

RAUMBEZOGENE EMISSIONSAUSWERTUNG UND -DARSTELLUNG FÜR LUFTVERKEHRSSIMULATIONEN IM RAHMEN VON EWMS

P. Weitz,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Flugführung,
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig

Zusammenfassung

Die prognostizierten Zuwachsraten des Luftverkehrs lassen einen zunehmenden Einfluss der Luftfahrt an der globalen Erwärmung durch Schadstoffemissionen erwarten. Das Institut für Flugführung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt betreibt Forschung mit dem Schwerpunkt Luftverkehrsmanagement mit dem Ziel, effiziente Maßnahmen zur Emissionsreduktion zu entwickeln. Zu diesem Zweck werden Studien erstellt, die auf der Simulation verschiedener Flughafenszenarien basieren.

Die Forschungsarbeit konzipiert und implementiert ein Werkzeug, das als Bestandteil der Auswertungssoftware EWMS Schadstoffemissionen berechnet und eine raumbezogene graphische Darstellung der Emissionsverteilung über den Flughafen und Flughafennahbereich generiert. Als Basis zur Eigenentwicklung wird zunächst durch Forschungserforschung fachliches Grundwissen zur Emissionsberechnung aufgebaut. Daraus geht hervor, dass zur Berechnung des Schadstoffausstoßes sowohl Informationen zu den Flugbewegungen als auch Verbrauchsdaten der Triebwerke benötigt werden. Als Ergebnis berechnet das Auswertungsmodul die Masse der Schadstoffe CO, NO_x, HC, SO_x, H₂O, CO₂ sowie Feinstaub.

Um Engpässe, Wartezeiten oder alternative Rollwege schnell identifizieren und untersuchen zu können, bestand die Forderung, dass die Ergebnisdarstellungen intuitiv und vergleichbar sein sollen. Dies wurde erreicht, indem als Resultat die Verkehrswege des untersuchten Flughafens, abhängig von den ermittelten Emissionsintensität, farblich gekennzeichnet dargestellt werden. Zur besseren Orientierung kann zusätzlich vom Benutzer ein Luftbild des Flughafens als Hintergrundgrafik angezeigt werden. Zudem bieten sich dem Benutzer durch Zwischenergebnisse, die während der Berechnung entstehen, und den in Tabellenform exportierbaren Auswertungsdateien, umfangreiche Möglichkeiten zur Weiterverarbeitung. Die finale Programm-Version wurde in Anwendungsbeispielen durch den Entwickler sowie durch Experten aus der Abteilung erfolgreich validiert.

1. MOTIVATION

1.1. Umfeld

Das Institut für Flugführung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt betreibt Forschung mit dem Schwerpunkt Luftverkehrsmanagement. Unter anderem werden Luftverkehrssysteme in Simulationen modelliert. Die durchgeführten Simulationen betrachten verschiedene Aspekte des Luftverkehrs und untersuchen die Einwirkung neuer Systeme oder Verfahren. Insbesondere die Flughafenkapazitäten und die Lotsen- bzw. Pilotenbelastungen werden bei diesen Betrachtungen analysiert. In Zukunft sollen Auswertungsalgorithmen in der Lage sein, neue Verfahren und Ansätze auch unter dem Aspekt der Emissionsreduzierung untersuchen zu können. Dafür müssen Methoden zur Analyse von Schadstoffemissionen durch Kraftstoffverbrennung entwickelt und in Auswertungssysteme integriert werden.

Der globale Luftverkehr trägt zum Klimawandel unter anderem durch Emission von Kohlenstoffoxiden, Stickoxiden, Kondensstreifen und Veränderungen der Bewölkung bei. In den letzten Jahrzehnten hat sich die globale Erwärmung erheblich beschleunigt. Durch den Menschen verursachte Emissionen sind nach [1] die

Hauptursache für den Klimawandel. Der Anstieg des Meeresspiegels und das Abschmelzen der Gletscher und Eiskappen sind nur zwei weit reichende Folgen der Klimaerwärmung.

Der Anteil der Luftfahrt an der Klimaerwärmung ist nach [2] mit ca. 2–3 % im Jahr 2009 gering. Jedoch wird prognostiziert, dass die Anzahl der IFR1 Flüge in Europa von 2005 bis 2025 im Fall des größten Wachstums um etwa 150% ansteigen wird. Um das globale Klima und fossile Energiereserven im Zuge dieser Entwicklung nicht stärker zu belasten, müssen die Emissionen von Treibhausgasen und der spezifische Treibstoffverbrauch reduziert werden.

In der Abteilung Luftverkehrssysteme werden unter anderem Methoden zum effizienteren Luftverkehrsmanagement untersucht, welche die Emissionsmenge von Treibhausgasen reduzieren. In diesem Zusammenhang werden Flughafenszenarien simuliert, die Ergebnisse anschließend untersucht und Studien über effiziente Maßnahmen erstellt. So kann beispielsweise der Zusammenhang zwischen der Nutzung bestimmter Rollwege und der Ausbreitung von Treibhausgasen simuliert und verglichen werden, da Kraftstoffverbrauch

¹ engl. Instrument Flight Rules - Instrumentenflugregeln

und Emissionen unmittelbar von den Flugbewegungen abhängig sind. Somit können gezielte Optimierungen des Rollverkehrs am Boden Engpässe und Wartezeiten verhindern und dadurch erhebliche Kraftstoff- und Emissionseinsparungen erzielt werden.

Um Engpässe, Wartezeiten oder bessere Rollwege schnell erkennen und untersuchen zu können, sollten die Ergebnisdarstellungen intuitiv und vergleichbar sein. Als Unterstützung für solche Analysen wird in der Forschungsarbeit eine graphische Darstellung der berechneten Emissions- und Treibstoffwerte entwickelt. Dabei wird ein bereits entworfenes Berechnungsmodell („Prototypische Entwicklung einer CO₂ und Stickoxid-Emissionsauswertung für Luftverkehrssimulationen“, vgl. [3]) als Basis verwendet. Dieses Modell wird im Laufe der Entwicklung überarbeitet und erweitert.

1.2. Ziele

Um die Umwelteinflüsse der Flugoperationen bestimmen zu können, ist es laut [4] in der Forschung von Bedeutung, ein Werkzeug zu entwickeln, welches die Produktion und das Vorkommen von Schadstoffen analysiert und graphisch darstellt. Zur Untersuchung von Flughafenoperationen werden Simulationsszenarien erstellt und die Ergebnisse anschließend ausgewertet. Durch die Simulation wird beschrieben, wann sich welches Flugzeug wo in welchem Flugzustand am Flughafen oder im umgebenden Luftraum aufgehalten hat.

Das Institut für Flugführung hat zur Unterstützung der Simulationsauswertung das Softwarepaket „Extensible Workflow Management for Simulations“ (Abk: EWMS) entwickelt. Das EWMS bietet die Möglichkeit, Analyseparameter automatisiert und unabhängig vom Simulatortyp zu berechnen und darzustellen.

Das Ziel der Forschungsarbeit ist es, ein Werkzeug für eine raumbezogene graphische Darstellung der emittierten Schadstoffe im Flughafenbereich zu implementieren. Dazu wird im Rahmen des EWMS ein Modul entwickelt, welches eine Darstellungsmöglichkeit für Schadstoffemissionen von Luftverkehrsabläufen zur Verfügung stellt. Als notwendige Vorarbeit soll im Projekt zunächst eine fachliche Kompetenz im Hinblick auf Benutzung, Fähigkeiten und Anforderungen von Emissionsmodellen aufgebaut werden. Diese fachliche Basis soll somit in der Abteilung Luftverkehrssysteme erweitert und spezifiziert werden. Das Grundwissen zur Emissionsberechnung soll bei den Eigenentwicklungen der Auswertungen angewendet werden.

Das Softwaremodul für EWMS soll die Schadstoffe räumlichen Dimensionen zuordnen, d.h. es muss errechnet werden, welche Masse eines bestimmten Stoffes auf den einzelnen Flughafenabschnitten ausgestoßen wurde. Die Datenbasis für die Berechnung des Emissionsmodells bildet sich aus den zeitlichen Parametern, den Routeninformationen und den weiteren Flugparametern. Signifikante Positionen in den Phasen des LTO², wie beispielsweise „Start of Taxi-out“, „Start of Take-Off“ oder auch der „Touchdown“, werden bewertet, um die Schadstoffbildung räumlich einzuordnen.

² engl. Landing and Take-Off cycle

2. KLIMAWIRKUNG DER LUFTFAHRT

Triebwerksabgase haben sowohl am Boden als auch in der Luft Einfluss auf das Klima. Ausgestoßen werden, wie in Bild 1 zu sehen, CO, CO₂, NO_x (NO, NO₂), C_xH_y (HC), SO₂, H₂O und Feinstaub (PM³). Das am häufigsten auftretende Treibhausgas ist CO₂, welches beim Verbrennen von Treibstoff in den Triebwerken entsteht. Seitdem fossile Energieträger in der Industrie verwendet werden, ist der CO₂ Gehalt in der Atmosphäre um 35 % angestiegen [5].

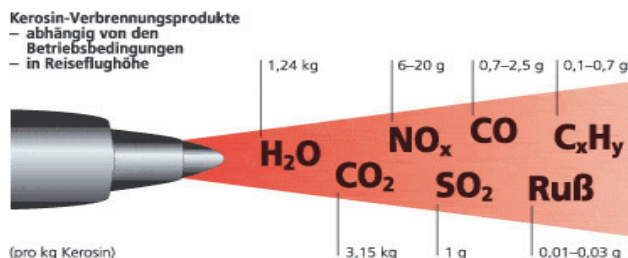


BILD 1: Kerosin-Verbrennungsprodukte [5]

CO, CH und Ruß sind Produkte unvollständiger Verbrennung. Durch die Erhöhung der Verbrennungstemperatur und des Drucks in der Brennkammer konnte der Kerosinverbrauch bereits gesenkt werden [5]. Somit liegen die spezifischen Emissionen dieser Stoffe bei modernen Flugtriebwerken weit unter den Werten älterer Triebwerke. Allerdings begünstigen erhöhte Temperatur und höherer Druck die Bildung von Stickoxiden (NO_x). Stickoxide entstehen durch Oxidation des in der Luft enthaltenen Stickstoffs [5]. Zu den genannten Stoffen wird auch Wasserdampf freigesetzt, der in kalter Luft die Bildung von Kondensstreifen verursacht. In [6] ist beschrieben, dass die Erwärmung durch NO_x und Kondensstreifen kurz- und mittelfristig am größten ist. Langfristig hat jedoch CO₂ die größten Auswirkungen auf die Umwelt.

Die Treibhausgase machen im gesamten Gasvolumen der Lufthülle nur einen marginalen Bruchteil aus. Der Anteil von Gasen an einem Gesamtvolumen wird durch die Konzentration angegeben. Die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre liegt nach [7] bei 380 ppm. Das bedeutet, in 1.000.000 Luft-Molekülen befinden sich 380 CO₂-Moleküle. Die CO₂ Konzentration ist im Jahr 2005 um insgesamt 100ppm gestiegen.

Beitrag zu	absoluter Beitrag	gesamte anthropogene Änderung	relativer Beitrag
CO ₂ -Emissionen	550 - 700 Tg/a	30700 Tg/a	1.8 - 2.3 %
CO ₂ -Konzentrations-Änderung	1 - 1.5 ppm	100 ppm	1 - 1.5 %
Strahlungsantrieb (RF)	0.05 W/m ²	1.6 W/m ² 0.6 - 2.4 W/m ²	3 % 2 - 8 %
Änderung der Bodentemperatur	0.02 - 0.03 °C	0.76 °C	3 - 4 %

BILD 2: Beiträge des Luftverkehrs zur Klimaänderung im Jahr 2005 [8]

Trotz dieser geringen Konzentration haben die Treibhausgase eine hohe Klimawirkung. Das liegt an zwei

³ engl. Particulate Matter

physikalischen Eigenarten: Sie lassen die kurzwellige Strahlung der Sonne relativ ungehindert zur Erdoberfläche durch, absorbieren aber die von der Erde reflektierte langwellige Wärmestrahlung. Durch die Reflektion der Energie erwärmt sich die Atmosphäre stärker. Werden die Treibhausgas-Emissionen nicht verringert, ist eine Zunahme von 0,2°C pro Dekade für die nächsten 30 Jahre sehr wahrscheinlich [9].

2.1. Forschungsansätze zur Reduzierung von Luftverkehrsabgasen

Die technischen Weiterentwicklungen der letzten Jahre bewirkten eine höhere Effizienz der Luftfahrt. Zum einen sind die Kapazitäten gestiegen, zum anderen wurde der spezifische Kraftstoffverbrauch deutlich verringert. Durch technischen Fortschritt ist der Verbrauch laut [10] pro Person um 70% geringer als bei den ersten Jet-Flugzeugen.

Das Bundesministerium für Umwelt geht laut [11] davon aus, dass bei dem erhöhten Leistungsbedarf die neuen Triebwerkstechnologien nicht ausreichen, um in Zukunft einen nennenswerten Einfluss auf das Gesamtemissions-Niveau auszuüben. Weitere Optimierungen, unter anderem im Bereich des Luftverkehrsmanagements, werden zur nachhaltigen Beeinflussung des Gesamtemissions-Niveaus benötigt.

Das hohe Einsparungspotential, welches bei guter Flugverkehrsleitung und durch verbesserte Infrastruktur erreicht werden kann, wird von der Lufthansa in [12] untermauert. So wird in Bild 3 verdeutlicht, dass 3% des gesamten Kerosinverbrauchs durch intelligentes Management eingespart werden können. Zur Datenerhebung zählen Anflugverzögerungen, Warteschleifen und schnelleres Fliegen, um Verspätungen durch Infrastruktur-Engpässe in der Luft und am Boden aufzuholen. Die Daten beziehen sich auf den weltweiten Verkehr der Lufthansa Passagier Airline. Laut dem Bericht aus [12] konnte die Lufthansa alleine im Jahr 2006 durch Verbesserungen im ATM-Bereich circa 142.000 Tonnen CO₂ einsparen.

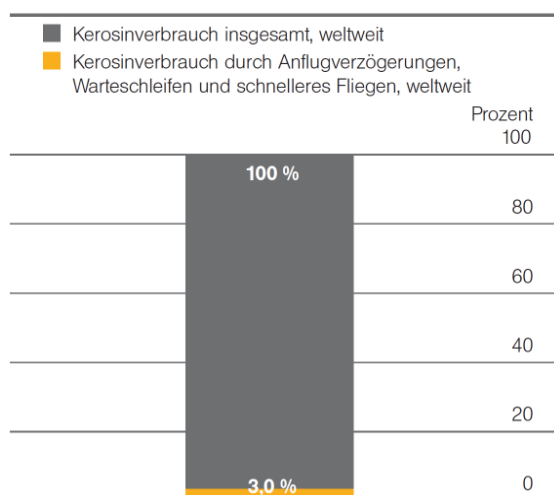


BILD 3: Kerosinverbrauch durch Infrastruktur Engpässe [12]

Zu diesen Einsparungen kann das Weiterentwicklungspotenzial von operativen und strategischen Maßnahmen ergänzt werden. Nach [13] ist für diese Anwendung das Luftverkehrsmanagement das wichtigste operative Werkzeug. Dazu zählen der Einsatz effizienterer Flugzeuggrößen, optimale Rollwege und Geschwindigkeiten sowie eine schnellere Abfertigung der Flugzeuge am Boden. Durch dieses Teilgebiet des ATM konnte die Lufthansa im Jahr 2006 die Umwelt um circa 200.000 Tonnen CO₂ entlasten.

Mit Emissionsauswertungstools kann der Prozess beim Anfertigen von Studien und Forschungsansätzen für operative und infrastrukturelle Maßnahmen unterstützt werden. Vorstellbar ist beispielsweise, dass genau analysiert werden kann, wie alternative Taxiwege kritische Engpässe entlasten würden und letztendlich Kraftstoffeinsparungen erreichen würden.

3. BETRACHTUNGSGRENZEN

Bei der zu entwickelnden wissenschaftlichen Methodik zur Berechnung und Darstellung der Emissionsmasse werden bestimmte Erklärungsgrößen aus der Realität abgebildet. Eine vollständige Abbildung der Realität ist auf Grund der Komplexität nicht möglich. Bei einer solchen vereinfachenden Abbildung werden zur Abstrahierung gewisse Betrachtungsgrenzen festgelegt. Der Detaillierungsgrad muss der gewünschten Qualität entsprechen.

3.1. Räumliche Betrachtung

Es wird in der Problemstellung des Projekts gefordert, den Flughafenbereich bis zu einer Höhe von 3000 ft zu untersuchen (der Reiseflug wird nicht betrachtet). In diesem territorialen Flughafenbereich verwendet man die Flugphasen des LTO-Cycle. Dies ist die Bezeichnung für den kompletten Lande- und Startprozess (engl. Landing and TakeOff cycle). Der Emissionsausstoß in diesem Flugraum beträgt nach [16] im Durchschnitt und im Verhältnis zur zurückgelegten Strecke mit 25 % einen erheblichen Anteil an den gesamten Flugemissionen. Im Kreislauf des LTO ist der Emissionsausstoß stark abhängig von der jeweiligen Phase, in der sich das Luftfahrzeug befindet. Der LTO umfasst vier Phasen: Anflug, Taxi, Start und den Steigflug (siehe Bild4). In diesen Phasen kann man, abhängig vom Flugzeugtyp (spezifischer Verbrauch) und der Zeitdauer der Flugphase, den Kerosinverbrauch berechnen.

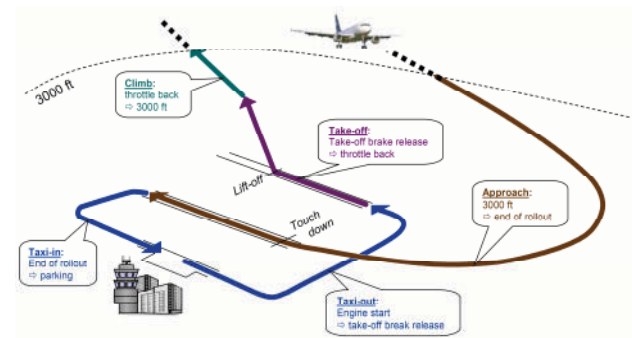


BILD 4: Der Standard LTO cycle [17]

3.2. Emissionsquellen

Im flughafennahen Bereich gibt es viele Verursacher von Abgasen. So werden Abgase durch Passagiere bei der Anreise mit PKW, Bussen oder Zügen produziert. Bodenfahrzeuge im Rollfeldbereich, wie zum Beispiel Ground power units⁴ oder Gepäcktransportfahrzeuge verursachen Schadstoffemissionen. Das Hauptmerkmal liegt allerdings auf den Flugzeugoperationen. Die Energieversorgung eines Flugzeuges erfolgt über zwei verschiedene Triebwerkstypen: Zum einen das Hilfstriebwerk (engl. auxiliary power unit, APU) zur Erzeugung von elektrischer Energie für die Bordelektronik, und zum anderen das Haupttriebwerk für die kinetische Energie (Schubkraft). Zunächst wird ausschließlich der Schadstoffausstoß der Haupttriebwerksturbinen betrachtet. In weiteren Entwicklungsstufen sollen auch die Emissionen der APU implementiert werden.

3.3. Schadstoffarten

In ersten externen Projektanfragen haben sich folgende Stoffe herauskristallisiert, welche es zu untersuchen und zu berechnen gilt: H_2O , CO_2 , SO_x , NO_x , CO , HC und PM . In welcher Weise und Menge diese Stoffe beim Verbrennungsvorgang auftreten und wie sie berechnet werden können, folgt in den nächsten Kapiteln. Im Folgenden werden die zu betrachtenden Schadstoffe festgelegt. Ein Flugzeug verwendet in den einzelnen Phasen unterschiedliche Schubeinstellungen für die Triebwerke. Die verbrauchte Kraftstoffmenge ist direkt abhängig vom Schub und kann aus der Dauer des Triebwerksschubes, die ein Flugzeug in der Zeit hat, berechnet werden. Bei den Emissionswerten wird bei der Entstehung zwischen zwei Stoffkategorien unterschieden.

Zum einen gibt es Stoffe, deren Emissionsrate von der verbrauchten Kraftstoffmasse und zusätzlich vom Schub abhängig ist. Die Schubeinstellung wird durch die Art der Flugphase abstrahiert. Das heißt, es ist wichtig, in welcher Phase das Abgas berechnet werden soll, da jeder Phase eine Schubgröße zugeordnet ist. Somit spricht man in diesem Zusammenhang von phasenabhängigen Stoffen. Ein Beispiel hierfür ist das CO : Bei gleichem Kraftstoffverbrauch entsteht beim Rollvorgang mehr CO als beim Take Off, da beim Take Off mehr Leistung benötigt wird. Der Treibstoff verbrennt heißer und reagiert somit zu CO_2 anstatt zu CO .

Im Gegensatz dazu sind die Emissionen einiger anderer Stoffe allein vom Kraftstoffverbrauch abhängig. Bei diesen spielt es keine Rolle, welche Phase betrachtet wird. Sie werden als Phasenunabhängige Stoffe:

Phasenunabhängige Stoffe:

H_2O : Emission von Wasser. Verwendet ausschließlich die konstante Rate von 1,237 kg Wasser/kg Kerosin (vgl. [18], Seite 21). Sie ist nur vom Kerosinverbrauch abhängig.

CO_2 : Verhält sich analog zu den Wasseremissionen. CO_2 ist nur vom Kerosinverbrauch abhängig mit konstant 3,15 kg CO_2 / kg Kerosin (vgl. [18], Seite 23).

SO_x : Diese Emission lässt sich aus dem Sulfatgehalt im Kerosin herleiten. In einem berechneten amerikanischen Mittelwert beträgt der SO_x Ausstoß 1 g / kg Kerosin (vgl. [19], Seite 39).

Phasenabhängige Stoffe:

NO_x : Zu den so genannten Stickoxiden zählen viele verschiedene Stoffe, welche Stickstoff (Nitrogenium) enthalten. Im Zusammenhang mit dem Treibhauseffekt sind NO und NO_2 die wichtigsten Vertreter der Stickstoffe (zusammengefasst zu NO_x , vgl. [20], Seite 5f).

CO : Kohlenstoffmonoxid entsteht bei der Verbrennung von Kerosin (vgl. [20], Seite 5).

HC : Zu HC -Emissionen sind alle Kohlenwasserstoffe zusammengefasst (C_mH_n). Da Kerosin aus einem Gemisch von Kohlenwasserstoffen besteht, verbleiben auch nach der Verbrennung Kohlenwasserstoffe im Abgas (vgl. [20], Seite 6).

PM : Der zu beachtende Feinstaub, engl. Particulate Matter (kurz als PM -Standard bezeichnet), ist ein Sammelbegriff für Teilchen verschiedener Größe, welche eingeatmet werden können. Der Feinstaub tritt in zwei verschiedenen Partikelgrößen auf, PM_{10} mit einem aerodynamischen Durchmesser⁵ von 10 Mikrometern (10 μm) und $PM_{2,5}$ (2,5 μm). Bei den vorliegenden Abgasuntersuchungen werden die zwei Feinstaubgrößen zu einem Feinstaubwert PM zusammengefasst (vgl. [20], Seite 6).

3.4. Datenquellen

Für die zu verwendenden Daten wurden die zwei folgenden Eckpunkte gesetzt:

1. Unabhängige Datengrundlagen
2. Angemessene Genauigkeit

Es werden für die geplanten Berechnungen Datensätze verwendet, die aus wissenschaftlichen Forschungsprojekten stammen. Daten zur Berechnungsgrundlage sollen für sich selbst stehen und nicht aus anderen Inputdaten abgeleitet sein. Grundlage für die Auswertungen von EWMS sind Simulationsdaten. Jeder im Institut verwendete Simulator hat unterschiedliche Ausgabedateien. EWMS bietet für die meisten Simulationen eine Projektumgebung zur Auswertung der Simulationsergebnisse. Diese Simulationsergebnisse werden beim Einlesen unter anderem zu Flugphasen mit einer bestimmten Dauer und Flugplandaten zusammengefasst. Im Rahmen der Emissionsauswertung kann somit direkt auf die FlugID, Flugphasen, die verwendeten Flugzeugtypen und weitere Parameter zugegriffen werden.

⁴ Ground power units sind Fahrzeuge zur Energieversorgung von parkenden Flugzeugen.

⁵ Ist die abstrakte Größe zur Beschreibung des Verhaltens eines Gas getragenen Partikel.

JP	ICAO Codes	wake span	wing span	Number of Engines	Engine
J	A306	H	44,84	2	CF6-80C2A8
J	A30B	H	44,8	2	CF6-50C
J	A30B	H	44,8	2	CF6-50C2R
J	B744	H	64,8	4	RB211-524H2
J	B753	M	38,1	2	RB211-535E4B
J	B762	H	47,6	2	CF6-80A
J	F900	M	19,3	3	TFE731-5AR-1C
J	E170	M	26	2	CF34-8E5

Tabelle 1: Ausschnitt aus der Flugzeugdatenbank von ICAO [21]

Engine Identification	-----EI HC-----			

	T/O	C/O	App	Idle
	-----g/kg-----			
Allied Signal				
TFE731-2-2B	0,114	0,128	4,26	20,04
TFE731-3	0,062	0,072	1,41	9,04

Tabelle 2: Ausschnitt aus der Triebwerksdatenbank von ICAO [14]

Für die Berechnung der Emissionen werden zwei weitere Datenquellen als Basis herangezogen. Die Flugzeugdaten (siehe Tabelle1) beschreiben, welcher Flugzeugtyp welche und wie viele Triebwerke einsetzt. Hierfür wird eine Datenbank der ICAO gewählt (vgl. noiseDB⁶, Anleitung in [22]). Die zweite Datengrundlage ist eine Triebwerkstabelle (siehe Tabelle2) der ICAO, welche alle verwendeten Triebwerke beinhaltet (vgl. ICAO Engine Emissions Databank⁷, Erläuterung in [14]). Die Struktur der Daten wird in Tabelle1 und Tabelle2 deutlich, jedes Triebwerk hat einen eindeutigen Namen und Werte für den Emissionsindex des Schadstoffes für jede Phase. Auf die Berechnung mit Hilfe der Emissionsindizes wird im späteren Teil der Arbeit genauer eingegangen.

4. BERECHNUNG DER SCHADSTOFFEMISSIONEN

4.1. Berechnung Kraftstoffverbrauch

Der absolute Kraftstoffverbrauch für jede Flugnummer wird aus der Dauer der Phasen eines Flugzyklus (z.B. Start, Landung, Rollen zum Gate etc.), den spezifischen

Flugzeugdaten und den Werten zum Kraftstoffverbrauch der eingesetzten Triebwerke berechnet.

- a = Aircraft
- n_a = Number of Engines
- p = Flugphase
- e = Engine Type
- F_{p,e} = specific Fuel burn in Phase for Engine [e]
- D_{p,a} = Duration in Sekunden

$$F_{[kg]} = n \times D_{[sec]} \times F_s_{[kg/sec]}$$

Formel 1: Berechnung des Treibstoffverbrauchs

$$[F_{a,n,p,D}] = \text{sekunden} \times \frac{kg}{\text{Sekunden}} = kg$$

Formel 2: Einheiten Nachweis für die Treibstoffberechnung

4.2. Berechnung Emissionsmasse

Aus dem berechneten Wert kann mit den Emissionsindizes der absolute Wert für die Schadstoffe gefolgert werden. Der Emissionsindex ist angegeben in g/kg, d.h. x Gramm von Schadstoff a werden bei y Kilogramm Kraftstoffverbrauch emittiert.

- F_{a,n,p,D} = Fuel burn in specific Phase, Aircraft, Number of Engines and Duration
- EI_{p,e} = Emission Index for Phase p and Engine e

$$E_{[g]} = EI_{[g/kg]} \times F_{[kg]}$$

Formel 3: Berechnung der Emissionsmasse

$$[E_{p,e,a,n,D}] = \frac{g}{kg} \times kg = g$$

Formel 4: Einheiten Nachweis für die Emissionsberechnung

Das Ergebnis dieses Schrittes ist der Kraftstoffverbrauch in Kilogramm für einen Flug auf einem Streckenabschnitt in den jeweiligen Phasen des LTO. In dem Punkt Streckenabschnitt muss zwischen Knoten und Links unterschieden werden. Emissionen entstehen auf Links, wenn sich ein Flugzeug auf diesen bewegt.

⁶ Vgl. <http://noisedb.stac.aviation-civile.gouv.fr/index.html>

⁷ Vgl. <http://www.caa.co.uk/default.aspx?catid=702>

5. ERGEBNISSE

In diesem Abschnitt wird detailliert auf Auswertungsergebnisse eingegangen. Der Prozess der Emissionsauswertung setzt sich aus fünf Unterprozessen zusammen. Nach abgeschlossenen Teilschritten werden die Zwischenergebnisse der Berechnungen protokolliert und in Dateien exportiert. Das fördert eine gute Transparenz und Validierungsmöglichkeit der Zwischenergebnisse. Nachfolgend werden Ausschnitte der exportierten Resultate gezeigt und beschrieben. In Tabelle 3 kann der Benutzer die Flugbewegungen der eingelesebenen Simulation einsehen. Die Tabelle ist nach den Flugnummern sortiert und zeigt alle Phasen eines Fluges im Flughafennahbereich. Dazu kommen Informationen zu den Streckenabschnitten, der Dauer einer Phase und dem Flugzeugtyp.

FlightID	Phase	startNode	endNode	Duration	Aircraft
11	DEPARTURE BOARDING	FRA 150	FRA 226	1320	B737
11	TAXI	FRA 150	FRA 226	85,9	B737
12	TAXI	FRA 87	FRA 11	18,2	A320
12	TAKEOFF RUN	FRA 12	FRA 13	19,1	A320
12	TAKEOFF RUN	FRA 11	FRA 12	7,6	A320
18	LANDING ROLL	FRA 4	FRA 3	14,7	A388
18	LANDING ROLL	FRA 5	FRA 4	11,1	A388
18	TAXI	FRA 169	FRA 129	17,4	A388
18	TAXI	FRA 3	FRA 169	14,7	A388
96	TAXI	FRA 80	FRA 81	44,2	A332
96	TAXI	FRA 193	FRA 80	34	A332
96	TAXI	FRA 195	FRA 193	12,2	A332
96	ARRIVAL DEBARKATION	FRA 81	AN 58	2099,9	A332

Tabelle 3: FlightID, Phase, Nodes, Duration [sec], Aircraft

Gleiche Flugzeugversionen können mit unterschiedlichen Triebwerkstypen ausgestattet sein. In Tabelle 4 ist ein Ausschnitt der Mittelwertstabelle dargestellt. Es zeigt die durchschnittlichen Verbrauchswerte eines Flugzeugtyps.

Aircraft	EI_NOX_APP	EI_NOX_CO	FUEL_FLOW_IDLE	FUEL_FLOW_TO
A320	8,8	19,5	0,1	1,062
A321	9,6	22,9	0,1179	1,35
A342	10,2	27,2	0,1192	1,383
A343	10,2	27,2	0,1192	1,383
AT45	9,9	15,5	0,033	0,15
B737	8,9	16,9	0,1071	1,107
B738	9,3	18,9	0,1111	1,209
GLF5	7,7	15,4	0,083	0,747
MD11	11,3	23,4	0,2046	2,624
MD80	8,2	16,1	0,1344	1,307
T204	8,4	30,7	0,1836	1,833
YK40	9	22	0,044	0,634

Tabelle 4: Aircraft, EmissionIndex [g/kg], FuelFlow [g/sec]

Als Grundlage zum zeichnen der Emissionskarte, muss das Knoten - Link Netz des Flughafen mit den Koordinaten der Punkte definiert sein. Zusätzlich müssen den Links die Emissionswerte zugeordnet werden. Die Daten aus Tabelle 5 sind Grundlage zum Zeichnen der Emissionsdarstellung und bieten dem Benutzer einen detaillierten Blick in die Kennwerte der Berechnung.

Link Name	Belegungsdauer	Phase	Startknoten	X-Koordinate	Y-Koordinate
FRA 5-TO-FRA 4	12613,8	LANDING ROLL	FRA 5	8,556496	50,032677
FRA 72-TO-FRA 70	7331,5	TAXI	FRA 72	8,565392	50,044842
FRA 251-TO-FRA 252	29286,2	LANDING ROLL	FRA 251	8,511806	50,0443
FRA 22-TO-FRA 23	14285,4	TAKEOFF OVERFLYING RWY	FRA 22	8,544201	50,03471
FRA 14-TO-FRA 15	11379,8	TAKEOFF RUN	FRA 14	8,571905	50,041187
FRA 62-TO-FRA 64	140155,4	TAXI	FRA 62	8,56161	50,040646
FRA 29-TO-FRA 30	86488,7	TAKEOFF RUN	FRA 29	8,526001	50,022953
FRA 5-TO-FRA 119	3213,7	LANDING ROLL	FRA 5	8,556496	50,032677
FRA 126-TO-FRA 102	58632,5	TAXI	FRA 126	8,567792	50,033382

Endknoten	X-Koordinate	Y-Koordinate	Fuel Flow	CO	NOx	PM	CO2
FRA 4	8,551236	50,031464	8541,63	214077,3	39842,2	888	26906156,5
FRA 70	8,56569	50,045479	2482,42	64862,9	11504,7	262,7	7819638,3
FRA 252	8,504763	50,042641	9236,23	247593,5	42853,2	987	29094128,1
FRA 23	8,536242	50,032944	63532,89	26919,9	2254328,3	8851,8	200128627,1
FRA 15	8,567453	50,040146	50417,83	21532,7	1775420,1	7074,4	158816168,9
FRA 64	8,568054	50,04221	56543,03	1475582,9	265492,1	5942,3	178110546,3
FRA 30	8,526047	50,002094	309273,75	157829,3	9564367,7	42661,1	974212317,9
FRA 119	8,55198	50,033344	1577,08	41206,3	7160,5	166,5	4967807,1
FRA 102	8,5741	50,035007	19241,63	526854,4	85246,4	2038	60611153,7

Tabelle 5: Ergebnis zum Zeichnen

Die Emissionsdaten in den Tabellen bieten eine gute Möglichkeit genaue Erkenntnisse aus den Simulationen zu gewinnen. Jedoch verbirgt sich hinter einer detaillierten Analyse der Werte ein hoher Arbeitsaufwand, welcher dem Auftraggeber einer Untersuchung nicht zumutbar ist. Deshalb beinhaltet die Aufgabe der Forschungsarbeit unter anderen die Entwicklung einer geeigneten Darstellung für die berechneten Werte. Bild 5 zeigt die entwickelte raumbezogene Emissionsdarstellung für ein simuliertes Luftverkehrsszenario. Anhand dieser Grafik lassen sich schnell und intuitiv erste Indikatoren erkennen, die aus den Tabellen in der Kürze nicht deutlich herauskommen. Die Darstellung zeigt keine realen Flugbewegungen, sondern eine interne Untersuchung am Flughafen Frankfurt am Main. Es ist bei diesem Szenario deutlich eine hohe Belastung am Anfang der Startbahn 25R zu sehen. Diese RWY wird in diesen Simulationen nur als Startbahn benutzt. Im Gegensatz dazu werden auf der Parallelbahn 25L nur Landungen durchgeführt.

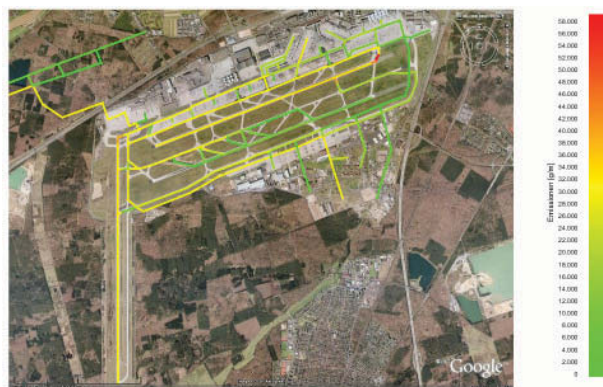


BILD 5: Raumbezogene Emissionsdarstellung für Luftverkehrssimulationen

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass alle Implementierungsaufgaben wie geplant gelöst wurden. Die Ergebnisse zeigen keine erkennbaren Fehler auf und erwiesen sich bei den Evaluationen als korrekt.

6. AUSBLICK

Die Emissionsauswertung und -darstellung stellt zwar eine abgeschlossene Arbeit dar, jedoch sind in diesem Forschungsfeld weitere Entwicklungsschritte angedacht. Im nachfolgenden Abschnitt werden potenzielle Zukunftsperspektiven der Emissionsdarstellung aufgezeigt. Dabei werden sowohl die Anwendungsmöglichkeiten als auch die Möglichkeiten der technischen Weiterentwicklung betrachtet.

Die Evaluationsprozesse an einigen Szenarien wurden mit guten Ergebnissen abgeschlossen. Allerdings wurden die berechneten Emissionen nicht mit Realdaten verglichen. Auf wissenschaftlichen Seminaren und Kongressen (DGLR Workshop - umweltfreundliches Fliegen 17. Juni 2010) wurden die Entwicklungen der Auswertung vorgestellt und Ergebnisse diskutiert. In diesem Zusammenhang gab es hilfreiche Informationen und Vorschläge über mögliche Schnittstellen in Parallelprojekten. Zum Beispiel führt das Institut für Verbrennungstechnik des DLR aktuell Messungen am Flughafen in Zürich durch. Bei diesen Messungen werden Schadstoffe im Realbetrieb untersucht, welche zur Validierung des Modells herangezogen werden können. Außerdem könnten z.B. in Zusammenarbeit mit Lufthansa die theoretisch berechneten Verbrauchsdaten mit den real existierenden Verbrauchsdaten der Fluggesellschaft validiert werden.

In den Analysen zum aktuellen Stand der Technik wurden Defizite in Betrachtungen der Schadstoffquellen und territorialen Betrachtungsgrenzen festgestellt. So werden in anderen Emissionsmodellen auch die Hilfstriebwerke, die Bodenfahrzeuge sowie der Reiseflug betrachtet. Durch schrittweise Weiterentwicklungen der EWMS Auswertungen sollen Konzepte implementiert werden, welche zusätzlich die Schadstoffe der Hilfstriebwerke und der Bodenfahrzeuge untersuchen. Des Weiteren soll analysiert werden, welchen Nutzen eine Berechnung der Verbrauchsdaten im Reiseflug für das Institut für Flugführung hat.

Ein weiterer technischer Ansatz wurde in dieser Arbeit bereits konzipiert. Die Möglichkeit, die berechneten Emissionen flächenhaft darzustellen (Grid-Rasterung) soll detaillierter untersucht und in die Auswertung implementiert werden. Dabei soll ein Verfahren zur Ausbreitung von Spurenstoffen in der Atmosphäre durch Dispersion und Transport durch Wind ausgearbeitet werden. Für eine solche Dispersionsberechnung könnten Ausbreitungsmodelle wie das Gaußsche Fahnenmodell oder das Lagrangesche Partikel-Modell eingesetzt werden, wie zum Beispiel in [15] erläutert.

Das Fazit und der Ausblick zeigen, welchen Stand das Projekt mit dem Abschluss der Arbeit erreicht hat und welche zahlreichen weiteren Möglichkeiten sich mit der Emissionsauswertung in EWMS eröffnen. Zusätzlich findet die entstandene Entwicklung aktuell und in Zukunft weitreichende Einsatzgebiete in Forschungsprojekten des DLR.

7. ABKÜRZUNGEN

ACARE	- Advisory Council for Aeronautics Research in Europe
APU	- Auxiliary Power Unit
ATM	- Air Traffic Management
DLR	- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EEC	- EUROCONTROL Experimental Centre
EWMS	- Extensible Workflow Management for Simulations
FAA	- Federal Aviation Administration
GPU	- Ground Power Unit
ICAO	- International Civil Aviation Organisation
IFR	- Instrument Flight Rules
KML	- Keyhole Markup Language
LFZ	- Luftfahrzeug
LTO	- Landing and Take Off
RWY	- Runway
SIMMOD	- Simulation Model
USAF	- United States Air Force

8. REFERENZEN

- [1] Schumann, U.: „Klimawirkung des Luftverkehrs“, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. - Institut für Physik der Atmosphäre, 2000
- [2] European Commission: „EU focus on clean air“, Office for official Publications of the European Communities, 1999
- [3] Weitz, P.: „Prototypische Entwicklung einer CO₂ und Stickoxid-Emissionsauswertung für Luftverkehrssimulationen“, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2009
- [4] Fuller, I. (EUROCONTROL Experimental Centre) et al.: „Airport Local Air Quality Studies Case Study: Emission Inventory for Zurich Airport with different methodologies“, EUROCONTROL Experimental Centre 2004
- [5] o.V. Der Flughafenverband: „Umweltschutz: Emissionen“, <http://www.adv.aero/emissionen.html>, Stand 28.07.2010
- [6] Leggert, J.: „Global Warming. Die Wärmekatastrophe und wie wir sie verhindern können“, Der Greenpeace Report. München 1991
- [7] o.V. Lufthansa: „Gase, die das Klima verändern“, [- \[wissen.lufthansa.com/fileadmin/de/medien/4203M.pdf\]\(http://wissen.lufthansa.com/fileadmin/de/medien/4203M.pdf\), Stand 03.08.2010
 - \[8\] Sausen, R.: „Fliegen wir das Klima zugrunde?“, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen 2008
 - \[9\] Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen \(Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, WMO/UNEP, \[www.ipcc.ch\]\(http://www.ipcc.ch\)\): „Klimaänderung 2007: Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger“, 2007
 - \[10\] Baughcum, S. L. et al.: „Aircraft Emissions: Current Inventories and Future Scenarios“, <http://repository.upenn.edu/librarypapers/59>, University of Pennsylvania, 1999, Stand 03.08.2010
 - \[11\] Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt: „Naturschutz und Reaktorsicherheit: Maßnahmen zur verursacherbezogenen Schadstoffreduzierung des zivilen Flugverkehrs“, 2001
 - \[12\] o.V. Lufthansa: „Vier Säulen des Klimaschutzes - Weltklima im Wandel“, <http://erlebnis-wissen.lufthansa.com/fileadmin/de/medien/4102M.pdf>, Stand 20.07.2010
 - \[13\] o.V. IPCC \(Intergovernmental Panel on Climate Change\): „Aviation and the global Atmosphere - A Special Report of IPCC Working Groups I and II in Collaboration with the Scientific Assessment Panel to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer“, Cambridge University Press, 1999
 - \[14\] ICAO Engine Exhaust Emission Databank, First Edition 1995, Doc 9646- AN/943, <http://www.caa.co.uk/default.aspx?catid=702&page type=90>, Stand 20.01.2010
 - \[15\] Celikel, A. et al.: „Preliminary Local Air Quality Study“ EUROCONTROL Experimental Center, 2002
 - \[16\] Kesigin, U.: „A study on the aircraft emission at Turkish airports“, 2001
 - \[17\] Fleuti, E., Polyméris, J.: „Aircraft NO_x-Emissions within the Operational LTO Cycle“, Unique \(Flughafen Zürich AG\), P.O. Box, CH-8058 Zurich, \[www.unique.ch\]\(http://www.unique.ch\), In cooperation with Swiss Flight Data Monitoring, 2004
 - \[18\] o.V. The National Environmental Research Institute: „Emission Inventory Guidebook“, 2006
 - \[19\] ICAO: „Airport Air Quality Guidance Manual“, ICAO Preliminary Unedited Version, 2007
 - \[20\] EUROCONTROL Experimental Centre: „Airport Local Air Quality Studies \(ALAQS\)“, Concept Document Issue, 2005
 - \[21\] EUROCONTROL, La Direction générale de l'Aviation civile \(DGAC\): Noise Certification Database, <http://noisedb.stac.aviation-civile.gouv.fr/index.html>, Stand 20.01.2010
 - \[22\] ICAO Annex 16: „International Standards and recommended practices, Environmental protection“, Volume II „Aircraft engine emissions“, 1993](http://erlebnis-

</div>
<div data-bbox=)