenkonversionsdienst dar. Eine weitere Motivation für den Prototypen ist die Frage der Anwendbarkeit des aktuellen Stands der Technik im Bereich Augmented Reality im Flugsicherungsumfeld. Während die AR-Hardware zum aktuellen Zeitpunkt noch Mängel in Sachen Bedienung, Komfort und Rechenleistung aufweist, so ist das Potenzial der Technologie in der Zukunft nicht zu übersehen. Auch im Flugsicherungsumfeld kann eine AR-Nutzung mit verbesserter Hardware sinnvoll und vorteilhaft sein. So könnte beispielsweise ein Tower-Lotse eine Brille tragen, welche ihm Daten zu jedem sichtbaren Flugobjekt darstellen kann. Ebenso vorstellbar wäre eine Bodenlagedarstellung für Flughäfen mit VR oder AR. Die operative Verwendung dieser Technologie in professionellen Anwendungen zur Luftlagedarstellung, dürfte sich allerdings aufgrund von unzureichenden oder fehlenden Bedienkonzepten noch einige Zeit verzögern. Im Jahr 2012 ist bei einer ähnlichen Untersuchung in einer Ausgabe dieser Zeitschrift ein weiteres Problem identifiziert worden, welches nach wie vor besteht: „Da die Fluglotsen üblicherweise zu zweit in einem Team arbeiten, wurde vielfach der Wunsch nach einer Mehrbenutzerfähigkeit geäußert.“ ([10])

## Ausblick

Der Höhenkonversionsdienst erfüllt derzeit bereits einen ersten Anwendungsfall und wird zukünftig weiter ausgebaut und fertiggestellt. Der Prototyp der 3D-Luftlagedarstellung greift auf einige Funktionalitäten des Dienstes zurück und stellt somit präzisere und umfangreichere Höhendaten dar. Für die nahe Zukunft sind weitere dreidimensionale Luftlagedarstellungen im UTM-Umfeld geplant, welche ihre Höhenkonversionen und Geländeabfragen über den Dienst umsetzen sollen.

Die zukünftige Relevanz von 3D-Luftlagedarstellungen bleibt vorerst unbekannt, wird aber mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit steigen. Durch neue technologische Möglichkeiten für dreidimensionale Visualisierungen wird ein intuitiveres Wahrnehmen von virtuellen Darstellungen ermöglicht. Die Effektivität und der Mehrwert von dreidimensionalen Anwendungen in der Flugverkehrskontrolle muss in Zukunft allerdings erst noch anhand von Studien mit Fluglotsen belegt werden. Deutlich früher ist allerdings schon die Implementierung von

Informationssystemen denkbar, welche nicht im operativen Geschäft der Flugsicherung zum Einsatz kommen, sondern anderweitige nicht-sicherheitskritische Funktionalitäten erfüllen. Dies könnten zum Beispiel Luftlagedarstellungen in Flughafennähe, zur Überwachung von Drohnen, Visualisierung von Fluglärm oder die Zuordnung von Drohnen zu Drohnenpiloten sein.

## Abkürzungsverzeichnis

AGL	Above Ground Level
AMSL	Above Mean Sea Level
AR	Augmented Reality
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
DWD	Deutscher Wetterdienst
FL	Flight Level (Flugfläche)
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
ICAO	International Civil Aviation Organization
QFE	Luftdruck in Flugplatzhöhe (oder an der Start- und Landebahnschwelle)
QFF	Atmospheric Pressure Converted to Mean Sea Level (Luftdruck, umgerechnet auf die Meereshöhe unter Berücksichtigung des Messortes)
QNH	Höhenkorrekturwert (bezogen auf Normalnull NN)
UAS	Unmanned Aerial System
UTM	UAS Traffic Management
R	Virtual Reality

## Referenzen

- [1] Rummel, R. (2017). Erdmessung und Satellitengeodäsie. ISBN 978-3-662-47100-5.
- [2] Bauer, M. (1997). Vermessung und Ortung mit Satelliten: NAVSTAR-GPS und andere satellitengestützte Navigationssysteme (eine Einführung für die Praxis). ISBN 3-879-07309-0.

- [3] Scheucher, W. (2020). Vertical Limits of Airspace. Aufgerufen am 02.04.2022. Verfügbar unter: [https://ext.eurocontrol.int/aixm\\_confluence/display/ACGAIP/Vertical+Limits+of+Airspace](https://ext.eurocontrol.int/aixm_confluence/display/ACGAIP/Vertical+Limits+of+Airspace)
- [4] ICAO, Manual of the ICAO Standard Atmosphere (extended to 80 kilometres (262 500 feet)), Doc 7488-CD, Third Edition, 1993, ISBN 92-9194-004-6.
- [5] D. Reinert, F. Prill, H. Frank, M. Denhard, M. Baldauf, C. Schraff, C. Gebhardt, C. Marsigli and G. Zängl (2021). DWD Database Reference for the Global and Regional ICON and ICON-EPS Forecasting System. Aufgerufen am 21.04.2022. Verfügbar unter: [https://www.dwd.de/DWD/forschung/nwv/fepub/icon\\_database\\_main.pdf](https://www.dwd.de/DWD/forschung/nwv/fepub/icon_database_main.pdf)
- [6] Zogg, J.-M. (2009). GPS und GNSS: Grundlagen der Ortung und Navigation mit Satelliten. Aufgerufen am 02.04.2022. Verfügbar unter: [https://www.zogg-jm.ch/Dateien/Update\\_Zogg\\_Deutsche\\_Version\\_Jan\\_09\\_Version\\_Z4x.pdf](https://www.zogg-jm.ch/Dateien/Update_Zogg_Deutsche_Version_Jan_09_Version_Z4x.pdf)
- [7] Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (2022). Digitale Geländemodelle. Aufgerufen am 02.04.2022. Verfügbar unter: [https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitale-geodaten/digitale-gelandemodelle.html?\\_\\_store=default](https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitale-geodaten/digitale-gelandemodelle.html?__store=default)
- [8] Krutina, M.F.H. (2010). Barometrische Höhenmessung. Volkshochschule Darmstadt, Darmstadt. Aufgerufen am 07.04.2022. Verfügbar unter: [http://www.wolkenschnueffler.de/media/DIR\\_62701/8850f06277167a7efff8044ffffef.pdf](http://www.wolkenschnueffler.de/media/DIR_62701/8850f06277167a7efff8044ffffef.pdf)
- [9] DFS Deutsche Flugsicherung GmbH (2022). STANLY\_Track3. Aufgerufen am 18.05.2022. Verfügbar unter: [https://stanlytrack3.dfs.de/st3/STANLY\\_Track3.html](https://stanlytrack3.dfs.de/st3/STANLY_Track3.html)
- [10] J. Bergner, C. Schmand (2012). Fortschrittliche Visualisierungssysteme für Fluglotsenarbeitsplätze. Aufgerufen am 18.05.2022. Verfügbar unter: <https://www.dfs.de/homepage/de/medien/publikationen/fokus1202.pdf>

## Untersuchungen zur Stabilität von VOR-Anlagen - ein Beitrag zur Energiewende

Dr. Ralf Eichhorn & Marc Radermacher (BAF)

### Einleitung

Die Deutsche Flugsicherung (DFS) betreibt in Deutschland zurzeit 54 VOR (VHF Omnidirectional Radio Range, dt. *Drehfunkfeuer*) Anlagen, die die Luftraumnutzer bei der Navigation unterstützen. Ungefähr 75 Prozent davon sind Doppler-Anlagen (DVOR), der Rest sind konventionelle VOR (CVOR). Beide unterscheiden sich technisch in der Art, wie die Radiosignale erzeugt werden, die Nutzung durch das Luftfahrzeug beeinflusst dies jedoch nicht. Generell liefern Doppler-VOR bessere Signalqualitäten, sind aber technisch aufwendiger.

In der Vergangenheit standen Bedenken bezüglich der Signalqualität der VORs und der damit verbundenen navigatorischen Genauigkeit häufig dem Ausbau der Windenergie entgegen. So können Reflexionen der Radiosignale an den Windenergieanlagen (WEA) zu unerwünschten Störungen führen. Dieser Beitrag beschreibt nun eine der Maßnahmen, welche die DFS ergriffen hat, um den Zielkonflikt zwischen Luftfahrt und Energiewirtschaft zu entschärfen. Durch eine sorgfältige Analyse, die im Folgenden beschrieben wird, konnten diese Bedenken reduziert werden, wodurch die DFS einen weiteren Beitrag zur Energiewende in Deutschland leisten kann.

### Motivation

VORs gehören zu den klassischen Mitteln der Navigation im Luftverkehr. Dabei werden von einer Bodenstation mehrere Signale ausgesendet, die es einem Luftfahrzeug erlauben, seine Position relativ zu dieser Station (auch Azimut oder Bearing genannt) zu bestimmen. Auch wenn die Bedeutung von VORs durch die Einführung modernerer und auch genauerer Navigationsmittel abnimmt, so bilden sie dennoch eine notwendige Rückfallebene, die es auch zu schützen gilt, sollte es beispielsweise durch Störungen zu Beeinträchtigungen der Satellitennavigationssysteme (GNSS) kommen.

Die Anforderungen für den Betrieb von VORs ergeben sich aus diversen ICAO-Dokumenten wie beispielsweise dem Annex 10 Volume I [1]. Generell wird die Systemgenauigkeit bei der VOR-Nutzung durch drei Faktoren bestimmt:

- Die Genauigkeit des Empfängers im Luftfahrzeug,
- Störungen auf dem Signalweg (z.B. verursacht durch topografische Gegebenheiten oder Bebauung, darunter auch Windenergieanlagen) und
- die Genauigkeit der Bodenstation, also des VOR-Senders.

Die Empfängergenauigkeiten, also Punkt eins, liegen außerhalb des Einflussbereiches der DFS. Die hierfür bestehenden Spezifikationen müssen daher als gegeben angenommen werden.

Bezüglich Punkt zwei gehört es zu den Aufgaben des Betreibers von VOR-Anlagen sicherzustellen, dass die im Luftraum empfangbaren VOR-Signale die geforderten Anforderungen als Teil der Systemgenauigkeit erfüllen. Dies wird beispielsweise durch die regelmäßige Flugvermessung sichergestellt. Aber auch dadurch, dass Störungen, die durch Bebauung entstehen können, im Vorfeld beurteilt und gegebenenfalls vermieden werden (siehe §18a LuftVG). Bezüglich der Prognose von Signalausbreitungsstörungen, und hier insbesondere die Beeinträchtigung durch Windenergieanlagen, hat die DFS in den vergangenen Jahren zusammen mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) im Rahmen des Forschungsprojekts WERAN und WERAN+ enorme Verbesserungen der Prognosegenauigkeit erreichen können, die aber nicht Gegenstand dieses Beitrags sind [2].

Dieser Artikel beschäftigt sich hingegen mit der Erfassung, Auswertung und Bewertung der Betriebsparameter der Bodenstationen (VOR-Sender) und zählt somit zur Dritten der oben genannten Komponenten. Um die Stabilität und Genauigkeit der VOR-Anlagen zu untersuchen, wurden die von den Anlagen ausgestrahlten Azimutwerte über das anlageneigene Monitoring-Equipment erfasst, aufgezeichnet und mittels Fernauslesung abgerufen. Diese Erfassung der Monitorwerte erfolgte an insgesamt 21 Standorten über einen Zeitraum von zunächst 12 Wochen.

Bei CVOR-Anlagen befinden sich zwei physisch getrennte Monitorantennen in unmittelbarer Nähe von ca. 5 Metern zur Senderantenne. Daraus bestimmt die Anlage zwei unabhängige Monitorwerte zur Überwachung. DVOR-Anlagen arbeiten mit nur

einer Monitorantenne in knapp 200 Metern Entfernung. Das dabei empfangene Überwachungssignal wird über interne Baugruppen in zwei redundante Monitorwerte aufgespalten.

### Datengrundlage

Bei den 21 untersuchten Anlagen handelt es sich um VOR-Anlagen des Musters 4000 von SEL. Sieben Anlagen sind dabei vom Typ CVOR, vierzehn vom Typ DVOR. Die Aufzeichnung der Azimutwerte erfolgte stündlich. Pro Messzeitpunkt liegt dabei jeweils ein Messwert für beide Monitore vor. Bei CVOR-Anlagen sind beide Monitorwerte im Azimutwinkel unterschiedlich, da die Monitorantennen in unterschiedlichen Richtungen zur Anlage positioniert sind. DVOR-Anlagen verfügen über zwei Monitorwerte, die von der Richtung identisch sein sollten, da sie von derselben Monitorantenne aufgezeichnet werden. Es zeigte sich, dass für die qualitative Auswertung der Messwerte von VOR-Anlagen die Art, Dauer und Häufigkeit der Datenaufzeichnung von entscheidender Bedeutung ist, um Phänomene, die in diesem Artikel beschrieben werden, aufzudecken und Aussagen über ihre Relevanz treffen zu können.

### Messmethoden

Regelmäßige Messwerte über einen langen Zeitraum zeigen die grundsätzliche Zuverlässigkeit der Anlagen und können zur Analyse von saisonalen oder tageszeitlichen Schwankungen verwendet werden. Langfristige Änderungen, wie ein wegdriftender Signalwert oder einzelne bzw. wiederkehrende Sprünge können so entdeckt werden. Auch Einflüsse von einer Senderumschaltung, wie im weiteren Teil dieses Artikels beschrieben, lassen sich so quantifizieren. Damit lange Zeiträume effizient aufgezeichnet werden können, sollte keine hohe Abtastfrequenz bei der Messung vorliegen. Regelmäßige halbstündliche oder stündliche Werte sind hierbei im Allgemeinen ausreichend, um erste Erkenntnisse zu erzielen und Anhaltspunkte für gezieltere Messungen zu gewinnen.

Für die Aufzeichnungen boten sich zunächst fernzugriffsbasierte Methoden wie das Navigation and Landing-System (NLS) der DFS an, das planbar die anlageneigenen Monitorwerte auslesen und speichern kann. Diese Fernauslesung ist derzeit allerdings nur an 21 VOR-Anlagen der DFS verfügbar. Für Messungen an anderen Standorten musste das Systemmanagement vor Ort sein. Die Messaufnahme erfolgte dann jeweils durch ein zusätzliches Messgerät, wie dem EVS300 von Rohde & Schwarz, welches für die Dauer der Datenaufzeichnung an die Anlage angeschlossen werden musste.

Bei den Analysen der stündlichen Messwerte zeigte sich jedoch, dass Aufzeichnungen mit kurzem Messabstand von wenigen Sekunden benötigt werden, wenn kurzfristige und schnelle Änderungen untersucht werden sollen. Detailmessungen liefern das Vielfache an Messwerten in kurzer Zeit und damit eine deutlich größere Datenmenge mit teilweise hunderttausend Messpunkten; sie bieten sich daher vorwiegend für kurze Messzeiträume wie Tage oder einzelne Wochen an. Bei Messintervallen von weniger als 10 Sekunden ist derzeit eine Umsetzung mit den fernauslesbaren Systemen schwierig bis unmöglich, so dass auch diese Messungen durch Personal vor Ort durchgeführt wurden. Hier gilt der besondere Dank an alle Systemmanager der VORs, die beim Sammeln der Daten geholfen haben.

### CVOR vs. DVOR – Unterschiede der Datenqualität

In einem ersten Untersuchungsabschnitt fanden im Frühjahr 2021 über zwölf Wochen hinweg stündliche NLS-Aufzeichnungen der Azimutwerte an allen untersuchten VOR-Anlagen statt. Diese Messungen ergaben jeweils knapp 2.000 Messpunkte pro Monitor einer Anlage. Bei sieben CVORs und 14 DVORs mit jeweils zwei Monitoren standen für die Auswertung über 40.000 Messpunkte zur Verfügung.

### Allgemeine Eingruppierung

Die stündlichen Daten erlauben einen Vergleich der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Anlagen. Im Speziellen können die Typen CVOR und DVOR untereinander, beide Monitore einer VOR-Anlage und die Anlagen eines Typs untereinander verglichen werden. Im Wesentlichen basiert dieser Vergleich auf der Messpunktverteilung. Je weniger die aufgezeichneten Messwerte um den Mittelwert der Messungen streuen, umso genauer sendet die Anlage ihr Signal. Unter der Annahme, dass Störungen und Fehler des VOR-Signals ebenfalls normalverteilt sind, sollten sich bei 2.000 Messpunkten störungsarme von störungsanfälligen Anlagen sichtbar abheben.

Anzumerken ist, dass die räumliche Anordnung der ortsfesten Monitorantennen bei jeder VOR individuell auf Grund der örtlichen Gegebenheiten gewählt wurde. Die aufgezeichneten Azimutwerte liegen daher von Anlage zu Anlage unterschiedlich zwischen 0 und 360 Grad. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Anlagen herzustellen, werden daher relative Azimutabweichungen um den Mittelwert verwendet. Daraus resultiert eine Verteilung um den

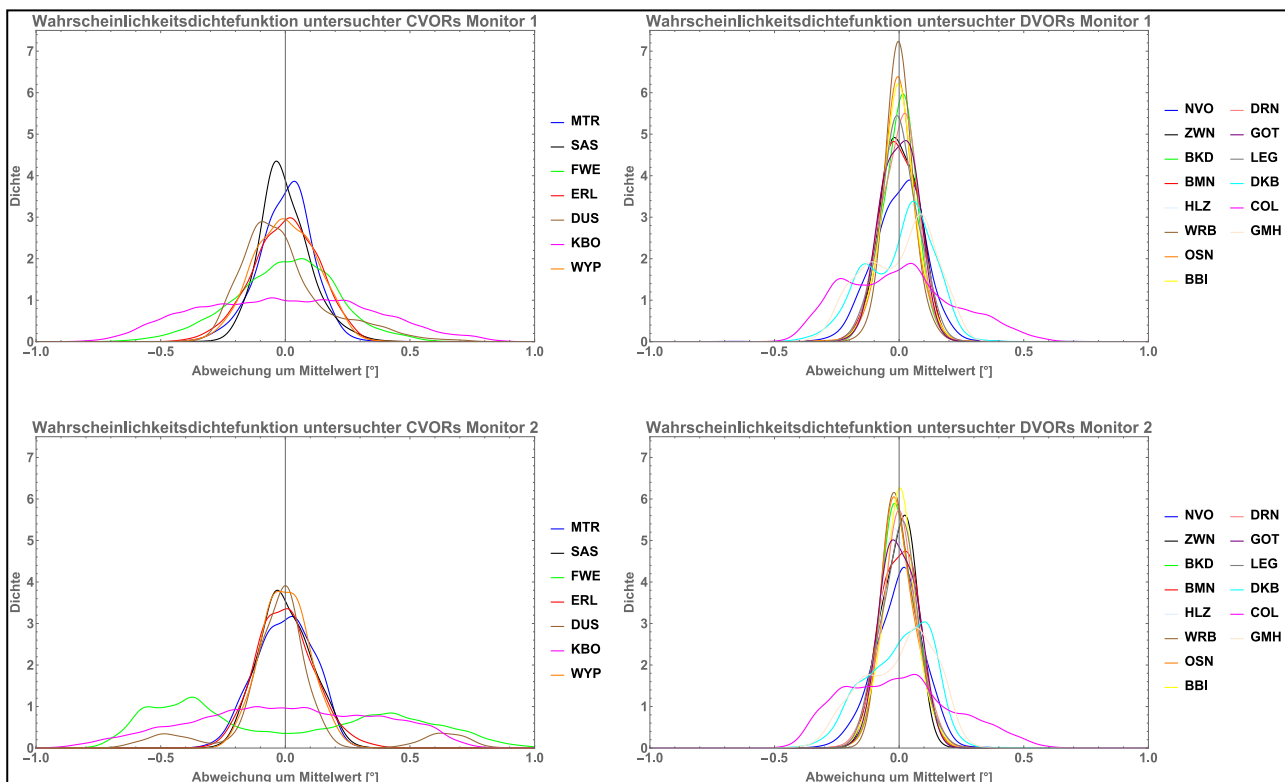


Abbildung 1: Übersicht über die mittels NLS-Fernauslesung gewonnenen Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen. Links dargestellt die an den CVORs ermittelten Daten, rechts die Verteilungen der Doppler-VOR Monitormesswerte.

Nullpunkt. Für den Vergleich wird die Darstellung als Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion gewählt. Daraus wird zum einen die Verteilung, als auch die relative Konzentration der aufgezeichneten Messwerte ersichtlich. Die gewählte Grafik hat somit den Informationsgehalt eines Histogramms zusammen mit der Vergleichbarkeit von unterschiedlichen Anlagen. Abbildung zeigt die relativen Verteilungen der Messwerte an den untersuchten CVORs und DVORs. Dabei können folgende Beobachtungen gemacht werden:

1. Der Großteil der Aufzeichnungen, sowohl bei CVOR als auch DVOR, sind in Verteilung und Breite ähnlich und lassen sich hinreichend gut durch eine Gaußverteilung beschreiben.
2. Beide Monitormesswerte einzelner Anlagen verhalten sich gleich, so dass von einem vernachlässigbaren Messrauschen auszugehen ist.
3. Bei DVOR-Anlagen ist eine stärkere Konzentration der Messwerte um den Mittelwert zu erkennen. Die erkennbar geringere Varianz dokumentiert die bekannte, bessere Signalstabilität der DVORs.
4. Im Rahmen der Stichprobe verhalten sich anteilig mehr CVOR- als DVOR-Anlagen auffällig bzw. untypisch.

Ergänzend zu diesen vier Feststellungen werden bei DVOR-Anlagen im Vergleich zu CVOR-Anlagen vermehrt einzelne Messwerte registriert, die stark vom Mittelwert abweichen. Solche Ausreißer zeigen teilweise Abweichungen von mehreren Grad an und wurden im Verlauf der Untersuchungen genauer betrachtet.

Basierend auf der Vielzahl der bestimmten Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen konnte an den meisten VOR-Standorten eine typische Performance, also eine Normalverteilung der Werte, erkannt werden. Lediglich die Anlagen KBO, COL und Monitor 2 von FWE heben sich von den anderen Verteilungen signifikant ab und müssen daher als Sonderfälle angesehen werden.

### Analyse der Genauigkeit

Die Betrachtung der Sendegenauigkeit erfolgt in diesem Artikel als Betrachtung der Streuung, also der Abweichung einzelner Messpunkte vom Mittelwert. Dabei werden Verschiebungen der Messreihen, wenn sie als Sprünge erfolgen, nicht berücksichtigt. Diese Artefakte werden separat betrachtet.

Die Messungen der DVOR-Anlagen zeigen gegenüber den konventionellen Anlagen eine höhere Signalgenauigkeit. Im Mittel streuen die untersuchten DVOR-Anlagen in einem Bereich von 0,2 bis 0,4 Grad.

Bei den CVOR-Anlagen liegt durchschnittlich eine Streuung von 0,4 bis 0,7 Grad vor. Wertet man die Daten unter der Annahme einer Gaußverteilung anhand der Standardabweichung aus, ergibt sich ein identisches Bild. Für die betrachteten Messreihen ist die Standardabweichung der CVOR-Anlagen doppelt so groß wie die der DVOR-Anlagen.

Eine Aussage über den genauen Faktor, um den die DVOR-Anlagen der DFS eine höhere Signalgenauigkeit haben, lässt sich nicht treffen, da mehrere Faktoren die Bestimmung beeinflussen. Die zeitliche Auflösung der Messwerte (Häufigkeit der Messpunkte pro Zeiteinheit) haben auf die Standardabweichung einen entscheidenden Einfluss, da bei Störungen die Dauer und Intensität unbekannt sind. Zusätzlich finden die Messungen an DVOR- und CVOR Anlagen räumlich in unterschiedlicher Entfernung statt. Während die Monitorantennen an CVOR-Anlagen in 5 Metern Entfernung zur Sendeanenne stehen, sind es bei DVOR-Anlagen knapp 200 Meter. Die beiden genannten Gründe führen bei der vorliegenden Messung zu Nachteilen für die DVOR-Anlagen. Daher ist der nachgewiesene Genauigkeitsvorteil der DVOR-Signale im Vergleich zu den CVOR-Signalen als gegeben anzusehen.

Die Messungen zeigen ebenfalls, dass es typisches Anlagenverhalten bei beiden VOR-Anlagenarten gibt und wie dieses aussieht. Hiervon klar zu unterscheiden sind atypische Anlagen, deren Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion signifikant von einer Gaußverteilung abweicht. Ein Beispiel hierfür ist der Monitor 2 der VOR Fürstenwalde (FWE), dargestellt durch die grüne Kurve in Abbildung unten links. Es lässt sich schlussfolgern, dass individuelle Gegebenheiten, technische Probleme oder fehlerhafte Einstellungen an einzelnen Standorten zu Abweichungen in der Messwertverteilung der Anlagen führen kann. So fielen bei den Auswertungen speziell die CVOR KBO und die DVOR COL auf, deren

besonderes Verhalten näher betrachtet wurde, aber in diesem Artikel nicht spezifischer thematisiert werden. Eine genaue Untersuchung zur Identifizierung und Klassifizierung solch abweichenden Verhaltens erfordert zunächst Parametermessungen mit höherer Messfrequenz. Gleiches gilt für die Untersuchung der Ausreißer-Phänomene an DVOR-Anlagen. Im späteren Verlauf des Artikels wird eine exemplarische Untersuchung an der DVOR OSN detailliert beschrieben.

### Analyse der Stabilität

Beim Vergleich der Stabilität der Azimutwerte an CVOR- und DVOR-Anlagen wird das Sprung- und Ausreißerverhalten bewertet. Die Definition des Sprungs bezieht sich in diesem Artikel auf eine sprunghafte positive oder negative Änderung des Azimutwerts, die über eine gewisse Zeit konstant verläuft und nicht abklingt. Im Gegensatz dazu werden sprunghafte Änderungen, die direkt wieder abklingen, als Ausreißer bezeichnet.

Im untersuchten Zeitraum wurden vier Fälle von Sprüngen an CVOR- und zwei an DVOR-Anlagen festgestellt. Entsprechend dem Verhältnis von betrachteten CVOR- zu DVOR-Anlagen wurden an CVOR-Anlagen somit viermal so viele Fälle aufgezeichnet. Zusätzlich fielen die Sprünge an CVOR-Anlagen mit durchschnittlich 0,39 Grad fast doppelt so groß aus, wie die Sprünge an DVOR-Anlagen mit 0,23 Grad. Eine weitere Beobachtung zeigt, dass die Anordnung von zwei physischen Monitoren an konventionellen Drehfunkfeuern zu unterschiedlich starken Sprüngen und zu entgegengesetzten Sprüngen in den Monitorwerten führen kann. Die Sprünge an DVOR-Anlagen sind im Gegensatz dazu in beiden Monitoren nahezu identisch aufgezeichnet worden. Dies ist mit dem baulichen Unterschied beider Anlagen- und Monitoring-Systemen zu erklären.

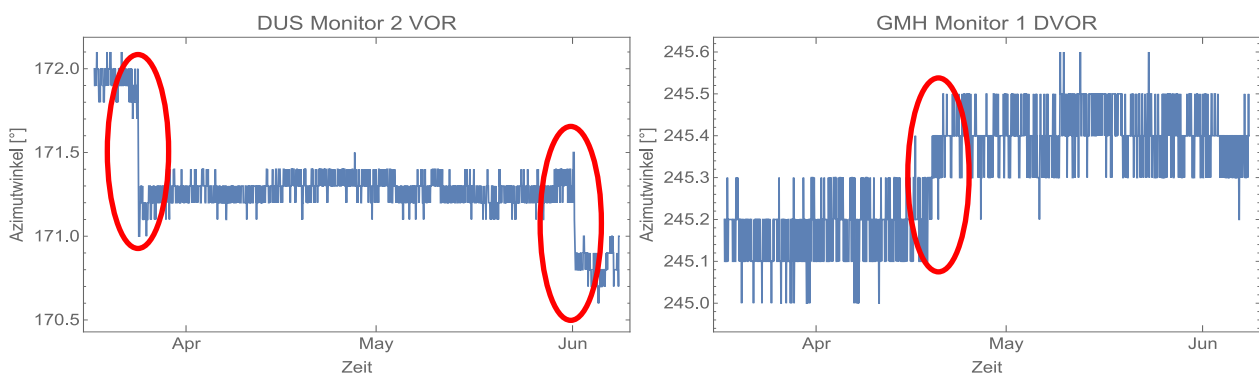


Abbildung 2: Zeitliche Darstellung der mittel NLS aufgenommenen, stündlichen Messwerte der beiden Anlagen DUS und GMH. Neben einem rauschartigen Schwanken sind mehr oder weniger ausgeprägte Sprünge zu erkennen.

In Abbildung 2 werden identifizierte Sprünge in den Azimutverläufen der Anlagen DUS und GMH exemplarisch dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Monitore jeweils unauffällige Azimutwerte der Anlage aufzeichnen, die durch auftretende Sprünge verändert werden. An der Ganggenauigkeit ändern die Sprünge nichts. Das heißt, die Schwankung des Sendeverhalten bleibt von den Sprüngen unverändert, auch wenn die Schwankung nun um einen geringfügig anderen Wert besteht. Neben der Identifikation und Beschreibung der Sprünge, konnten für fünf der sechs Sprünge eine identische Ursache der Sprünge gefunden werden. Zu den Zeitpunkten der Sprünge erfolgte an den Anlagen jeweils eine Senderumschaltung.

Anders als Sprünge, die bei stündlichen Messwerten über einen längeren Zeitraum sehr gut erfasst werden, können Ausreißer mit stündlichen Messwerten nicht untersucht werden. Für deren Beschreibung werden kürzere Messintervalle im Sekundenbereich benötigt. Aus den Daten der stündlichen Messungen sind lediglich einzelne Ausreißer-Ereignisse, bei einer Vielzahl von CVOR- und DVOR-Anlagen, ersichtlich. Als Beispiel dafür zeigt die Abbildung 3 den Verlauf der Azimutwerte an der DVOR OSN.

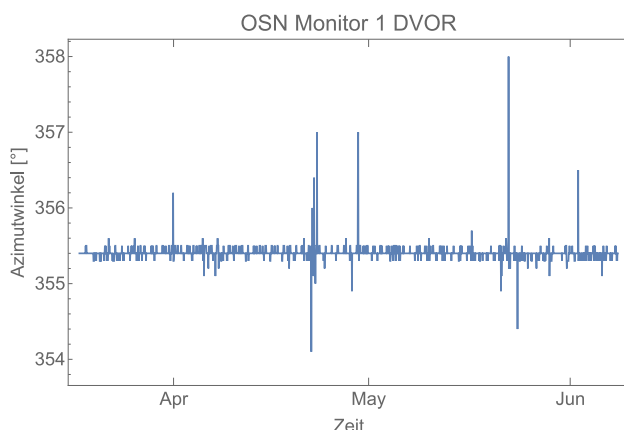


Abbildung 3: Kurzzeitige „Störungen“ auf dem Monitorsignal der DVOR Osnabrück (OSN).

### Anpassungsmöglichkeiten der Überwachung für Drehfunkfeuer

VOR-Anlagen werden über ihre eigenen Monitor-systeme fortlaufend überwacht, um im Falle von beständigen Abweichungen eine Abschaltung auszulösen. Diese ICAO-Forderung der Überwachung stellt sicher, dass kein fehlerhaftes Signal abgestrahlt bzw. vom Luftfahrzeug zur Navigation verwendet wird.

### Status Quo – Aktuelle Grenzwerte

Die derzeit bei der DFS betriebenen VOR-Anlagen orientieren sich hinsichtlich der Grenzwerte für eine Abschaltung im Fehlerfall an den Anforderungen der ICAO-Richtlinien für den Betrieb von Drehfunkfeuern. Diese schreibt eine maximale Toleranz von  $\pm 1$  Grad zum eingestellten Sollwert vor. Die letztendlich untersuchte Fragestellung war, ob diese erlaubte Schwankungsbreite angemessen und notwendig ist, oder ob eine Reduktion dieses zunächst formal festgelegten Werts zu vermehrten Abschaltungen führen würde.

Für die Abschaltung der VORs ist gemäß der Fachlichen Anweisung Inbetriebhaltung (FA-IBH) maßgeblich, dass eine Abweichung von einem Grad auf beiden Anlagen-Monitoren gleichzeitig für mindestens 30 Sekunden erfasst werden muss. Sind diese Bedingungen erfüllt, erfolgt eine automatische Abschaltung. Hierbei wird aktuell nicht zwischen CVOR- und DVOR-Anlagen unterschieden.

Die gefundenen Performanceunterschiede zwischen CVOR und DVOR rechtfertigen allerdings die Untersuchung, ob diese Grenzwerte für beide Anlagentypen geeignet bzw. angemessen sind. Betrachtet man die Werte des Sprungverhaltens und der Messwertgenauigkeit der untersuchten CVOR-Anlagen, dann erscheint eine Toleranz von  $\pm 1$  Grad durchaus als angemessen. Würde man bei diesen Anlagen die Monitorauslöseschwelle reduzieren, so käme es voraussagbar zu mehr ungeplanten Abschaltungen. Die gezeigte Anlage DUS ließe sich so wohl nicht mehr zuverlässig in der geforderten Verfügbarkeit betreiben.

Die betrachteten Performancewerte für DVOR-Anlagen zeichneten hingegen ein deutlich besseres Bild. Das identifizierte Sprungverhalten und die Genauigkeit ließen eine Anpassung des Grenzwerts folglich zu. Lediglich eine identifizierte Störung, die eine Grenzwertreduzierung beeinträchtigen könnte, ist noch unbekannt: das Ausreißer-Verhalten.

### Ausreißer-Untersuchung am Beispiel der DVOR OSN

Die stündlichen Messungen zeigten ein erhöhtes Auftreten von Ausreißern bei DVOR-Anlagen im Vergleich zu CVOR-Anlagen. Um prüfen zu können, ob diese kurzzeitig auftretenden Störungen Einfluss auf den Betrieb mit reduzierten Grenzwerten haben, sind Messungen mit kleinem Messintervall erforderlich. Da eine Abschaltung erst nach einer 30-sekündigen kontinuierlichen Überschreitung des Grenzwerts eintritt, müssen mindestens 2 Messwerte in diesem Zeitabschnitt aufgenommen werden.

Exemplarisch wurde die DVOR OSN hinsichtlich ihrer Ausreißer untersucht. Sie zeigte sich bei der Voranalyse als auffälligste Doppler-VOR mit den meisten und größten Abweichungen, dargestellt in Abbildung 3. Sie wurde daher ausgewählt, um eine Worst-Case-Einschätzung vorzunehmen: Wenn hier eine Reduktion der Monitorabschaltsschwellen möglich wäre, dann sind auch bei anderen, vermeintlich „stabileren“ DVORs keine negativen Auswirkungen zu befürchten.

Im Sommer 2021 fanden dafür zeitgleich zwei Detailmessungen der Azimutwerte statt. Dabei wurden Daten im 5- bzw. 10-Sekunden-Takt erfasst. Ein EVS-Gerät zeichnete über neun Tage alle fünf Sekunden das Empfangssignal der Monitorantenne auf. Per NLS-Messwertanforderung wurden ferner über 16 Tage alle 10 Sekunden die aus dem Rohsignal abgeleiteten Signale beider Monitore aufgenommen. Diese Messkonstellation bietet neben einer Auswertung von kurzfristigen Störungsphänomenen auch eine Analyse der anlageninternen Signalinterpretation. Das heißt, wie die aufgenommenen Signale der Antenne in den beiden Monitorbaugruppen in Messwerte umgewandelt werden.

Die detaillierte Feinmessung bietet mehrere Ansätze für die Beobachtung und Auswertung von Ausreißer-Phänomenen an DVOR-Anlagen. Zum einen kann das Aufbau- bzw. Abklingverhalten einer Störung analysiert und zum anderen können die Zeitpunkte der Störungen betrachtet werden. Die Auswertung der aufgezeichneten Daten ermöglichte mehrere Beobachtungen: Wie die Abbildung 4 zeigt, liegt eine Vielzahl von Ausreißern vor, die im EVS (oberes Diagramm) zu deutlich kleineren Ausschlägen geführt hat als in beiden Monitoren (mittlere und untere Grafik). Die maximal aufgezeichnete Differenz zwischen minimalem und maximalem Messwert beträgt bei den EVS-Daten 1,76 Grad, während sie bei beiden Monitoren jeweils über 12 Grad liegt. Darüber hinaus lässt sich eine Regelmäßigkeit der Ausreißer-Zeiträume erkennen. Während der Großteil der Aufzeichnungen stabil und ohne Auffälligkeiten verläuft, werden alle zwei Tage extreme Ausreißer in den Abend und Nachtstunden aufgezeichnet. Eingezeichnet in die Grafiken in Abbildung 4 sind jeweils zwei Referenzlinien, die eine obere und untere Grenze von 0,5 Grad Abweichung um den Sollwert von 355,4 Grad darstellen.

Bei genauerer Analyse der Extremwerte zeigt sich, dass der Großteil der Störungen einzelne, kurzzeitig auftretende Abweichungen ist, deren Dauer zumeist weit unter 30 Sekunden liegt. Eine weitere Beobachtung zeigt, dass häufig nur einer der beiden Monitore Extremwerte annimmt, während sich der

andere Monitorwert nur leicht oder gar nicht verändert.

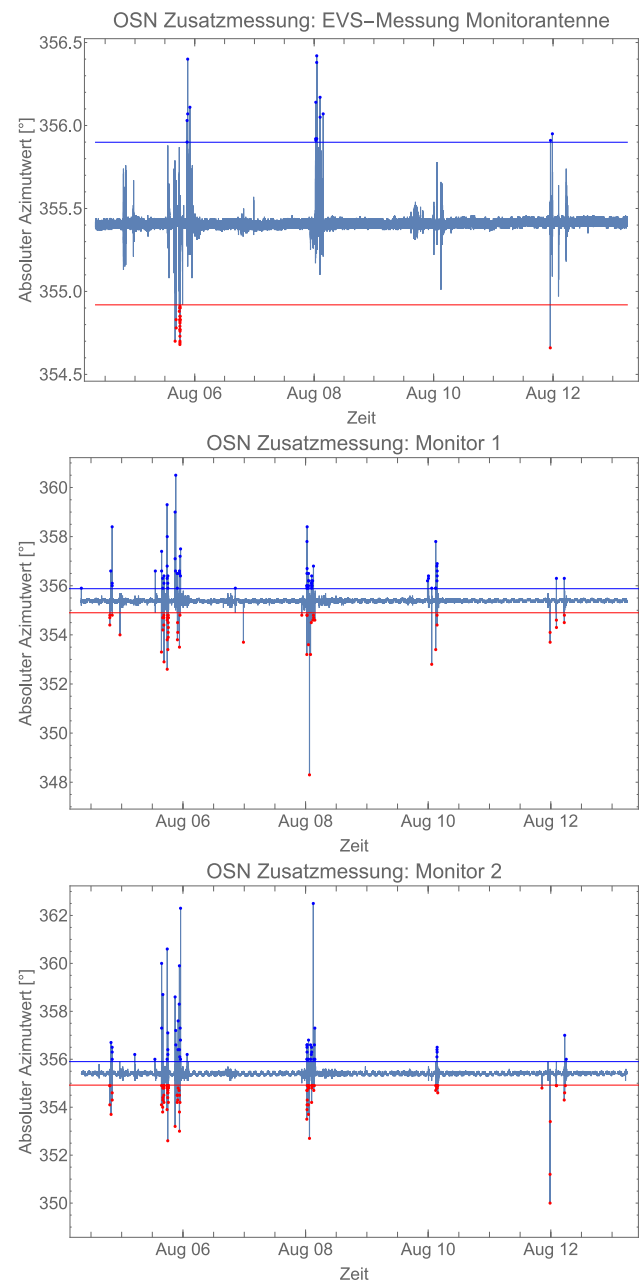


Abbildung 4: Detaillierte Untersuchungen an der DVOR Osnabrück (OSN). Dargestellt ist sowohl eine Messung vor Ort mittels EVS300, als auch per NLS ausgelesene Messwerte, wie sie von der Anlage selbst erfasst wurden.

Diese Beobachtungen reduzieren die Gefahr, dass einzelne Ausreißer für eine Notabschaltung bei reduzierten Grenzwerten verantwortlich sein könnten. Dies wurde zusätzlich für verschiedene Grenzwertschranken mathematisch gezeigt. Teilt man die Messung in Abschnitte von 30 Sekunden, können diese untersucht werden, ob alle Werte innerhalb oder außerhalb dieser theoretischen Grenzen liegen.



Kritisch hierbei sind 30-Sekunden Abschnitte, in denen beide Monitorwerte kontinuierlich außerhalb eines Grenzwertbereichs liegen. In diesem Fall würde es in der Realität zu einer Abschaltung kommen.

Die Messung an der DVOR OSN wurde auf die Grenzwerte von  $\pm 0,5$  bis  $\pm 0,1$  Grad Abweichung zum Sollwert überprüft. Tabelle 4 zeigt dabei die Ergebnisse. Dargestellt ist wie häufig bei Monitor 1, Monitor 2 oder beiden gleichzeitig ein Fall in den Daten aufgetreten ist, bei dem die Messwerte länger als 30 Sekunden am Stück über oder unter dem definierten Grenzwert lagen.

*Tabelle 1: Tabelle mit angenommenen Abschalt-schwellenwerten und deren Auswirkung anhand der Daten der Detailmessung an der DVOR OSN.*

Theoretischer Grenzwert	Mon 1	Mon 2	Mon 1 und 2 gleichzeitig
$\pm 0,5^\circ$	0	0	0
$\pm 0,4^\circ$	2	0	0
$\pm 0,3^\circ$	3	1	0
$\pm 0,2^\circ$	4	1	0
$\pm 0,1^\circ$	16	7	0

Im untersuchten 16-tägigen Zeitraum wurde keimale der Sollwert gleichzeitig auf beiden Monitoren über 30 Sekunden um plus oder minus 0,1 Grad überschritten. Somit lag in jedem 30 Sekunden-Zeitfenster immer mindestens 1 Azimutwert der Monitore 1 oder 2 innerhalb eines Bereichs von 0,3 Grad. Dies heißt faktisch, dass trotz einer Vielzahl einzelner Ausreißermesswerte deren Dauer der Störung zu kurz ist, oder dass sie nur individuell an einzelnen Monitoren auftritt. Beides führt nicht zu einer Abschaltung, sodass damit kein Problem für die Verfügbarkeit der DVOR-Anlagen besteht. Bedenken muss man bei diesen Erkenntnissen allerdings, dass die Untersuchung in einem zufälligen zweiwöchigen Zeitfenster im Sommer stattgefunden hat. Es wäre daher wünschenswert, weitere Messdaten auch in anderen Jahreszeiten aufzunehmen und diese hinsichtlich von Schwankungen, Sprüngen und Ausreißern zu untersuchen.

Hinsichtlich der Beurteilung möglicher Auswirkungen durch die Reduktion der Abschaltsschwellen ist es empfehlenswert, alle potenziellen Störfaktoren zu berücksichtigen und mit ausreichender Sicherheit in die Bewertung einzubinden. Dazu zählen langfristige Störungen durch Sprünge, wie sie durch eine Senderumschaltung hervorgerufen werden können, als auch kurzfristige Störungen, wie sie in Form von Ausreißern eintreten. Berücksichtigt man die Ergebnisse der aufgezeichneten Daten, so könnte ein reduzierter Grenzwert für DVOR-Anlagen in der

Größenordnung von  $\pm 0,5$  Grad liegen. Hier ist nach gegenwärtigem Stand der Erkenntnisse von keiner verfügbarkeitsrelevanten Beeinträchtigung auszugehen.

### Stand und Ausblick

Auf Basis der hier vorgestellten Analysen wurden die Monitorschwellen der DVOR OSN im Herbst 2021 versuchsweise auf  $0,5^\circ$  reduziert. Nach nunmehr sechs Monaten mit reduzierter Toleranzschwelle wurden bisher keine Ausfälle berichtet. Seit Anfang 2022 werden ferner alle anderen DVOR der SIS-Niederlassung Nord mit reduzierten Werten betrieben. Auch hier wurden seitdem keine Auffälligkeiten beobachtet.

Auf Basis der bisher positiven Erfahrung im Betrieb findet zurzeit eine formale Anpassung der Inbetriebhaltungsvorschriften statt. Ziel ist es, zukünftig alle DVORs mit einer Abschaltsschwelle von  $0,5^\circ$  zu betreiben. Durch diese Reduktion wäre es dann möglich, größere Störungsbeiträge durch die Signalausbreitung zu tolerieren. Konkret würde dies den Zubau weiterer, signalstörender Windenergieanlagen erlauben, denn der zugelassene Gesamtfehler setzt sich aus allen drei zu Beginn eingeführten Einflüssen zusammen. Schafft man es, einen Fehleranteil, wie den dritten Anlageneigenen zu reduzieren, können im Gegenzug für einen anderen Fehleranteil höhere Toleranzen akzeptiert werden. Wieviel dies konkret sein wird, bedarf der Einzelfallbetrachtung. Erkennbar ist jedoch, dass durch die Reduktion der Abschaltsschwellen ein doch nennenswerter Zubau von WEAs in der Nähe der VORs möglich erscheint.

### Fazit

Die Monitorauswertungen haben gezeigt, dass es einen klaren Unterschied zwischen CVOR und DVOR-Anlagen gibt, der sich vor allen in einem konstanteren Sendeverhalten der Doppler-Anlagen mit sehr geringer Streuung und einer geringeren Anfälligkeit von äußeren Störeinflüssen auszeichnet. Zudem lag der Anteil an auffälligen Anlagen im Verhältnis zu den unauffälligen Anlagen bei DVOR-Stationen unter den Werten der CVOR-Anlagen. Ob deshalb beide Anlagentypen mit den identischen Grenzwerten betrieben werden sollten, ist daher in Frage zu stellen. Vielmehr scheint es auf Basis der Ergebnisse der Studie angebracht, CVORs wie bisher mit Abschaltsschwellen von einem Grad zu betreiben, diesen Wert aber für DVOR auf  $0,5^\circ$  zu reduzieren.

## Abkürzungsverzeichnis

CVOR	Conventional-VOR
DFS	Deutsche Flugsicherung
DVOR	Doppler-VOR
EVS300	ILS/VOR-Analyzer der Firma Rohde & Schwarz
FA-IBH	Fachliche Anweisung Inbetriebhaltung
ILS	Instrument Landing System
ICAO	International Civil Aviation Organization
GNSS	Globales Navigationssatellitensystem
LuftVG	Luftverkehrsgesetz
NLS	Navigation and Landing System
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
SEL	Standard Elektrik Lorenz AG
SIS	Systeme und Infrastruktur Dienste (Abteilung DFS)
VOR	Very High Frequency Omnidirectional Radio Range
WEA	Windenergieanlage
WERAN/ WERAN+	Wechselwirkung von Windenergieanlagen und terrestrischer Navigation/Radar

## VOR-Kennungsverzeichnis

BBI	Berlin-Brandenburg
BKD	Brückendorf
BMN	Bremen
COL	Cola
DKB	Dinkelsbühl
DRN	Dresden
DUS	Düsseldorf
ERL	Erlangen
FWE	Fürstenwalde
GMH	Germinghausen
GOT	Gotem

HLZ	Hehlingen
KBO	Köln-Bonn
LEG	Leipzig/Halle
MTR	Metro
NVO	Nörvenich
OSN	Osnabrück
SAS	Sarstedt
WRB	Warburg
WYP	Wipper
ZWN	Zweibrücken

## Referenzen

- [1] ICAO, *Annex 10: Aeronautical Telecommunications. Volume I Radio Navigation Aids*, 2018.
- [2] WERAN/WERAN+, Forschungsaktivität der PTB, siehe Webseite der PTB, aufgerufen am 02.06.2022. Verfügbar unter: <https://www.ptb.de/cms/de/ptb/fachabteilungen/abt2/fb-22/ag-221/forschungsaktivitaeten.html>

# Die digitale Plattform für die unbemannte Luftfahrt

Ralf Heidger, Kristijan Caprdja, Stephan Schuricht & Vincent Lambercy

## Einleitung

Laut dem Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft (BDL) sind in Deutschland aktuell über 430.000 Drohnen im Umlauf. Dabei wird mit rund 385.000 Drohnen der überwiegende Teil privat genutzt. Lediglich 45.200 Drohnen werden aktuell kommerziell genutzt, wobei dies einen Anstieg von +138% im Vergleich zum Jahr 2019 bedeutet [1].

Um den sicheren Betrieb von unbemannten Luftfahrzeugen zu gewährleisten, hat die Europäische Union am 24. Mai 2019 die Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 erlassen [2]. Diese enthält dabei „detaillierte Bestimmungen für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeugsysteme sowie für das Personal, darunter auch für Fernpiloten und an diesem Betrieb beteiligte Organisationen“ [2], die seit dem 01. Januar 2022 zwingend in der jeweiligen nationalen Fassung zu befolgen sind.

Im Rahmen der Umsetzung der Durchführungsverordnung 2019/947 hat das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) im Sommer 2021 die DFS mit der Entwicklung der digitalen Plattform Unbemannte Luftfahrt, kurz „dipul“, beauftragt. Die dipul ist dabei als zentrale Plattform für Drohnenbetreiber gedacht, die erstmals alle relevanten Geodaten, fachlichen Informationen und rechtlichen Regeln für die unbemannte Luftfahrt nach der deutschen Luftverkehrsordnung auf einer Webseite bündelt. Eine wichtige Komponente der dipul ist das sogenannte „Maptool“, eine interaktive, geografische Darstellung von Karten, in der Drohnenpiloten ihr geplantes Fluggebiet kreisförmig einzeichnen können. In dem ausgewählten Gebiet erhält der Nutzer dann alle wichtigen Informationen zu den für Drohnenflüge relevanten geografischen Zonen wie Kontrollzonen, Flughäfen und Landeplätze, Industrie- und Hafenbereiche, Autobahnen, Eisenbahnstrecken, Wasserstraßen und Naturschutzgebiete [3]. Die dipul informiert darüber hinaus über alle aktuellen und geltenden Vorschriften zum Betrieb von Drohnen [6] sowie die Kategorisierung des Drohnen-Betriebs, die Luftraum-Regeln und die Antragsverfahren für genehmigungspflichtige Drohnenflüge. In diesem Zusammenhang enthält dipul auch einen Überblick über die notwendigen Anträge und eine Auflistung der zuständigen Stellen für Betriebsgenehmigungen, die für Einflüge in Gebiete mit besonderen Luftfahrtregeln benötigt werden.

Seit dem 10.01.2022 ist die dipul offiziell online und kann unter [www.dipul.de](http://www.dipul.de) besucht werden (siehe Abbildung ).

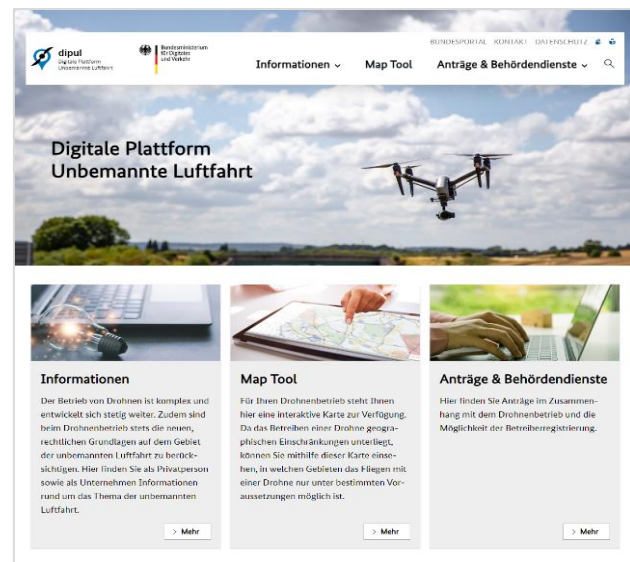


Abbildung 1: dipul Startseite.

## Die Funktionalität des Systems

Die dipul besteht vorrangig aus drei Komponenten:

- dem Content Management System (CMS) ‚lonas‘
- dem Maptool
- dem Web Map Service (WMS)

Das CMS ‚lonas‘ des Unternehmens Chameleon AG bildet den Rahmen für die Erstellung und Aktualisierung der Webseite [www.dipul.de](http://www.dipul.de). Über diesen kann die Darstellung und der Inhalt der Webpräsenz einfach und effizient mittels Baukasten-Prinzip erstellt und verändert werden.

Die dipul-Webseite besteht aus mehreren Bereichen. Über die Landing Page kann der Nutzer zu weiterführenden Seiten - der Knowledge Base, dem Maptool selbst, einem Bereich für Anträge und Behördendienste sowie einem Hilfe-Bereich - navigieren. Zusätzlich werden auf der Landing Page aktuelle Meldungen und Pressemitteilungen rund um das Thema Drohnen veröffentlicht.

Die Knowledge-Base umfasst alle relevanten Informationen zum sicheren und rechtmäßigen Betrieb von Drohnen. So werden allgemeine Informationen zum Betrieb von Drohnen, bspw. zur Versicherungspflicht, dem Mindestalter der Nutzer

und zur UAS-Betreiberregistrierung, die verschiedenen Drohnen-kategorien sowie die nach §21h LuftVO relevanten geografischen Gebiete beschrieben [3], [6].

Der Bereich ‚Anträge und Behördendienste‘ umfasst weiterführende Informationen zu allen Drohnen-relevanten Anträgen sowie Links zu jeweiligen Behörden, bspw. dem Luftfahrtbundesamt (LBA) bzw. den Landesluftfahrtbehörden (LLBs), die für die Genehmigung der Anträge zuständig sind.

Der Hilfebereich der dipul umfasst Hinweise zur dipul Homepage selbst, eine Anleitung zur Nutzung des Maptools sowie eine Anleitung zur Nutzung des Web Map Service.

Zusätzlich zu den aufgeführten Bereichen bietet die dipul Webseite ein Kontaktformular, mit welchem sich Nutzer bei Fragen bzw. zum Melden von Fehlern im Maptool bzw. auf der dipul-Homepage direkt mit dem UAS-Team in Verbindung setzen können. Die Anfragen werden innerhalb von Ionas geführt und entsprechend der etablierten Prozesse zwischen dem BMDV und der DFS zur Beantwortung verteilt.

Das Maptool ist eine von der Firma Unifly aus Antwerpen in Belgien entwickelte Kartenapplikation mit markttypischen Kartenfunktionen (siehe Abbildung 2). So kann ein Nutzer durch Verschieben und Zoomen der Karte zu Orten innerhalb Deutschlands navigieren, Orte innerhalb Deutschlands suchen, die Karte rotieren, sich die Karte über dem eigenen Standort zentrieren lassen und den Kartenhintergrund wechseln.

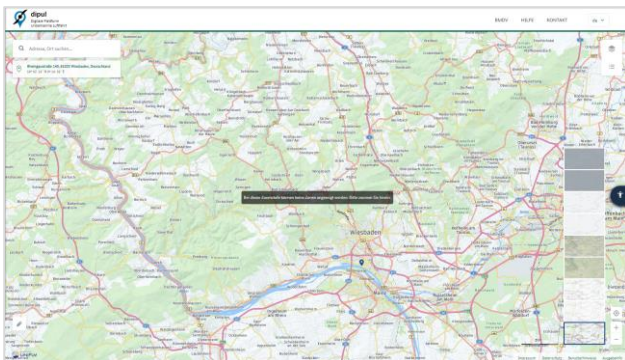


Abbildung 2: Übersichtsbild mit Ortsbeschriftungen farbig ohne zusätzliche Layer.

Hauptzweck des Maptools ist es aber, die Planung von Drohnenmissionen zu erleichtern. Im Allgemeinen unterliegen Drohnenmissionen einem Regelwerk. Ein Kriterium dieses Regelwerks ist dabei, ob die Drohnenmission innerhalb von sogenannten geografischen Gebieten stattfinden soll. Die geografischen Gebiete sind in §21h LuftVO geregelt

und beschreiben Gebiete im Luftraum, in denen der Betrieb von Drohnen nur unter Einhaltung bestimmter Voraussetzungen zulässig ist. So gehört beispielsweise der Luftraum über Freibädern nach §21h Absatz 3 Nr. 8 LuftVO zu geografischen Gebieten und darf nur unter der Voraussetzung von Drohnen befliegen werden, dass die Drohnenmission außerhalb der Betriebs- und Badezeiten stattfindet [3].

Um einen Überblick über die geografischen Gebiete in dem Gebiet einer geplanten Drohnenmission zu erhalten, stellt das Maptool dem Nutzer mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Der Nutzer kann auf der Karte zu dem gewünschten Ort der Drohnenmission navigieren und sich dort alle geografischen Gebiete über das Seitenmenü einblenden (siehe Abbildung 3). Mit einem Klick auf die Karte kann der Nutzer sich detaillierte Informationen zu den angezeigten geografischen Gebieten anzeigen lassen. Der Vorteil dieser Variante ist, dass der Nutzer ebenfalls alle geografischen Gebiete in unmittelbarer Nähe der geplanten Drohnenmission angezeigt bekommt.

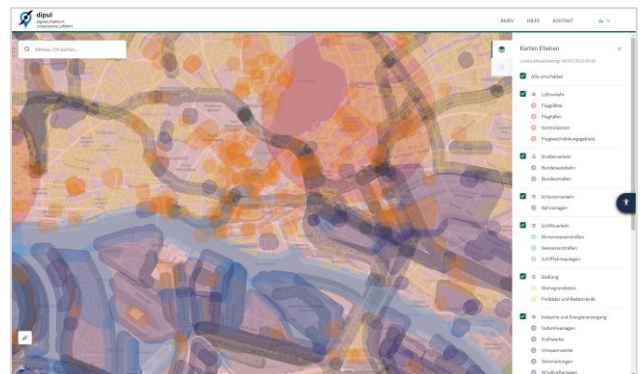


Abbildung 3: Schalten von Kartenlayern am Hamburger Hafen.

Zusätzlich bzw. optional bietet das Maptool die Möglichkeit, ein kreisförmiges Operationsgebiet der Drohnenmission zu zeichnen und dieses Operationsgebiet auf die Überlagerung mit existierenden geografischen Gebieten zu prüfen (siehe Abbildung 4). Wenn das Operationsgebiet geografische Gebiete schneidet, unabhängig davon ob ein geografisches Gebiet einblendet ist oder nicht, werden diese im Seitenmenü aufgelistet und der Nutzer kann sich weiterführende Informationen zu den einzelnen geografischen Gebieten einblenden. Dadurch erhält der Nutzer ein vollumfängliches Bild über alle geografischen Gebiete, die bei der Drohnenmission berücksichtigt werden müssen. Der Vorteil dieser Variante ist, dass geografische Gebiete nicht übersehen werden können.

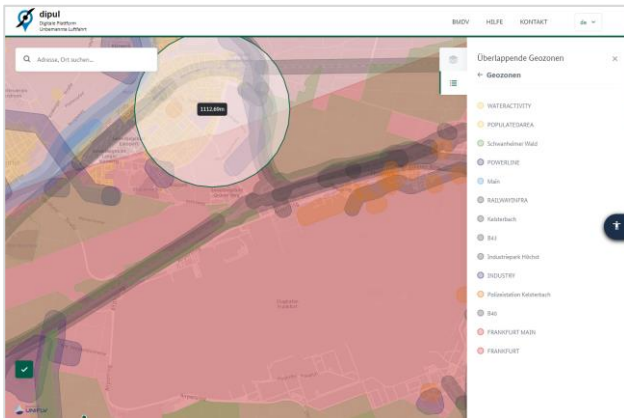


Abbildung 4: Eingezeichneter Suchkreis und überlappende Geozonen am Frankfurter Flughafen.

Die dritte Komponente der dipul ist der Web Map Service (WMS). Dieser über das Open Geospatial Consortium (OGC) standardisierte Webservice erlaubt es Nutzern, Geodaten im Rasterformat sowie weitere Metadaten zu beziehen. Dafür kann der Nutzer mittels eines einfachen http-Requests eine Get-Anfrage an den Geoserver stellen. Diese Get-Anfrage muss abhängig von der Abfrageoption verschiedene Pflichtparameter beinhalten. Der Geoserver stellt dann entsprechend der Get-Anfrage die Daten zur Verfügung und stellt sie entsprechend des gewünschten Ausgabeformates dar (siehe Abbildung 5).

Der WMS unterstützt dabei die folgenden Abfrageoptionen:

- `getCapabilities`: erlaubt die Abfrage von Metadaten eines Dienstes
- `getMap`: ermöglicht die Anzeige eines Kartenausschnittes in einem Rasterbildformat
- `getFeatureInfo`: erlaubt die Abfrage von speziellen Merkmalen eines Ortes auf der Karte

Aufgrund der aktuell gültigen Nutzungsbedingungen dürfen die vom WMS bezogenen Daten weder bearbeitet, vervielfältigt noch entgeltlich oder unentgeltlich verbreitet werden. Daher besteht der aktuelle Nutzen des WMS darin, dass sowohl Privatpersonen als auch Behörden die Daten in eigenen, nicht kommerziellen Anwendungen, einbinden können. Perspektivisch können hier auch weitere Nutzungsvereinbarungen mit Drittanbietern geschlossen werden, die die Daten unentgeltlich auf ihren Plattformen einbinden und darstellen.

## Responsives Design und Barrierefreiheit

Da die dipul im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr entwickelt wurde, waren zwei

Aspekte von zentraler Bedeutung: Responsives Design und Barrierefreiheit.

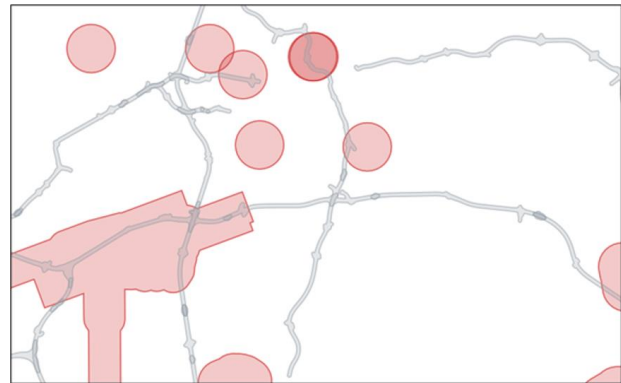


Abbildung 5: Ausgabe einer GetMap-Beispielabfrage.

Unter responsivem Webdesign versteht man, dass sich die Webseite in ihrer Größe sowie Anordnung von Menüpunkten an das Layout und die Auflösung des Displaysystems des Nutzers anpasst. Dies ist vor allem wichtig, da die dipul auch auf mobilen Endgeräten wie Smartphones oder Tablets genutzt werden soll. Eine besondere Herausforderung bestand dabei darin, trotz des wenig Platzes eines Smartphone- oder Tablet-Displays die Oberflächen so zu gestalten, dass

- sich einzelne Elemente nicht überlagern und somit eine Nutzung der dipul unmöglich machen und
- dem Nutzer die gleiche Arbeitsweise zu ermöglichen wie über einen Computer.

In mehreren Iterationen konnte die Webseite derart gestaltet werden, dass sie sowohl auf dem Computer als auch auf mobilen Endgeräten gut zu bedienen ist (siehe Abbildung 6 mit Darstellungen der Inhalte auf einem Mobilfunkgerät im Hochformat).

Der zweite relevante Punkt bei der Entwicklung der dipul war die Berücksichtigung der digitalen Barrierefreiheit. In Deutschland ist die Nutzung von barrierefreien Technologien, besonders für Webseiten sowie mobilen Anwendungen von öffentlichen Stellen des Bundes in §12a Behindertengleichstellungsgesetz (BGG), Absatz 1 [5] in Kombination mit der barrierefreien Informations-Technologie-Verordnung in der Version 2.0 (BITV 2.0) geregelt [4].

Im Allgemeinen versteht man unter der digitalen Barrierefreiheit, dass Computersysteme bzw. Webseiten derart gestaltet sind, dass diese für Menschen mit Behinderung genauso zugänglich sind wie für Menschen ohne Einschränkungen. Dafür stehen verschiedene assistive Technologien für die

Nutzer mit Behinderungen zur Verfügung, wie etwa Screenreader, Bildschirmrunden und Spracheingabegeräte. Voraussetzung für die Nutzung dieser Technologien ist aber, dass die Webseite gut strukturiert und semantisch korrekt aufgebaut ist.

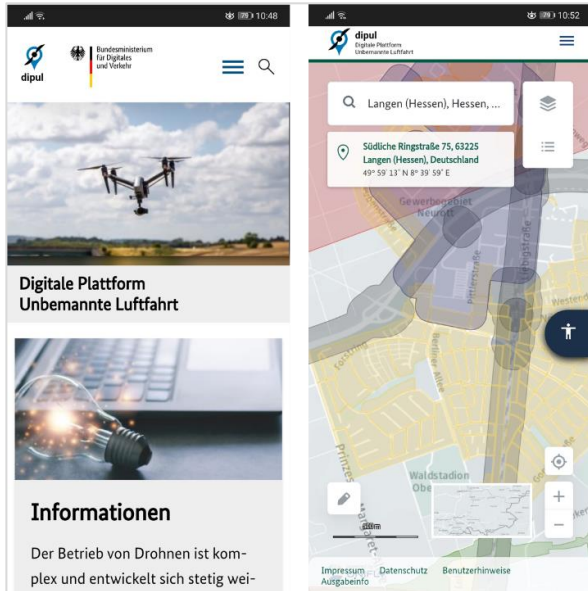


Abbildung 6: Responsives Design der dipul.

Für die dipul wurden sowohl das CMS Ionas als auch das Maptool hinsichtlich ihrer Barrierefreiheit nach der BITV [4] überprüft. Dabei war vor allem für das Maptool einiges an Entwicklungsarbeit notwendig, um die Applikation auch für Menschen mit Einschränkungen zugänglich zu machen. Zusätzlich wurde ein spezielles Plug-In der Firma DIGlaccess GmbH im Maptool eingebettet. Durch dieses Plug-In können die Nutzer verschiedene zusätzliche barrierefreie Anpassungen vornehmen, wie bspw. die Schriftgröße oder den Kontrast ändern (siehe Abbildung 7).

Das CMS Ionas erfüllt technologisch bereits viele Anforderungen hinsichtlich der Barrierefreiheit. Hier bestand die Herausforderung daher eher in der barrierefreien Gestaltung der dargestellten Inhalte. Aus diesem Grund sind verschiedene Inhalte sowohl in leichter Sprache für Menschen mit Lernschwierigkeiten, sowie in Gebärdenvideos für taube Menschen dargestellt.

### Systemarchitektur

Die dipul existiert in einer DFS-internen „staged cloud“, die aus einer Test-Instanz und einer produktiven Instanz besteht. Die Test-Instanz wird dabei vor allem für die Validierung und Verifikation von neuen Funktionen bzw. neuen Software-

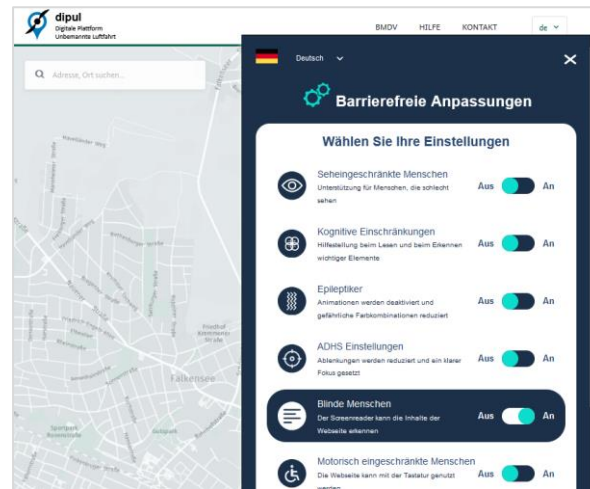


Abbildung 7: Darstellung des Barrierefreiheits-Plug-Ins der Firma DIGlaccess.

Versionen genutzt. Auf der produktiven Instanz läuft hingegen der für die Öffentlichkeit verfügbare Softwarestand.

Installiert ist die dipul analog zum UTM auf mehreren physikalischen Hochleistungsservern der DFS, die georedundant an unterschiedlichen Orten auf dem DFS-Campus verteilt sind. Dadurch wird vor allem die Ausfallsicherheit der dipul erhöht. Auf den physikalischen Servern sind in Summe 50 virtuelle Maschinen installiert, je 25 pro Test- bzw. Produktiv-Instanz, auf denen unterschiedliche Prozesse laufen. Siehe dazu Abbildung 8 mit den VMs für die Produktivinstanz links und strukturgleich für die Testinstanz rechts, sowie die VMs für Administrationsaufgaben unten. Die dipul läuft dabei innerhalb einer dedizierten DMZ innerhalb des Datencenters der DFS. Die DMZ ist ein speziell geschütztes Netzwerk, das durch eine Firewall den Zugang „von Außen“ auf die dipul-Server und den Zugang von den dipul-Servern in die Außenwelt maximal beschränkt. Dies ermöglicht bestmöglichen Schutz vor unerlaubtem Zugriff auf die dipul durch Dritte.

Um die Sicherheit der dipul gegen Angriffe aus dem öffentlichen Internet weiter zu erhöhen, wurden zwei weitere Maßnahmen ergriffen: Zum einen wurde ein DFS-internes „Security Risk Assessment“ (SRA) durchgeführt. Bei diesem SRA identifizieren und bewerten DFS-interne Experten der Abteilungen Security Management und des Systemhauses potenzielle Angriffsflächen und versuchen, sofern notwendig, Strategien zur Risikominderung zu etablieren. Zum anderen wurden für die dipul Penetration-Tests von einer externen Firma durchgeführt. In diesen Tests wird ein Cyberangriff

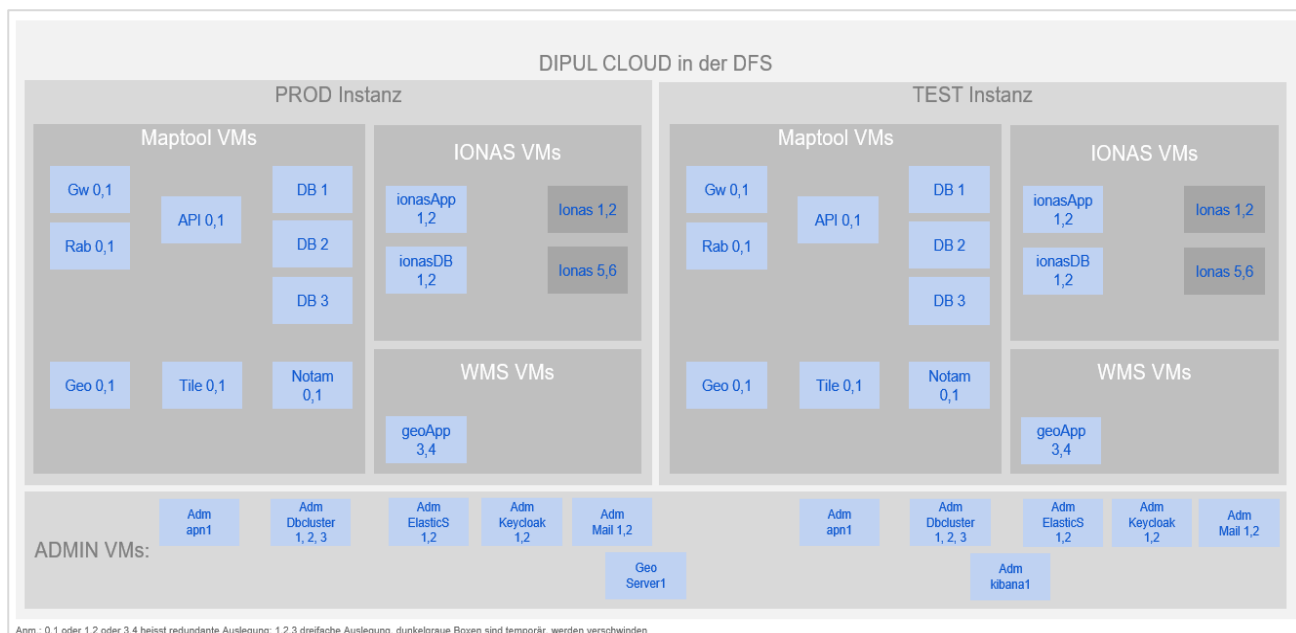


Abbildung 8: Architektur der VMs und Aufteilung in der Cloud.

auf die IT-Infrastruktur simuliert, um potenzielle Angriffspunkte für Hacker zu finden und die Sicherheitsprozesse zu optimieren. Als Ergebnis des Penetration-Tests wurde tatsächlich eine kritische Sicherheitslücke identifiziert, die innerhalb kürzester Zeit geschlossen wurde. Somit hat der Penetration-Test seinen Zweck erfüllt und die Sicherheit der dipul weiter verbessert.

Wie bereits beschrieben laufen die Komponenten der dipul auf virtuellen Maschinen, die auf physikalischen Servern auf dem DFS Campus gehostet sind. Die Nutzung von virtuellen Maschinen gewährleistet dabei die vertikale Skalierbarkeit des Systems. Ein hardwarebasierter Load Balancer nimmt externe Zugriffsanfragen aus dem öffentlichen Internet entgegen und leitet sie ausgewogen an die entsprechenden Komponenten des Systems innerhalb der DMZ weiter.

Zusätzlich gibt es einen Load Balancer, der sich innerhalb der DMZ befindet und verschiedene Lastausgleichsfunktionen für Anfragen innerhalb des Systems anbietet. Die Load Balancer bieten horizontale Skalierbarkeit, da eine Anfrage eines Dienstes auf der Eingangsseite an eine beliebige Anzahl redundanter Server auf der Ausgangsseite weitergeleitet werden kann. Eine Erhöhung der Kapazität eines bestimmten Dienstes kann durch eine Erhöhung der Anzahl der Server auf der Ausgangsseite des Load Balancers erreicht werden. Die Dienste des Systems sind so implementiert, dass die horizontale Skalierbarkeit auf diese Weise unterstützt wird. Die Load Balancer verbessern die

Verfügbarkeit des Systems. Sie überwachen ständig die Verfügbarkeit der einzelnen Server auf ihrer Ausgangsseite. Eine Anfrage auf der Eingangsseite wird nur an einen Server auf der Ausgangsseite weitergeleitet, der gerade verfügbar ist. Ein auf der Eingangsseite des Load Balancers bereitgestellter Dienst ist so lange verfügbar, wie einer der entsprechenden Dienste auf der Ausgangsseite verfügbar ist. Die Load Balancer sind ein kommerzielles Produkt, das in sich selbst redundant ist.

Die Architektur des Systems ist nach der bewährten Drei-Schichten-Architektur aufgebaut, die die Präsentations-, Logik- und Datenschicht voneinander trennt. Die Trennung in einzelne Schichten ermöglicht unabhängiges Systemmanagement, Entwicklung sowie teilweise in solcher Architektur inhärente Skalierung und Redundanz. Die Präsentationsschicht wird in Form von Web- oder mobilen Clients realisiert, die über ein REST-API mit der Logikschicht kommuniziert. Die Kommunikation nach außen wird dabei von den Gateway-VMs „GW 0,1“ (siehe Abbildung 8) besorgt, die Kommunikation nach innen über Messaging Services läuft über die Rabbit-MQ-VMs „Rab 0,1“.

Die Logikschicht besteht aus diversen Diensten, die die eigentliche Funktionalität der dipul implementieren. Diese sind vor allem in den VMs „API 0,1“ (siehe Abbildung 8) realisiert. Dazu treten noch die VMs „Geo 0,1“, auf denen der GeoServer des Maptools angesiedelt ist, der sich um die Manipulation, das Zeichnen und Filtern der

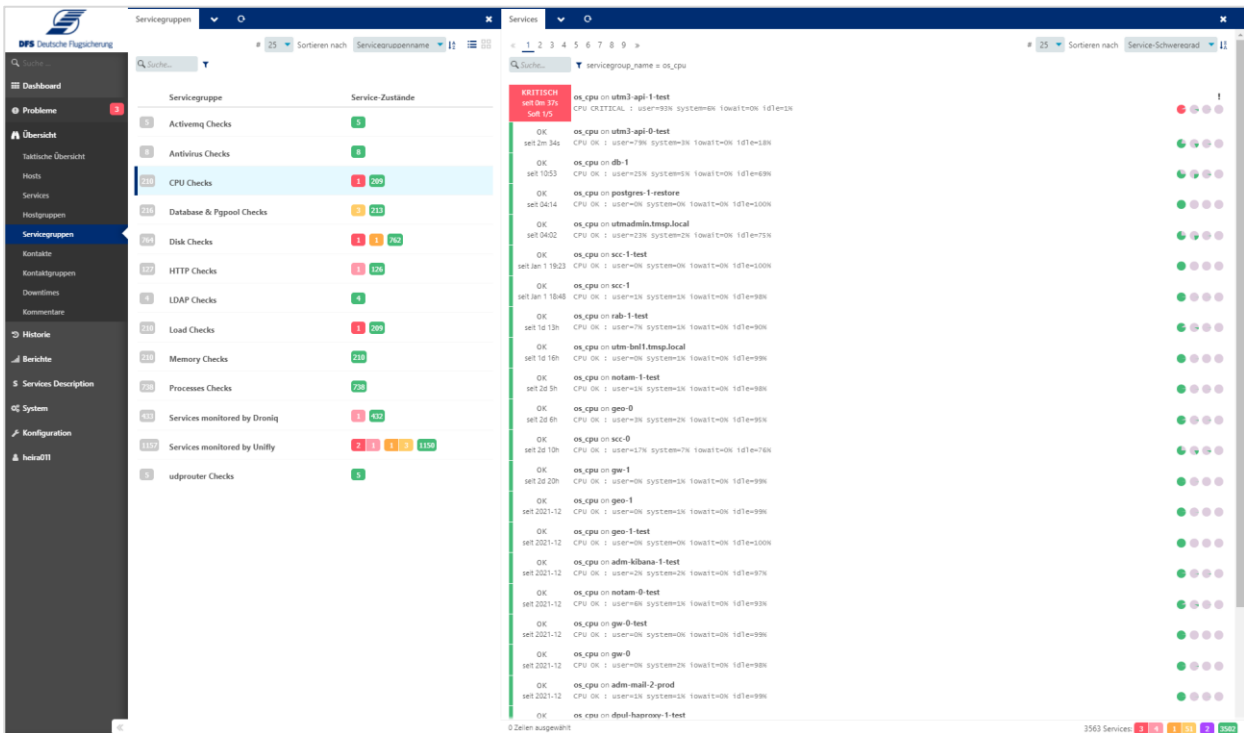


Abbildung 9: VM Checks auf Icinga – links die VMs mit Ampelstatus, und rechts die Prozesse mit Ampelstatus.

Kartenlayer kümmert. Die VMs „Tile 0,1“ besorgen das Management der Kacheln der Hintergrundkarten. Die VMs „Notam 0,1“ sind reserviert für die NOTAM-Erweiterung 2022. Die Datenschicht ist in Form von einer redundanten und skalierbaren SQL-Datenbank mit dem freien Postgres v.12 realisiert. Diese residieren auf den Datenbank-VMs „DB 1,2,3“.

Neben der VM-Gruppe für das Maptool sind auch noch die VM-Gruppen für das CMS Ionas und den WMS sowie für die Gesamtadministration der dipul-Cloud dargestellt (siehe Abbildung 8).

CMS Ionas besteht dabei im Wesentlichen aus den VMs „lonasApp 1,2“ für die Anwendung selbst, und den VMs für das Hosting der Ionas-Datenbanken „lonasDB 1,2“. WMS benutzt zwei VMs, nämlich „geoApp 3,4“, auf denen der Web-Map-Dienst redundant bereitgestellt wird. Die Administrations-VMs enthalten das Hosting für Icinga, ElasticSearch, Nutzerverwaltung und Keycloak-Server, Transfer-VMs für den ELT-Prozess der Geodaten, und das DB-Cluster-Monitoring.

Neben der dipul-spezifischen Infrastruktur betreibt das Projektteam im Systemhaus eine weitere Software-Infrastruktur zur Überwachung der DFS-Cloud, in der auch die dipul installiert, verwaltet und überwacht wird. Für das Monitoring der dipul werden hauptsächlich zwei Softwareanwendungen benutzt –

Icinga (siehe Abbildung 9) und Elasticsearch. Diese Anwendungen werden mit entsprechenden Softwareanpassungen eingesetzt, um die Vielzahl an virtuellen Maschinen mit hunderten Softwareprozessen für die Betriebssysteme, Datenbanken, Webserver, Geoserver und den eigentlichen Anwendungsprozessen zu steuern und zu überwachen.

Die Software Elasticsearch wird außerdem dafür verwendet, um Statistiken zur Nutzung der dipul zu generieren (siehe Abbildung 10). So werden bspw. die Anzahl der Nutzer auf dem CMS Ionas und dem Maptool sowie die Nutzung des WMS gezählt, die verwendeten Betriebssysteme und Browser ausgewertet und die Auslastung der genutzten Bandbreite überwacht. Eine Limitation bei der Zählung der Nutzer pro Komponenten besteht allerdings darin, dass hier die Anzahl der http-Requests eindeutiger einzelner IP-Adressen und eindeutiger einzelner Browser gezählt wird. Dadurch kann es vorkommen, dass Nutzer die mehrfach am Tag mit dem gleichen Browser und gleichem Endgerät auf die dipul zugreifen, nur einmal gezählt werden. Mit dieser Methodik wurden seit Live-Schaltung der dipul rund 15000 Besucher auf dem CMS Ionas, 11800 Besucher auf dem Maptool und 2015 Nutzungen des WMS gezählt.



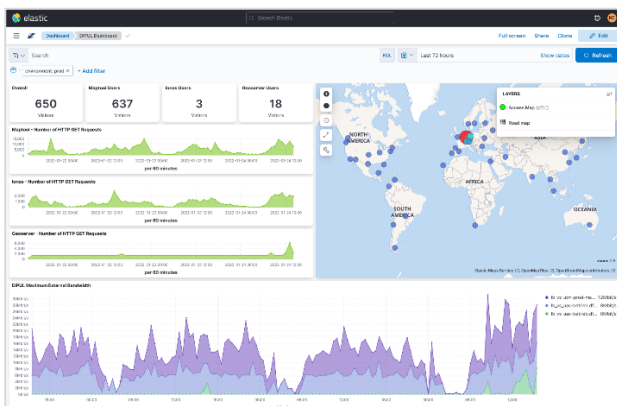


Abbildung 10: Beispiel der Elasticsearch-Auswertung.

## Betriebsabläufe

Wie eingangs erwähnt hat das BMDV die DFS mit der Entwicklung der dipul beauftragt. Dabei tritt das BMDV aber nicht nur als Auftraggeber in Erscheinung, sondern arbeitet auch aktiv an den Inhalten der dipul mit. Allen voran stellte die Projektgruppe „Unbemannte Luftfahrt“ (PGUnbLf) des BMDV die umfangreichen fachlichen und rechtlichen Informationen zur Weiterverarbeitung für das Systemhaus der DFS zusammen und wirkte intensiv an den Tests der verschiedenen Vorversionen der Webseiten und des Maptools mit. Auf Seiten der DFS sind vor allem die Abteilungen „Unbemannte Luftfahrzeugsysteme“, „SWE UAS Traffic Managementsystem“, sowie die Abteilung „Datendienst – Geodaten“ in dem Projekt involviert. Eine zentrale Komponente für den Erfolg der dipul ist und war dabei die gute Zusammenarbeit zwischen dem BMDV und der DFS, der DFS und den Vorlieferanten, sowie innerhalb der DFS zwischen den verschiedenen Abteilungen.

Die Abteilung „Unbemannte Luftfahrzeugsysteme“ war für die Gesamtkoordination in der DFS sowie die Vertragsgestaltung zuständig. Die Abteilung „SWE UAS Traffic Managementsysteme“ begleitet das Projekt in der technischen Projektleitung und den damit verbundenen technischen Aspekten. Sie ist für den Zusammenbau sowie der technischen Bereitstellung inklusive des Deployments der Cloud-Infrastruktur verantwortlich. Außerdem wurde durch die Abteilung das vom BMDV bereitgestellte Text- und Bildmaterial redaktionell aufbereitet und in das CMS Ionas getestet und eingestellt, und das Maptool nach Spezifikation, Tests und Abnahmen in die geschaffene webbasierte Infrastruktur eingebettet. Das Maptool wurde sodann mit den von der Abteilung „Datendienst – Geodaten“ bereitgestellten Geodaten befüllt und der digitale Web Map Service (WMS) programmiert und hinzugefügt. Neben den technischen Gesichtspunkten liegt bei der Abteilung

„SWE UAS Traffic Managementsystem“ ebenfalls die Koordination mit dem BMDV sowie den verschiedenen Unterauftragnehmern. Daraus ergibt sich die besondere Situation, dass die Abteilung zwischen den Wünschen des BMDV, sei es inhaltlich, fachlicher oder terminlicher Natur, und den Möglichkeiten der Vorlieferanten vermitteln muss.

Die Abteilung „Geodaten“ ist für die Bereitstellung der Datensätze über geografische Gebiete entsprechend der Luftverkehrs-Ordnung verantwortlich. Dabei müssen die Geodaten-Sätze aus mehreren Quellen validiert und zu einem großen Datensatz zusammengesetzt werden. Eine Herausforderung ist dabei, dass die Gesetze für Geodaten viel Raum für Interpretation lassen. Außerdem unterscheiden sich die für die dipul erforderlichen geografischen Gebiete von denen, die bereits im UTM-System der DFS zum Einsatz kommen, was unter anderem den Pflegeaufwand der Daten erhöht.

## Weiterentwicklung

Die Entwicklung der dipul ist gegenwärtig keinesfalls abgeschlossen. Für das CMS Ionas werden gerade die Inhalte in englischer Sprache eingepflegt. Außerdem wird in Betracht gezogen, die Knowledge-Base um detailliertere Beschreibungen der in der dipul angezeigten geografischen Gebiete zu erweitern. Für das Maptool sind außerdem zusätzliche Funktionalitäten geplant. Auf kurze Sicht werden hinzu gerade die Anforderungen für einen Volumenplaner mit dem BMDV final abgestimmt. Dieser Volumenplaner soll es perspektivisch Nutzern erlauben, einen Flugvolumen mit entsprechenden Dimensionen zu definieren, die dann für die Genehmigungsanträge in der speziellen Kategorie heruntergeladen und diesen angehängt werden können. Die Dimensionen des Flugvolumens, bestehend aus dem eigentlichen Fluggebiet und zwei zusätzlichen Pufferzonen, können dabei direkt in der dipul nach der Eingabe definierter Parameter berechnet und gezeichnet werden.

Weiterhin werden gerade die Anforderungen zur Umsetzung des Online-Zugangsgesetzes (OZG) mit dem BMDV, LBA und dem LLB Baden-Württemberg besprochen. Dabei geht es um die Unterstützung des Drohnenpiloten bei der Antragsstellung für den Einflug in geografische Gebiete. Ziel der Anforderungsklärung ist die bestmögliche Nutzung von Synergieeffekten mit den Anforderungen zum Volumenplaner. Die Inbetriebnahme beider Funktionalitäten sowie die Anbindung und Darstellung von NOTAMs und Wetterdaten des deutschen Wetterdienstes sind für das laufende Jahr 2022 geplant.

## Abkürzungsverzeichnis

BGBL	Bundesgesetzblatt
BGG	Behindertengleichstellungsgesetz
BITV	Barrierefreie Informations-technologie-Verordnung
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
CMS	Content Management System
DB	Database
DFS	Deutsche Flugsicherung
DIPUL	Digitale Plattform für unbemannte Luftfahrt
DMZ	Demilitarisierte Zone
ELT	Extract, Transform, Load (ETL) ist ein Prozess, bei dem Daten aus mehreren, gegebenenfalls unterschiedlich strukturierten Datenquellen in einer Zieldatenbank vereinigt werden
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IP	Internet Protocol
LBA	Luftfahrtbundesamt
LLB	Landesluftfahrtbehörde
LuftVO	Luftverkehrsordnung
NOTAM	Notice to Airmen
OCG	Open Geospatial Consortium
OZG	Online-Zugangsgesetz
PGUNBLF	Projektgruppe Unbemannte Luftfahrt
SRA	Security Risk Assessment
SWE	Softwareentwicklung
UAS	Unmanned Aircraft System
UTM	UAS Traffic Management
VM	Virtuelle Maschine
WMS	Web Map Service

## Referenzen

- [1] BDL Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft (2022). Analyse des deutschen Drohnenmarktes. Aufgerufen am 24.05.2022. Verfügbar unter: <https://www.bdl.aero/de/publikation/analyse-des-deutschen-drohnenmarktes>
- [2] EU Durchführungsverordnung 2019/947 – Artikel 1 „Gegenstand“. Aufgerufen am 24.05.2022. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0947&rid=1>
- [3] Bundesministerium der Justiz (2022). Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO) § 21h Regelungen für den Betrieb von unbemannten Fluggeräten in geografischen Gebieten nach der Durchführungsverordnung (EU) 2019/947. Aufgerufen am 24.05.2022. Verfügbar unter: [https://www.gesetze-im-internet.de/luftvo\\_2015/\\_21h.html](https://www.gesetze-im-internet.de/luftvo_2015/_21h.html)
- [4] Barrierefreie-Informationstechnik-Verordnung (BITV 2.0); Verordnung zur Schaffung barrierefreier Informationstechnik nach dem Behindertengleichstellungsgesetz. Inkrafttreten am 24. Juli 2002, veröffentlicht im BGBl. I S. 2654, Bonn.
- [5] Behindertengleichstellungsgesetz (BGG); Gesetz zur Gleichstellung von Menschen mit Behinderungen. Inkrafttreten am 01. Mai 2002, veröffentlicht im BGBl. I S. 1467, 1468, Bonn.
- [6] Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO). "Luftverkehrs-Ordnung vom 29. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1894), letzte Änderung Artikel 2 des Gesetzes vom 14. Juni 2021 (BGBl. I S. 1766), Bonn.

# Impressum

## 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](http://www.dfs.de) > [Medien](#) > [Publikationen](#)) 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:** 05.07.2022

### 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 © 2022 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 eines GM-Eintrages.



**DFS Deutsche Flugsicherung**

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](mailto:konrad.hagemann@dfs.de)

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

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

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

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

Nachdruck nur mit Genehmigung.

