

Neue Berechnungssoftware bei der Deutschen Flugsicherung eingeführt

Einführung einer Berechnungssoftware bei der Deutschen Flugsicherung für das Monitoring des Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen im Luftverkehr zur Bewertung von Flugverfahren

Ausgangslage und Motivation

Der Luftverkehr ist eine der energiereichsten Formen der Fortbewegung und ist dabei für ca. 2 % der anthropogenen CO₂-Emissionen verantwortlich^[1]. Die dabei entstehenden Emissionen werden direkt in der Atmosphäre, bis hinauf in die Tropopause freigesetzt. Zur Reduktion dieser Emissionen sind neben der Optimierung konstruktiver Luftfahrzeugeigenschaften insbesondere auch flugbetriebliche bzw. konkret die Luftraumstruktur betreffende Potenziale nutzbar. Ziel ist es insofern, Flugverfahren so zu optimieren, dass Kraftstoffverbrauch und Emissionen weiter minimiert werden. Mit dem Ziel einer in diesem Sinne effizienteren Nutzung des deutschen Luftraumes gründeten Vertreter der im Bundesverband Deutscher Fluggesellschaften (BDF) zusammengeschlossenen Airlines (Lufthansa, Condor, Air Berlin, TuilFly, Germania) und die Deutsche Flugsicherung GmbH (DFS) im Jahr 2013 die Arbeitsgruppe (AG) *Optimiertes Fliegen*.

Für die Bewertung von Maßnahmen zur Optimierung von Flugverfahren und Lufträumen sind robuste und belastbare Methoden erforderlich. Für Prognosen und zu Planungszwecken stehen bereits seit langem Softwarelösungen bereit, die auf der vertikalen Analyse von Flugverläufen (Start- und Landephase) und der Analyse von Flugzeiten (Streckenflug) basieren. Diese getrennte Analyse von vertikalem und horizonta-

lem Flugverlauf erschwert allerdings bisher eine ganzheitliche Betrachtung von Flugverläufen. Die *Gesellschaft für Luftverkehrsforschung mbH* (GfL) entwickelte dafür im Auftrag und enger Abstimmung mit der AG *Optimiertes Fliegen* einen neuartigen Ansatz des *EJPM based Trajectory Analysis Tool* (ETAS). Dieses ermöglicht nun in integrierter Form neben der präzisen Berechnung des flugspezifischen Kraftstoffverbrauchs für Luftfahrzeuge mit Strahl- und Turboprop-Triebwerken auch die Ermittlung von Schadstoffemissionen (bspw. CO_x, NO_x, Ruß etc.) auf Basis von verfügbaren Luftfahrzeugtrajektorien (bspw. Radardaten). Die Software wurde nach umfangreichen Testzyklen^[5] im Jahr 2016 zur produktiven Nutzung für die Arbeitsgruppe bei der DFS eingerichtet.

Implementierung von ETAS im Rahmen der AG *Optimiertes Fliegen*

ETAS erlaubt die sehr präzise Ermittlung der Energiebilanz und des daraus abgeleiteten Kraftstoffverbrauchs sowie

umweltrelevanter Emissionen eines Fluges anhand von Flugspuraufzeichnungen in Abhängigkeit der meteorologischen und betrieblichen Umgebungsparameter. Der modulare Aufbau ermöglicht dabei die individuelle Anpassung und somit flexible Anwendbarkeit von ETAS. Im Rahmen der AG wurde ETAS auf einem Serversystem der DFS installiert. Die Software berechnet zeitgesteuert alle über Deutschland aufgezeichneten Flugbewegungen des zivilen Luftverkehrs (siehe Abbildung 1 zur grundlegenden Funktionsweise).

Über die konfigurierbaren Schnittstellen werden zunächst die zur Berechnung erforderlichen Daten in ETAS eingelesen. Diese sind:

- Luftfahrzeugtrajektorien aus dem *Flight Track and Aircraft Noise Monitoring System* (FANOMOS)^[2] der DFS. Hierbei handelt es sich um Informationen zur geografischen Luftfahrzeugposition, Flughöhe und Flugzeit mit einer Auflösung von 4 s (0,25 Hz). FANOMOS-Daten umfassen

zudem relevante Flugplaninformationen der Luftverkehrsgesellschaften (bspw. Luftfahrzeugtyp),

- Wetterdaten im GRIB2-Format (*General Regularly-distributed Information in Binary form*, Version 2) des Deutschen Wetterdienstes (DWD), die mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde im 3D-Format zur Verfügung stehen. Sie enthalten notwendige Zustandsparameter der Atmosphäre (z.B. Windgeschwindigkeit und -richtung^[3]),
- Konfigurationsdaten der in ETAS deklarierten Luftfahrzeugtypen. Sie dienen dazu, die aerodynamischen (Zelle) als auch thermodynamischen (Triebwerk) Eigenschaften mustergenau modellieren zu können. Die Daten können dabei aus standardisierten Datenbanken wie die Base of Aircraft Data der Eurocontrol^[7] und der ICAO Emission Database^[6] sowie aus individuell (z.B. von GfL) erstellten Datenbanken eingelesen werden.

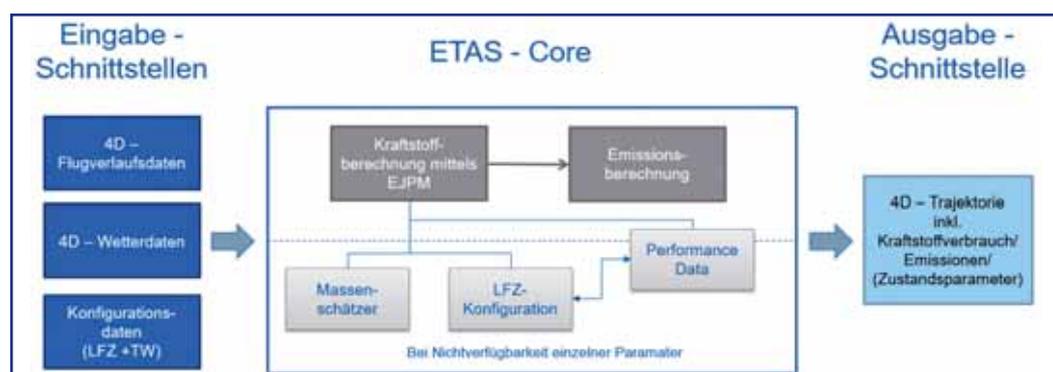


Abbildung 1: Grundlegender modularer Aufbau von ETAS gemäß DFS-Implementierungsvorgaben. Bildquelle: GfL mbH

Verfahrenstechnisch erfolgt in einem ersten Schritt die Aufbereitung der Eingangsdaten. Dies umfasst die Synchronisation der unterschiedlichen o.g. Datensätze als auch die Ermittlung/Abschätzung ggf. fehlender Parameter durch speziell hierfür entwickelte Schätzalgorithmen. Dies betrifft typischerweise Daten zur LFZ-Masse und zur aktuellen Luftfahrzeugkonfiguration bei Start/Anflug/Landung (Klappen- und Fahrwerksstellung)^[5].

Im nachfolgenden Prozess berechnet ETAS mittels dem an der TU Dresden entwickelten Enhanced Jet Performance Model – EJPM^[4] den Kraftstoffverbrauch. Das Grundprinzip der Berechnungen beruht auf der Bestimmung der Änderung von potenzieller und kinetischer Energie je Zeitintervall unter Berücksichtigung der Kompressibilität der Luft. Hieraus wird die erforderliche Leistung (Energiezu- und -abfuhr

je Zeiteinheit) ermittelt, die zur Umsetzung dieser Zustandsänderung erforderlich ist. Energiezuführung bedeutet hierbei das Setzen von Triebwerksleistung, Energieabführung hingegen die (exzessive) Erhöhung des Luftwiderstandes (bspw. durch Erhöhung des Anstellwinkels oder Ausfahren der Klappen). Über die gegebene Energiedichte (Heizwert in kJ/kg) des Kraftstoffs und dem typischen Triebwerkswirkungsgrad errechnet sich der Kraftstoffverbrauch pro Zeitintervall. Unter Berücksichtigung von wahrer Eigen- und Bodengeschwindigkeit sowie der Flughöhe wird sodann der Verbrauch pro Streckensegment ermittelt. Abschließend werden auf Basis des ermittelten Kraftstoffverbrauches sowie des Flug- und Atmosphärenzustandes die resultierenden Emissionen berechnet.

Die Ergebnisse werden in Form erweiterter Flugspur-/FANOMOS-Datensätze ausgegeben.

Auf diese Weise ist eine direkte Weiterverarbeitung durch andere Softwaresysteme der AG Optimiertes Fliegen problemlos möglich. Hierfür werden diese Daten über ein Onlineportal den AG-Mitgliedern bereitgestellt.

Anwendung von ETAS im operationellen Alltag der Luftfahrtunternehmen und der DFS

Derzeit nutzt die DFS die täglich durchgeführten Kraftstoffberechnungen für die kontinuierliche Auswertung von Anflügen auf deutsche Verkehrsflughäfen. Die Ergebnisdarstellung erfolgt dabei in Form von Dashboards, die spezifische Kennzahlen enthalten und den AG-Mitgliedern im monatlichen Zyklus seit 2017 bereitgestellt werden. Die Kennzahlen sind wie folgt definiert:

- Kraftstoffverbrauch vom Einflug in den deutschen Luft-

raum bis zu einem Abstand von 30 NM zum Zielflughafen,

- Kraftstoffverbrauch für den Anflugteil ab einer Entfernung von 200 NM (Top of Descent weitestgehend enthalten) bis zu einem Radius von 30 NM um den Zielflughafen und
- Kraftstoffverbrauch ausgehend von einem Radius von 30 NM um den Zielflughafen bis zur Landung.

In Post-Analysen konnte mittels Vergleich zu Realdaten von Flugschreibern (Flight Data Recorder, FDR) gezeigt werden, dass unter quasi vollständiger Kenntnis der Randbedingungen, insbesondere der atmosphärischen Zustandsdaten, eine sehr präzise Berechnung des Kraftstoffverbrauchs über den Flugverlauf in ETAS erfolgt^[5] (vgl. Abbildung 2).

WONDERFULLY
inventive



When it comes to fabricated components FRANKE is your reliable partner within the Gas Turbine, Aerospace and Space industry. With more than 60 years of experience we inventively support your projects from the very first concept to the engine-ready component. Find out more at industech.ch

MAKE IT WONDERFUL **FRANKE**
Franke Industrie AG

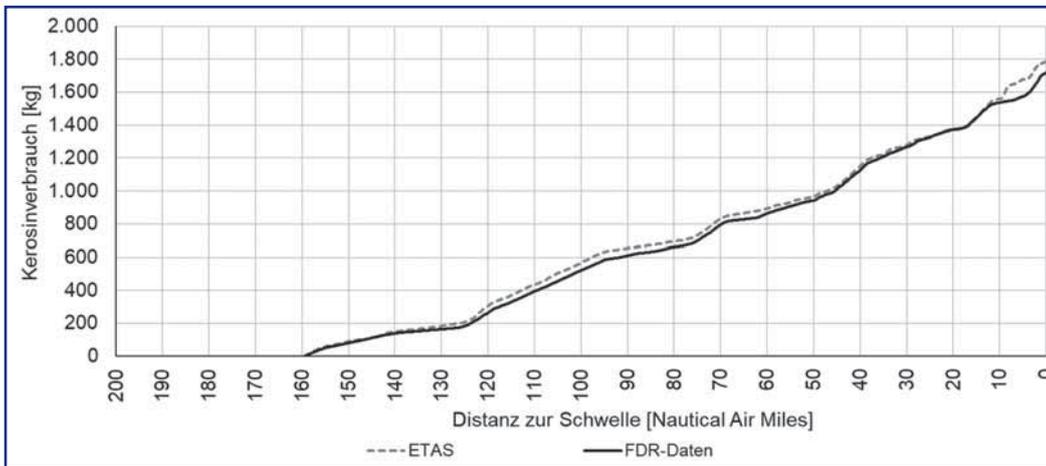


Abbildung 2: Vergleich von ETAS berechnetem Kraftstoffverbrauch vs. FDR-Daten: Bildquelle: GfL mbH

Alternative Anwendungsgebiete und geplante Weiterentwicklungen

Im Rahmen der ETAS-Produkt-pflege erfolgt gemeinsam mit den Luftfahrtunternehmen und der DFS eine kontinuierliche Kalibrierung und Validierung der Software, um die Berechnungsgenauigkeiten weiter stetig zu steigern.

Zusätzlich wird seitens DFS mit den AG-Mitgliedern daran gearbeitet, die Datengrundlage der Flugspuren im FANOMOS-System mittels erweiterter Datenkommunikation mit dem Flugbetrieb zu verbessern: So soll die Start- bzw. Landemasse zukünftig direkt in die Flugplanninformationen integriert werden, um so den Fehler bei der Massebestimmung zu reduzieren. Daneben wird mittelfristig an einer Integration der wahren Fluggeschwindigkeit gearbeitet (Geschwindigkeit in Bezug auf

die umgebende Luft, *True Air Speed*, TAS), die direkt von dem jeweiligen Luftfahrzeug an die Bodenstationen übermittelt werden soll, sodass die Abhängigkeit von komplexen Wetterdaten reduziert werden kann.

Aufgrund des modularen Aufbaus von ETAS entwickelt GfL derzeit weitere Anwendungsmöglichkeiten. So soll ETAS – mit einem alternativen Flugleistungsmodul ausgestattet – auch als zentraler Bestandteil eines operationellen Flugplanungstools gemäß EU-Vorschrift IR-OPS^[8] einsetzbar sein. Ziel ist es hiermit, auch ex ante, also vor Flugdurchführung, den Kraftstoffbedarf hochpräzise unter aktuellen bzw. prognostizierten Randbedingungen (bspw. meteorologische Parameter, Luftraumstruktur etc.) minimieren zu können. Hardwareseitig wird diese ETAS-Version auf einem Flugzeugcomputer, dem *Electronic Flight Bag* (EFB), je nach Zulassung auch

im Flug eingesetzt werden, um operationell im Flug auf geänderte Randbedingungen (bspw. geänderte Flugroute, Wetterlagen etc.) zeitnah reagieren zu können.

Dipl.-Ing. Christian Seiß
seiss@gfl-consult.de
 Prof. Dr.-Ing. Hartmut Fricke
fricke@gfl-consult.de

Gesellschaft für
 Luftverkehrsforschung mbH
www.gfl-consult.de

Dipl.-Geoökol. Sascha Wichmann
sascha.wichmann@dfs.de

DFS
 Deutsche Flugsicherung GmbH
www.dfs.de

Literaturverzeichnis

- [1] International Civil Aviation Organization: „2016 Environmental Report“, Montreal/Kanada, 2016
 [2] Deutsche Flugsicherung

GmbH; Erläuterung von FANOMOS auf der DFS Website: https://www.dfs.de/dfs_homepage/de/Flugsicherung/Glossar%20Flugsicherung/F/ (Stand 04.01.2018)

[3] Deutscher Wetterdienst DWD; – Informationstechnik – GRIB: General Regularly-distributed Information form: https://www.dwd.de/DE/derdwd/it/_functions/Teasergroup/grib_de.html (Stand 04.01.2018)

[4] M. Kaiser, M. Schultz, H. Fricke; “Enhanced Jet Performance Model“, ATACCS 2011

[5] H. Fricke, C. Seiß, R. Herrmann; Fuel and Energy Benchmark Analysis of Continuous Descent Operations, Eleventh USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, Lissabon/Portugal 2015

[6] International Civil Aviation Organization, ICAO Aircraft Engine Emissions Databank, Version 24, Montreal/Canada, 2017

[7] EUROCONTROL, Project BADA USER MANUAL FOR THE BASE OF AIRCRAFT DATA (BADA) FAMILY 4, EEC Technical/Scientific Report No. 12/11/22-58, Brüssel/Belgien 2016

[8] Europäische Union: Verordnung (EU) Nr. 965/2012 zur Festlegung technischer Vorschriften und von Verwaltungsverfahren in Bezug auf den Flugbetrieb gemäß der Verordnung (EG) Nr. 216/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates. Brüssel, Oktober 2012

IMPRESSUM

Herausgeber:

Public Verlagsgesellschaft
 und Anzeigenagentur mbH
 Mainzer Strasse 31
 55411 Bingen
 Telefon: 0049.6721.49512-0
 e-mail: info@publicverlag.com
 Internet: www.publicverlag.com

Geschäftsführung:

Günter Hassinger
 Martina Laloi

Redaktion: V. i. S. P.:
 Martina Laloi

Druck:

VMK Druckerei GmbH
 Faberstraße 17, 67590 Monsheim
 Fon: 0049.6243.909.110
 Internet: www.vmk-druckerei.de

Das Magazin erscheint viermal jährlich.

Preis pro Heft: 8,- Euro inkl. MwSt.
 Jahresabo: 32,- Euro inkl. MwSt
 (innerhalb von Deutschland)

Erfüllungsort und Gerichtsstand
 ist Bingen. ISSN 1868-5919

Alle Beiträge und Bilder sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar.

Eine Haftung des Verlags für die Richtigkeit und Brauchbarkeit des technischen Inhalts der veröffentlichten Beiträge ist ausgeschlossen.

Für unverlangt eingesandte Manuskripte und Fotos wird keine Gewähr übernommen. Gekennzeichnete Artikel stellen die Meinung des Autors, nicht unbedingt die der Redaktion dar.

Titelfotos:

© frank peters.com (o. l.),
 © Nikolay N. Antonov - Fotolia.com (o. r.),
 © Pakhipat - Fotolia.com (u. l.),
 © swisshippo - Fotolia.com (u. r.)