



## **Fortschrittliche ATM-Konzepte**

Raumbezogene Emissionsauswertung und  
-darstellung für Luftverkehrssimulationen  
im Rahmen von EWMS

Bachelorarbeit  
Paul Weitz

IB-Nummer 112-2010/41  
Zugänglichkeitsstufe A/I



**Institut für Flugführung**  
Direktor: Prof. Dr. Dirk Kügler

## Dokument Information

Zuständiger Projekt- / Abteilungsleiter:	Dipl.-Ing. Franz Knabe / Dr.-Ing. Thorsten Mühlhausen
Zuständiger Autor:	Paul Weitz
Weitere Autor(en):	
Projekt / Zielfeld:	Fortschrittliche ATM Konzepte
Zugänglichkeitsstufe:	A / I
Datei:	2010-09-20_Schadstoffemissionsauswertung.pdf
Version:	0.01
Speicherdatum:	2010-10-06
Gesamtseitenzahl:	53

## Änderungsverfolgung

<b>Version</b>	<b>Datum</b>	<b>Geänderte Seiten / Kapitel</b>	<b>Bemerkungen</b>
0.01	05.10.2010	Gesamtes Dokument	Formatierung der Bachelorarbeit nach Institutsvorlage

© 2010, DLR, Institut für Flugführung:

Dieses Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung innerhalb und außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des DLR, Institut für Flugführung, unzulässig und wird zivil- und strafrechtlich verfolgt. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

## Inhalt

1	Einleitung .....	5
1.1	Zielsetzung und Aufgabenstellung .....	6
1.2	Umfeld .....	6
1.3	Struktur der Arbeit.....	7
2	Vorgehensmodell und Planung.....	8
2.1	Abgrenzen der Arbeitspakete.....	8
2.2	Projektplan / Vorgehensmodell .....	9
3	Grundlagen zur Klimawirkung der Luftfahrt.....	9
3.1	Auswirkungen des Flugverkehrs auf die Umwelt .....	9
3.2	Forschungsansätze zur Reduzierung von Luftverkehrsabgasen .....	10
3.3	Stand der Technik zu Emissionsauswertung und -darstellung.....	11
4	Analyse und Entwurf.....	16
4.1	Identifikation von Erweiterungsmöglichkeiten des Prototypen .....	16
4.2	Betrachtungsgrenzen.....	17
4.2.1	Räumliche Betrachtung .....	17
4.2.2	Emissionsquellen .....	18
4.2.3	Schadstoffarten .....	18
4.3	Datenquellen und Zuverlässigkeit .....	19
4.4	Datenaufbereitung .....	20
4.5	Fehlerabschätzung der betrachteten Werte .....	22
4.5.1	Einflussfaktoren.....	22
4.5.2	Einflussgröße .....	22
4.6	Berechnung der Schadstoffemissionen.....	23
4.7	Graphische Darstellung der Emissionswerte.....	26
4.7.1	Rollwege .....	26
4.7.2	Rasterung von Linien.....	28
4.7.3	Kartenlayout .....	28
5	Implementierung.....	31
5.1	Software-Architektur .....	31
5.2	Datahandling.....	34
5.3	Berechnung der Schadstoffemissionen.....	35
5.4	Schadstoffemissionswerte .....	36
5.5	Darstellung mit JFreeChart .....	36
6	Anwendungsbeispiel und Bewertung der Ergebnisse .....	37
6.1	Anwendungsbeispiel .....	37
6.2	Ergebnisse.....	39
7	Fazit und Ausblick .....	42
I	Literaturverzeichnis .....	44
II	Abbildungsverzeichnis.....	46
III	Tabellenverzeichnis.....	46
IV	Quellcodeverzeichnis.....	47
V	Abkürzungsverzeichnis .....	47
VI	Anhang .....	48

## Executive Summary (Zusammenfassung)

The predicted traffic growth in aviation is expected to lead to an increasing impact of aviation on the global warming caused by emissions. The Institute of Flight Guidance of the German Aerospace Center conducts research with a focus on air traffic management, aiming to develop efficient measures to reduce emissions. For this purpose, studies are created based on the simulation of varying airport scenarios.

This thesis designs and implements a tool which calculates pollutant emissions and generates a graphical representation of the spatial emission distribution over the airport as part of the analysis software EWMS. Initially, basic knowledge about emission calculation is established through research as a basis for proprietary development. This shows that the calculation of emissions requires both information about the amount of aircraft movement and consumption data of the engines. As a result the evaluation module calculates the mass of the pollutants CO, NOX, HC, SOX, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> and particulate matter.

To quickly identify and investigate bottlenecks, delays or alternative taxiways, the presentation of results was required to be intuitive and comparable. This was achieved by colorizing the manoeuvring area of the investigated airport depending on the determined emission intensity. In addition, the user can display an aerial view of the airport as a background graphic for better orientation. For post processing the user is also provided with interim results occurring during the calculation and the report data as exportable tables. The final program version was successfully validated by the developer and experts from the Institute using airport (simulation) examples.

# 1 Einleitung

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 IFR<sup>1</sup> 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 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.

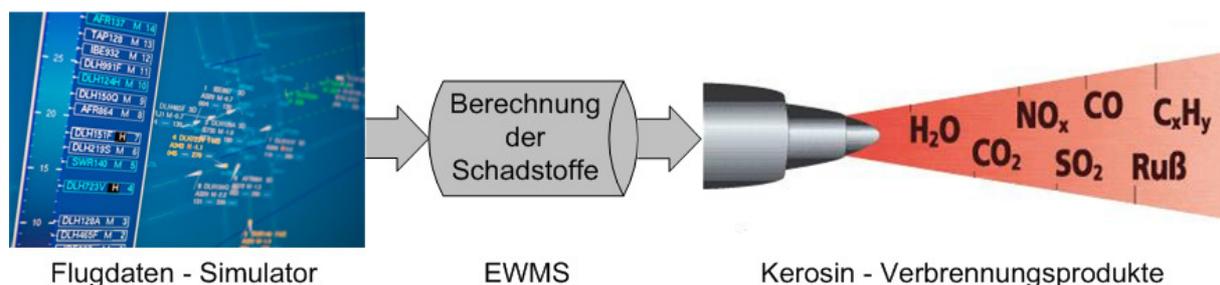


Abbildung 1: Berechnung der Schadstoffe im Luftverkehr

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 vorliegenden Arbeit eine graphische Darstellung der berechneten Emissions- und Treibstoffwerte entwickelt. Dabei wird ein bereits entworfenes Berechnungsmodell („Prototypische Entwicklung einer  $CO_2$  und Stickoxid-Emissionsauswertung für Luftverkehrssimulationen“, vgl. [3]) als Basis verwendet. Dieses Modell wird im Laufe der vorliegenden Bachelorarbeit überarbeitet und erweitert.

<sup>1</sup> engl. Instrument Flight Rules - Instrumentenflugregeln

## 1.1 Zielsetzung und Aufgabenstellung

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 vorliegenden Bachelorarbeit 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 wird im Hauptteil dieser Arbeit zunächst eine fachliche Kompetenz im Hinblick auf Benutzung, Fähigkeiten und Anforderungen von Emissionsmodellen aufgebaut. Diese fachliche Basis soll somit in der Abteilung Luftverkehrssysteme erweitert und spezifiziert werden. Das Grundwissen zur Emissionsberechnung soll verständlich wiedergegeben und bei den Eigenentwicklungen der Auswertungen angewendet werden. Die prototypische Emissionsauswertung aus [3] soll in den ersten Arbeitsschritten validiert werden. Hierfür werden Beispielszenarien geladen und Emissionen berechnet. Die Ergebnisse werden anschließend nachgerechnet und mit Experten ausgewertet. In einer weiteren Untersuchung des Emissionsmodells sollen bereits existierende Tools untersucht und unter definierten Anforderungen mit dem Prototypen verglichen werden. Eine Ausarbeitung des Entwicklungspotenzials, welche in der Implementierung umzusetzen ist, stellt das Fazit der Untersuchung dar.

Aus der Validierung sind die Anforderungsanalyse und der Softwareentwurf zu erstellen. Als Grundlage für eine Erweiterung der Emissionsberechnung sollen bei der Implementierung Fehler (Berechnungs- oder Datenaufbereitungsfehler) behoben und dokumentiert 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 LTO<sup>2</sup>, wie beispielsweise „Start of Taxi-out“, „Start of Take-Off“ oder auch der „Touchdown“, werden bewertet, um die Schadstoffbildung räumlich einzuordnen.

## 1.2 Umfeld

Dieses Kapitel beschreibt mögliche Anwendungsgebiete der Software. Dabei wird auf globale Ziele der Simulationsanalysen eingegangen und der Nutzen einer graphischen Emissionsdarstellung in Bezug auf aktuelle Forschungsprojekte begründet. Umweltprojekte in der Luftfahrt beschäftigen sich unter anderem mit Untersuchungen von möglichen Methoden zum Verringern der Klimawirkung des Luftverkehrs.

ACARE - Advisory Council for Aeronautics Research in Europe - ist ein europäisches Rahmenprogramm, welches die oben erläuterten Untersuchungen anstellt [5]. Zur Verbesserung des europäischen und weltweiten Flugtransportsystems werden in ACARE Methoden zur Reduktion der Umweltbelastung entwickelt.

---

<sup>2</sup> Engl. Landing and Take-Off cycle

Dabei sollen folgende Einsparungen bis 2020 erreicht werden (Referenzjahr 2000):

- 50% Reduzierung von CO<sub>2</sub> - Emissionen durch verringerten Treibstoffverbrauch
- 80% weniger NO<sub>x</sub> (Stickstoffoxide) - Emissionen
- 50% Reduzierung von Flughafenlärm
- Einen nachhaltigen Produktionszyklus: Entwurf, Herstellung, Wartung und Recycling [6]

Im Rahmen von ACARE wurde das Projekt CLEANSKY gestartet. In den Grundlagen von CLEANSKY [7] wird von drei Ansätzen zur Lösung des Schadstoffproblems in der Luftfahrt ausgegangen:

- weniger Fliegen, Verringern der Nachfrage
- Reduzierung der spezifischen Emissionen durch technologische Maßnahmen
- bessere Auslastung durch optimierten Flughafenbetrieb

Bei diesen Betrachtungen ist die Motivation des Instituts für Flugführung, Ansätze im Flughafenbetrieb (vgl. Punkt drei) zu entwickeln und die Ergebnisse zu bewerten. Ein Arbeitspaket in CLEANSKY, an dem das Institut für Flugführung beteiligt ist, umfasst Untersuchungen im Rollverkehr, intern als „Smart Operation on Ground“ bezeichnet. Unter anderem sollen in Schnellzeitsimulationen die Emissionseinsparungen durch den Einsatz von Elektromotoren beim Taxivorgang untersucht werden. Dies skizziert einen möglichen Einsatz zum Berechnen und Auswerten von Schadstoffemissionen anhand von Simulationsszenarien mit Hilfe von EWMS.

### 1.3 Struktur der Arbeit

Die vorliegende Bachelorarbeit zeigt die Umsetzung einer wissenschaftlichen Aufgabe und soll dem Leser ein Verständnis über das Grundwissen, das Konzept und die praktische Implementierung, welche der Autor in seinen Tätigkeiten entwickelt hat, geben. Zu Beginn der Arbeit wird eine kurze Einleitung in die Thematik der Aufgabe gegeben. Dabei wird auch beschrieben in welchen Projekten der Einsatz des zu entwickelnden Produkts Unterstützung bietet.

Um einen zielgerichteten und strukturierten Entwicklungsprozess zu gewährleisten wird in Kapitel 2 ein Vorgehensmodell für die praktische Umsetzung definiert. Dabei wird die Bachelorarbeit in Arbeitspakete gegliedert, um fest definierte Arbeitsschritte verfolgen zu können. Das theoretische Hintergrundwissen zum gestellten Problem wird in Kapitel 3 durch umfassende Literaturrecherche erarbeitet. Der Fokus liegt auf den Grundlagen zu Emissionsberechnungen und der graphischen Darstellung von Schadstoffen.

Als Kernkapitel ist Teil 4 der Arbeit zu sehen. Darin wird das Konzept zur Emissionsberechnung und -darstellung entworfen. Durch das Erläutern der Strategie wird dem Leser das Modell zur Abbildung der realen Flughafenwelt in der Simulationsauswertung vorgestellt. Das Implementierungskapitel befasst sich mit einigen interessanten technischen Umsetzungen. Die Implementierung ist in dieser Arbeit iterativ durchgeführt worden, um Zwischenergebnisse aus Arbeitsschritten evaluieren zu können. Neben dem Endresultat, der Emissionskarte, werden auch die Zwischenergebnisse während der Auswertung gespeichert. In Kapitel 6 wird der Auswertungsprozess aus Sicht des Benutzers erklärt und die Ergebnisse werden vorgestellt. Mit einer Reflexion des Erreichten und dem Ausblick auf weitere geplante Entwicklungen wird die Bachelorarbeit abgeschlossen.

## 2 Vorgehensmodell und Planung

Für eine gute Komplexitätsbeherrschung bei der Entwicklung des Softwaremodells wird die Arbeit in der Planungsphase in Teilaufgaben strukturiert. Auch in der Planung der vorliegenden Bachelorarbeit wurden verschiedene Teilaufgaben definiert. Diese Maßnahme wird auch als reduktionistischer Lösungsansatz bezeichnet und bietet eine gute Möglichkeit, die Bachelorarbeit zu strukturieren und ein Vorgehensmodell zu entwickeln.

### 2.1 Abgrenzen der Arbeitspakete

Die jeweiligen Arbeitsschritte werden in Arbeitspaketen gebündelt. Folgend sind die drei Arbeitspakete für das Entwickeln der Lösung definiert und strukturiert.

#### **Theoretisches Grundwissen zu Emissionen im Flugverkehr:**

Durch umfangreiche Literaturrecherche soll erarbeitet werden, welchen Einfluss die zivile Luftfahrt auf die Umwelt hat. Außerdem soll sich ein Überblick darüber verschafft werden, welche Emissionsreduzierungen sich durch den Einsatz von fortschrittlichen ATM-Konzepten erzielen lassen. In diesem Arbeitspaket sollen bereits existierende Tools für die Emissionsuntersuchung bewertet und mit dem Prototypen aus [3] verglichen werden. Das Fazit des Arbeitspaketes soll widerspiegeln, welche Faktoren die größten Einflüsse bei der Entstehung von Abgasen haben, wie diese durch verbesserte Flugführung beeinflusst werden können und um welche Funktionalität der Prototyp aus [3] erweitert werden sollte.

#### **Konzeptentwicklung:**

In diesem Arbeitspaket soll entworfen werden, wie die Funktionen des Emissionsprototypen verbessert werden können und welche Funktionen neu zu implementieren sind. Dabei ist auf eine Untersuchung der verschiedenen Technologien und deren Einsatzmöglichkeiten zu achten. Des Weiteren ist festzulegen, welche Anforderungen das Modul erfüllen muss und auf welchen Daten die Berechnungen basieren.

#### **Implementierung:**

Ein gutes Konzept zur Beschreibung der Implementierungsaufgaben im vorliegenden Projekt ist die Gliederung der Lösung in Eingabe, Verarbeitung und Ausgabe, da dies dem abstrakten Prozessmodell der Auswertung entspricht. Die drei Schritte der Datenverarbeitung sind voneinander abhängig, sodass die Entwicklung folgende Struktur hat:

1. Eingabe: relevante Flugdaten (Simulationsergebnisse und Triebwerksinformationen) sowie die Koordinaten des Flughafenlayouts werden aus der EWMS-Datenbank gelesen.
2. Verarbeitung: Verarbeiten der durch den Benutzer eingegrenzten Daten in interne Objektstrukturen. Die Koordinaten des Flughafenlayouts werden in interne Datenstrukturen verarbeitet und verknüpft. Berechnen der gewünschten Verbrauchskennwerte und Zuordnen der Werte zu den jeweiligen Streckenabschnitten.
3. Ausgabe: Das generierte Flughafenlayout wird dem Benutzer auf einer Karte dargestellt. Die errechneten Emissionsdaten werden auf den Streckenabschnitten gezeichnet.

## 2.2 Projektplan / Vorgehensmodell

Jede größere Ausarbeitung zu einem Thema steht für sich allein und kann nicht eins zu eins einem vordefinierten Modell zugeordnet werden. Die raumbezogene Berechnung, Auswertung und graphische Darstellung der Kraftstoffverbrauchsdaten werden iterativ entwickelt. Beim iterativen Modell werden Zyklen wiederholt durchlaufen. Bei diesem Vorgehen ist festgelegt, dass am Ende eines Zyklus ein Zwischenprodukt entwickelt ist. Somit kann nach jeder Stufe (Zwischenprodukt) eine Bewertung durchgeführt werden, wodurch frühzeitig Anforderungen modifiziert und die gewünschten Änderungen integriert werden können. Dabei ist die Möglichkeit gegeben, Wünsche und Anforderungen mit dem Kunden am Zwischenprodukt zu modifizieren. Am Ende des Entwicklungsprozesses sollen alle erarbeiteten Funktionen aus den Zyklen vollständig implementiert sein. Die Planung der Bachelorarbeit ist durch fest definierte Termine eingeschränkt. Für die Planung der Bachelorarbeit wurde ein zeitlicher Projektplan, siehe Anhang 1, erstellt.

## 3 Grundlagen zur Klimawirkung der Luftfahrt

Im folgenden Kapitel wird das fachliche Grundwissen aufgebaut, welches zur Entwicklung und Analyse für Schadstoffemissionen benötigt wird. Dies erfolgt in drei Schritten. Zunächst wird dargelegt, um welche Stoffe es sich genau bei der Belastung der Umwelt handelt und welche Auswirkungen auf das Ökosystem zu erwarten sind. Darauf aufbauend wird eine Übersicht gegeben, in welcher die technischen Ansätze zur Reduzierung der Klimawirksamkeit in Forschungsentwicklungen betrachtet werden. Dabei wird detailliert auf das Einsparungspotenzial von Schadstoffen durch verbesserte Flugplanung eingegangen. In vielen Studien werden bereits Analysewerkzeuge zur Berechnung eingesetzt. Einige Tools wurden im Rahmen der Bachelorarbeit getestet und in Kapitel 3.3 eine Funktionsbewertung mit Vor- und Nachteilen aufgestellt. In den Ausarbeitungen zum Stand der Technik wird der Status Quo des Emissionsprototypen [3] mit den Tools verglichen. Daraus ergeben sich die relevanten Verbesserungen und Erweiterungen. In diesem Kapitel wird die Relevanz der Entwicklung bestärkt.

### 3.1 Auswirkungen des Flugverkehrs auf die Umwelt

Triebwerksabgase haben sowohl am Boden als auch in der Luft Einfluss auf das Klima. Ausgestoßen werden, wie in Abbildung 2 zu sehen,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ),  $\text{C}_x\text{H}_y$  (HC),  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  und Feinstaub ( $\text{PM}^3$ ). Das am häufigsten auftretende Treibhausgas ist  $\text{CO}_2$ , welches beim Verbrennen von Treibstoff in den Triebwerken entsteht. Seitdem fossile Energieträger in der Industrie verwendet werden, ist der  $\text{CO}_2$  Gehalt in der Atmosphäre um 35 % angestiegen [8].

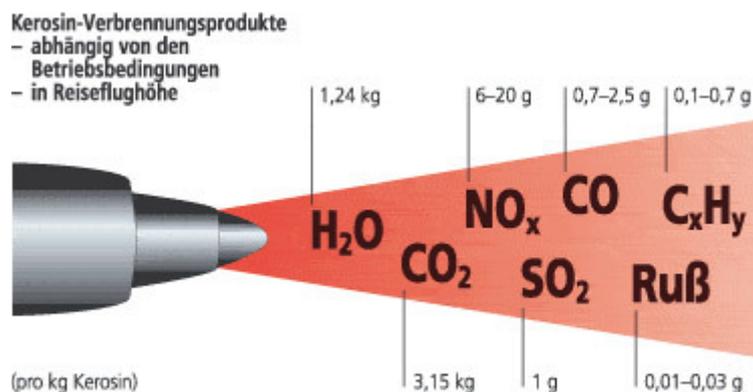


Abbildung 2: Kerosin-Verbrennungsprodukte [8]

<sup>3</sup> engl. Particulate Matter

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 [8]. 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<sub>x</sub>). Stickoxide entstehen durch Oxidation des in der Luft enthaltenen Stickstoffs [8]. Zu den genannten Stoffen wird auch Wasserdampf freigesetzt, der in kalter Luft die Bildung von Kondensstreifen verursacht. In [9] ist beschrieben, dass die Erwärmung durch NO<sub>x</sub> und Kondensstreifen kurz- und mittelfristig am größten ist. Langfristig hat jedoch CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre liegt nach [10] bei 380 ppm. Das bedeutet, in 1.000.000 Luft-Molekülen befinden sich 380 CO<sub>2</sub>-Moleküle. Die CO<sub>2</sub> Konzentration ist im Jahr 2005 um insgesamt 100ppm gestiegen. Zeile zwei in Tabelle 1 zeigt einen Anteil des Luftverkehrs von ca. 1-1,5 % am CO<sub>2</sub>- Anstieg.

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

Tabelle 1: Beiträge des Luftverkehrs zur Klimaänderung im Jahr 2005 [11]

Trotz dieser geringen Konzentration haben die Treibhausgase eine hohe Klimawirkung. Das liegt an zwei physikalischen Eigenarten: Sie lassen die kurzweilige 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 [12].

### 3.2 Forschungsansätze zur Reduzierung von Luftverkehrsabgasen

Es wurde bereits erwähnt, dass die technischen Weiterentwicklungen der letzten Jahre eine höhere Effizienz der Luftfahrt bewirkten. Zum einen sind die Kapazitäten gestiegen, zum anderen wurde der spezifische Kraftstoffverbrauch deutlich verringert. Durch technischen Fortschritt ist der Verbrauch laut [13] pro Person um 70% geringer als bei den ersten Jet-Flugzeugen.

Das Bundesministerium für Umwelt geht laut [14] 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 [15] untermauert. So wird in Abbildung 3 verdeutlicht, dass 3% des gesamten Kerosinverbrauchs durch intelligentes Management eingespart wer-

den 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 [15] konnte die Lufthansa alleine im Jahr 2006 durch Verbesserungen im ATM-Bereich circa 142.000 Tonnen CO<sub>2</sub> einsparen.

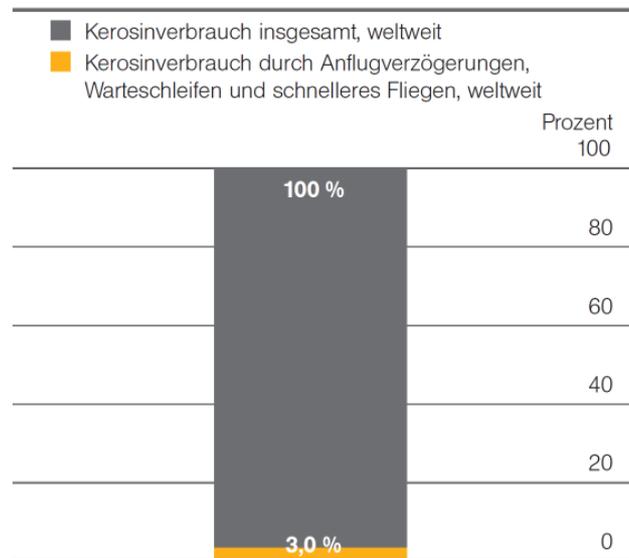


Abbildung 3: Kerosinverbrauch durch Infrastruktur Engpässe [15]

Zu diesen Einsparungen kann das Weiterentwicklungspotenzial von operativen und strategischen Maßnahmen ergänzt werden. Nach [16] 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 CO<sub>2</sub> 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.

### 3.3 Stand der Technik zu Emissionsauswertung und -darstellung

Der Ansatz, eine spezielle Anwendung zur Emissionsauswertung zu entwickeln, ist bereits in weiteren Unternehmen und Einrichtungen verfolgt worden. In diesem Arbeitsschritt wird ein Überblick der Funktionalitäten bereits entwickelter Tools vermittelt. Die technischen Möglichkeiten, die sich aus verschiedenen Programmen ergeben, werden durch Literaturrecherche und Beispielprojekte erarbeitet und dargestellt. Die drei ausgewählten Modelle LASPORT, EDMS, und AEM3 sind nach eingehender Literaturrecherche häufig eingesetzte Programme und stellen somit eine valide Basis dar. Die in diesem Kapitel erstellte Zusammenfassung der Eigenschaften soll einen ersten groben Überblick geben. Der Arbeitsaufwand für eine ausführlichere Recherche ist für den Zeitraum der Bachelorarbeit zu umfangreich. Um einen tiefgründigeren Einblick zu erhalten, werden die Handbücher zu den Tools empfohlen. Am Ende des Abschnitts wird als Fazit der Prototyp aus [3] mit den betrachteten Tools verglichen, bewertet und Weiterentwicklungspotenzial erarbeitet.

**LASPORT** ist ein Programm zur Berechnung von Abgasen und deren Ausbreitung in der Atmosphäre an Flughäfen [17]. Vor der Berechnung muss der User gewünschte Parameter einstellen und das Flughafenlayout als Grafik skalieren. Mit den eingestellten Parametern können im Einzelnen die Emis-

sionen von Flugzeugen im LTO mit Haupttriebwerken und Hilfstriebwerken (engl. auxiliary power unit, APU) sowie von GPUs (engl. ground power units) und von Bodenversorgungsfahrzeugen (engl. ground support equipment, GSE) berechnet werden. Das Ergebnis dient anschließend als Input für das Ausbreitungsmodell LASAT, welches die Ausbreitung der emittierten Abgase, z. B. durch Wind-einfluss, berechnen kann. Die genaue Funktionsübersicht wird in Form von Stichpunkten erbracht:

- Berechnungsprojekt mit Flugbewegungen erstellen
- Kartenlayout kalibrieren und Rollfeld anpassen
- Einstellen von Parametern (z.B. Berechnungsgrundlagen, Schadstoffe)
- Berechnen der Emission für die Parameter:
  - Flugzeugemissionen (LTO cycle, aufgeteilt in 6 Phasen)
  - auxiliary power units (APU)
  - ground power units (GPU)
  - ground support equipment (GSE)
- Ergebnisanalyse und graphische Darstellung (siehe Abbildung 4)

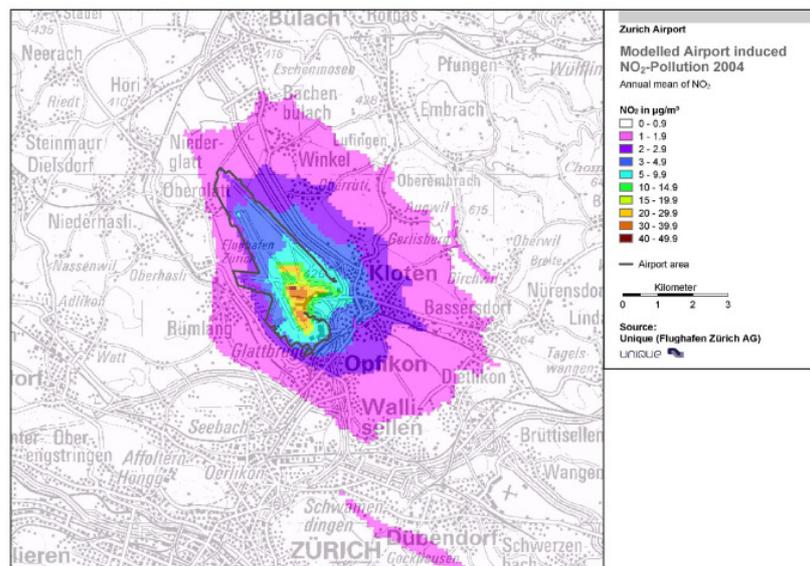


Abbildung 4: Beispieldarstellung von LASPORT [18]

Des Weiteren werden die Datenquellen zur Berechnung betrachtet. Die Flughafenszenarien können für LASPORT aus allgemeinen Verkehrsinformationen (scenario calculation) oder aus individuell angegebenen Flugzeugbewegungen gebildet werden. Für die Emissionsdaten dient die ICAO Engine Emissions Data Bank [19], worin den Flugzeugen kein bestimmtes Triebwerk zugeordnet wird, sondern dieses in eine technische Kategorie eingegliedert wird. Tabelle 2 zeigt hierzu ein Beispiel.

[TABLE.EMISSIONBASE.AC]							
Name	Technologie	Tracer	Unit	TakeOff	Clim- bOut	Appro- ach	Idle
Gross	tech-1	Fuel	kg/s	8,23E+05	6,49E+05	2,24E+05	7,62E+04
Gross	tech-1	NOX	g/kg	3,70E+06	2,86E+06	8,85E+05	3,51E+05
Gross	tech-1	HC	g/kg	3,69E+04	4,11E+04	9,00E+04	1,73E+06

Tabelle 2: Datengrundlage der Emissionen nach Kategorien (LASPORT) [17]

Zu den Userkonfigurationsmöglichkeiten ist zu sagen, dass die gewünschten Stoffe zur Darstellung ausgewählt werden können. Festzuhalten ist, dass LASPORT ein umfangreiches Tool ist, um die Ausbreitung von Abgasen nach deren Entstehung zu simulieren. Jedoch beruhen die Berechnungen der Emissionen und das Abbilden der Flugbewegungen im Szenario auf Durchschnittswerten und sind somit nicht detailliert genug [17].

Bei **EDMS** (Emission and Dispersion Modelling System) handelt es sich um ein weiteres Tool, um die Auswirkungen der Luftfahrt auf die Luftqualität im Flughafenbereich zu beurteilen. Entwickelt wurde EDMS von der United States Federal Aviation Administration (FAA) in Kooperation mit der United States Air Force (USAF). Im Folgenden werden die Funktionen der grafischen Auswertung beschrieben:

- Berechnungsprojekt mit Flugbewegungen erstellen
- EDMS liefert eine Emissionsdatenbasis, die manuell ergänzt werden kann
- Berechnen der Emission für die Parameter:
  - Flugzeugemissionen (LTO cycle aufgeteilt in 6 Phasen)
  - auxiliary power units (APU)
  - ground support equipment (GSE)
- Ergebnisanalyse und graphische Darstellung (siehe Abbildung 5)

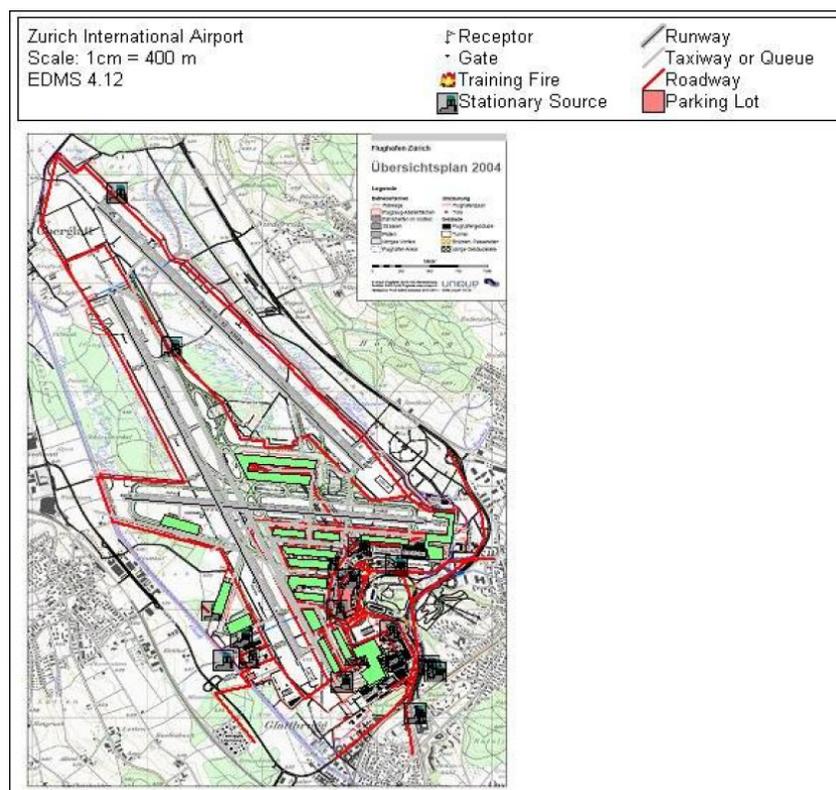


Abbildung 5: Flughafenlayout in EDMS [4]

Um ein Projekt mit EDMS modellieren zu können, muss zunächst die komplette Flughafeninfrastruktur erstellt werden. Dazu zählen unter anderem aktive Runways und deren Taxiways sowie Gates usw. Betrachtet man in EDMS einen Flug im LTO, so werden Standardzeiten für den Taxivorgang und die Warteschlangen festgesetzt. Weitere Zeiten in den Phasen im Flugprofil werden für Flugzeugkategorien, denen die Flugzeugtypen zugeordnet sind, vorgeschrieben. Des Weiteren müssen die Trieb-

werksdaten festgelegt werden, hier wird einer Flugzeugkategorie ein repräsentatives Triebwerk zugeordnet (siehe Tabelle 3). Dabei werden für die Emissionsindizes Durchschnittswerte von allen Flugzeugen einer Kategorie gebildet. Für die Ausbreitungsberechnung wird ein Gauß-Modell verwendet (AERMOD) [20]. Dazu müssen die Positionen der Emissionsquellen, die Emissionswerte und die meteorologischen Daten spezifiziert werden [20]. EDMS ist für US-Flughäfen vorkonfiguriert, dadurch sind einige Daten für den europäischen Raum nicht repräsentativ und müssten aufwändig angepasst werden.

Zurich Airport Data		EDMS Representation			
Aircraft Category	Movements	Aircraft	Engine	Classification	APU
Large Jet	10'031	B-747-400	PW4056	Large	PW901A
Medium Jet	15'512	A-330	PW4168A	Heavy	GCTP 331-350
Small Jet	128'162	A-320-200	CFM56-5B2/2P	Small	GTCP 85-129 (200HP)
Regional Jet	50'356	CRJ 200	CF34-3B	Small	GTCP 36-150R
Business Jet	12'264	Citation V	JT15D-5	Small	GTCP 36-150R
Turboprop	38'077	Dash8-400	PW123	Small	none
Piston Prop	11'480	Cessna 172	IO-320 DIAD	Small	none
<b>Total</b>	<b>265'882</b>				

Tabelle 3: Datengrundlage der Emissionen nach Kategorien (EDMS) [4]

Das dritte Werkzeug ist das Advanced Emission Model (**AEM3**). Es wurde von EUROCONTROL als Stand alone System<sup>4</sup> entwickelt. Flugprofile aus Luftverkehrsszenarien von unterschiedlichem Umfang (Studien) können mit AEM3 analysiert werden. Dabei können beispielsweise Ergebnisse darüber erzielt werden, wie viel Einsparungen verschiedene Maßnahmen zur Folge haben. Berechnet wird in AEM3 mit der ICAO Engine Emissions Data Bank (siehe [19]) für Flugoperationen im LTO unter 3000ft und über 3000ft mit BADA (siehe [21]), wobei 150 Flugzeugmuster abgedeckt werden können.

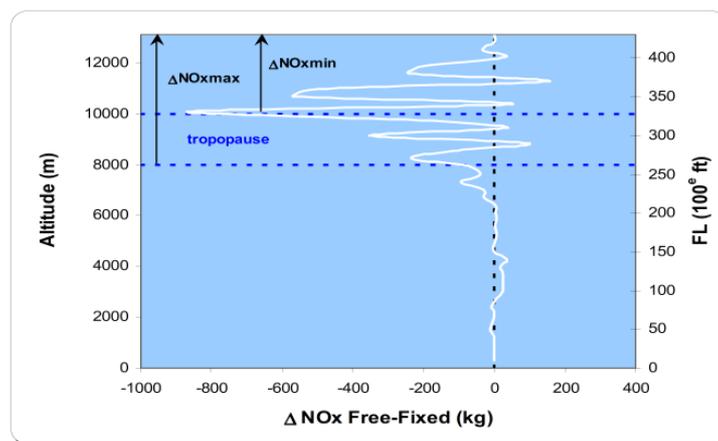


Abbildung 6: Ergebnisdarstellung in AEM3 [6]

Die dynamischen Daten werden durch die Flugszenarien beschrieben. Die Ergebnisdarstellung erfolgt mittels Diagrammen, wie oben dargestellt. Eine geographische Darstellung ist nicht integriert und kann nur mit externen Programmen wie z.B. ARC View GIS generiert werden. Dabei ist die graphische Darstellung durch Koordinaten begrenzt (minimale und maximale vertikale und horizontale Koordinate, Länge und Breite).

<sup>4</sup> Eigenständiges Programm, ohne weitere Zusatzsoftware benutzbar.

Die Darstellung von AEM3 bildet den Abschluss der Programmuntersuchung. Aus den erläuterten Eigenschaften soll nun die Erkenntnis gezogen werden, welche Eigenschaften in der Bachelorarbeit integriert werden können und sollen.

	Eigenschaften	LASPORT	EDMS	AEM3	EWMS
Daten	• Flugzeug ID	✓	✓	✓	✓
Flugbewegungen	• Departure Profil	-	-	-	✓
	• Arrival Profil	-	-	-	✓
	• Warteschlangen Zeiten	✓	✓	-	✓
	• Taxi Route	✓	✓	✓	✓
Daten	• direkte Zuordnung EI → AC	-	-	-	✓
Emissionen	• EI werden Kategorie zugeordnet	✓	✓	✓	✓
	• Hilfstriebwerk (APU)	✓	✓	✓	-
	• Ground Support Equipment (GSU)	✓	✓	✓	-
	• Emissionsindikatoren Reiseflug (BADA)	-	-	✓	-
Darstellung	• Integriertes Kartenlayout	-	✓	-	Status: Entwicklung
	• Ausbreitungsmodell in Atmosphäre	✓	✓	-	-
	• genaue Darstellung Flughafenlayout	✓	✓	-	Status: Entwicklung

Tabelle 4: Vergleich der Emissionsmodelle

Die Untersuchung sollte die Eigenschaften vergleichbarer Auswertungstools erarbeiten. Einige Eigenschaften werden in Tabelle 4 übersichtlich dargestellt und sollen als Ansatz für die Verbesserung und Erweiterung des Prototypen aus [3] herangezogen werden. Als Vorteil ist zu sehen, dass mit EWMS alle Flugbewegungen aus den Schnellzeitsimulationen detailliert zur Verarbeitung vorliegen. Das heißt, die Flugphasen sind in EWMS für jede Flugnummer individuell definiert. Im Gegensatz dazu wird in den anderen Modellen ein Standard-LTO-Zyklus verwendet. Des Weiteren kann durch die Informationen im Flugplan jedes Flugzeug identifiziert und ihm ein Triebwerkstyp zugeordnet werden. Der Prototyp ist im Bereich der Datenbasis und -berechnung ausgereift. Die anderen Modelle haben allerdings große Vorteile in der graphischen Darstellung der Ergebnisse, so dass sich in diesem Bereich die größten Erweiterungsmöglichkeiten des Prototypen ergeben.

Als Fazit kann gesagt werden: Die betrachteten und zum Teil getesteten Tools entsprechen nicht den spezifischen Anforderungen zur Bewertung von Simulationsszenarien im Institut für Flugführung. Es ist zum Beispiel keine Anbindung der Emissionsmodelle an die Simulatoren des Instituts möglich. Außerdem sind die detaillierten Daten der Simulationen in den Tools nicht abbildbar und es stellt einen erheblichen Aufwand dar, die Tools in die Institutstätigkeiten zu integrieren. In den vorangegangenen Kapiteln wurde ein Verständnis über die Umweltproblematik im Luftverkehr vermittelt. Die Stoffe CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, HC, SO<sub>2</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, H<sub>2</sub>O und der Feinstaub PM werden beim Verbrennungsvorgang von Kerosin emittiert. Durch Absorption und Reflexion der Sonnenstrahlen wirken sich die Stoffe trotz geringer Konzentration stark auf das Weltklima aus. Durch Maßnahmen im Flugmanagement (infrastrukturelle, strategische und operative Maßnahmen) kann der Einfluss der Luftfahrt auf die Umwelt verringert werden. Durch die Bachelorarbeit soll ein Werkzeug entwickelt werden, welches den Auswertungsprozess der Maßnahmen unterstützt. Die Ausarbeitung der Funktionalitäten von bereits entwickelten Tools zeigt notwendige Anforderungen an das Auswertungsprogramm auf. In den weiteren Schritten gilt es, die Erkenntnisse aus dem Kapitel auf die eigenen Entwicklungen anzuwenden.

## 4 Analyse und Entwurf

Eine klare Anforderungserhebung ist ein wichtiger Schritt zur Definition des Lösungsweges. Es werden Prioritäten gesetzt und Unklarheiten beseitigt. Deshalb wird in den nachstehenden Abschnitten erarbeitet, was das Produkt können soll. Dabei wird auch festgelegt, welche Einflussparameter in die Emissionsberechnung einfließen.

### 4.1 Identifikation von Erweiterungsmöglichkeiten des Prototypen

Der Prototyp bietet dem User die Möglichkeit, Schadstoffemissionen, welche über ein komplettes Simulationsszenario entstehen, zu berechnen und in Diagrammen darzustellen. Ausgehend vom Prototypen ist es für eine genauere Untersuchung jedoch notwendig, die raumbezogene Auswertung detaillierter zu gestalten. Das bedeutet, die Luftverkehrsbewegungen, resultierend aus den Simulationen, müssen feiner betrachtet werden. Durch das Auswerten von Emissionen auf einzelnen Streckenabschnitten können die ausgestoßenen Schadstoffe ortsbezogen berechnet werden.

Die funktionellen Anforderungen an das Auswertungsmodul sind im Folgenden übersichtlich in Funktionen abstrahiert und aufgelistet. Gegliedert sind die Funktionen nach dem EVA Prinzip (Eingabe -> Verarbeitung -> Ausgabe). Das Programm EWMS bietet über Schnittstellen bereits eine Datengrundlage mit Flugzeugtypen und Triebwerkstypen, dazu werden beim Starten externe Dateien in die EWMS-Datenbank geladen. Diese Funktionalität wurde bereits in vorangegangenen Entwicklungen [3] implementiert. Ausnahme hierbei sind Daten der APU. Die Auswertung der APU Emissionen ist noch nicht integriert und wird als Zusatz gesehen. Die kompletten Simulations- und Emissionsdaten befinden sich nach dem Starten von EWMS und Laden eines Szenarios in der internen EWMS Datenbank. Als Dateneingabe wird das Laden der benötigten Daten aus der EWMS-Datenbank in interne Datenstrukturen bezeichnet. In der folgenden Auflistung wird dargestellt, welche Daten für die Berechnung benötigt werden:

- E) Dateneingabe:**
- E1 – Laden des ACType<sup>5</sup>
  - E2 – Laden der JetEmission<sup>6</sup>
  - E3 – Laden der Simulationsdaten
  - E4 – Laden der TurboProp<sup>7</sup>
  - E5 – Flughafenlayoutdaten und Karte einlesen/laden
  - E6 – Laden der APU-Daten
  - E7 – Laden der GSE<sup>8</sup> Daten
  - E8 – Laden der meteorologischen Daten

Die Entwicklung des Emissionsreports wird über verschiedene Iterationen durchgeführt. Im Laufe des iterativen Entwicklungsprozesses sind unterschiedliche Anforderungen umzusetzen. Funktionalität E1 bis E5 sind in der ersten Iteration zu erfüllen. Nach der Fertigstellung des Zwischenproduktes wird eine Evaluation durchgeführt. Anschließend muss eine Nutzen- und Aufwandsschätzung für die weiteren Features gemacht werden um zu entscheiden, welche der Funktionalitäten E6 bis E8 in die Bachelorarbeit integriert werden sollen.

- V) Datenverarbeitung:**
- V1 – Links und Nodes<sup>9</sup> des Flughafens identifizieren
  - V2 – Zuordnung einer Flugphase zu jedem Link
  - V3 – Zuordnung des Triebwerkstyps zum Flugzeugtyp

<sup>5</sup> Aircraft Type (engl. Flugzeugtyp)

<sup>6</sup> Emissionswerte von Jet Flugzeugen (mit Strahltriebwerk)

<sup>7</sup> Kombination aus Turbine und Propeller

<sup>8</sup> GSE: Ground Support Equipment

<sup>9</sup> Links und Nodes, beschreiben die Streckenabschnitte und Knotenpunkte des Flughafens als Graph

V4 – Für jeden Link die Kraftstoff und Emissionsberechnung durchführen

**A) Datenausgabe:**

- A1 – Ausgabe und Darstellung der Kraftstoff- und Emissionswerte pro Simulation, Link, Phase, Flugzeugtyp, Durchschnittswerte (Tabelle)
- A2 – Diagramme für unterschiedliche Schadstoffe auf bestimmtem Links (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HC)
- A3 – Diagramme für verschiedene Links, Flugzeuge
- A4 – Visuelle Darstellung des Vorfeldes
- A5 – Zeichnen und Einfärben der Links z.B. mit Einheit [g/m]
- A6 – Darstellung der Hintergrundkarte

Auch die Funktionalitäten der Verarbeitung und der Ausgabe sind iterativ zu entwickeln. In der Entwicklung sollen zunächst alle Daten verarbeitet und die Ergebnisse berechnet werden. Im darauffolgenden Schritt sollen die Ergebnisse in eine Excel Tabelle exportiert werden. Das Ergebnis der nächsten Iteration soll das Flughafenvorfeld zeichnen. Funktionalität A5 soll die weitere Iteration abschließen. Alle bisher genannten Iterationen beinhalten Muss-Anforderungen an das Programm. Das Darstellen der Hintergrundkarte ist als Kann-Anforderung definiert und stellt die letzte Iteration dar.

## 4.2 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.

### 4.2.1 Räumliche Betrachtung

Es wird in der Aufgabenstellung der Bachelorarbeit 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 [22] 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 Abbildung 7). In diesen Phasen kann man, abhängig vom Flugzeugtyp (spezifischer Verbrauch) und der Zeitdauer der Flugphase, den Kerosinverbrauch berechnen (genauere Berechnungsvorschrift in Kapitel 4.6).

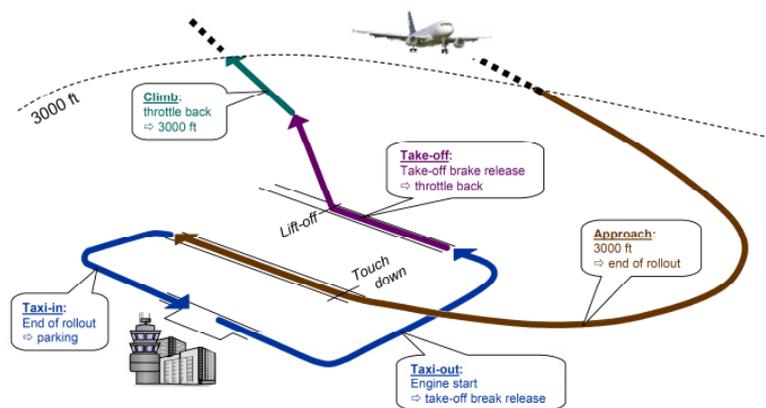


Abbildung 7: Der Standard LTO cycle [23]

## 4.2.2 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 units<sup>10</sup> 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.

## 4.2.3 Schadstoffarten

In ersten externen Projektanfragen haben sich folgende Stoffe herauskristallisiert, welche es zu untersuchen und zu berechnen gilt: H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, 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 (siehe Kapitel 4.2.1 und 4.5). 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 (siehe Abschnitt 4.5). Das heißt, es ist wichtig, in welcher Phase das Abgas berechnet werden soll, da jeder Phase eine Schubgröße zugeordnet ist (vgl. Kapitel 4.5). 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<sub>2</sub> 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 Phasen unabhängig bezeichnet.

### Phasenunabhängige Stoffe:

**H<sub>2</sub>O:** Emission von Wasser. Verwendet ausschließlich die konstante Rate von 1,237 kg Wasser/kg Kerosin (vgl. [24], Seite 21). Sie ist nur vom Kerosinverbrauch abhängig.

**CO<sub>2</sub>:** Verhält sich analog zu den Wasseremissionen. CO<sub>2</sub> ist nur vom Kerosinverbrauch abhängig mit konstant 3,15 kg CO<sub>2</sub> / kg Kerosin (vgl. [24], Seite 23).

**SO<sub>x</sub>:** Diese Emission lässt sich aus dem Sulfatgehalt im Kerosin herleiten. In einem berechneten amerikanischen Mittelwert beträgt der SO<sub>x</sub> Ausstoß 1 g / kg Kerosin (vgl. [25], Seite 39).

---

<sup>10</sup> Ground power units sind Fahrzeuge zur Energieversorgung von parkenden Flugzeugen.

### Phasenabhängige Stoffe:

**NO<sub>x</sub>:** Zu den so genannten Stickoxiden zählen viele verschiedene Stoffe, welche Stickstoff (Nitrogenium) enthalten. Im Zusammenhang mit dem Treibhauseffekt sind NO und NO<sub>2</sub> die wichtigsten Vertreter der Stickstoffe (zusammengefasst zu NO<sub>x</sub>, vgl. [26], Seite 5f).

**CO:** Kohlenstoffmonoxid entsteht bei der Verbrennung von Kerosin (vgl. [26], Seite 5).

**HC:** Zu HC-Emissionen sind alle Kohlenwasserstoffe zusammengefasst (C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>). Da Kerosin aus einem Gemisch von Kohlenwasserstoffen besteht, verbleiben auch nach der Verbrennung Kohlenwasserstoffe im Abgas (vgl. [26], 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, PM10 mit einem aerodynamischen Durchmesser<sup>11</sup> von 10 Mikrometern (10 µm) und PM2,5 (2,5 µm). Bei den vorliegenden Abgasuntersuchungen werden die zwei Feinstaubgrößen zu einem Feinstaubwert PM zusammengefasst (vgl. [26], Seite 6).

## 4.3 Datenquellen und Zuverlässigkeit

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.

JP	ICAO Codes	wake	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 5: Ausschnitt aus der Flugzeugdatenbank von ICAO [27]

<sup>11</sup> Ist die abstrakte Größe zur Beschreibung des Verhaltens eines Gas getragenen Partikel (siehe Anhang 2)

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

Tabelle 6: Ausschnitt aus der Triebwerksdatenbank von ICAO [19]

Für die Berechnung der Emissionen werden zwei weitere Datenquellen als Basis herangezogen. Die Flugzeugdaten (siehe Tabelle 5) beschreiben, welcher Flugzeugtyp welche und wie viele Triebwerke einsetzt. Hierfür wird eine Datenbank der ICAO gewählt (vgl. noiseDB12, Anleitung in [28]). Die zweite Datengrundlage ist eine Triebwerkstabelle (siehe Tabelle 6) der ICAO, welche alle verwendeten Triebwerke beinhaltet (vgl. ICAO Engine Emissions Databank13, Erläuterung in [19]). Die Struktur der Daten wird in Tabelle 5 und Tabelle 6 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.

## 4.4 Datenaufbereitung

Die Daten werden aus den verschiedenen Datenquellen mit Hilfe von Parsern in die Datenbank eingelesen und gespeichert. Nach dem Einlesen und Vorverarbeiten der Daten setzt sich die Struktur in der Datenbank aus sechs Tabellen zusammen (siehe Abbildung 8). Das Datenbankmodell ist nicht normalisiert. Da die Daten nicht verändert werden, können keine Inkonsistenzen auftreten. In der Triebwerkstabelle („Engine\_Table“) stehen Informationen über die einzelnen Triebwerke, die Emissionsindizes für die einzelnen Phasen, das Zertifizierungsjahr<sup>14</sup> sowie die Leistungsdaten. Die Definition der einzelnen Flugzeugtypen ist in der Aircraft\_Table festgelegt. Dazu gehören die eindeutige Bezeichnung nach ICAO Codes, Triebwerkstyp (Jet oder Turboprop), die Anzahl der Triebwerke und die Maße des Luftfahrzeugs.

Einem Flugzeugtyp können mehrere Triebwerke zugeordnet werden. Genauso kann ein Triebwerk in verschiedenen Flugzeugtypen eingesetzt werden. Aus den Simulationsszenarien resultieren die Einträge in den Tabellen „Flight\_Plans“ und „Flight\_Phases“. Diese Tabellen speichern den verwendeten Flugzeugtyp, die Flugphase und die Dauer der jeweiligen Phase. Die Relation beschreibt, dass einem Flugplan mehreren Flugphasen zugeordnet werden können. Auch die Tabelle mit den Knoten („Node\_Table“) und Links („Link\_Table“) werden mit den Informationen der Simulation gefüllt. Einer Flugphase können somit zwei oder ein Knoten zugeordnet werden. Phasen, denen nur ein Knoten zugeordnet ist, beschreiben einen Wartevorgang. Ein Streckenabschnitt muss immer aus zwei Knoten bestehen, Anfangs- und Endpunkt.

<sup>12</sup> Vgl. <http://noisedb.stac.aviation-civile.gouv.fr/index.html>

<sup>13</sup> Vgl. <http://www.caa.co.uk/default.aspx?catid=702>

<sup>14</sup> Zertifizierungsjahr ist das Datum der Triebwerkstests für die Kennwerte.

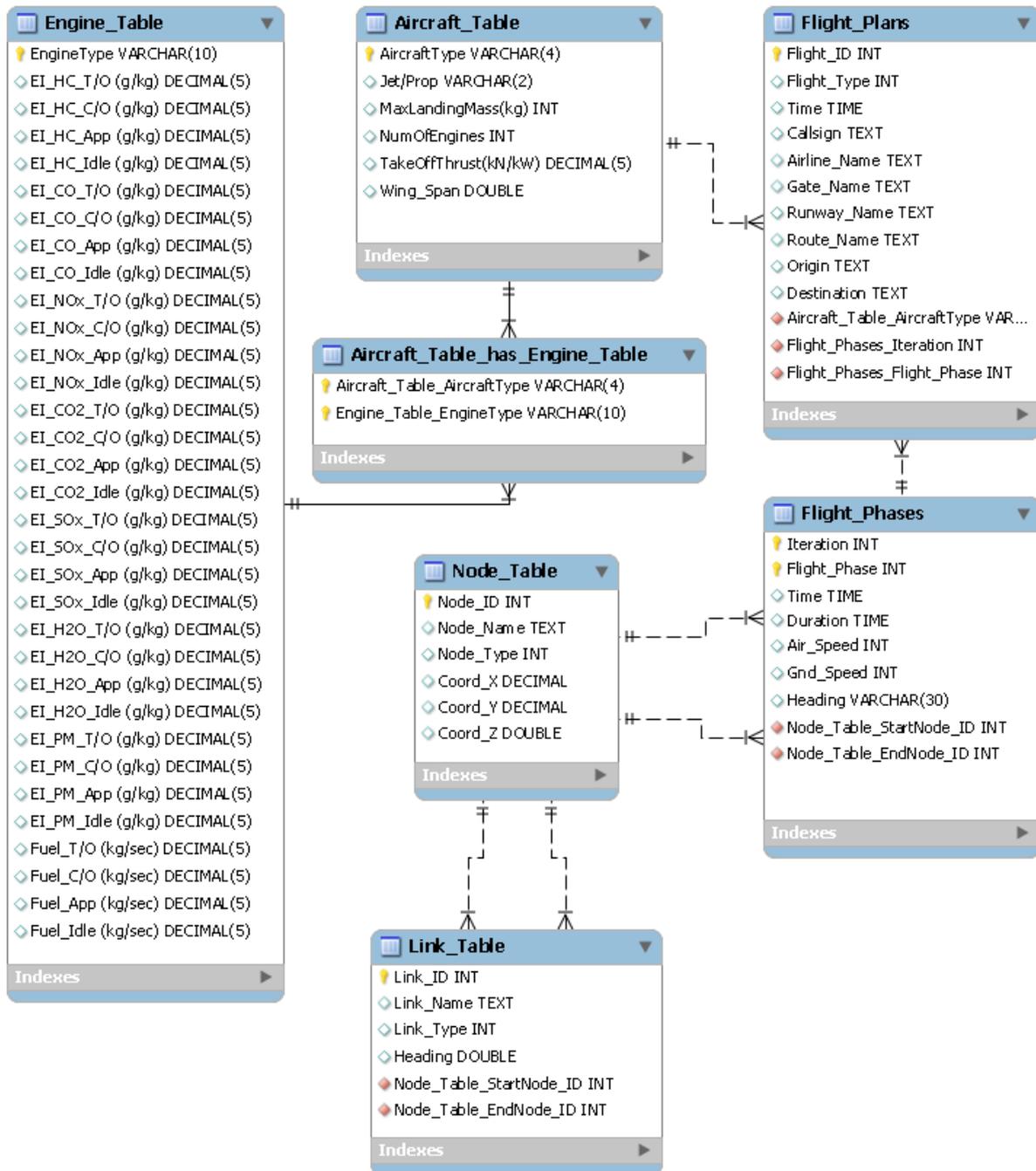


Abbildung 8: Datenbankstruktur

## 4.5 Fehlerabschätzung der betrachteten Werte

Die Berechnung soll mit ausreichender Genauigkeit sicherstellen, dass alle Faktoren, die einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis der Berechnung haben, berücksichtigt werden. Jedoch werden nebenläufige Einflüsse aufgrund fehlender Daten oder hohen Aufwandes in den Vorarbeiten ausgegliedert. Im Folgenden werden verschiedene Einflussfaktoren auf ihre Genauigkeit untersucht. Es ist an dieser Stelle anzumerken, dass die Ergebnisse von Emissionsberechnungen im Modell nur den theoretischen Verbrauch eines Fluges widerspiegeln. Für einige reale Einflüsse wie Wetter, Anzahl der Sitze an Bord und deren Besetzung, werden in den vorliegenden Studien lediglich europäische Mittelwerte angenommen.

### 4.5.1 Einflussfaktoren

**Flugzeugtyp:** Der Kraftstoffverbrauch hängt unter anderem vom Flugzeugtyp ab. Eine Unterscheidung erfolgt nach Jet- oder Propellerflugzeugen. Zusätzlich kann zwischen den eingebauten Triebwerken und deren Leistung unterschieden werden. Die Information über den Flugzeugtyp wird aus dem Simulationsszenario gewonnen.

**Phase:** Die Emissionsrate der betrachteten Stoffe hängt direkt vom Kraftstoffverbrauch ab. Dieser steht wiederum im Zusammenhang mit dem vom Piloten gewählten differenzierten Schub um das Flugzeug zu manövrieren. Da die gegebenen Daten keinen Rückschluss auf exakte Schubwerte zulassen, werden über den LTO vier Phasen mit jeweils spezifischen Schubeinstellungen nach [25], Seite 29 abstrahiert:

- Idle: 7 % Triebwerksschub
- Take Off: 100 % Triebwerksschub
- Climb Out: 85 % Triebwerksschub
- Approach mit 30 % Triebwerksschub

**Wind:** Im Start- und Landezyklus ist das Flugzeug immer den herrschenden Windverhältnissen ausgesetzt. Beim Start- und Landeverkehr wird für den jeweiligen Auftrieb eine bestimmte Geschwindigkeit des Flugzeugs zur umgebenden Luft benötigt. Somit wird bei Gegenwind eine geringere Geschwindigkeit über Grund (Erdfestes Koordinatensystem) für den Auftrieb benötigt. Dadurch ist die Dauer der Phasen länger und der Kraftstoffverbrauch nimmt zu. In [29] wird eine mittlere Anfluggeschwindigkeit von 130 bis 145 kt angenommen. Bei Gegenwind von 20 kt würde die Geschwindigkeit über Grund um 13 bis 15 % abnehmen und die Phase länger dauern. Somit kann bei der Simulationsmodellierung der Windfaktor mit einfließen und wird bei der Emissionsberechnung einbezogen (vgl. [16]).

### 4.5.2 Einflussgröße

Die Faktoren mit dem größten Einfluss werden aus Datenbanken der ICAO und EEC erfasst (vgl. Kapitel 4.3) und geben die Grundlage für die Berechnung. Die Datenquellen sind von den Organisationen wissenschaftlich geprüft und stellen den aktuellen Stand der Forschung dar. Da, wie zu Beginn der Arbeit erwähnt, einige Einflussfaktoren dem Aufwand- zum Nutzen-Faktor nicht gerecht werden, wurde in der Berechnung ein Kompromiss zwischen Genauigkeit, Datenerhebungs- und Berechnungsaufwand realisiert. Die Einflussfaktoren haben unterschiedliches Gewicht, wie auch in [16] beschrieben. Die Berücksichtigung der Faktoren und deren Gewichtung wird in Tabelle 7 dargestellt.

Bereich	Faktoren	Einfluss	Berücksichtigung bei der Berechnung
Flugzeug	Flugzeugtyp	Mittel ( $\pm 25\%$ )	Detailliert
	Triebwerkstyp	Mittel ( $\pm 25\%$ )	Mittelwert
	Zustand Flugzeug und Triebwerke	Gering ( $< 5\%$ )	Mittelwert
Phase	Spezifischer Treibstoffverbrauch in Abhängigkeit von Flugphase und Distanz (Taxi, Operational Towing)	Groß (50%)	Detailliert
	Warteschleifen	Gering ( $< 5\%$ )	Mittelwert
	Wetter (Wind, Temperatur)	Gering ( $< 10\%$ )	Nicht betrachtet

Tabelle 7: Einflussfaktoren

## 4.6 Berechnung der Schadstoffemissionen

Die grundlegenden Daten zur Berechnung wurden in Kapitel 4.3 „Datenquelle und -aufbereitung“ bereits umfangreich vorgestellt. Aus den Vorarbeiten des letzten Semesters sind die Datengrundlagen zu den Flugzeug- und Triebwerkstypen sowie die Berechnungsvorschriften für Treibstoff und Emissionen bereits in der EWMS Datenbank implementiert. In der aktuellen raumbezogenen Auswertung muss die Emissionsberechnung der Flugoperationen in feinere Abschnitte aufgeteilt werden, um die Abgasentwicklung auf den Streckenabschnitten abbilden zu können. Wie in Abbildung 9 zu sehen, kann die luftseitige Infrastruktur des Flughafens in Verkehrswege (Taxiways, Runways) und Knoten aufgeteilt werden. Das Auswertungsmodul soll die Abgase für jeden Streckenabschnitt berechnen und darstellen.

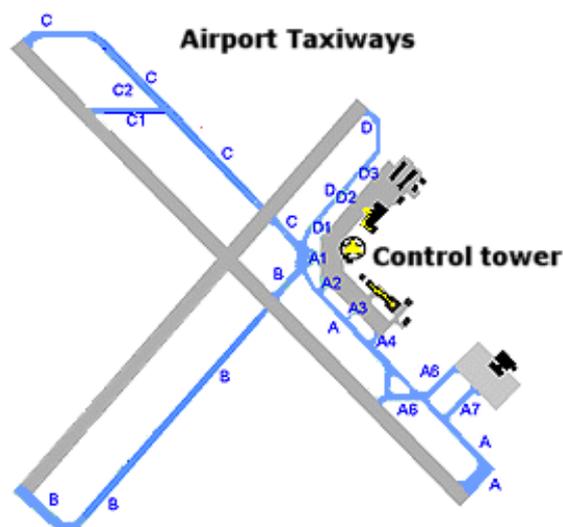


Abbildung 9: Flughafenlayout<sup>15</sup>

<sup>15</sup> Vgl. <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/83/Taxiways.png>

Dafür müssen die Flugbewegungen den Streckenabschnitten zugeordnet werden und die Emissionswerte berechnet werden. Das Verknüpfen dieser Daten und der Berechnungsalgorithmus werden im Folgenden erläutert (siehe Abbildung 10).

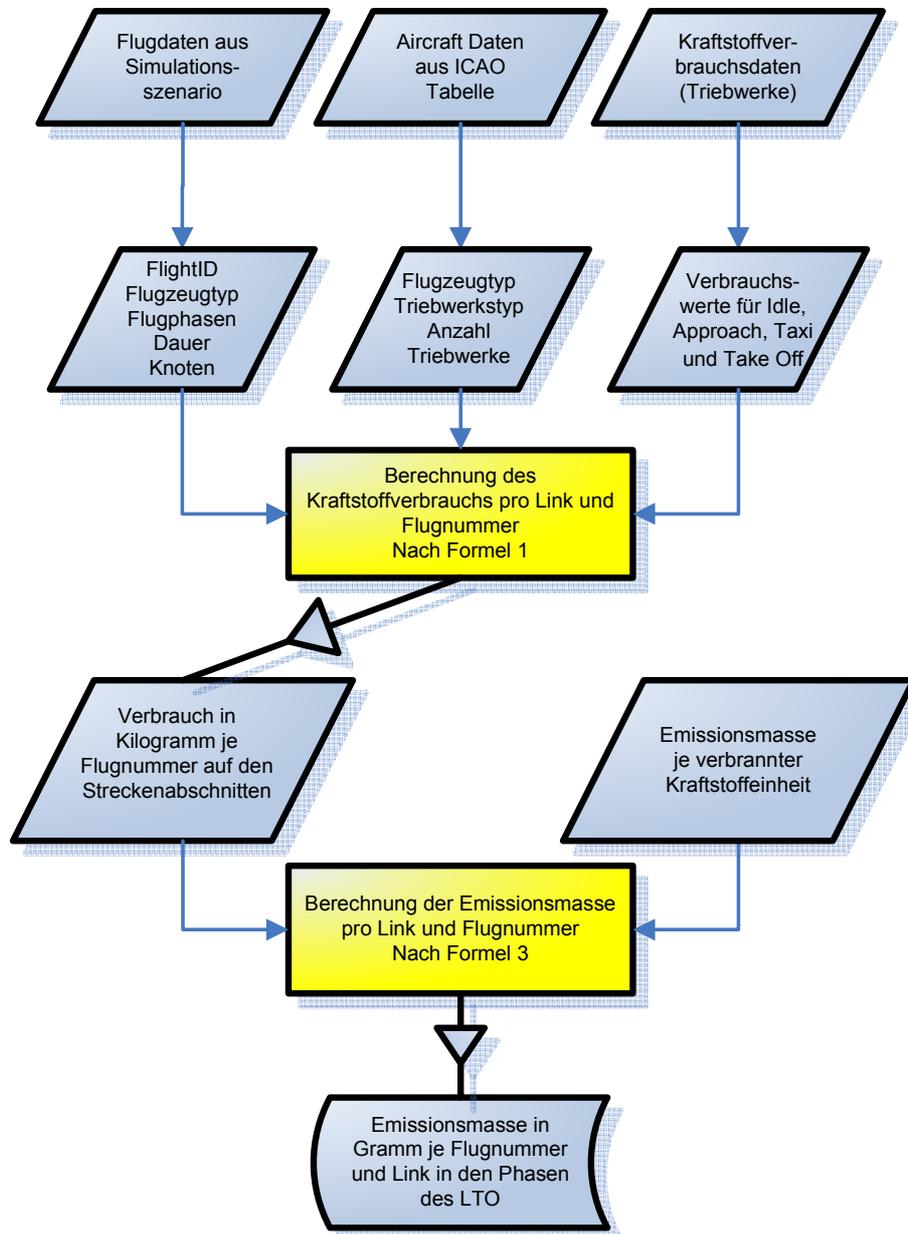


Abbildung 10: Flussdiagramm zur Berechnung der Emissionsmasse

Die Flugbewegungen aus der Simulation, die Flugzeugdaten (Tabelle 5) und die Kraftstoffverbrauchsdaten der Triebwerke (Tabelle 6) werden nach Formel 1 verknüpft.

### Berechnung Kraftstoffverbrauch:

- a = Aircraft
- n<sub>a</sub> = Number of Engines
- p = Flugphase
- e = Engine Type
- F<sub>p,e</sub> = specific Fuel burn in Phase for Engine [e]
- D<sub>p,a</sub> = 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

Nach Formel 3 wird im zweiten Schritt mit der spezifischen Emissionsrate die Emissionsmasse in Gramm einer Flugnummer in den Phasen des LTO berechnet. Bei diesem Berechnungsmodell war als spezielle Schwierigkeit zu beachten, dass ein Flugzeugtyp unterschiedliche Konfigurationen haben kann. Bei verschiedenen Versionen eines Flugzeugtyps kann unter anderem der Triebwerkstyp variieren. Die Simulationsdaten enthalten keine klare Zuordnung, welche Flugnummer mit welchem Triebwerk ausgestattet ist. In der Entwicklung wird deshalb eine Mittelwertsberechnung angewendet, um jedem Flugzeugtyp genau einen Kraftstoffverbrauchswert und Emissionsindex für Phase und Schadstoffart zuordnen zu können. Da diese Vorverarbeitung nicht zur eigentlichen Thematik der Emissionsberechnungsverfahren zählt und eine genaue Erläuterung den Rahmen der Bachelorarbeit überschreitet, wird an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen.

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. Aus dem berechneten Wert kann mit den Emissionsindizes der absolute Wert für die Schadstoffe gefolgert werden (siehe 2.2 Einflussgrößen zur Kraftstoff- und Emissionsberechnung). Der Emissionsindex ist angegeben in g/kg, d.h.  $x$  Gramm von Schadstoff  $a$  werden bei  $y$  Kilogramm Kraftstoffverbrauch emittiert.

### Berechnung Emissionsmasse:

- F<sub>a,n,p,D</sub> = Fuel burn in specific Phase, Aircraft, Number of Engines and Duration
- EI<sub>p,e</sub> = 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 ersten 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. Auf einem einzelnen Knoten werden beim Wartevorgang Abgase produziert. Das bedeutet, es gibt Emissionen, die einem Link zugeordnet werden können und es gibt Emissionen, die nur einem Knoten zugeordnet werden können. Daraus ergibt sich ein Problem für die Darstellung, welches in Kapitel 4.7 genau erläutert wird. Dazu ein Beispiel in Tabelle 8: In den Taxi-Phasen gibt es immer zwei Knoten (Start- und Endknoten), Wartephasen (z.B. das Entladen, blau hinterlegt) hingegen werden auf nur einem Knoten durchgeführt.

FlightID	Phase	startNode	endNode
1	TAXI	72	73
1	ARRIVAL_DEBARKATION	73	73
1	TAXI	70	71
1	TAXI	71	72

Tabelle 8: Link / Knoten Operationen

## 4.7 Graphische Darstellung der Emissionswerte

Ziel dieses Abschnittes ist es, eine Darstellungsmöglichkeit für Rollverkehrswege auf einem Flughafen zu entwickeln, die eine differenzierte Beschreibung der Abgasemissionen auf die Verkehrsanlage erlaubt. Die Darstellung soll das Verkehrswegesystem des Simulationsszenarios auf einer zweidimensionalen Karte abbilden.

### 4.7.1 Rollwege

Die notwendigen Informationen zum Flughafenlayout liefert das Simulationsszenario. In der Datenbank wird eine Tabelle mit allen vorhandenen Knoten gespeichert. Eine Verbindung zwischen zwei Knoten wird dann als Link, welcher auch in einer Datenbanktabelle gespeichert ist, bezeichnet. Die Koordinaten sind in Längen- und Breitengraden angegeben. Diese werden zur Konfiguration und zum Zeichnen der Flughafendarstellung herangezogen, um ein optimales Höhen- und Breitenverhältnis zu erreichen. Erste Ideen zum Zeichnen des Flughafenlayouts wurden durch Skizzen wie in Abbildung 11 festgehalten. Es zeigt ein einfaches Knoten-Link Netz mit den Bezeichnungen.

Im Programmablauf ist vorstellbar, dass für jeden Link nacheinander alle Flugdaten und Emissionsdaten aus den Datenbasen geladen werden und für diesen Link der Treibstoffverbrauch und die Schadstoffemissionsmasse berechnet wird.

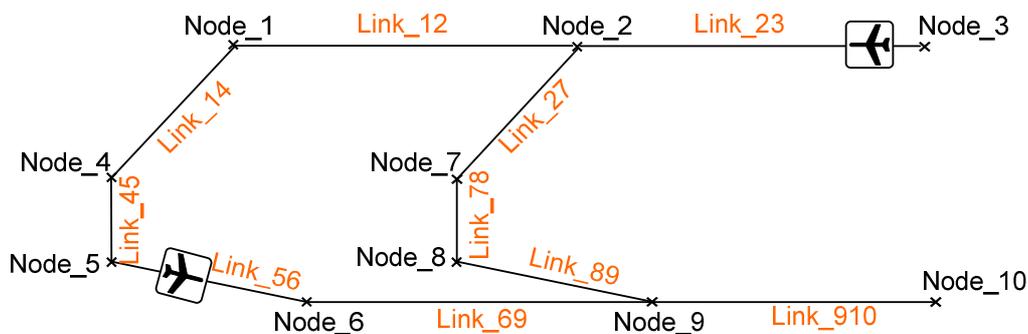


Abbildung 11: Skizze zur Darstellung des Flughafenlayouts

### Farbliche Darstellung:

Die berechneten Emissionen sollen auf der Karte farblich differenziert dargestellt werden. Um einen vergleichbaren Wert für die Emissionen zu bekommen, ist es wichtig, nicht den absoluten Schadstoffwert für einen Link anzugeben, da die Links eine unterschiedliche Länge haben. So ist die Überlegung, einen relativen Verbrauch bzw. eine Konzentrationsrate anzugeben. Im ersten Schritt soll durch das Verhältnis der Schadstoffmasse zur Länge des Links ein relativer Verbrauchswert in  $g/m$  angegeben werden. In weiteren Entwicklungen soll die Masse einer einheitlichen Fläche zugeordnet werden, so dass eine Konzentration in der Einheit  $g/m^2$  angegeben werden kann. Wie oben kurz angedeutet, stellt es ein Problem dar, wie Emissionen, die an einem Knoten beim Warten entstehen, in die farbliche Darstellung integriert werden können. Folgende Ansätze wurden ausgearbeitet:

- Die Emissionen an einem Knoten werden anteilig auf die angrenzenden Links aufgeteilt. Das bedeutet, der Absolutwert des Schadstoffs wird durch die Anzahl der angrenzenden Links dividiert und dann zu den Emissionsmassen der Links addiert. Dieses Verfahren ist mit geringem Aufwand umsetzbar, würde jedoch eine hohe Verfälschung der Linkemissionen zur Folge haben.
- Die Emissionen an einem Knoten werden als Absolutbetrag farbig und blasenförmig dargestellt. Durch diese Darstellung können die einzelnen Knoten gut miteinander verglichen werden. Außerdem ist diese Variante durch die Abgrenzung der Daten von den Linkemissionen mit relativ geringem Aufwand zu implementieren. Allerdings würde sich die Auswertung weniger intuitiv interpretieren lassen, da der Absolutwert des Knoten mit dem Relativwert der Links verknüpft werden muss.

In einem weiteren Ansatz werden die Links in äquidistante Abschnitte aufgeteilt. Die Emissionen an einem Knoten werden dann dem letzten Streckenabschnitt den das Luftfahrzeug passiert hat zugeordnet. Die Emissionen, welche an einem Knoten entstehen, würden dadurch sehr gut und realitätsnah zugeordnet. Durch die relative Angabe der Emissionen auf äquidistante Abschnitte können die Strecken intuitiv verglichen werden. Zusätzlich wäre die Umsetzung ein erster Entwicklungsschritt zur Rasterung des Flughafenlayouts auf ein Grid (siehe Abschnitt 4.7.2). Als Nachteil bei diesem Verfahren ist der extrem hohe Aufwand in der Umsetzung zu sehen.

Die berechneten Emissionen werden daraufhin farblich, wie unten in der Legende abgestuft, in die Darstellung eingezeichnet. In der Grafik soll, ähnlich zur Abbildung, eine Legende mit den Abstufungen der Konzentrationen integriert werden. Die farbliche Abstufung der Skala ist nur beispielhaft dargestellt und kann im Ergebnis von der Abbildung abweichen.

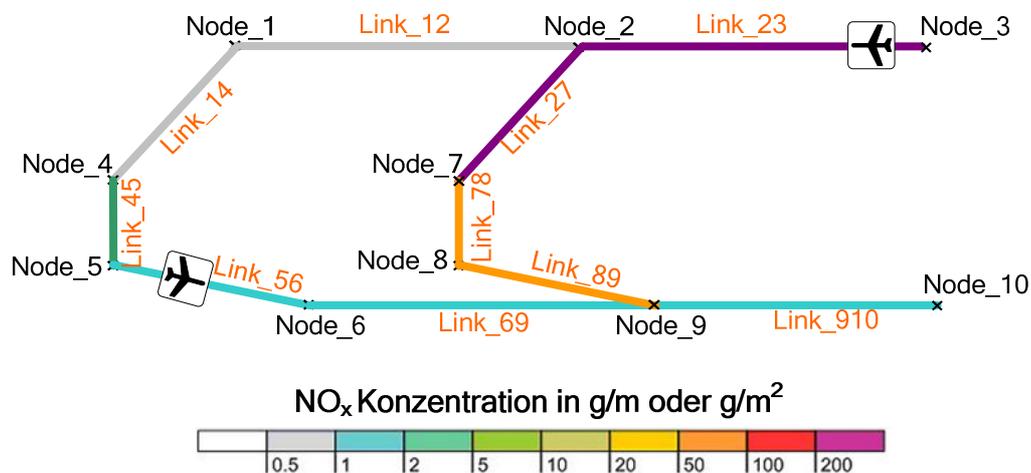


Abbildung 12: Farbliche Darstellung von Emissionen [17]

## 4.7.2 Rasterung von Linien

In diesem Abschnitt soll ein theoretisches Konzept entwickelt werden, welches die Darstellung des Flughafenlayouts auf einem Raster ermöglicht. Die Darstellung der Schadstoffemissionen auf Rasterflächen bildet die Realität noch etwas besser im Auswertungs-Modell ab. Dabei ist zu beachten, dass Emissionen nicht an einem Punkt entstehen, so dass eine eindeutige Linie bei Bewegungen entsteht, sondern durch die Anordnung der Triebwerke auf einer Tragfläche von bis zu 80 Metern Breite sowie den herrschenden Wettereinflüssen werden die ausgestoßenen Abgase auf einen gewissen Bereich verteilt. Um die Bewegungen der Luftfahrzeuge auf ein Raster abzubilden, wird von einer geraden Linie, die durch ihren Anfangs-  $(x_a, y_a)$  und Endpunkt  $(x_e, y_e)$  definiert ist, ausgegangen. Um die entstandenen Emissionen zu rastern, müssen die Bildpunkte entlang der Verbindungslinie bestimmt und mit entsprechenden Werten gesetzt werden. In der Informatik gibt es unterschiedliche Ansätze zur Rasterung. In diesem Konzept wird ein *brute force Algorithmus* angewendet. Dieser inkrementelle Algorithmus arbeitet mit der Steigungsform der Geraden  $f(x) = mx + B$ , nach [30]. Der Ablauf lässt sich folgendermaßen darstellen:

- Berechne die Steigung (nach [31])  $m = \frac{y_e - y_a}{x_e - x_a}$
- Starte von links (nach [30])  $y_i = mx_i + B$
- Setze den nächsten Punkt  $(x_i, \text{Round}(y_i))$

Dabei meint  $\text{Round}(y_i) = \text{Floor}(0.5 + y_i)$ <sup>16</sup>. Es wird dabei vorausgesetzt, dass die Felder des Rasters durch einen Wert mit der Schrittweite 1 indiziert sind.

So kann das nächste Rasterelement, welches die Linie schneidet, inkrementell über

$$y_{i+1} = mx_{i+1} + B = m(x_i + \Delta x) + B = y_i + m\Delta x$$

ermittelt werden, wobei durch eine Schrittweite von  $\Delta x = 1$  das Inkrement  $m\Delta x = m$  ist. Nach diesem Vorgehen würden alle Felder des Rasters identifiziert, welche von einem Link geschnitten werden. Diesen Feldern wird dann die auf diesem Link entstandene Emissionsmasse anteilig zugeordnet. Liegen die Emissionen in dieser Form vor, so kann der Einfluss von weiteren Parametern (z.B. Wind) auf das Raster abgebildet werden. Mit der Ausarbeitung dieses Verfahrens ist die erste theoretische Betrachtung abgeschlossen. Die Umsetzung und Implementierung sollen in weiteren Entwicklungsschritten, welche über diese Arbeit hinausgehen, untersucht werden.

## 4.7.3 Kartenlayout

Die Darstellung der Emissionswerte mit Hilfe des Knoten-Link-Netzes wird durch eine Hintergrundkarte des Flughafens realistischer und somit auch von Benutzern intuitiver verwendbar. Das Einbinden der Karte soll einige Anforderungen erfüllen. Es ist darauf zu achten, dass die Verwendung der Auswertung auch mit der Hintergrundkarte weiterhin flexibel ist. Jedoch soll durch einen weitestgehend automatisierten Prozess der Benutzerkomfort gewährleistet sein. Zusätzlich soll in den Überlegungen beachtet werden, dass auch Simulationsszenarien für Flugkonzepte, welche in ferner Zukunft liegen, erstellt werden und aktuelle Satellitenbilder nicht geeignet sind.

Für das Erstellen der Hintergrundgrafik wurden zwei Konzepte entwickelt, welche sich in der technischen Umsetzung unterscheiden. Der erste Ansatz beschreibt ein Verfahren, bei welchem aus einer Pixelgrafik und den Koordinaten ein statisches Bild, passend zum Flughafen erstellt wird. Durch den zweiten Ansatz kann eine dynamische Karte mit Hilfe einer Kartenbibliothek erzeugt werden.

<sup>16</sup> Floor() gibt die größte ganze Zahl zurück, die kleiner oder gleich dem übergebenen Ausdruck ist.

### Statische Darstellung:

Beim ersten Verfahren handelt es sich um die Positionierung einer Grafik als Hintergrund für das abstrahierte Flughafenlayout. Hierbei werden die Geodaten der Grafik durch Auszeichnungssprachen wie KML oder QGF beschrieben. **KML** befolgt die XML-Syntax und ist ein Standard des Open Geospatial Consortium. Mit KML-Dokumenten können *Placemark-Elemente* (z.B. Punkte, Linien oder Polygone) und *GroundOverlay-Elemente* (z.B. Luft- und Satellitenbilder) dargestellt werden [32]. In Quellcode 1 ist die Beschreibung eines *GroundOverlay-Elementes* dargestellt. Der `<Icon>` Tag beinhaltet den Link zu der .jpg mit der Hintergrundgrafik. Die Positionierung der Grafik ist durch den Tag `<LatLonBox>` beschrieben. Die Randkoordinaten sind durch die nördlichen und südlichen Breitengrade, sowie die östlichen und westlichen Längengrade gesetzt. Zusätzlich wird ein Rotationswert für Bilder angegeben, bei denen die Y-Achse nicht genordet ist.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<kml xmlns="http://www.opengis.net/kml/2.2"
xmlns:gx="http://www.google.com/kml/ext/2.2"
xmlns:kml="http://www.opengis.net/kml/2.2"
xmlns:atom="http://www.w3.org/2005/Atom">
<GroundOverlay>
  <name>Bild-Overlay ohne Namen</name>
  <color>8affffff</color>
  <Icon>
    <href>Flughafen.jpg</href>
    <viewBoundScale>0.75</viewBoundScale>
  </Icon>
  <LatLonBox>
    <north>53.65516877864251</north>
    <south>53.61601787461681</south>
    <east>10.00908310348634</east>
    <west>9.962458061808027</west>
    <rotation>-1.128650980860761</rotation>
  </LatLonBox>
</GroundOverlay>
</kml>
```

Quellcode 1: GroundOverlay-Element im KML-Format

**QGF** ist ein SIMMOD Format, mit welchem der Benutzer Grafiken für die Darstellung spezifizieren kann. In QGF beginnen die Elementbeschreibungen stets mit einem *OPEN*, gefolgt von der Bezeichnung des grafischen Objekts. Alle *OPEN* Kommandos werden am Ende durch ein *CLOSE* beendet. In dem Beispiel Quellcode 2 wird das grafische Element durch den Befehl *GIF\_LL\_SCALE longitude latitude altitude Above\_Below filename.jpg* eingebunden und beschrieben. Als Äquivalent zur KML Information werden die Bildgrenzen und die nördliche Ausrichtung durch die Koordinaten und einen Rotationswert angegeben. Der Parameter B definiert, dass das Bild hinter allen weiteren Elementen angezeigt wird.

Zum Einbinden der KML- bzw. QGF-Dateien könnte der Benutzer über eine EWMS-Funktion die gewünschte Datei aus einem Verzeichnis auswählen und einbinden.

**OPEN JPG\_LAYER**

**GIF\_LL\_SCALE** 9.962458061808027 53.65516877864251 10.00908310348634  
53.61601787461681 -1.128650980860761 **B** Flughafen.jpg

**CLOSE**

Quellcode 2: Grafisches Element im QGF-Format

### Dynamische Darstellung:

Ansatz zwei konzipiert eine Möglichkeit, bei der ein Bild aus einer online verwalteten Landschaftskarte dargestellt wird. Technologien und Services zur Darstellung und Integration von Karten in Applikationen haben sich in den letzten Jahren stark verbreitet. Als frei verwendbarer Service für Applikationen wurde ein Ansatz zur Verwendung von **OpenStreetMap** entwickelt. Das Projekt wurde 2004 gegründet, sammelt frei verfügbare Geodaten und stellt sie unter der Creative Commons Attribution-ShareAlike 2.0 Lizenz zur Verfügung. Die Daten von OpenStreetMap können auf vielfältige Weise in eigene Anwendungen integriert werden, auch der Zugriff aus einer klassischen Java / Swing Desktopanwendung heraus mit *JXMapView* ist möglich. *JXMapView* ist ein Projekt von *Swinglabs*<sup>17</sup>. Von *Swinglabs* lädt man sich das Paket **SwingX-WS** herunter und fügt die darin enthaltenen Bibliotheken dem Classpath des Projektes hinzu. Mit Hilfe von *JXMapView* wird letztlich ein spezialisiertes *JPanel* erzeugt, welches die Möglichkeit besitzt, Kacheln von Mapservern zu laden. Aus dieser Ansicht lässt sich ein *BufferedImage* erstellen, welches durch die Randkoordinaten des Flughafenlayouts begrenzt ist und anschließend als Hintergrundgrafik dargestellt wird.



Abbildung 13: Flughafen Braunschweig in OpenStreetMap

Es wurden in diesem Abschnitt zwei Konzepte erarbeitet, welche sich in Aufwand und technischer Umsetzung unterscheiden. Durch den ersten Ansatz hat der Benutzer die Möglichkeit, seine Grafik frei zu wählen und zu konfigurieren, so dass sich ein erhöhter Aufwand durch manuelle Konfiguration des Benutzers ergibt. Außerdem ist durch den ersten Ansatz die Aktualität nicht gegeben. So kann es vorkommen, dass sich das Luftbild des Flughafens seit einiger Zeit geändert hat, die Grafik allerdings noch die veraltete Version anzeigt. Im zweiten Konzept wurde eine Möglichkeit vorgestellt, welche das Laden einer Hintergrundkarte von Mapservern ermöglicht und diese automatisch skaliert. Dabei stellte

<sup>17</sup> <http://swinglabs.org/>

sich ein entscheidender Nachteil heraus: Die Lizenzen lassen eine Benutzung in einem kommerziellen Umfeld nur mehr oder weniger eingeschränkt zu. Weitere Nachteile sind bei Flughafenstrukturen, welche es in der Realität noch nicht gibt, zu sehen. Außerdem muss bei der Generierung eine Verbindung zum Mapserver vorhanden sein. Um die Flexibilität des Benutzers zu gewähren und auch das Laden fiktiver Flughafenbilder zu ermöglichen wird in dieser Arbeit der statische Ansatz zur Darstellung einer Hintergrundgrafik verfolgt.

## 5 Implementierung

Eine Auswertung ist im Allgemeinen von zwei Parametern abhängig. Durch den Input wird bestimmt, welche Daten betrachtet werden sollen. Der Output bestimmt, welche Daten vom User erwartet werden. Das kommende Kapitel beschreibt einige interessante Gesichtspunkte bei der Umsetzung von Input Daten in Auswertungsergebnisse. Dabei wird bewusst auf detaillierte Codebeispiele verzichtet, um den Softwareablauf der gesamten Problemlösung abstrahieren zu können. Somit soll mit diesem Kapitel ein Eindruck der technischen Umsetzung verschafft werden.

### 5.1 Software-Architektur

In Abbildung 14 wird der Kern des Auswertungsmoduls in Form eines Paket-Diagramms dargestellt. Erweiterungsmodule und Komponenten, die das EWMS zur Verfügung stellt, werden nicht betrachtet. Um den Report möglichst modular und somit wartbar, erweiterbar und austauschbar zu gestalten, wird Architektur durch Komponenten zerlegt. Bei der Definition der Komponenten wird darauf geachtet, dass diese möglichst zusammenhängende Funktionalität übernehmen, sodass die Funktionalität des Systems durch das Austauschen einer Komponente erweitert bzw. geändert werden kann [33]. Weiterhin soll es möglich sein, weitere Funktionalität durch neue Komponenten einzubinden, ohne dass der vorhandene Code der Anwendung verändert werden muss.

Auswertungsmodule im *EWMS-Projekt* sind im Paket *src.dlr.ewms.report* implementiert (siehe Abbildung 14). Dabei ist eine weitere Anforderung im Projekt, auswertungsspezifische Hilfsklassen in eigene Unterpakete auszugliedern. Für den Emissionsreport wurde deshalb ein Paket *emission* angelegt. Das *emission-Paket* dient in der Architektur als Fachkomponente. In diesem Paket sind alle funktionalen Anforderungen zur Durchführung der Emissionsanalyse implementiert. Um die Funktionalität von der persistenten Komponente zu trennen, ist das Paket in *emission.util* und *emission.datatypes* gegliedert ist. Operationen, welche als fachliche Hilfsfunktionen der Emissionsauswertung aufgerufen werden, sind dem Paket *emission.util* zugeordnet. In *emission.datatypes* werden die Entitäten abgebildet. Die Pakete *report.panel* und *report.util* beinhalten Hilfsfunktionen für alle Auswertungsmodule und dienen zur Darstellung der Reportinformationen (z.B. Konfigurationen). Die Schnittstelle zum EWMS wird über die abstrakten Klassen *EWMSMapReport* und *EWMSReport* realisiert. Die Hauptkomponente des Emissionsreports ist die Klasse *EmissionMapReport*, sie koordiniert den internen Ablauf der Auswertung (siehe Abbildung 15).

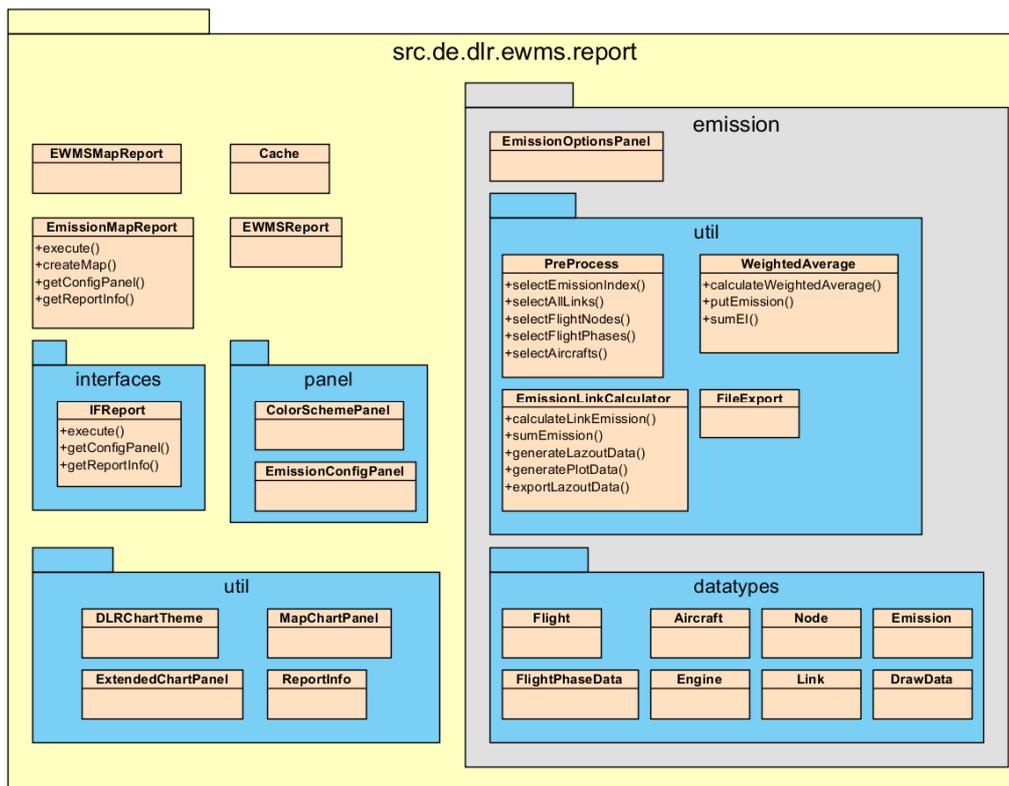


Abbildung 14: Paketdiagramm des Auswertungsmoduls

Das Sequenzdiagramm in Abbildung 15 stellt in der rechten Lebensspalte die Aktionen, welche bei einer Auswertung gestartet werden, dar. Die internen Prozesse finden jedoch nicht in der Klasse *EmissionMapReport*, sondern durch Delegation statt und sind in den Hilfsklassen implementiert. Im ersten Schritt nach dem Starten des Reports müssen die benötigten Daten aus der Datenbank geladen und in geeigneten Datenstrukturen gespeichert werden. Das Laden der Daten wird durch die Klasse *PreProcess* implementiert und der Datenbankzugriff über die *Cache*-Klasse koordiniert. Die *Cache* Klasse bietet Hilfsfunktionen, die nicht reportspezifisch sind, in welcher die ausgeführten Datenbankabfragen zwischengespeichert sind und bei wiederholtem Ausführen nicht neu geladen werden müssen.

Die Funktionen zur Berechnung der Emissionen pro Link sind in der Klasse *EmissionLinkCalculator* umgesetzt, dabei muss zusätzlich der Mittelwert der Triebwerksdaten in *WeightedAverage* gebildet werden. Da verschiedene Auswertungen eine Hintergrundkarte zur Darstellung benötigen, wird das Einlesen der Grafik in der abstrakten Klasse *EWMSMapReport* zur Verfügung gestellt. Auch das Plotten von farbigen XY-Linien wird von *EWMSMapReport* implementiert. Dafür wird vom *EmissionMapReport* eine Datensammlung mit Links und zugehörigen Emissionswerten übergeben. Die generierte Karte wird über die Schnittstellen an das EWMS übergeben und über die Benutzerschnittstelle zur Verfügung gestellt.

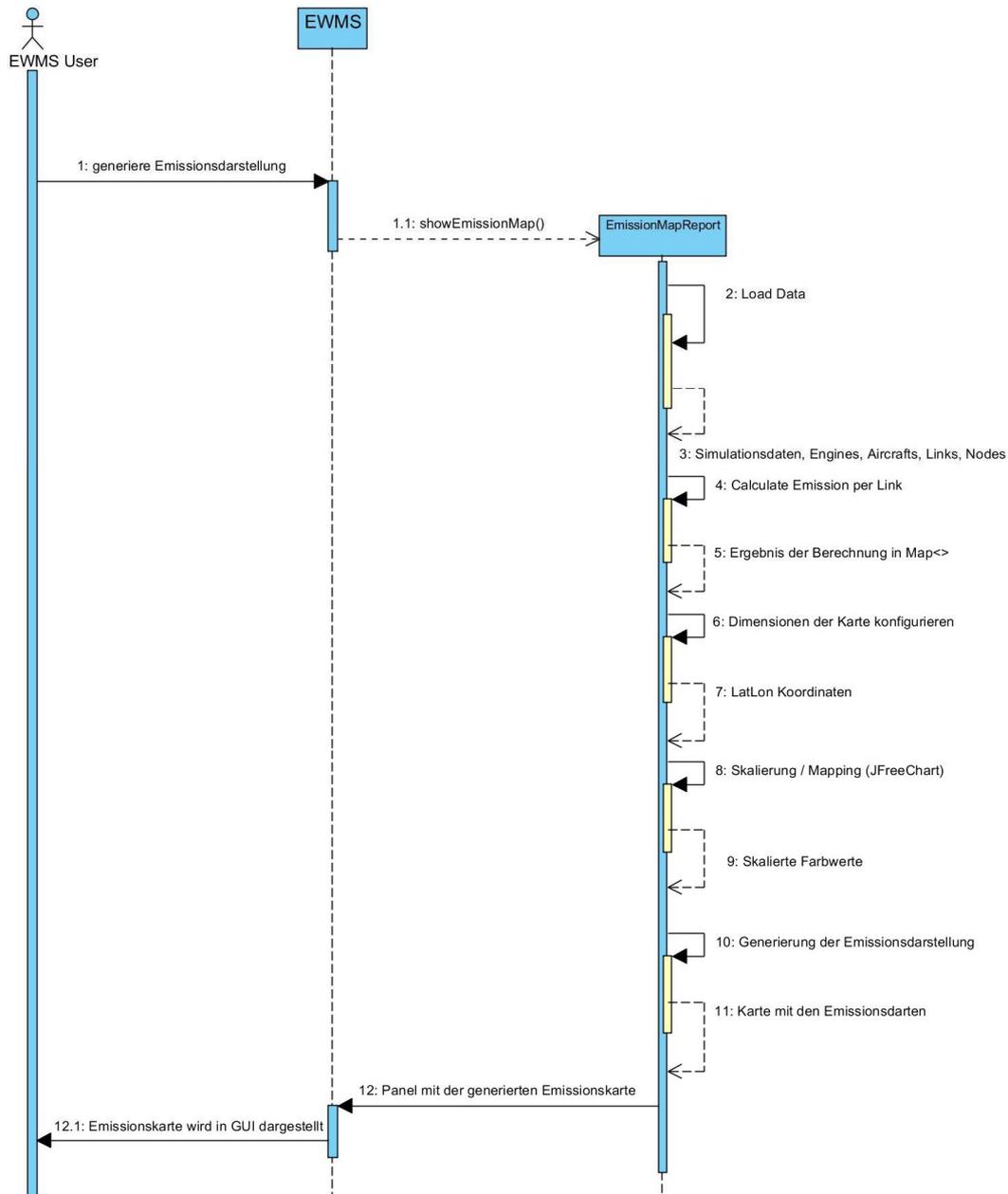


Abbildung 15: Sequenzdiagramm des EmissionMapReport

## 5.2 Datahandling

Nach dem Starten des *EmissionMapReport* wird die Klasse *PreProcess* aufgerufen. EWMS implementiert eine Hilfsklasse zum Erzeugen von SQL-Statements, einen so genannten *Statement Builder*. Durch Funktionen des *Statement Builder* werden Select Statements ausgeführt und alle benötigten Informationen aus der *EWMS-Datenbank* geladen, und anschließend miteinander verknüpft sowie in interne Datenstrukturen (siehe *datatypes-Paket* in Abbildung 14) gespeichert. Ziel dieses Abschnittes ist es, einen Einblick zu geben, welche konkreten Daten für die Berechnung aus der Datenbank gelesen werden. Da jedoch eine detaillierte Analyse der Statements zu weit geht, wird entsprechend auf die Anhänge verwiesen. Zusätzlich kann Abbildung 8 auf Seite 21 hilfreich für das Verständnis der Beschreibung sein. Alle Daten werden einzeln aus den Datenbanktabellen gelesen, dadurch kann die Anforderung, Zwischenergebnisse zu generieren und zu exportieren, einfacher umgesetzt werden.

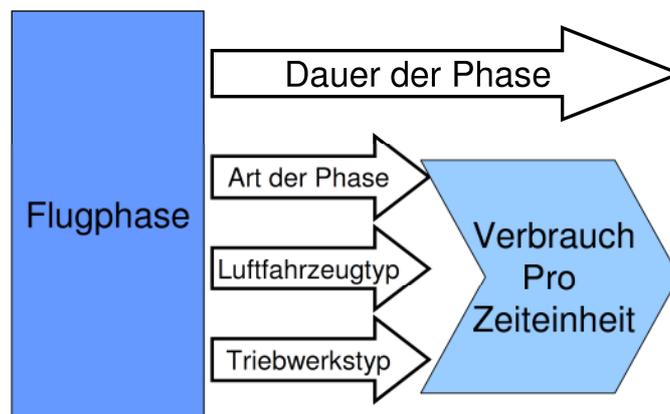


Abbildung 16: Benötigte Daten

### Flugphasen:

Die Informationen zu den Flugbewegungen der Simulation sind verfeinert bis hin zu den einzelnen Flugphasen. Aus der Datenbank werden für jeden Flug die Daten FlugID, Flugzeugtyp, Flugphasen, Dauer der Flugphase und Strecke der Flugphase geladen. Dabei wird ein Join der Tabellen *Flight\_Plans* und *Flight\_Phases* mit dem Selektionsattribut *FlightID* durchgeführt (siehe *doFlightNoQuery* Anhang 4).

### Flughafeninformationen:

Auch die Informationen zu dem Flughafenrollfeld werden einzeln gelesen. Aus der *Link\_Table* werden *Link\_Name* und die Start- und Endpunkte geladen. Um die Position der einzelnen Nodes zu identifizieren, werden die x-, y- und z-Koordinaten aus der *Node\_Table* gelesen (siehe *doLinksQuery* und *doNodesQuery* in Anhang 4).

### Flugzeuginformationen:

Zur Spezifizierung des Flugtyps im Flugplan, werden Flugzeugtyp und Anzahl der Triebwerke zu jeder FlugID selektiert. Dabei wird ein Join über *Aircraft\_Table* und *Flight\_Plans* mit dem Vergleich des Flugzeugtypen durchgeführt (*doIDAircraftsQuery*). Außerdem wird zur Mittelwertsberechnung die Zuordnung der Triebwerke zu den Flugzeugtypen benötigt. Dies erfolgt durch einen Join der *Aircraft\_Table* und *Engine\_Table* (siehe *doAircraftsEngineQuery* in Anhang 4).

### Triebwerksinformationen:

Zu den Triebwerken werden zu jedem Triebwerk alle Informationen zu den Kraftstoffverbrauchswerten und den Schadstoffemissionswerte benötigt, sowie das Zertifizierungsjahr der Triebwerkstests (siehe *doEmissionIndexQuery* in Anhang 4).

### 5.3 Berechnung der Schadstoffemissionen

Bei der Berechnung der Kraftstoff- und Emissionsmenge pro Streckenabschnitt muss über eine switch-Struktur die Flugphase identifiziert werden, da die Emissionsraten für die Phasen unterschiedlich sind (siehe Einflussfaktoren). Steht fest, mit welcher Dauer sich das Flugzeug in der Phase bewegt, kann wie unten abgebildet, der Wert berechnet werden.

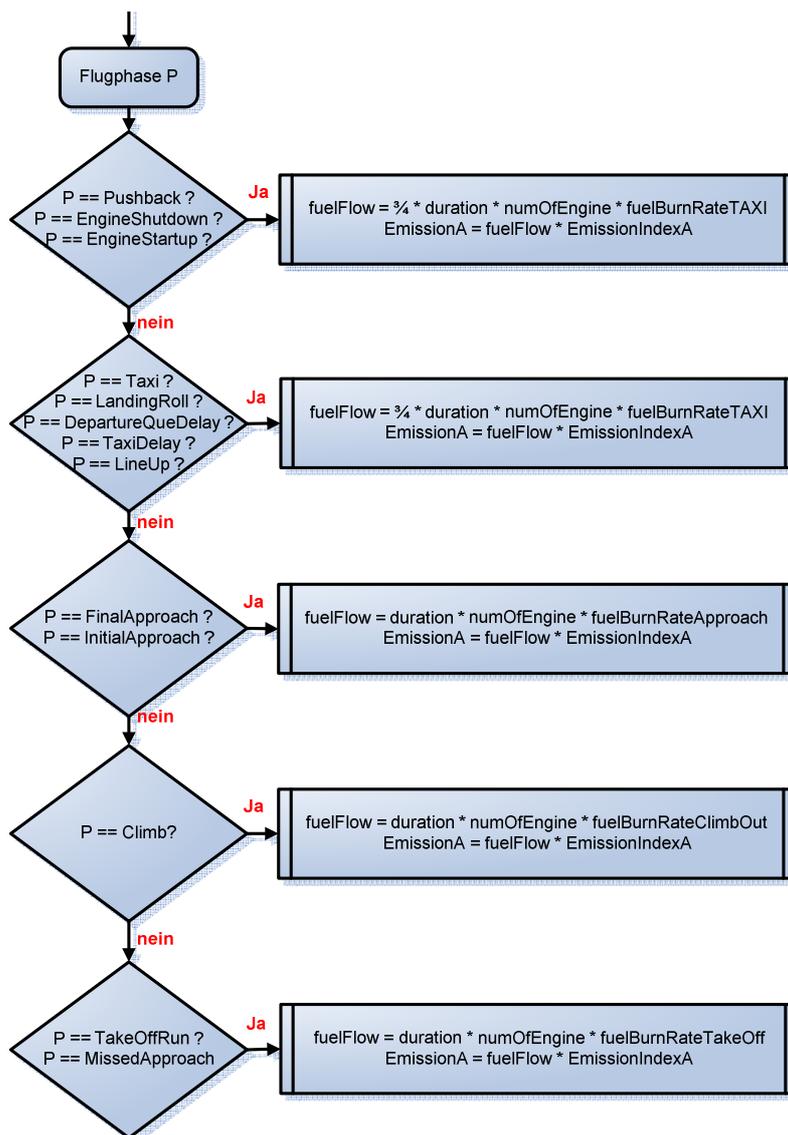


Abbildung 17: switch – Struktur zur Berechnung der Werte

## 5.4 Schadstoffemissionswerte

Die Ergebnisse aus den Berechnungen in Abschnitt 5.3 werden in einer *HashMap* zwischengespeichert. Der Link- und Knotenname wird als Datentyp String und der Emissionswert als Datentyp Double gespeichert (siehe Abbildung 18). Anschließend werden diese Werte durch die Länge der Links normalisiert, um, wie bereits beschrieben, einen vergleichbaren Verbrauchswert in g/m zu erhalten.

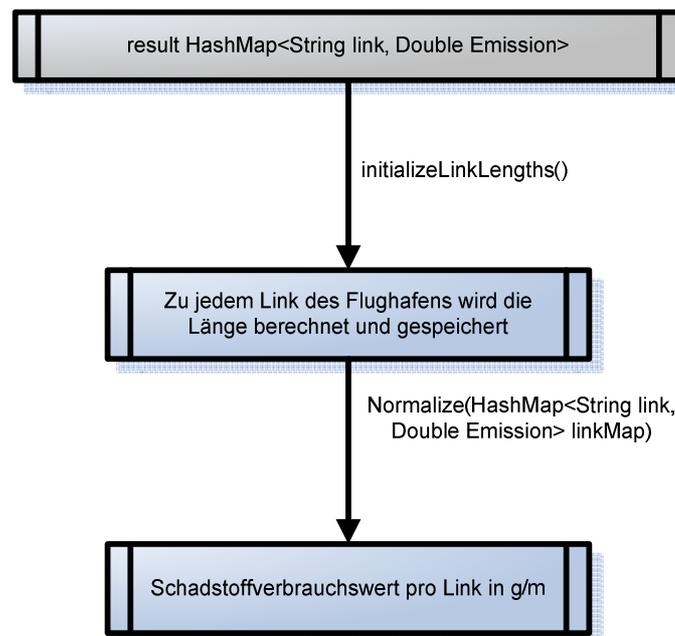


Abbildung 18: Datenstruktur der Ergebnisse

## 5.5 Darstellung mit JFreeChart

In der Softwareumgebung von EWMS ist für die Darstellung von Diagrammen das Framework JFreeChart<sup>18</sup> als Standard festgelegt. JFreeChart ist ein Framework für die Programmiersprache Java. Die Bibliothek verfügt über Methoden zum Erstellen von komplexen Diagrammen. Ein weiterer Vorteil ist der einfache Export als PNG, JPG oder auch PDF-Grafiken. Das EWMS stellt über die Klasse EWMSMapReport (siehe Abbildung 14) Methoden zur Verfügung, die den XYLineAndShapeRenderer von JFreeChart implementieren. Mit Hilfe dieses Renderers werden Datenpunkte mit einer Linie verbunden. Die resultierende Datensammlung kann dann mit der Klasse XYPlot gesetzt und dem JFreeChart Objekt hinzugefügt werden. Nach den Berechnungen wird das Diagramm im Report-Panel dargestellt.

<sup>18</sup> <http://www.jfree.org/jfreechart/>

## 6 Anwendungsbeispiel und Bewertung der Ergebnisse

Die Entwicklung der Emissionsauswertung erfolgte iterativ. Nach der Umsetzung der Funktionalität wurden die Resultate durch Tests mit Experten aus der Abteilung logisch evaluiert. Um den Nutzen der Arbeit zu verdeutlichen, werden der Einsatz der Software und die Ergebnisse in diesem Kapitel anhand eines Beispiels präsentiert. Die Darstellungen und Ergebnisse im Beispiel basieren auf einem internen DLR-Projekt, bei dem ein fiktiver Flugbetrieb simuliert wurde. Somit sind die erörterten Ergebnisse nicht repräsentativ für den heutigen realen Betrieb auf dem gezeigten Flughafen.

### 6.1 Anwendungsbeispiel

Aufgabe dieses Abschnittes ist es, eine Anwendung der Emissionsauswertung in der EWMS-Umgebung zu demonstrieren und die einzelnen Schritte zu beschreiben. Diese Beschreibung dient zur Zeit auch als Benutzerführung und soll zeitnah in das Benutzerhandbuch von EWMS integriert werden.

#### Einstellungen:

EWMS bietet im Startbildschirm die Auswahl der Simulationsumgebung an, da Ergebnisse verschiedener Simulatoren eingelesen werden können. Im Konfigurationsfenster kann durch Eingabe des Benutzernamens, Passworts und Serveradresse eine Serververbindung hergestellt werden (Abbildung 19). Auch eine lokale Projektbearbeitung ist möglich. In den weiteren Einstellungsfunktionen werden Sprache und der Pfad des Simulationsprojektes eingestellt (Abbildung 20).

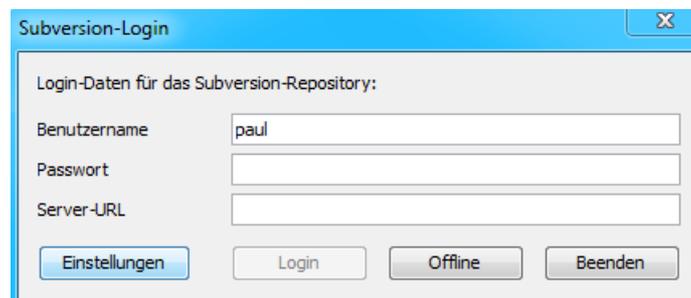


Abbildung 19: Login-Fenster

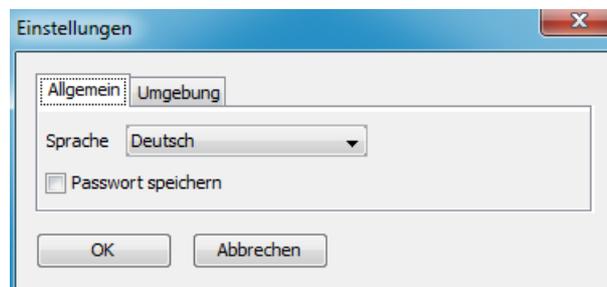


Abbildung 20: Einstellungs-Fenster

#### Projekt laden:

Das Hauptfenster von EWMS ist in zwei Bereiche strukturiert (siehe Abbildung 21). Am linken Rand sind die einzelnen Tabs, die den Arbeitsfluss von links nach rechts beschreiben. Im Tab Projekte sind die Simulationsstudien des Projektpfades aufgelistet. Das Laden der Simulation in die Datenbank erfolgt mit der rechten Maustaste. Nach erfolgreichem Laden ist der Projektordner mit einem grünen Haken markiert.

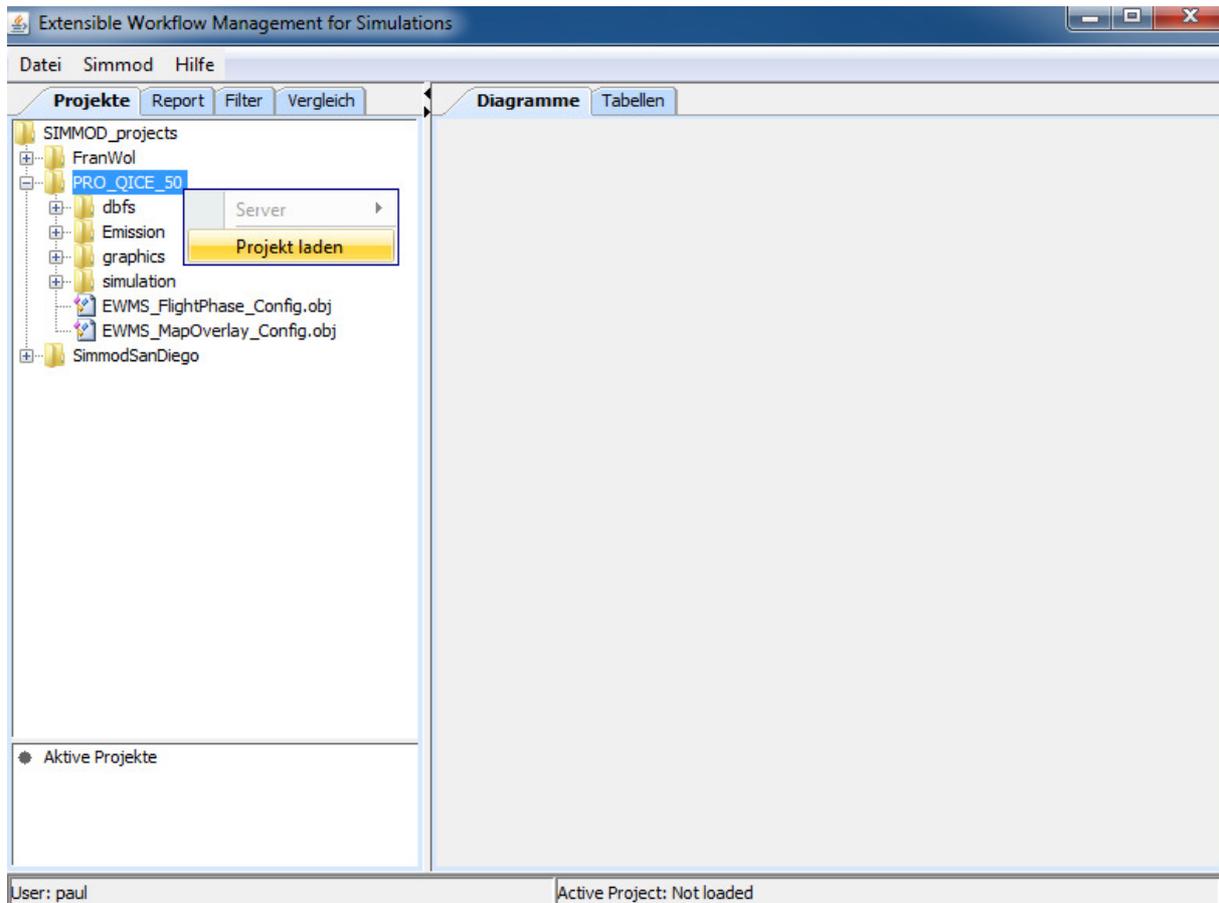


Abbildung 21: Hauptfenster EWMS

### Auswahl des Report:

Nach dem Laden des Simulationsprojekts folgt im Arbeitsfluss die Auswahl der Reports. Die Report-funktionen sind wie in Abbildung 22 zu sehen in einem eigenen Tab aufgelistet. Durch eine hierarchische Darstellung sind die verschiedenen Auswertungen in Kategorien unterteilt, was diesen Arbeitsschritt deutlich übersichtlicher macht. Im Auswertungsverzeichnis /Emission/Map sind alle wählbaren Darstellungen für die Emissionen aufgelistet. Nach der Auswahl eines Schadstoffs wird die Berechnung gestartet und das abstrakte Rollfeld des Flughafens gezeichnet.

Zum Einbinden einer Hintergrundkarte kann über die Funktionen durch das klicken der rechten Maustaste die Beschreibungsdateien im KML- oder QGF-Format nach dem Ansatz aus Kapitel 4.7.3 ausgewählt werden. Weitere Emissionsreports im Verzeichnis /Emission/Mittelwerte stellen dem Benutzer die berechneten Daten in Standardisierter Diagramm-Form dar, wie in Anhang 5 zu sehen. Eine weitere hilfreiche Funktionalität stellt JFreeChart mit einer automatischen Zoom-Möglichkeit bereit. Durch das Markieren eines Bereichs auf der Karte wird dieser Ausschnitt auf das ganze Panel skaliert und vergrößert angezeigt.

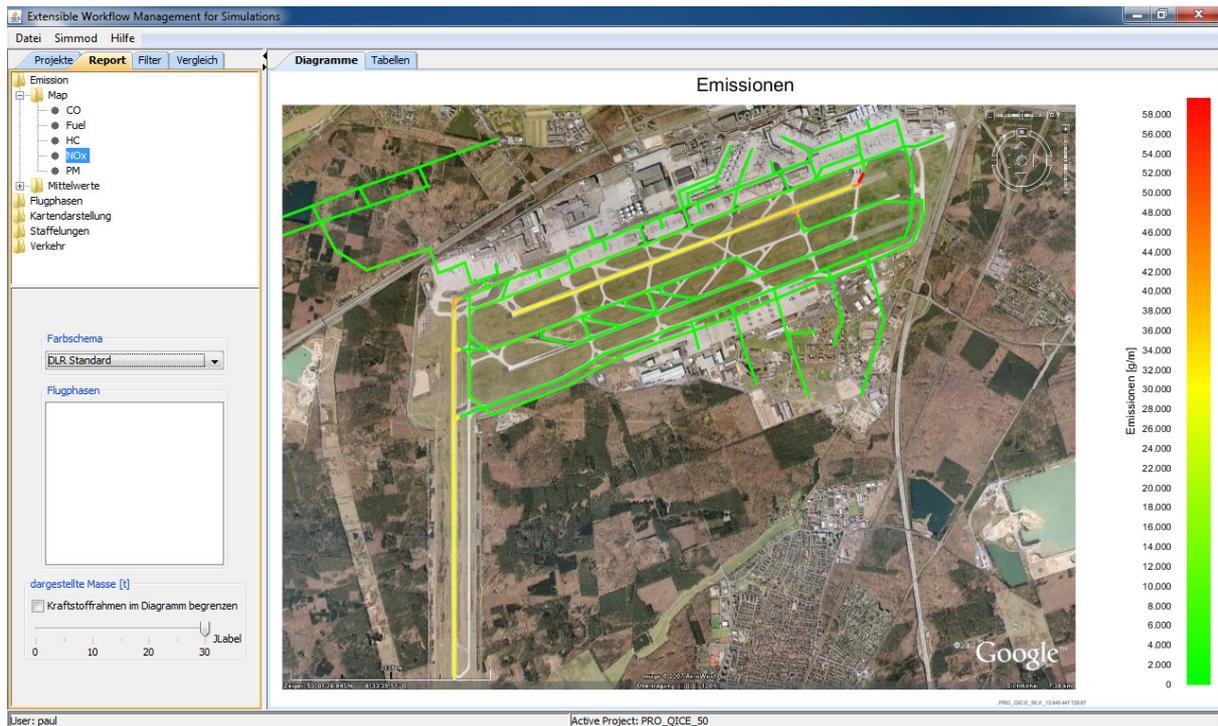


Abbildung 22: Auswahl des Report

## 6.2 Ergebnisse

Nachdem die Funktionsbeschreibung dem User die Nutzung des Tools beschreibt, wird in diesem Abschnitt detailliert auf Auswertungsergebnisse eingegangen. Der Prozess der Emissionsauswertung (siehe Abbildung 15) 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 9 kann der Benutzer die Flugbewegungen der eingelesenen 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 9: FlightID, Phase, Nodes, Duration [sec], Aircraft

Wie in Kapitel 4.6 beschrieben, können gleiche Flugzeugversionen mit unterschiedlichen Triebwerkstypen ausgestattet sein. In Tabelle 10 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 10: Aircraft, EmissionIndex [g/kg], FuelFlow [g/sec]

Als Grundlage zum zeichnen der Emissionskarte, muss das Knoten - Link Netz des Flughafens mit den Koordinaten der Punkte definiert sein. Zusätzlich müssen den Links die Emissionswerte zugeordnet werden. Die Daten aus Tabelle 11 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 11: 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 beinhaltete die Aufgabe der Bachelorarbeit unter anderen die Entwicklung einer geeigneten Darstellung für die berechneten Werte. Abbildung 23 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.

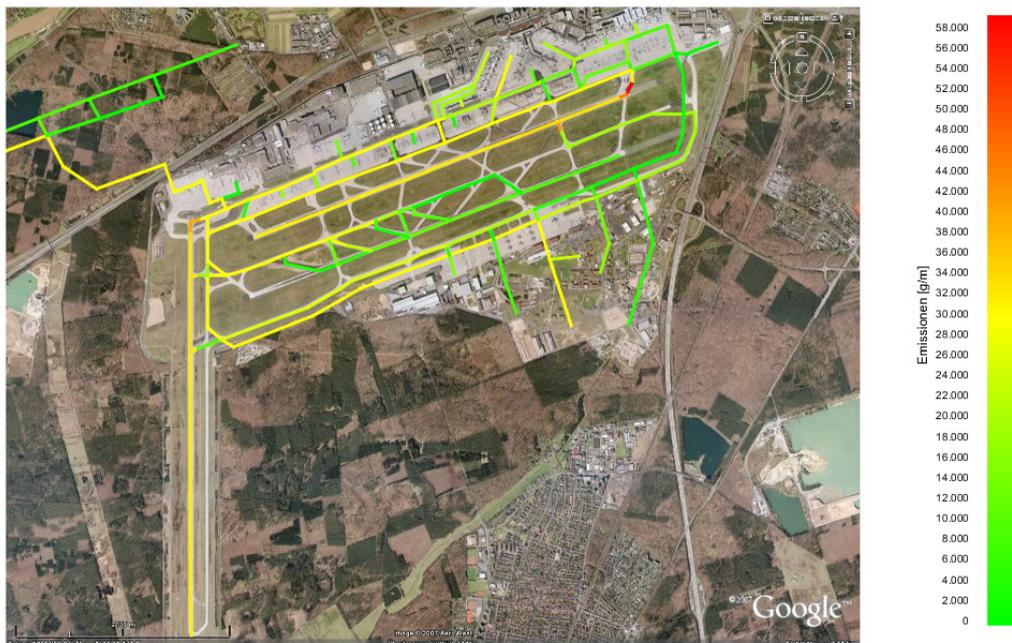


Abbildung 23: Raumbezogene Emissionsdarstellung für Luftverkehrssimulationen

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.

## 7 Fazit und Ausblick

Die durchschnittliche Wachstumsrate für den europäischen Luftverkehr für die nächsten 20 Jahre liegt nach Angaben von EUROCONTROL [34] mit 2,3%–3,5% pro Jahr nur geringfügig unter den hohen Steigerungsraten der Vergangenheit. Zusätzlich belegen Prognosen einen wachsenden Stellenwert des Flugverkehrs am Energieverbrauch im deutschen Verkehrssektor (siehe Anhang 3). Somit ist mit einem steigenden Anteil des Luftverkehrs an den gesamten anthropogenen Emissionen zu rechnen. Aus diesem Trend ergibt sich, dass rechtzeitig Maßnahmen zur Begrenzung des Zuwachses an Schadstoffemissionen aus dem Luftverkehr ergriffen werden sollten. Bei diesem Luftverkehrswachstum müssen Lösungen zur resultierenden Umweltbelastung aus dem Luftverkehr entwickelt werden. Möglichkeiten zur Reduzierung der vom Luftverkehr ausgehenden negativen Folgewirkungen (wie CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> und Lärm) müssen stärker untersucht werden.

Die entwickelte Emissionsdarstellung bietet eine Möglichkeit, in Luftverkehrssimulationen eingesetzte Verfahren zur Schadstoffreduzierung zu bewerten und auf einem Flughafenlayout darzustellen. Mit dem Abschluss dieser Arbeit ist ein Auswertungsmodul entwickelt und in der EWMS Umgebung implementiert. Der Anwender ist mit Hilfe des EWMS Grundprogramms in der Lage, die geladenen Simulationsszenarien auf die emittierten Emissionsmassen pro Streckenabschnitt zu untersuchen. Somit unterstützt die Software den Prozess der Analyse von operativen Maßnahmen mit intuitiven und vergleichbaren Flughafendarstellungen.

Die Umsetzung dieses Projektes orientiert sich an drei Arbeitsschritten. In der theoretischen Betrachtung wurde ein umfangreiches Wissen zu Benutzung, Fähigkeiten und Anforderungen von Emissionsmodellen aufgebaut und die Erkenntnisse als Basis zur Eigenentwicklung verwendet. Der nächste Schritt erarbeitete ein detailliertes Konzept des Berechnungsmodells. Dabei wurden die Datenbasen gewählt und die Formeln dargestellt. Diese Ausarbeitungen beinhalteten einen erheblichen Teil der Gesamtkomplexität der Problemlösung. Für das Konzept wurden Betrachtungsgrenzen aufgestellt, um die Realität auf das Berechnungsmodell abbilden zu können. Die Implementierung des Konzepts als Modul von EWMS umfasst Lösungen zur Umsetzung von Dateneingabe, Verarbeitung und Ausgabe. Als Ergebnis der Bachelorarbeit wurde eine lauffähige Version der Auswertung erstellt und in EWMS integriert.

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, Deutscher Luft- und Raumfahrt-Kongress 1. September 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 [20] 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.

## I Literaturverzeichnis

- [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 CO<sub>2</sub> 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. Advisory Council for Aeronautics Research in Europe:  
<http://www.acare4europe.com/>, Stand 14.07.2010
- [6] Jelinek, F. (Environmental Studies Business Area) et al.: „The Free Route Airspace Project (FRAP) - Environmental Benefit Analysis“, EUROCONTROL Experimental Centre, 2002
- [7] o.V. Clean Sky Website, [www.cleansky.eu](http://www.cleansky.eu), Stand 15.07.2010
- [8] o.V. Der Flughafenverband: „Umweltschutz: Emissionen“, <http://www.adv.aero/emissionen.html>, Stand 28.07.2010
- [9] Leggert, J.: „Global Warming. Die Wärmekatastrophe und wie wir sie verhindern können“, Der Greenpeace Report. München 1991
- [10] o.V. Lufthansa: „Gase, die das Klima verändern“, <http://erlebnis-wissen.lufthansa.com/fileadmin/de/medien/4203M.pdf>, Stand 03.08.2010
- [11] Sausen, R.: „Fliegen wir das Klima zugrunde?“, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. , Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen 2008
- [12] 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
- [13] 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
- [14] Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt: „Naturschutz und Reaktorsicherheit: Maßnahmen zur verursacherbezogenen Schadstoffreduzierung des zivilen Flugverkehrs“, 2001
- [15] o.V. Lufthansa: „Vier Säulen des Klimaschutzes - Weltklima im Wandel“, <http://erlebnis-wissen.lufthansa.com/fileadmin/de/medien/4102M.pdf>, Stand 20.07.2010
- [16] 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

- [17] Janicke Consulting Environmental Physics: „Einführung in LASPORT“, <http://janicke.de/data/lasport/lasport-2.0.pdf>, Stand 19.07.2010
- [18] EUROCONTROL Experimental Centre: „Airport Local Air Quality Studies, ALAQS Case Study: Zurich Airport 2004, a comparison of modelled and measured air quality“, 2005
- [19] ICAO Engine Exhaust Emission Databank, First Edition 1995, Doc 9646- AN/943, <http://www.caa.co.uk/default.aspx?catid=702&pagetype=90>, Stand 20.01.2010
- [20] Celikel, A. et al.: „Preliminary Local Air Quality Study“ EUROCONTROL Experimental Center, 2002
- [21] Bos, A.: „User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA), Revision 2.6“, Eurocontrol, 1997
- [22] Kesigin, U.: „A study on the aircraft emission at Turkish airports“, 2001
- [23] Fleuti, E., Polyméris, J.: „Aircraft NOx-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
- [24] o.V. The National Environmental Research Institute: „Emission Inventory Guidebook“, 2006
- [25] ICAO: „Airport Air Quality Guidance Manual“, ICAO Preliminary Unedited Version, 2007
- [26] EUROCONTROL Experimental Centre: „Airport Local Air Quality Studies (ALAQS)“, Concept Document Issue, 2005
- [27] 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
- [28] ICAO Annex 16: „International Standards and recommended practices, Environmental protection“, Volume II “Aircraft engine emissions“, 1993
- [29] Lorenz, S. und Reichmuth, J.: „Projekt ´FRA-Ausbau´ - Kapazitätsgutachten zum ROV“, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., 19.09.2001
- [30] Krömker, S. und Winckler, M.: „Computergraphik I, SS 2003“, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Interdisziplinäres Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen, 2003
- [31] Friedmann, M.: „Graphische Datenverarbeitung“, Informationstechnik - Duale Hochschule Baden-Württemberg Mannheim, 2009
- [32] o.V. Google Code: „KML in Google Maps“, <http://code.google.com/intl/de-DE/apis/kml/documentation/mapsSupport.html>, Stand 02.09.2010
- [33] Balzert, H.: „Lehrbuch der Software-Technik“, Software-Entwicklung, 1996
- [34] o.V. EUROCONTROL Long-Term Forecast: „IFR Flight Movements 2008-2030“, 2008

## II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Berechnung der Schadstoffe im Luftverkehr.....	5
Abbildung 2: Kerosin-Verbrennungsprodukte [8] .....	9
Abbildung 3: Kerosinverbrauch durch Infrastruktur Engpässe [15].....	11
Abbildung 4: Beispieldarstellung von LASPORT [18] .....	12
Abbildung 5: Flughafenlayout in EDMS [4].....	13
Abbildung 6: Ergebnisdarstellung in AEM3 [6] .....	14
Abbildung 7: Der Standard LTO cycle [23].....	17
Abbildung 8: Datenbankstruktur .....	21
Abbildung 9: Flughafenlayout .....	23
Abbildung 10: Flussdiagramm zur Berechnung der Emissionsmasse.....	24
Abbildung 11: Skizze zur Darstellung des Flughafenlayouts .....	26
Abbildung 12: Farbliche Darstellung von Emissionen [17].....	27
Abbildung 13: Flughafen Braunschweig in OpenStreetMap .....	30
Abbildung 14: Paketdiagramm des Auswertungsmoduls.....	32
Abbildung 15: Sequenzdiagramm des EmissionMapReport.....	33
Abbildung 16: Benötigte Daten.....	34
Abbildung 17: switch – Struktur zur Berechnung der Werte .....	35
Abbildung 18: Datenstruktur der Ergebnisse.....	36
Abbildung 19: Login-Fenster .....	37
Abbildung 20: Einstellungs-Fenster.....	37
Abbildung 21: Hauptfenster EWMS.....	38
Abbildung 22: Auswahl des Report .....	39
Abbildung 23: Raumbezogene Emissionsdarstellung für Luftverkehrssimulationen .....	41

## III Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beiträge des Luftverkehrs zur Klimaänderung im Jahr 2005 [11] .....	10
Tabelle 2: Datengrundlage der Emissionen nach Kategorien (LASPORT) [17] .....	12
Tabelle 3: Datengrundlage der Emissionen nach Kategorien (EDMS) [4].....	14
Tabelle 4: Vergleich der Emissionsmodelle .....	15
Tabelle 5: Ausschnitt aus der Flugzeugdatenbank von ICAO [27] .....	19
Tabelle 6: Ausschnitt aus der Triebwerksdatenbank von ICAO [19].....	20
Tabelle 7: Einflussfaktoren .....	23
Tabelle 8: Link / Knoten Operationen.....	26
Tabelle 9: FlightID, Phase, Nodes, Duration [sec], Aircraft.....	39
Tabelle 10: Aircraft, EmissionIndex [g/kg], FuelFlow [g/sec].....	40
Tabelle 11: Ergebnis zum Zeichnen.....	40

## IV Quellcodeverzeichnis

Quellcode 1: GroundOverlay-Element im KML-Format .....	29
Quellcode 2: Grafisches Element im QGF-Format .....	30

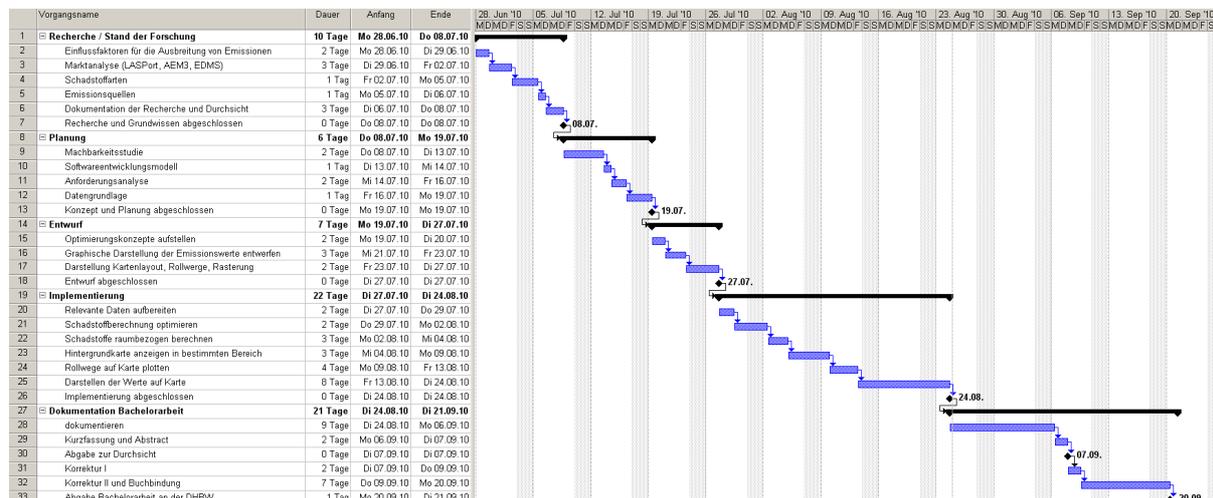
## V Abkürzungsverzeichnis

<b>ACARE</b>	- Advisory Council for Aeronautics Research in Europe
<b>AEM3</b>	- Advanced Emission Model
<b>APU</b>	- Auxiliary Power Unit
<b>ATM</b>	- Air Traffic Management
<b>DLR</b>	- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
<b>EDMS</b>	- Emission and Dispersion Modelling System
<b>EEC</b>	- EUROCONTROL Experimental Centre
<b>EWMS</b>	- Extensible Workflow Management for Simulations
<b>FAA</b>	- Federal Aviation Administration
<b>GPU</b>	- Ground Power Unit
<b>GSE</b>	- Ground Support Equipment
<b>HSQLDB</b>	- Hyper Structured Query Language Data Base
<b>ICAO</b>	- International Civil Aviation Organisation
<b>IFR</b>	- Instrument Flight Rules
<b>KML</b>	- Keyhole Markup Language
<b>LFZ</b>	- Luftfahrzeug
<b>LTO</b>	- Landing and Take Off
<b>QGF</b>	- Dateiformat zur Beschreibung von Grafiken für SIMMOD
<b>RWY</b>	- Runway
<b>SIMMOD</b>	- Simulation Model
<b>TWY</b>	- Taxiway
<b>USAF</b>	- United States Air Force

## VI Anhang

### Anhang 1

#### Zeitlicher Projektplan der Bachelorarbeit (MS-Project):



### Anhang 2

**Partikelgröße** (nach Ch. Cozzarini, Quellen der Partikel-Emissionen, 20. Wiener Motorensymposium, Mai 1999):

Partikel haben in der Regel keine geometrisch regelmäßigen Formen (Kugel, Würfel, usw.), über die sie einfach beschrieben werden könnten. „Dispersitätsgrößen“, die mit der Partikelgröße in Beziehung stehen, werden nach DIN 66 141 „Feinheitsmerkmale“ genannt.

- aerodynamischer Durchmesser: Partikel gleichen aerodynamischen Verhaltens wie gleicher Sinkgeschwindigkeit werden durch die Definition eines aerodynamischen Durchmessers als gleichwertig angesehen. Nachfolgend die allgemeine Gleichung für die Sinkgeschwindigkeit  $w_s$  einer Kugel:

$$w_s^2 = \frac{4}{3} \frac{1}{c_w(Re)} \frac{\Delta \rho}{\rho_f g d}$$

$$\Delta \rho = \rho_p - \rho_r$$

$\rho_p$  = Dichte der Partikel

$\rho_f$  = Dichte des Fluids

$g$  = Schwerebeschleunigung

$d$  = Partikeldurchmesser

$c_w$  = Widerstandsbeiwert einer Kugel

$\mu$  = kinematische Zähigkeit des Fluids

$w_s$  = Sinkgeschwindigkeit

$$\frac{w_s \cdot d \cdot \rho_f}{\mu}$$

$Re = \frac{\mu}{\mu} = \text{Reynolds-Zahl}$

Der Widerstandsbeiwert  $c_w$  ist eine Funktion der Reynolds-Zahl. Für  $Re \leq 0.25$ , d. h. im Bereich des Stokes'schen Gesetzes, ist  $c_w = 24/Re$ . Damit wird

$$w_s = \frac{1}{18} \frac{\Delta \rho}{\mu} g d^2$$

Ein Sinkgeschwindigkeits-Äquivalenzdurchmesser oder aerodynamischer Durchmesser, auch Stokes-Durchmesser, ergibt sich damit zu:

$$d_{\text{Aero}} = \sqrt{\frac{18 \mu w_s}{g \Delta \rho}}$$

$d_{\text{Aero}}$  = aerodynamischer Äquivalentdurchmesser

gültig in Luft für Partikel im Größenbereich 1 mm < d < 50 mm.

Der aerodynamische Äquivalenzdurchmesser hängt somit von der Dichte ab. Meist wird (im Gegensatz zu DIN 66 112) die Dichte-Differenz  $\Delta \rho = 1 \text{ g/cm}^3$  zu Grunde gelegt.

Umrechnung bei anderer Dichte:

$$d_{\text{eff.}} = d_{\text{St}} \sqrt{\frac{\Delta \rho_{\text{St}}}{\Delta \rho}}$$

Übergangsbereich: Bei Partikeldurchmessern unter 1 mm muss das Sinkgeschwindigkeitsgesetz infolge der Wirkung der Brown'schen Bewegung korrigiert werden:

$$w_s = \frac{1}{18} \frac{\Delta \rho}{\mu} g d^2 C_u$$

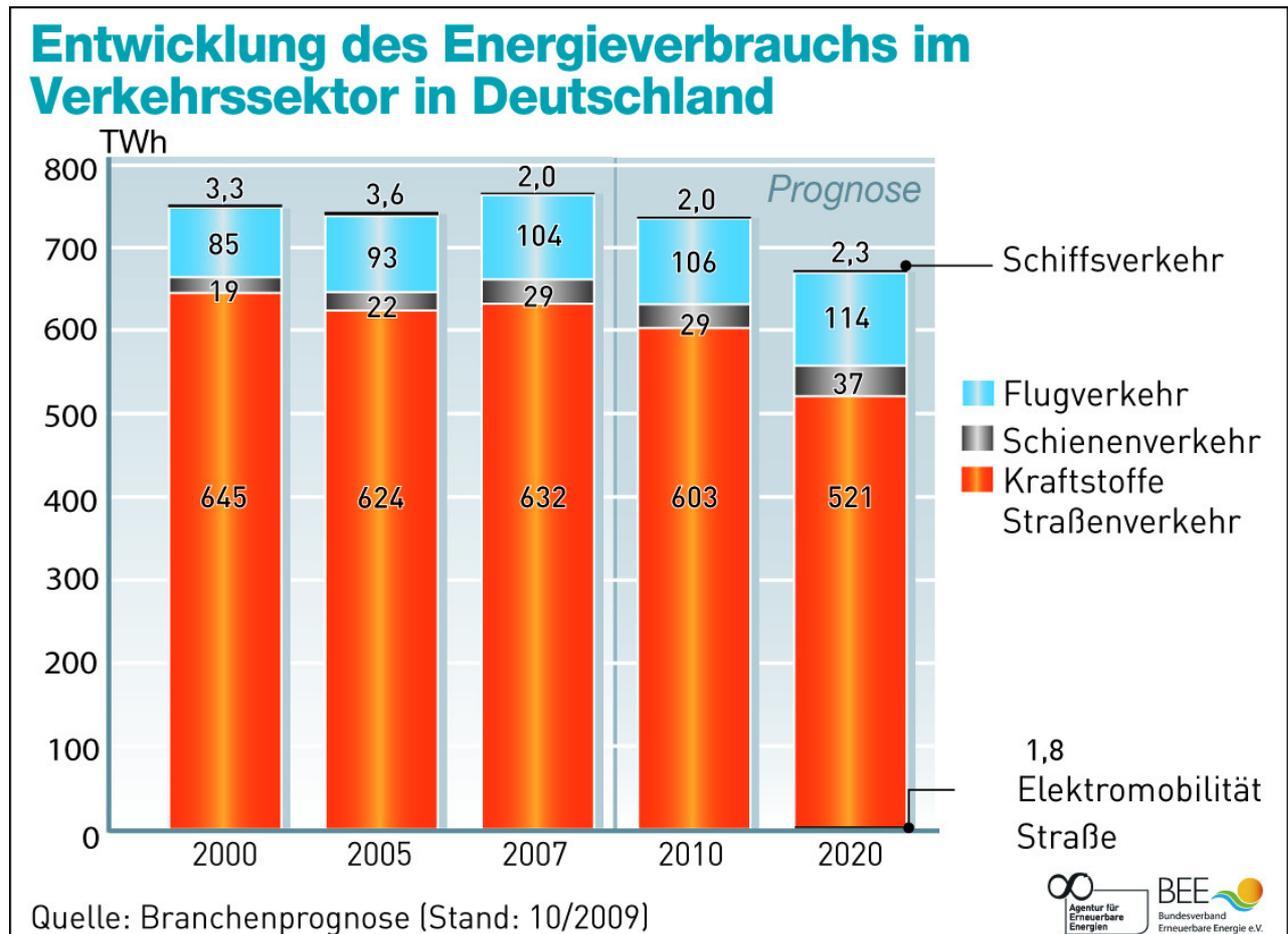
$C_u$  = die Cunningham-Korrektur ändert sich stark mit der Partikelgröße

d(&my;m) 0.01 0.1 0.5 1.0 5.0 10.0

$C_u$  22.3 2.9 1.33 1.16 1.03 1.01

## Anhang 3

### Energieverbrauch im Verkehrssektor:



Agentur für Erneuerbare Energien: Energieverbrauch und -entwicklung im Verkehrssektor bis 2020, Oktober 2009

## Anhang 4

### Flugphasen:

doFlightNodeQuery:

```
SELECT FLIGHT_PHASES.FLIGHT_PHASE FLIGHT_PHASE,  
FLIGHT_PHASES.FLIGHT_ID FLIGHT_ID, FLIGHT_PHASES.DURATION  
DURATION, FLIGHT_PHASES.NODE_NAME NODE_NAME,  
FLIGHT_PHASES.END_NODE_NAME END_NODE_NAME,  
FLIGHT_PLANS.AIRCRAFT_TYPE AIRCRAFT_TYPE FROM  
__PRO_QICE_50_0__ FLIGHT_PHASES AS FLIGHT_PHASES,  
__PRO_QICE_50_0__ FLIGHT_PLANS AS FLIGHT_PLANS WHERE  
FLIGHT_PLANS.FLIGHT_ID = FLIGHT_PHASES.FLIGHT_ID ORDER BY  
FLIGHT_PHASES.FLIGHT_ID
```

### Flughafeninformationen:

doLinksQuery:

```
SELECT LINKS.LINK_NAME LINK_NAME, LINKS.NODE_NAME NODE_NAME,  
LINKS.END_NODE_NAME END_NODE_NAME FROM  
__PRO_QICE_50_0__ LINKS AS LINKS
```

doNodesQuery:

```
SELECT NODES.NODE_NAME NODE_NAME, NODES.COORD_X COORD_X,  
NODES.COORD_Y COORD_Y, NODES.COORD_Z COORD_Z FROM  
__PRO_QICE_50_0__ NODES AS NODES
```

### Flugzeuginformationen:

doDAircraftsQuery:

```
SELECT FLIGHT_PLANS.FLIGHT_ID FLIGHT_ID,  
AIRCRAFT.AIRCRAFT_TYPE AIRCRAFT_TYPE,  
AIRCRAFT.NUM_OF_ENGINES NUM_OF_ENGINES FROM  
__PRO_QICE_50_0__ FLIGHT_PLANS AS FLIGHT_PLANS, AIRCRAFT  
WHERE FLIGHT_PLANS.AIRCRAFT_TYPE = AIRCRAFT.AIRCRAFT_TYPE  
AND AIRCRAFT.AIRCRAFT_TYPE = FLIGHT_PLANS.AIRCRAFT_TYPE  
ORDER BY FLIGHT_PLANS.FLIGHT_ID
```

doAircraftsEngineQuery:

```
SELECT AIRCRAFT.AIRCRAFT_TYPE AIRCRAFT_TYPE,  
AIRCRAFT.ENGINE_TYPE ENGINE_TYPE, AIRCRAFT.NUM_OF_ENGINES  
NUM_OF_ENGINES FROM AIRCRAFT ORDER BY  
AIRCRAFT.AIRCRAFT_TYPE
```

### Triebwerksinformationen:

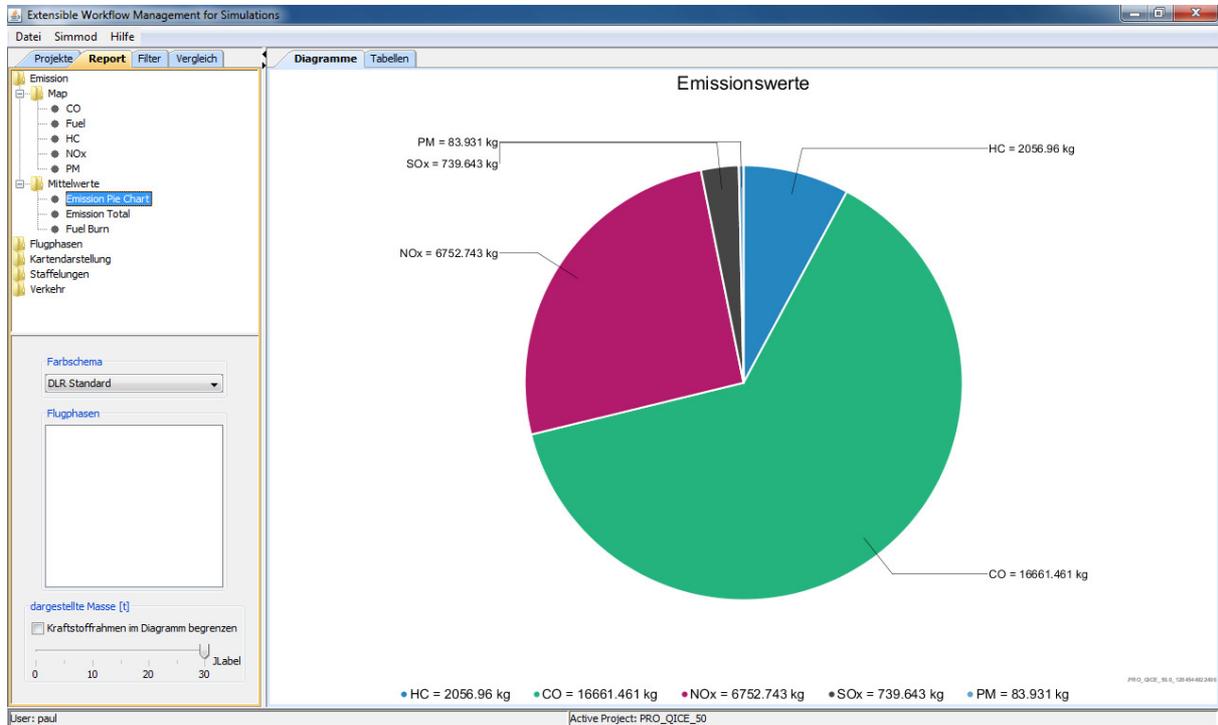
doEmissionIndexQuery:

```
SELECT ENGINE.ENGINE_TYPE ENGINE_TYPE, ENGINE.YEAR YEAR,  
ENGINE.EI_HC_TO EI_HC_TO, ENGINE.EI_HC_CO EI_HC_CO,  
ENGINE.EI_HC_APP EI_HC_APP, ENGINE.EI_HC_IDLE EI_HC_IDLE,
```

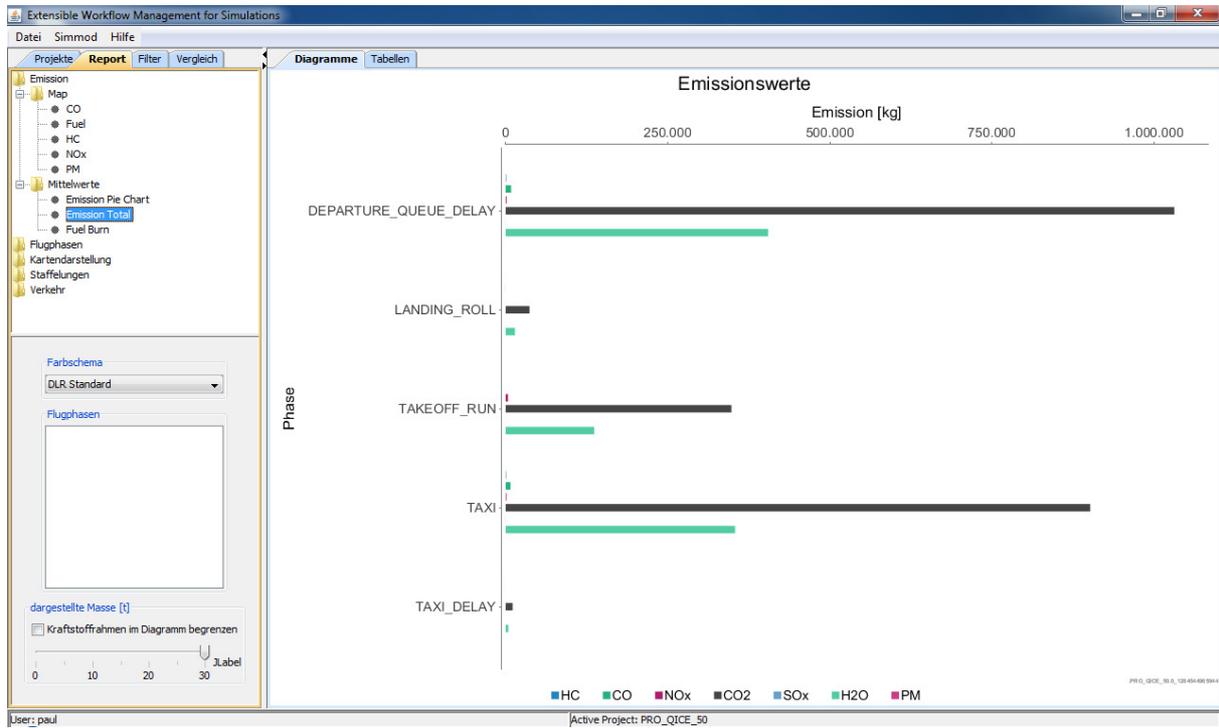
```
ENGINE.EI_CO_TO EI_CO_TO, ENGINE.EI_CO_CO EI_CO_CO,  
ENGINE.EI_CO_APP EI_CO_APP, ENGINE.EI_CO_IDLE EI_CO_IDLE,  
ENGINE.EI_NOX_TO EI_NOX_TO, ENGINE.EI_NOX_CO EI_NOX_CO,  
ENGINE.EI_NOX_APP EI_NOX_APP, ENGINE.EI_NOX_IDLE EI_NOX_IDLE,  
ENGINE.EI_PM_TO EI_PM_TO, ENGINE.EI_PM_CO EI_PM_CO,  
ENGINE.EI_PM_APP EI_PM_APP, ENGINE.EI_PM_IDLE EI_PM_IDLE,  
ENGINE.FUEL_FLOW_TO FUEL_FLOW_TO, ENGINE.FUEL_FLOW_CO  
FUEL_FLOW_CO, ENGINE.FUEL_FLOW_APP FUEL_FLOW_APP,  
ENGINE.FUEL_FLOW_IDLE FUEL_FLOW_IDLE, ENGINE.EI_CO2_TO  
EI_CO2_TO, ENGINE.EI_CO2_CO EI_CO2_CO, ENGINE.EI_CO2_APP  
EI_CO2_APP, ENGINE.EI_CO2_IDLE EI_CO2_IDLE, ENGINE.EI_SOX_TO  
EI_SOX_TO, ENGINE.EI_SOX_CO EI_SOX_CO, ENGINE.EI_SOX_APP  
EI_SOX_APP, ENGINE.EI_SOX_IDLE EI_SOX_IDLE, ENGINE.EI_H2O_TO  
EI_H2O_TO, ENGINE.EI_H2O_CO EI_H2O_CO, ENGINE.EI_H2O_APP  
EI_H2O_APP, ENGINE.EI_H2O_IDLE EI_H2O_IDLE FROM ENGINE
```

## Anhang 5

### Tortendiagramm der Emissionswerte aus einer Simulation:



Die Emissionen sind je Phase als Balkendiagramm dargestellt:



Die Verbrauchte Kraftstoffmenge je Phase:

