

Verbundprojekt im Rahmen des 1. Aufrufs im 5. Luftfahrtforschungsprogramm des  
Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie

*aireg<sup>EM</sup>*

*Aviation Initiative for **Renewable Energy** in **Germany** e.V.  
Emissionseigenschaften von alternativen Luftfahrtkraftstoffen*

## **Schlussbericht**

Förderkennzeichen: 20T1310A  
Bearbeitungszeit: 01/2014 – 06/2017

Deutsche Lufthansa AG  
Dr. Gerd Saueressig  
Dr. Alexander Zschocke  
David Weigelt  
Frankfurt, September 2017

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Impressum

Autoren: Dr. Gerd Saueressig  
Dr. Alexander Zschocke  
David Weigelt

Firma: Deutsche Lufthansa AG

Anzahl Seiten : 27

Copyright © 2017 : Deutsche Lufthansa AG  
Umweltkonzepte Konzern - FRA CP/U  
Airportring  
60546 Frankfurt

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

## Kurzfassung

Sowohl die internationale Klimapolitik, die damit verbundenen Forschungsziele als auch die von der Flugverkehrsbranche selbstgesteckten Klimaschutzziele hängen wesentlich davon ab, inwieweit es gelingt, alternative Kraftstoffe mit günstigen CO<sub>2</sub>-Bilanzen und Emissionswerten von Non-CO<sub>2</sub>-Substanzen zum Einsatz zu bringen.

Zentrales Ziel von aireg<sup>EM</sup> war es deshalb, die wissenschaftlich fundierte Informationsbasis zu den Emissionen von Kraftstoffen zu erweitern. Hierzu wurden Emissionsvergleichsmessungen von einem aromatenfreien alternativen Kraftstoff (ATJ-SPK) in Reinform und Jet A1 am Triebwerksprüfstand der Lufthansa Technik durchgeführt. Es bestand eine enge Kooperation mit der HBBA-Studie, im Rahmen derer ein weiterer synthetischer Kraftstoff untersucht wurde.

Zusammengenommen zeigen die Ergebnisse, dass der Aromatengehalt als der wesentliche Parameter für die Partikelbildung identifiziert werden konnte. Bei niedrigen Triebwerksdrehzahlen reduzierte sich die Partikelanzahl um bis zu 90%. Bei höheren Drehzahlen sank die spezifische Partikelmasse um bis zu 30%, während die Partikelmasse bei der Berechnung vollständiger Flugmissionen um bis 50% reduziert war. Sonstige Kraftstoffbestandteile haben für die Partikelbildung eine nachrangige Bedeutung.

Weitere Untersuchungen fanden auf dem Vorfeld am Flughafen Frankfurt statt. Hier konnte weltweit zum ersten Mal demonstriert werden, dass Messungen des Abgasstrahls in direkter Linie startender Flugzeuge (geschützt hinter einer Blastwand) möglich sind und Messdaten von guter Qualität liefern.

Die aireg<sup>EM</sup>-Ergebnisse zeigen deutlich, dass der Aromatengehalt und die Non-CO<sub>2</sub>-Emissionen wichtige Kriterien zur Beurteilung alternativer Kraftstoffe darstellen, die eine bessere Grundlage für künftige politische und unternehmerische Entscheidungen liefern.

## Abstract

International policy on climate change, the related research objectives and the climate targets set by aviation largely depend on to which extent it will be possible to use alternative fuels with favorable CO<sub>2</sub>-balances and improved emissions of non-CO<sub>2</sub>- substances.

The main goal of aireg<sup>EM</sup> was therefore to expand the scientific information base on the fuel-related emissions. For this purpose, emission measurements were carried out of an unblended aromatics-free alternative fuel (ATJ-SPK) and compared to the respective values for Jet A1 at Lufthansa Technik's engine test cell. There was a close cooperation with the HBBA-study, in which another synthetic fuel was tested.

Altogether the results show that the aromatics content could be identified as an essential parameter for particle formation. At low engine speeds the number of particles was reduced by up to 90%. At higher engine speeds the specific particle mass decreased up to 30%, while the particle mass was reduced by up to 50% if a complete flight missions was calculated. Other fuel constituents are of subordinate importance for particle formation.

Further investigations took place on the apron of Frankfurt Airport. It was demonstrated for the first time around the world that measurements of the jet blast in the direct line of starting aircraft (protected behind a blast wall) are possible and provide good quality data.

The results clearly show that the aromatics content and the non-CO<sub>2</sub>-emissions are important criteria for assessing alternative fuels, which provides a better basis for future political and entrepreneurial decisions.



## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung / Abstract.....	iii
Tabellenverzeichnis: .....	vi
Bildverzeichnis.....	vi
Abkürzungen .....	vii
1. Einleitung .....	1
1.1. Ausgangslage, Voraussetzungen sowie wissenschaftlicher und technischer Stand .....	1
1.2. Aufgabenstellung, Planung und Ablauf des Vorhabens, Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	1
2. AP1 – Emissionsmessung und Kraftstoffanalyse .....	3
2.1. Emissionsmessungen am Triebwerksprüfstand .....	3
2.1.1. Ausgangslage .....	3
2.1.2. Fragestellung von aireg <sup>EM</sup> und Vorgehen .....	4
2.1.3. Ergebnisse .....	8
2.2. Freifeldmessung auf dem Vorfeld am Flughafen Frankfurt.....	8
2.2.1. Organisation von Abgasmessungen startender Flugzeug am Flughafen Frankfurt.....	8
2.2.2. Messungen von Abgasen startender Flugzeuge.....	11
2.2.3. Messergebnisse und Bewertung .....	11
2.3. Kriterien für künftigen Kraftstoffen.....	12
3. AP2 – Triebwerksperformance und Flugleistungsrechnung.....	15
3.1. Aufgabenstellung und Zusammenarbeit.....	15
3.2. Triebwerksmodelle und Flugmissionen .....	16
3.2.1. Verkehrsstatistik und Triebwerksmodelle.....	16
3.2.2. Flugmissionen je Flotte.....	17
3.3. Emissionsberechnungen.....	18
3.3.1. Ergebnisse .....	18
3.3.2. Proberechnungen am Beispiel Airbus A330-300 .....	21
3.3.3. Vergleich mit anderen Emissionsberechnungen.....	24
4. Literatur .....	25
5. Danksagung .....	27

## Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1:	Messprogramm je Kraftstoff am Triebwerksprüfstand.....	7
Tabelle 2:	Eigenschaften der in aireg <sup>EM</sup> untersuchten Kraftstoffe.....	15
Tabelle 3:	Übersicht der Lufthansa Flotten mit Triebwerksversionen und der Zuordnung zu den Triebwerksmodellen (TW-Modell).....	17
Tabelle 4:	Übersicht der Lufthansa Flotten mit Beschreibungen der mittleren Missionen.....	18
Tabelle 5:	Beschreibungen der mittleren Missionen für fünf Untergruppen des A330-Streckenportfolios.....	22
Tabelle 6:	Vergleich von Verbrauchs- und Emissionsberechnungen aus Abschnitt 3.3.1 mit LH-internen Berechnungen und deren prozentuale Differenzen.....	24

## Bildverzeichnis

Bild 1:	LHT-Prüfstand mit eingebautem Triebwerk; im Hintergrund der Abluftkanal.....	5
Bild 2:	eingebaute Messsonde im Abluftkanal (links); Parkposition Messfahrzeug an der Außenwand des Prüfstands in Höhe des Abluftkanals (rechts).....	6
Bild 3:	oben links: Blastwand (rechts) am nördlichen Ende der Startbahn 18 West am Flughafen Frankfurt; oben rechts: Position des DLR-Messwagens hinter der Wand; unten links: Spalt unter der Wand mit Messsonde des DLR; unten rechts: Blickrichtung der Sonde entlang der Startbahn auf die eindrehenden Flugzeuge.....	9
Bild 4:	Übersicht des Flughafens Frankfurt mit den für die Messkampagne wesentlichen Orten (LAC = Lufthansa Aviation Center).....	10
Bild 5:	Startbahn 18 West: die zu den verschiedenen Rollwegen gehörenden Startpositionen sind blau markiert; der rote Pfeil weist auf die Blastwand.....	11
Bild 6:	Darstellung der relativen Unterschiede im Verbrauch beim Vergleich des alternativen Kraftstoffs ATJ relativ zu Jet A1 für die mittleren Missionen aller Teilflotten.....	19
Bild 7:	Darstellung der relativen Unterschiede der CO <sub>2</sub> - und H <sub>2</sub> O-Emissionen beim Vergleich des alternativen Kraftstoffs ATJ relativ zu Jet A1 für die mittleren Missionen aller Teilflotten.....	19
Bild 8:	Darstellung der relativen Unterschiede der Rußmassenemissionen beim Vergleich des alternativen Kraftstoffs ATJ relativ zu Jet A1 für die mittleren Missionen aller Teilflotten.....	20
Bild 9:	oben: Verteilung der Grosskreisentfernungen der A330-300-Flotte für 2013 für die fünf ausgewählten Untergruppen; unten: Verteilungen der zu den fünf Untergruppen gehörenden Trip fuel-Verbräuche.....	21
Bild 10:	Darstellung der Unterschiede zwischen den beiden Kraftstoffen ATJ und Jet A1 im Kraftstoffverbrauch, in den CO <sub>2</sub> -Emissionen und Partikelmasseemissionen für fünf verschiedene A330-Missionen.....	23

## Abkürzungen

AP	Arbeitspaket
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATJ-SPK	Alcohol To Jet Synthesized Paraffinic Kerosene
CORSIA	Carbon Offset and Reduction Scheme for International Aviation
DLH	Deutsche Lufthansa AG
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DLR-AT	DLR – Institut für Antriebstechnik, Köln
DLR-VT	DLR – Institut für Verbrennungstechnik, Stuttgart
ECHA	Europäische Agentur für chemische Stoffe
FL	flight level = Flugfläche; Fläche gleichen Luftdrucks
FT-Kerosin	Fischer-Tropsch Kerosin
HBBA-Studie	High Biofuel Blends in Aviation-Studie
HEFA-Kerosin	Hydrotreated Esters and Fatty Acids Kerosin
ICAO	Internationale Zivilluftfahrtorganisation
LFT	Lufthansa Flight Training GmbH
LHT	Lufthansa Technik AG
LTL	Lufthansa Technik Logistik
LTO-Zyklus	Landing-TakeOff-Cycle der ICAO Zertifizierung
SIP-Kerosin	Synthesized Iso-Paraffins-Kerosin





## 1. Einleitung

### 1.1. Ausgangslage, Voraussetzungen sowie wissenschaftlicher und technischer Stand

Die Ausgangslage zu Beginn des Projekts war – und ist weiterhin – im Wesentlichen durch die Fragestellung geprägt, wie der Luftverkehr seine selbstgesteckten Reduktionsziele zur Klimawirkung erreichen kann. Wichtigste Neuerung ist das 2016 im Rahmen der ICAO verabschiedete CORSIA-Abkommen. CORSIA ist Bestandteil des globalen Maßnahmenpakets zur Reduzierung des luftfahrtbedingten Klimaeintrags und beinhaltet wesentliche Regelungen zum CO<sub>2</sub>-neutralen Wachstum des internationalen Flugverkehrs ab 2021. Es soll künftig als einziges marktbasierendes Instrument greifen, um den Umgang mit CO<sub>2</sub>-Emissionen aus internationalen Flügen zu regeln. Für wachstumsbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen müssen Airlines dann Kompensationszertifikate erwerben.

Dementsprechend erhöht sich auch der Anreiz, noch intensiver am technischen Fortschritt, an einer verbesserten Infrastruktur und an operativen Maßnahmen zu arbeiten. Zusammen mit den ökonomischen Instrumenten von CORSIA bilden diese drei Gebiete die sogenannte Vier-Säulen-Strategie für den Klimaschutz der Luftfahrtbranche.

Die Erforschung und der Einsatz alternativer Treibstoffe stellt einen wichtigen Teil der Säule ‚Technischer Fortschritt‘ dar. Denn die i.d.R. deutlich niedrigere Netto-CO<sub>2</sub>-Bilanz von alternativen Kraftstoffen ermöglicht es, die Emissionen im Flugbetrieb dauerhaft zu reduzieren. Abgesehen von CO<sub>2</sub> treten jedoch im Flugbetrieb auch andere Emissionen auf, deren Beeinflussung durch Biokraftstoffe ebenfalls betrachtet werden muss.

Für eine fundierte Beurteilung der Non-CO<sub>2</sub>-Emissionen von alternativen Kraftstoffen fehlte es bisher an entsprechenden Informationen. Zentrales Ziel von aireg<sup>EM</sup> war es, die Emissionseigenschaften eines alternativen Kraftstoffes bei operativ relevanten Lastzuständen zu untersuchen. Von besonderem Interesse waren dabei Informationen zu Schubsetzungen im Reiseflug (Cruise) und für reduzierte Schubsetzungen beim Start, da diese von den standardisierten Messungen gemäß ICAO-LTO-Zyklus nicht abgedeckt werden, sie aber für die Beurteilung der lokalen Luftqualität und der Klimawirksamkeit der Emissionen wichtige Hinweise liefern können.

### 1.2. Aufgabenstellung, Planung und Ablauf des Vorhabens, Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die zentralen Aufgabenstellungen waren die Durchführung von Abgasmessungen sowohl am Triebwerksprüfstand bei verschiedenen operativ relevanten Lastzuständen als auch auf dem Vorfeld am Flughafen Frankfurt, wo startende Flugzeuge untersucht wurden. Beide Aufgaben waren Teil des Arbeitspakets 1 (AP1) und wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Partner DLR VT und Lufthansa Technik durchgeführt und mit dem Partner DLR AT abgestimmt. Denn die Messergebnisse von einem alternativen Kraftstoff (ATJ = Alcohol-To-Jet von Gevo) am Triebwerksprüfstand waren wichtige Ausgangsdaten für die Modellierung von Emissionseigenschaften bei DLR AT im Rahmen von AP2. Mithilfe der Ergebnisse von DLR AT konnten bei Lufthansa

vergleichende Abschätzung der Unterschiede in den Emissionen von Jet A1 und dem ATJ-Kraftstoff vorgenommen werden.

Alle vorgesehenen Aufgaben konnten wie geplant bearbeitet werden und lieferten sehr interessante Ergebnisse, die infolge des Projekts nach und nach veröffentlicht und vertieft werden.

Im Zusammenhang mit den Abgasmessungen am Triebwerksprüfstand bestand eine wichtige Verbindung mit der HBBA-Studie [1], mit der Lufthansa von der EU-Kommission, DG Energy beauftragt wurde und im Rahmen derer ein weiterer alternativer Kraftstoff (ARA: vollsynthetisches CH-Kerosin) untersucht wurde. Große Teile der Arbeiten am Triebwerksprüfstand konnten für beide Projekte parallel und synergetisch geplant und durchgeführt werden, was zu entsprechend geringeren Kosten führte.

Aus diesen Ergebnissen zur Wirkung von Aromaten und zum Emissionsverhalten des ATJ-Kraftstoffs wurden Kriterien in Bezug auf die Zusammensetzung von künftigen Kraftstoffen abgeleitet.

## 2. AP1 – Emissionsmessung und Kraftstoffanalyse

### 2.1. Emissionsmessungen am Triebwerksprüfstand

#### 2.1.1. Ausgangslage

Erste Messungen der mit Biokraftstoffen verbundenen Emissionen wurden Ende des vorigen Jahrzehnts vorgenommen [2]. Diese Messungen standen damals in Verbindung mit der Zulassung der Kraftstoffe, und sollten vor allen Dingen sicherstellen, dass mit den neuen Kraftstoffen keine Verschlechterung der Emissionseigenschaften verbunden ist. Tatsächlich stellte sich jedoch in diesen Messungen heraus, dass die Emissionen sich nicht nur nicht verschlechterten, sondern vielmehr bei den Partikelemissionen eine deutliche Verbesserung auftrat. Dieser Sachverhalt wurde später auch bei gezielten Emissionsuntersuchungen bestätigt und wurde für alle bisher zugelassenen Biokerosinkomponenten beobachtet (Fischer-Tropsch, HEFA<sup>1</sup>, SIP<sup>2</sup> und ATJ-SPK<sup>3</sup>).

Zum Startzeitpunkt von aireg<sup>EM</sup> Anfang 2014 waren derartige Messungen nur am Boden auf Prüfständen vorgenommen worden, eine zwischenzeitlich veröffentlichte gemeinsame Studie des DLR und der NASA wies aber mittlerweile nach, dass das beobachtete Phänomen auch im Flug auftritt [5].

Den vor aireg<sup>EM</sup> vorgenommenen Emissionsmessungen ist überwiegend gemeinsam, dass sie nicht unter Einsatz der reinen Biokraftstoffe erfolgten, sondern hauptsächlich Gemische aus Biokerosin und fossilem Kerosin untersuchten. Eine Ausnahme hiervon bilden die im Rahmen des CLEEN-Programmes von Rolls-Royce vorgenommenen Emissionsmessungen [6], die aber im Rahmen von zulassungsrelevanten Untersuchungen erfolgten und daher nur ein sehr begrenztes Spektrum an Emissionsmessungen beinhalteten. Der Grund dafür, dass die Messungen überwiegend mit Biokerosingemisch durchgeführt worden, liegt darin, dass Biokerosin bisher nur als Gemischbestandteil mit einem maximalen Anteil von 50 % zugelassen ist<sup>4</sup>.

Die Verbesserung der Partikelemissionen durch die Beimischung von Biokerosin wurde darauf zurückgeführt, dass zum einen alle bisher zugelassenen Biokerosine weitgehend oder völlig aromatenfrei sind und zum anderen Biokerosin praktisch keinen Schwefel oder sonstige Kontaminationen enthält. Vermutet wurde, dass hierbei der Einfluss des Fehlens von Aromaten eine größere Bedeutung hat als das Fehlen von Kontaminationen; ein entsprechender empirischer Beleg fehlte jedoch noch. Da die Messungen ganz überwiegend an Biokerosingemischen vorgenommen wurden, konnte die Auswirkung des Biokerosins auf die Emissionen nur indirekt ermittelt werden, indem zunächst eine Messung nur mit fossilem Kerosin vorgenommen wurde, und anschließend eine Messung mit einem Gemisch aus dem gleichen fossilen Kerosin und Biokerosin. Aus der Differenz der bei den beiden Messungen ermittelten

<sup>1</sup> Zu Tests mit FT- und HEFA-Kerosin siehe die Übersicht in Tabelle 3 in [3]

<sup>2</sup> Siehe hierzu S.98 – 104 in [1]

<sup>3</sup> Siehe hierzu S.123 – 133 in [4]

<sup>4</sup> Der laut ASTM D7566 maximal zulässige Anteil beträgt 50 % bei FT- und HEFA-Kerosin, 30 % bei ATJ-SPK und 10 % bei SIP.

Emissionen ließ sich der Effekt des Biokerosins bestimmen. Eine direkte Messung der mit Biokerosin verbundenen Emissionen war jedoch nicht möglich, da ein Einfluss der fossilen Mischungs Komponente nie vollständig ausgeschlossen werden konnte.

### 2.1.2. Fragestellung von aireg<sup>EM</sup> und Vorgehen

Ziel der Untersuchung war es, die Auswirkungen eines Biokerosins auf die Verbrennungsemissionen im Rahmen eines Triebwerkslaufes auf einem Triebwerksprüfstand möglichst genau zu bestimmen. Gemessen werden sollte hierbei unter Bodenbedingungen; eine Simulation der atmosphärischen Bedingungen (z.B. Cruise) war nicht Bestandteil der Messkampagne, erfolgt aber im Rahmen von AP2.

Als Triebwerk wurde hierbei das CFM56-Triebwerk ausgesucht, weil dieser Triebwerkstyp sowohl den Kontinentalverkehr (A320) als auch den Interkontinentalverkehr (A340) abdeckt und somit umfangreiche Informationen für die in AP2 geplante Flottensimulationen ermöglichte.

Vorgesehen war ursprünglich für die Emissionsmessungen ein Triebwerk zu verwenden, das anschließend im Rahmen eines Werkstattereignisses zerlegt werden sollte. Dies sollte ermöglichen, Biokerosin einzusetzen, ohne es vorher mit fossilem Kraftstoff zu vermischen. Eine solche 100-prozentige Nutzung von reinem Biokerosin ist zwar gegenwärtig im Flugbetrieb nicht zulässig, die mit einer Zerlegung und Wartung des Triebwerks verbundene Inspektion hätte aber ausgereicht, den mit der Verwendung eines nicht zugelassenen Kraftstoff verbundenen Sicherheitsanforderungen zu genügen.

Im weiteren Fortschritt der Projektarbeiten ergab sich die Möglichkeit statt einem für ein Werkstattereignis vorgesehenem, im normalen Flugbetrieb eingesetztem Triebwerk den Versuchsträger zu verwenden, der von Lufthansa Technik im Rahmen des EVE-Projektes [7] aufgebaut wurde und den weltweit einmaligen detaillierten Emissionsvergleich des konventionellen Jet A1-Kraftstoffes mit einem ungemischten aromatenfreien alternativen Kraftstoff (ATJ) ermöglichte. Bei diesem Versuchsträger handelt es sich um ein CFM56-5C4 Triebwerk, das aus dem normalen fliegerischen Einsatz herausgezogen und mit einer zusätzlichen Instrumentierung versehen wurde. LHT sieht dieses Triebwerk hauptsächlich für die Erforschung der Details der Verbrennungsprozesse im Triebwerk vor, war aber bereit, den Versuchsträger für die Biokerosinprobe zur Verfügung zu stellen. Da es sich um einen Versuchsträger handelt, und nicht mehr um ein operativ eingesetztes Triebwerk, war die Verwendung eines nicht zugelassenen Kraftstoffes problemlos. Das Projekt aireg<sup>EM</sup> konnte dabei vom umfangreichen Wissen der LHT-Experten über die Thermodynamik dieses Triebwerks und von der ausführlichen Dokumentation der thermodynamischen Triebwerksprozessgrößen für den jeweiligen Kraftstoffbetrieb profitieren.

Die Beschaffung der für die Prüfstandsmessungen erforderlichen Menge an Biokerosin (ca. 3 Tonnen) stellte sich als schwierig heraus, da es in Europa gegenwärtig keine verfügbare Kapazität für die Herstellung von Biokerosin gibt. Als zu verwendender Biokraftstoff ausgewählt wurde daher von der US-Firma Gevo hergestelltes ATJ-SPK. ATJ-SPK ist ein Biokerosin, das ausschließlich aus n- und iso-paraffinen Kohlenwas-

serstoffketten mit einer Kettenlänge von C12 und C 16 besteht. Es enthält praktisch keine Aromaten oder Verunreinigungen. Da es sich hierbei um ein nicht ECHA-registriertes Produkt handelt, war allerdings für den Import dieses Biokerosins ein relativ aufwändiges Verfahren zur Erteilung einer ECHA-Ausnahmegenehmigung erforderlich, um die Ware importieren zu können.

Die Durchführung der Messungen erfolgte, indem die Biokerosinmenge aus Fässern in einen Vorfeldtankwagen gepumpt wurde, der dann mit der Tankanlage des Triebwerksprüfstands verbunden wurde. Zur Koordination und Durchführung dieser Messungen waren im Vorfeld eine Vielzahl von Punkten zu klären:

- Bereitstellung eines Tankfahrzeugs durch den örtlichen Tankdienst AFS; Beratung durch AFS-Experten bzgl. Logistik und Durchführung.
- Lagerung der Treibstofffässer und Umfüllung des Treibstoffs in den Tankwagen gemäß Wasserhaushaltsgesetz (WHG).
- Klärung und Beschaffung der notwendigen Anschlüsse an das Leitungssystem.
- Umgang mit dem Risiko der potentiellen Auswirkungen des aromatenfreien Kraftstoffs auf Dichtungen und Zähler der Betankungsanlage.
- Logistik zur Messungen eines weiteren Kraftstoffs (HBBA-Studie) im Rahmen der gleichen Messkampagne.
- Berücksichtigung von Totvolumina im Leitungssystem.
- Klärung der Anforderungen des Triebwerksprüfstands hinsichtlich Druck und Durchflussmengen des Kraftstoffs, die vom Tankfahrzeugs zu gewährleisten sind.
- Positionierung des DLR-Messfahrzeugs.



*Bild 1: LHT-Prüfstand mit eingebautem Triebwerk; im Hintergrund der Abluftkanal.*

Die Messkampagne fand am Triebwerksprüfstand der LHT in Hamburg statt (s. Bild 1). Wie geplant wurde sie als kombinierte Messkampagne zusammen mit dem EU-Projekt HBBA (High Biofuel Blends in Aviation) durchgeführt, so dass in erheblichem Maße Zeit und Kosten gespart werden konnten. Diese beiden Projekte konnten auch inhaltlich miteinander verknüpft werden, da im Rahmen der HBBA-Studie ein vollsynthetischer Biokraftstoff getestet wurde, dessen Zusammensetzung grundsätzlich der des fossilen Kerosins entspricht. Insbesondere enthält dieses Kerosin auch Aromaten, aber keinen Schwefel oder sonstige Verunreinigungen. Die Messungen für die HBBA-Studie ermöglichten daher die Unterscheidung der durch die Aromaten und Verunreinigungen verursachten Emissionseffekte. Korrespondierend hierzu wurde in aireg<sup>EM</sup> untersucht, welche Auswirkungen ein vollständig aromaten- und verunreinigungsfreies Kerosin hat.

Die extrem gute und effiziente Zusammenarbeit zwischen den Partnern DLR, LH, LHT und AFS sowie die Erfahrungen aus früheren Messungen führten zu einer äußerst gelungenen Messkampagne. So konnte auf eine ursprünglich geplante erste Kampagne verzichtet werden, in der Testmessungen mit Jet-A-1 vorgesehen waren. Die nötigen Erfahrungen mit der Messtechnik am Prüfstand konnten aus anderen Projekten gewonnen werden.

Die für die Emissionsmessungen verwendete Sonde wurde in den Abgaskanal montiert. Die damit verbundene Gasleitung wurde durch ein Loch in der Außenwand im Abluftkanals des Triebwerksprüfstands zum Messfahrzeug des DLR geführt (s. Bild 2). Die Position der Sonde wurde so gewählt, dass eine ausreichende Verdünnung des Abgases gegeben war, um so weitere Agglomeration der Partikel in den zum Fahrzeug führenden Leitungen zu minimieren. Diese Anordnung wurde bereits im Zusammenhang mit früheren Messkampagnen erprobt und konnte mit geringem Zusatzaufwand wiederhergestellt werden.



*Bild 2: eingebaute Messsonde im Abluftkanal (links); Parkposition Messfahrzeug an der Außenwand des Prüfstands in Höhe des Abluftkanals (rechts).*

Die Messkampagne startete am 1.11.2016 und dauerte bis zum 4.11.2016 (Abbau). Nach der Ankunft am 1.11. starteten am 2.11. die Vorbereitungen der Messkampagne mit der Betankung des AFS-Pumpenfahrzeuges mit dem ersten alternativen Kraftstoff 1 (HBBA-Studie) und dem Aufbau der Messgeräte und der Sonde.

Die eigentlichen Emissionsmessungen erfolgten am 3.11. nach dem folgenden Zeitplan:

- Vorbereitungen Versuchsträger 3 h
- 1. Lauf (konv. Kerosin) inkl. Leak Check und Trim Balancing 2:20 h
- Umrüstung (altern. Kraftstoff 1 – HBBA) 1 h
- 2. Lauf (altern. Kraftstoff 1 – HBBA) 1 h
- Umrüstung (altern. Kraftstoff 2 – aireg<sup>EM</sup>) 1 h
- Abpumpen und Neubefüllung Pumpenwagen 1:30 h
- 3. Lauf (altern. Kraftstoff 2 – aireg<sup>EM</sup>) 1 h
- Umrüstung (konv. Kerosin) 1 h
- 4. Lauf (konv. Kerosin) 1:30 h
- Nachlauf inkl. Umrüstung 1:30 h
- Demontage Messsonde aus Abluftkanal

Das Messprogramm je Kraftstoff untergliederte sich wie folgt (s. Tabelle 1):

Tabelle 1: Messprogramm je Kraftstoff am Triebwerksprüfstand.

	Drehzahl N1	Dauer
	RPM	min
Ground Idle / GI Warm Up		5
C4 Maximum Continuous, Warm Up	4398	13
C4 Take-Off (höchstes Rating)	4684	5
C4 Maximum Continuous Thrust	4398	5
C2 Maximum Continuous Thrust (etwa Cruise C4)	4292	5
N1 = 3800 RPM	3800	5
N1 = 3000 RPM	3000	5
Flight Idle /FI	~ 1325	5
Ground Idle	~ 940	5
zusätzlich bei 4. Lauf:		
Schnelle Acceleration (gem. ESM: FI - 1s bis TO - FI)		
Flight Idle		5
Langsame Acceleration (FI bis T/O in 30s)		

Die Auswahl der Messpunkte erfolgte unter Berücksichtigung realer flugbetrieblicher Drehzahlen sowie weiterer Betriebspunkte entlang der Triebwerkskennlinie. So sind die LHT-Experten in der Lage, die Charakteristik des Triebwerkes ebenso wie die lastabhängigen Emissionswerte zu ermitteln und bei Bedarf eine Umrechnung von Boden-Referenzwerten für andere Umgebungswerte unter z.B. Reiseflugbedingungen durchzuführen.

Die Messungen "schnelle Acceleration" und "langsame Acceleration", die beim 4. Lauf zusätzlich durchgeführt wurden, stehen nicht in direktem Bezug zum Einsatz von Biokerosin, sondern dienen der Untersuchung von transienten Übergängen zum Verständnis der Ergebnisse der Freifeldmessungen.

### 2.1.3. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Emissionsmessungen wurden durch das DLR ausgewertet. Es zeigte sich, dass das aromaten- und verunreinigungsfreie ATJ-SPK-Kerosin insbesondere in den mittleren Drehzahlbereichen (Approach und Taxi) zu einer spektakulären Reduzierung der Partikelemissionen führt. Für die Partikelanzahl im Leerlauf (flight idle) ermittelte das DLR eine Reduzierung um mehr als 90 %<sup>5</sup>. Einzelheiten lassen sich dem Abschlussbericht des Partners DLR entnehmen [8].

Dieses Ergebnis ergänzt komplementär die Ergebnisse der HBBA-Studie, die bereits veröffentlicht wurden [1] und zeigt, dass der emissionsreduzierende Effekt hauptsächlich vom Aromatenanteil und -zusammensetzung abhängt, während das Fehlen von Verunreinigungen nur eine sekundäre Rolle spielt. Gemeinsam ermöglichen die beiden Studien klare Aussagen über die Auswirkungen von Aromaten auf die Partikelemission.

Die Triebwerksparameter wurden während der einzelnen Läufe aufgezeichnet. Ein Vergleich der Parameter zeigte keine auffälligen Abweichungen zwischen den Werten für den Lauf mit ATJ-SPK-Kerosin und den drei anderen Läufen, obwohl ATJ-SPK ausschließlich aus C12- und C16-Kohlenwasserstoffketten besteht, während bei den anderen Läufen Kerosin mit einer deutlich breiteren Verteilung der Kettenlängen verwendet wurde. Hier war es im Vorfeld für möglich gehalten worden, dass es zu Abweichungen kommen würde. Augenscheinlich hat aber die Verteilung der Kettenlängen auf den Betrieb eines Triebwerks unter Normalbedingungen keinen wesentlichen Einfluss. Es ist allerdings zu vermuten, dass sich dies bei einem Betrieb unter grenzwertigeren Bedingungen (zum Beispiel bei sehr kalten Temperaturen) anders darstellen kann.

Negative Auswirkungen des aromatenfreien Kraftstoffs auf die Dichtungen der Tankanlage wurden keine festgestellt. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Dichtungen in einem guten Zustand waren und nur eine Menge von ca. drei Tonnen durchgesetzt wurde.

Die Messungen zu transienten Übergängen zeigten, dass ein schnelles Hochfahren zu höheren Spitzenwerten bei den Emissionen führt, die dafür aber auch weniger lange anhalten. Dieser Effekt wird bei der Auswertung der während der Freifeldmessungen erhobenen Daten berücksichtigt werden.

## 2.2. Freifeldmessung auf dem Vorfeld am Flughafen Frankfurt

### 2.2.1. Organisation von Abgasmessungen startender Flugzeug am Flughafen Frankfurt

Messungen im Abgasstrahl von Flugtriebwerken stellen schon allein aufgrund der dort wirkenden Kräfte eine besondere Herausforderung für Technik und Operateur dar. Für die Abgasmessungen am V2500-Triebwerk eines A321 im Rahmen des burnFAIR-Projekts wurde eigens eine spezielle Halterung mit einem tonnenschweren

---

<sup>5</sup> s. hierzu [8], Abb. 4



Fuss gebaut, an der die Messsonde installiert wurde, und die Messungen wurden in der Lärmschutzhalle des Flughafens Hamburg durchgeführt [9].

Eine andere Herangehensweise stellen Messungen quer zum Abgasstrahl dar. So wurden in der Vergangenheit NO und NO<sub>2</sub> im Leerlauf am Ausgang der Schubdüse gemessen. Dabei kamen FTIR-Spektrometern (NO) und DOAS Systeme (NO<sub>2</sub>) zum Einsatz, die rund 50 m seitlich zum Flugzeug platziert waren [10].

Demgegenüber ermöglicht die vom Projektpartner DLR VT eingesetzte Messtechnik mit drei kombinierten Systemen eine sehr breite Untersuchung von verschiedenen Spurenstoffen und Partikeln direkt im Abgasstrahl.

Das Besondere an der Messidee des DLR in Frankfurt ist die Nutzung eines Spaltes unter einer Blastwand direkt am Bahnkopf der Startbahn 18 WEST. So sind einerseits Operateure und Geräte weitgehend vom Abgasstrahl geschützt und die Sonde konnte in gerader Linie zu den startenden Flugzeugen positioniert werden (s. Bild 3).



*Bild 3: oben links: Blastwand (rechts) am nördlichen Ende der Startbahn 18 West am Flughafen Frankfurt; oben rechts: Position des DLR-Messwagens hinter der Wand; unten links: Spalt unter der Wand mit Messsonde des DLR; unten rechts: Blickrichtung der Sonde entlang der Startbahn auf die eindrehenden Flugzeuge.*

Abgasmessungen auf dem Flughafenvorfeld stellen in vielerlei Hinsicht einen komplexen Non-Routine-Vorgang dar, der der intensiven und umfangreichen Planung und Vorbereitung bedarf. Neben den technischen Aspekten waren hier vor allem sicherheitsrelevante Punkte sowohl in Bezug auf Berechtigungen als auch im Ablauf zu klären. Folgende Punkte waren hierfür zu berücksichtigen:

- Bereitschaft der Fraport AG zur unentgeltlichen Unterstützung der Messkampagne eingeholt.

- Auswahl und finale Festlegung des Messorts an der Blastwand Startbahn 18 West mit Fraport AG.
- Beschaffung und Bereitstellung eines Bündels N<sub>2</sub>-Gasflaschen (benötigt zum Betrieb der DLR-Messgeräte) durch LTL (Lufthansa Technik Logistik).
- Lagerung und Transport am Messtag (durch LTL).
- Klärung von gefahrstofflichen und feuerpolizeilichen Fragen bzgl. des Transports mit entsprechenden Dienststellen der Fraport AG.
- Bestellung und Bereitstellung von liq. N<sub>2</sub> (zum Betrieb der DLR-Messgeräte) durch LHT.
- Veranlassung eines Bau- und Instandhaltungsvorgangs bei Fraport AG mit entsprechenden betrieblichen Regelungen am Flughafen (z.B. Sperrung eines Taxiways in der Nähe des Messorts).
- Begleitung der DLR-Messmannschaft während der Messungen auf dem Flughafenvorfeld durch Mitarbeiter der LHT.
- Schaffung der Zugangsvoraussetzungen – sowohl genereller als auch tagesbezogener Art – der DLR-Messmannschaft für das Flughafenvorfeld (Luftsicherheitsüberprüfung, Vorfeldzugang und Sicherheitsschulung u.a.).
- Organisation eines Lotsenfahrzeugs für die Wege zum und vom Messort sowohl für den Materialtransport als auch für das DLR-Messfahrzeug.
- Klärung eines sicheren Übernachtungsstandorts für das DLR-Messfahrzeug.

Aufgrund dieser Komplexität wurde im Rahmen der Messkampagne eine „Generalprobe“ durchgeführt, um sicherzustellen, dass die Abläufe funktionieren.

In Bild 4 sind die für die Messkampagne wesentlichen Orten auf einem Satellitenfoto gekennzeichnet.



**Bild 4:** Übersicht des Flughafens Frankfurt mit den für die Messkampagne wesentlichen Orten (LAC = Lufthansa Aviation Center).

### 2.2.2. Messungen von Abgasen startender Flugzeuge

Die Abgasmessungen wurden vom 19. - 21. Mai 2015 erfolgreich durchgeführt. Die umfangreichen Vorbereitungen und Absprachen ermöglichten eine gute und reibungslose Zusammenarbeit zwischen Fraport, DLR, LHT, LTL und DLH.

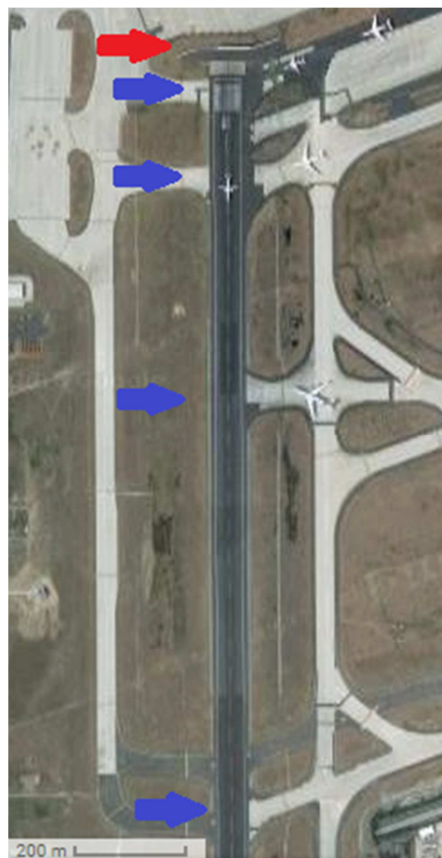
Bei hervorragenden äußeren Bedingungen konnte ein umfangreicher Datensatz von einem breiten Luftfahrzeugspektrum, das einen repräsentativen Querschnitt von Regional-, Kontinental- und Interkontinental-Flugzeugen darstellt, gesammelt werden.

Weltweit konnte so zum ersten Mal demonstriert werden, dass Messungen des Abgasstrahls startender Flugzeuge (geschützt hinter einer Blastwand) möglich sind und Messdaten von guter Qualität liefern.

Zur genauen Zuordnung der Messdaten zu dem Triebwerkstypen, wurden dem Partner DLR Informationen über die genauen Flugzeugtriebwerkskombinationen der Lufthansa-Flugzeuge bereitgestellt.

### 2.2.3. Messergebnisse und Bewertung

Die wichtigste Erkenntnis ist, dass die Abgasfahnen von den Messsystemen klar erfasst werden konnten und dass die verschiedenen Flugzeugtypen voneinander unterschieden werden können.



**Bild 5:** Startbahn 18 West: die zu den verschiedenen Rollwegen gehörenden Startpositionen sind blau markiert; der rote Pfeil weist auf die Blastwand.

Von den insgesamt vier Messabständen (s. Bild 5 blaue Pfeile) – bedingt durch die verschiedenen Rollwege zur Startbahn 18 West – lieferten die Messungen der beiden am nächsten zur Blastwand liegenden Startpositionen (rund 100 m und 200 m Distanz) sinnvolle Messdaten. Bei Regionalflugzeugen reduziert sich dies aufgrund der geringeren Massenströme auf die kürzeste Distanz bei schwankender Qualität der Messdaten.

Messungen mit Abständen von 300 m und mehr zeigen keine auswertbaren Messsignale, da die heißen Abgase schnell nach oben entweichen und die Windrichtung und –stärke einen zunehmenden Einfluss haben.

Vergleichende Messdaten zwischen konventionellen Triebwerken (Trent900, GE90) und Triebwerken mit modernerer Verbrennungstechnologie (Magerverbrennung beim GENX) liegen vor. Die qualitative Auswertung zeigte auch, dass die Messungen während des Rollvorgangs und des Schubhochfahrens aufgrund der Komplexität des Vorgangs nicht ohne weiteres mit standardisiert erhobenen Daten (z.B. ICAO-Emissionswerten) verglichen werden können, die bei stabilen Lastzuständen und damit stabilen Emissionsverhältnissen erhoben werden.

Demgegenüber beschreibt das auf die Startbahn rollende, eindrehende und dann den Schub erhöhende Flugzeug einen hochgradig dynamischen Vorgang, der entsprechende transiente Übergänge in der Verbrennung nach sich zieht. Die Messdaten sind entsprechend schwierig und mit Sorgfalt zu interpretieren.

Um hier zu einem tieferen Verständnis zu gelangen, wurde das Thema auch im Rahmen der Triebwerksprüfstandmessungen untersucht, mit dem Ziel, die im Freifeld zu Tage getretenen Effekt beim Hochfahren des Startschubs unter kontrollierten Bedingungen nachvollziehen zu können (s. auch Kapitel 2.1.2).

Die konkreten Messergebnisse zu den einzelnen Schadstoffkomponenten und Partikeln sind dem Schlussbericht des Partners DLR zu entnehmen [8].

### **2.3. Kriterien für künftigen Kraftstoffen**

Die im Rahmen von aireg<sup>EM</sup> durchgeführten Emissionsmessungen zeigten eindeutig, dass der Aromatengehalt eine wesentliche Auswirkung auf die Partikelemissionen hat. Dieses Ergebnis ist konsistent mit den Ergebnissen anderer Studien, insbesondere der HBBA-Studie [1]. Darüber hinausgehende Effekte der Biokraftstoffe auf andere Emissionen (zum Beispiel NO<sub>x</sub>) sind hingegen von untergeordneter Bedeutung.

Die in der wissenschaftlichen Diskussion erörterten Auswirkungen von Partikelemissionen sind zum einen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit [11], und zum anderen Klimaauswirkungen durch Induzieren von Kondensstreifen und Zirruswolkenbildung (vgl. z.B. [12]). Der erste Aspekt betrifft insbesondere Emissionen am Boden am Flughafen selber und im unmittelbaren flughafennahen Bereich, während der zweite Aspekt hauptsächlich in großer Höhe auftritt. Die genaue Bedeutung beider Faktoren ist in der Wissenschaft noch sehr umstritten, aber es besteht Konsens, dass eine möglichst weitgehende Reduzierung der Partikelemissionen wünschenswert ist.

Die Messungen im Rahmen von aireg<sup>EM</sup> belegen, dass sich die Partikelemissionen durch die Verwendung eines aromatenfreien Kraftstoffes deutlich reduzieren lassen.

Geradezu spektakulär ist die Wirkung bei Triebwerksdrehzahlen, die typischerweise am Boden erreicht werden: Hier ergibt sich eine Reduzierung der Teilchenanzahl in der Größenordnung von bis zu 90 %. Eine Reduzierung des Aromatengehaltes im Kraftstoff ist daher potenziell eine sehr wirksame Maßnahme, den Partikelemissionen am Boden zu begegnen. Während sich die Partikelanzahl unter Reiseflugbedingungen nur geringfügig unterscheidet, ist dennoch eine Reduktion der Gesamtpartikelmasse von bis zu 30% erreichbar. Diese Reduktion hat das Potential bereits deutliche Verbesserungen bei der Zirrenbildung zu bewirken.

Unter dem Aspekt der Partikelemissionen sollten zukünftige Flugturbinenkraftstoffe daher möglichst aromatenarm sein. Eine völlige Aromatenfreiheit lässt sich mit heutigen Tanksystemen nicht erreichen, da die gegenwärtig verwendeten Ventilsysteme überwiegend aus Nitrilgummi bestehen, in dem sich die Aromaten anreichern und die in neuen Dichtungen enthaltenen Weichmacher ersetzen, die im Betankungsbetrieb ausgewaschen werden. Durch die Aromaten quellen die Ventile auf und bleiben dicht<sup>6</sup>. Der hierfür erforderliche Anteil an Aromaten liegt aber weit unterhalb der Anteile, die sich normalerweise im Kerosin befinden [9] und die auf den natürlicherweise im fossilen Rohöl enthaltenen Aromatenanteil zurückzuführen sind. Forschungsbedarf besteht noch bezüglich des Aromatengehaltes, der tatsächlich mindestens erforderlich ist, um die Dichtigkeit der Tanksysteme zu gewährleisten. Der von der ASTM vorgegebene Mindestgehalt an Aromaten von 8 % ist als eher konservativ einzuschätzen und mit ziemlicher Sicherheit unnötig hoch, da an Flughäfen bereits über längere Zeit Kerosin mit deutlich niedrigerem Aromatengehalt vertankt wurde, ohne dass dies zu Sicherheitsproblemen geführt hätte<sup>7</sup>.

Gegenwärtig zugelassene Biokerosine sind aromatenfrei, da es bis vor einigen Jahren noch keine Verfahren gab, auch die Aromaten synthetisch herzustellen. Die gegenwärtig zugelassenen alternativen Kerosine eignen sich daher nur zum Beimischen zu fossilem Kerosin, dessen Aromatengehalt dadurch bis auf den vorgeschriebenen Mindestwert verdünnt werden kann. Mittlerweile wurden jedoch Verfahren entwickelt, die auch die Herstellung von Aromaten ermöglichen, so dass ein vollsynthetischer Biokraftstoff erzeugt werden kann (ARA, Swedish Biofuels)<sup>8</sup>. Diese Verfahren, bei denen sich der Aromatengehalt als ein Prozessparameter einstellen lässt, befinden sich gegenwärtig in der ASTM-Zulassung. Es ist davon auszugehen, dass dies die längerfristig erfolgreichere Variante sein wird, da das Mischen von Kerosin und Biokerosin ein zusätzlicher, und gegenwärtig sehr aufwändiger, Verfahrensschritt ist und mit den heute zugelassenen Biokerosinen maximal Beimischungsanteile von 50 % erreicht werden können, die Luftfahrtindustrie aber zur Erreichung ihrer CO<sub>2</sub>-Ziele bis 2050 einen weit über 50 % hinausgehenden Anteil an Biokerosin benötigen wird. Bei vollsynthetischen Kraftstoffen ist davon auszugehen, dass in absehbarer Zeit ein hundertprozentiger Ersatz des fossilen Kerosins zugelassen sein wird.

Die gegenwärtige Diskussion um die Förderung von Biokerosin steht hauptsächlich unter dem Aspekt der CO<sub>2</sub>-Reduzierung. Der Aromatengehalt des Kerosins steht hier im Hintergrund. Wie die HBBA-Studie gezeigt hat, führt aber ein vollsynthetisches Bi-

<sup>6</sup> Siehe hierzu die Ausführungen in [1], Kapitel 6

<sup>7</sup> Siehe [1], Seite 22

<sup>8</sup> Siehe [1], Abschnitte 3.5 und 3.6

okerosin zu ähnlichen Partikelemissionen wie ein fossiles Kerosin mit gleichem Aromatengehalt<sup>9</sup>; die Freiheit des Biokerosins von Verunreinigungen hat nur einen untergeordneten Effekt. Politische Vorgaben an die Förderung vollsynthetischer Kerosine sollten daher auch an die Bedingung geknüpft werden, dass der Aromatengehalt im Bereich der durch die Spezifikation vorgeschriebenen Mindestwerte bleibt. Da das aktuell verwendete fossile Kerosin ganz überwiegend weit oberhalb der Mindestgrenzen liegt, würde sich dann durch das vollsynthetische Kerosin insgesamt eine Senkung des Aromatengehaltes ergeben. Kritisch zu sehen sind hingegen insbesondere Verfahren, die zu einer Erhöhung des Aromatengehaltes führen würden (zum Beispiel Aufarbeitung von Biomasse durch Pyrolyse zu einem sehr aromatenhaltigen Zwischenprodukt, mit anschließender Weiterverarbeitung gemeinsam mit Rohöl in einer Raffinerie).

---

<sup>9</sup> Siehe [1], Kapitel 7

### 3. AP2 – Triebwerksperformance und Flugleistungsrechnung

Neben den spezifischen Daten aus den Prüfstandsmessungen in AP1 ist es von besonderem Interesse abzuschätzen, wie groß die Unterschiede zwischen konventionellem und alternativen Kraftstoff in Bezug auf Verbrauch und Emissionen ausfallen, wenn einzelne Flugmissionen simuliert und die Ergebnisse auf ein Flugbetriebsszenario übertragen werden.

#### 3.1. Aufgabenstellung und Zusammenarbeit

Da die Arbeitsweise von Flugzeugtriebwerken wesentlich durch Umgebungsgrößen, wie z.B. Temperatur, Druck, Dichte beeinflusst wird und ein reales Flugprofil neben wechselnden Triebwerkslasten vor allem durch verschiedene Flughöhen und einer damit einhergehenden Veränderung eben dieser Parameter gekennzeichnet ist, wurden hierfür vom Partner DLR Triebwerksmodelle entwickelt, die eine Abschätzung von Verbrauch und Emissionen für typische Umgebungsbedingungen und Lastzustände von realen Flugmissionen erlauben.

Die Ermittlung dieser höhenspezifischen Simulationswerte basierte dabei auf thermodynamischen Triebwerks- und Treibstoffmodellen des Instituts für Antriebstechnik des DLR (DLR AT), welche eine Hochrechnung des Betriebsverhaltens auf Basis der in AP1 untersuchten Kraftstoffe und der ermittelten Triebwerksbetriebslinien unter Prüfstandsbedingungen ermöglichten. Bereiche wie der Reiseflug sowie Teile des Steig- und Sinkfluges, die im realen Flugeschehen außerhalb der Bodenbedingungen stattfinden, konnten somit gemäß internationaler Standardatmosphäre (ISA) für typische Flughöhen simuliert und entsprechende Triebwerksperformancedaten abgeleitet werden.

So wurden vom Partner DLR AT für verschiedene Lufthansa-Flotten gemäß ihrer typischen Parameter – wie z.B. mittlere Missionsdauer, maximale Steighöhe – Triebwerksmodelle entwickelt und charakteristische Emissionsdaten ermittelt. Auf Basis dieser Hochrechnung und der bestehenden Referenzergebnisse aus den Messkampagnen sowie realer Verkehrsdaten der Lufthansa (Trip Fuel, Flughöhen, zurückgelegte Strecken sowie Flug- und Blockzeiten) aus dem Bezugsjahr 2013 erfolgte anschließend die Ermittlung der höhenspezifischen Emissionsindizes für die generischen Flugmissionen.

Tabelle 2: Eigenschaften der in aireg<sup>EM</sup> untersuchten Kraftstoffe<sup>10</sup>.

	Hersteller	C-Gehalt [%]	H-Gehalt [%]	EI CO <sub>2</sub> [kg/kg]	EI H <sub>2</sub> O [kg/kg]	Aromatengehalt [%]	Brennwert [MJ/kg]
Jet A1	-	85,9	14,1	3,15	1,26	15,6	43,07
ATJ-Kerosin	Gevo	84,1	15,5	3,08	1,38	<1	43,89

<sup>10</sup> s. hierzu in [8], Tab. 3 und in [13], S.35-36

In die Simulationsbetrachtung wurde mit den Daten der im AP1 am Triebwerksprüfstand untersuchten Kraftstoffe – konventioneller Referenzkraftstoffe Jet A1 und alternativer, aromatenfreien ATJ-Kraftstoff (GEVO, s. Tabelle 2) – durchgeführt.

## **3.2. Triebwerksmodelle und Flugmissionen**

### *3.2.1. Verkehrsstatistik und Triebwerksmodelle*

Nach der Sichtung verschiedener Alternativen wurde das OBELSIK-System als Datenquellen für die Flugbetriebsszenarien ausgewählt. Dort werden alle relevanten Informationen zu Einzelflügen gesammelt. Um diese Daten für die vorliegende Arbeit nutzen zu können, mussten sie gefiltert und aufbereitet werden. Andere Datenquellen mit teilweise aggregierten Informationen entsprachen nicht den Anforderungen. Das OBELSIK-System stellt eine umfassende und stringente Informationsquelle dar und lies aufgrund seiner Vielfalt die meisten Auswerteoptionen zu. In Abstimmung der Arbeiten der Partner DLR AT und Dt. Post/DHL wurde als Untersuchungsjahr das Jahr 2013 ausgewählt. Die zu den Einzelflügen aus OBELSIK extrahierten Daten umfassen die folgenden Bereiche:

- Flugnummer, Callsign u.ä.
- Datum, Zeitpunkte und -dauern (Boden und Flug u.ä.)
- Orte und Regionen
- Registrierung und Flotte
- Gewichte

Diese Analyse erfolgte jeweils für die Flotten der Lufthansa Passage Airline, der Lufthansa Cityline und Lufthansa Cargo.

Im Zuge der Auswertung der Verkehrsstatistik wurde mit Blick auf die Frage, welche Triebwerksmodelle zu entwickeln sind, verschiedene Teilflotten sinnvoll zusammengefasst (s. Tabelle 3), wie z.B. CRJ-700 und -900 oder ERJ-190 und-195, deren Bewegungsportfolio und vor allem die Triebwerke vergleichbar oder identisch sind.

Nach der Festlegung der zu untersuchenden Flotten für das Betrachtungsjahr wurden in Abstimmung mit den Partner DLR AT analysiert, für welche Teilflotten das gleiche Triebwerksmodell angesetzt werden kann. Hierbei wurden u.a. Informationen zu Triebwerksfamilien, spezifischen Verbräuchen und Emissionseigenschaften (ICAO-Emissionsdatenbank, [14]) berücksichtigt, so dass insgesamt fünf verschiedene repräsentative Triebwerksmodelle unterschieden wurden.

Mit Hilfe des DLR-eigenen Triebwerkssyntheseprogramms GTlab konnte der Partner DLR AT auf Basis von individuellen Triebwerksparemtern und der Ergebnisse aus AP1 für die beiden Kraftstoffe die individuellen Triebwerksmodelle entwickeln.



Tabelle 3: Übersicht der Lufthansa Flotten mit Triebwerksversionen und der Zuordnung zu den Triebwerksmodellen (TW-Modell).

Flotte	Abkürzung	Triebwerk	TW-Modell
CRJ 700/900	CRJ	CF34	A
ERJ 190/195	ERJ	CF34	A
Airbus A319/A320	319/320	CFM56 5A/B	B
Airbus A321	321	IAE V2500	B
Boeing 737-300 / -500	737	CFM56 3B1	B
Airbus A330-300	333	RR Trent 700	E
Airbus A340-300	343	CFM56 5C4	B
Airbus A340-600	346	RR Trent 500	C
Airbus A380-800	388	RR Trent 900	D
Boeing 747-400/8I	747	CF6-80C2/GENx	E
Boeing MD11F	MD11	CF6-80C2	E

Triebwerksmodell B deckt die meisten Flotten ab, weil es im Kern die CFM56-Baureihe repräsentiert. Die Unterscheidung zwischen Modell A und B ergibt sich aus den Schubklassen und den Brennstoffverbräuchen der jeweiligen Triebwerke. Das Modell C repräsentiert nur den A340-600, weil das Trent 500 eine deutlich andere NO<sub>x</sub>-Charakteristik aufweist, als Triebwerke mit vergleichbarer Leistung. Ebenso hat der A380 (Modell D) aufgrund des Brennstoffverbrauchs und der NO<sub>x</sub>-Charakteristik des Trent 900 eine Sonderstellung.

In Gruppe E sind verschiedene Triebwerke herstellerübergreifend zusammengefasst, da ihre Brennstoffverbräuche vergleichbar sind. Trent 700 (A330-300) passt gemäß NO<sub>x</sub>-Charakteristik und Brennstoffverbrauch sowie bzgl. BPR und OPR am besten in Gruppe E zusammen mit Flugzeugen, die mit dem CF6-80C2-Triebwerk ausgestattet sind. Eine Ausnahme bildet hier das GENx-Triebwerk der B747-8I. Diese Flugzeuge wurden näherungsweise ebenfalls mit Modell E modelliert, denn am Ende des Betrachtungsjahres waren erst neun Flugzeuge in Dienst gestellt, so dass ein möglicher Fehler und sein Einfluss auf die Gesamtemissionen im Rahmen der Gesamtgenauigkeit als vernachlässigbar abgeschätzt wurde.

### 3.2.2. Flugmissionen je Flotte

Zur Vorbereitung der Treibstoffvergleiche wurden für die ausgewählten Flotten Anzahlverteilungen bzgl. Streckenlängen (Grosskreis), Flugzeiten, Trip-fuel-Verbräuche und Gewichten u.a. erstellt (s. Tabelle 4).

Aufbauend auf den Triebwerksmodellen und deren Zuordnung zu den einzelnen Flotten wurden bei Lufthansa Passage Airline, Lufthansa Cargo und Lufthansa Cityline mit Hilfe von Experten aus der Flugplanung (Dispatch) typische Profile für die vorgegebenen mittleren Missionen definiert und an den Partner DLR AT übergeben.

Aufbauend auf diesen Daten konnten mit dem DLR-eigenen Missionstool VarMission Flugleistungsrechnungen durchgeführt und die Einflüsse alternativer Treibstoffe gegenüber konventionellem Kerosin für die repräsentativen mittleren Flugmissionen der vorgegebenen Lufthansa-Flotten quantifiziert und analysiert werden.

Neben dem Emissionsverhalten wurde auch die Auswirkungen der am Triebwerksprüfstand ermittelten höheren Energiedichte des alternativen Treibstoffs ATJ im Vergleich zum Jet A1 Kraftstoff auf die Flugzeugperformance und die Flugmissionen untersucht.

*Tabelle 4: Übersicht der Lufthansa Flotten mit Beschreibungen der mittleren Missionen<sup>11</sup>.*

Flotte	Flugzeit [min]	Gewicht [t]	Trip Fuel [t]	max. Höhe	Climb / step Climb / Descent
CRJ	56	30,7	1,52	FL350	15-20mins bis FL320-350 Descent 25-30mins
ERJ	67	42,4	2,33	FL350	15-20mins bis FL320-350 Descent 25-30mins
319/320	81/83	57,1/61,7	3,2/3,5	FL390	19/21mins bis FL390 nach 58/60mins Descent
321	94	72,5	4,5	FL360	23mins bis FL360 nach 69mins Descent
733/735	59/58	49,8/46,7	2,6/2,4	n/a	-
333	339	195	30,6	FL390	22mins/ 30mins
343	439	220	46,3	FL390	36mins bis FL370 nach 04:15 Climb auf FL390 Descent nach 06:54 hrs
346	557	313,7	76,1	FL370	32mins bis FL350 nach 05:50 Climb auf FL370 nach 07:14hrs climb auf FL390 Descent nach 09:29hrs
388	613	500,6	128,6	FL390	36mins bis FL350 nach 05:43hrs Climb auf FL390 Descent nach 09:39hrs
747	534	346	90,2	FL360	21mins bis FL340 nach 02:12hrs Climb auf FL360 nach 05:46 Climb auf FL380 nach 08:35 Descent
MD11	310	232,4	39,3	FL410	15mins bis FL330-350 nach 2-3hrs (weather) Climb Descent 33mins

### 3.3. Emissionsberechnungen

#### 3.3.1. Ergebnisse

Mit Hilfe dieser Simulationsstruktur konnten schließlich die flugphasenabhängigen Verbrauchswerte für die beiden betrachteten Kraftstoffe, der daran gekoppelte Aus-

<sup>11</sup> FL = flight level; z.B. FL320 bezeichnet die Flughöhe 32000 ft unter Standardbedingungen

stoß von CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O sowie die höhen-spezifischen Rußmassenemissionen für alle Flugzeug-Triebwerk-Kombinationen realitätsnah nachgebildet und quantifiziert werden.

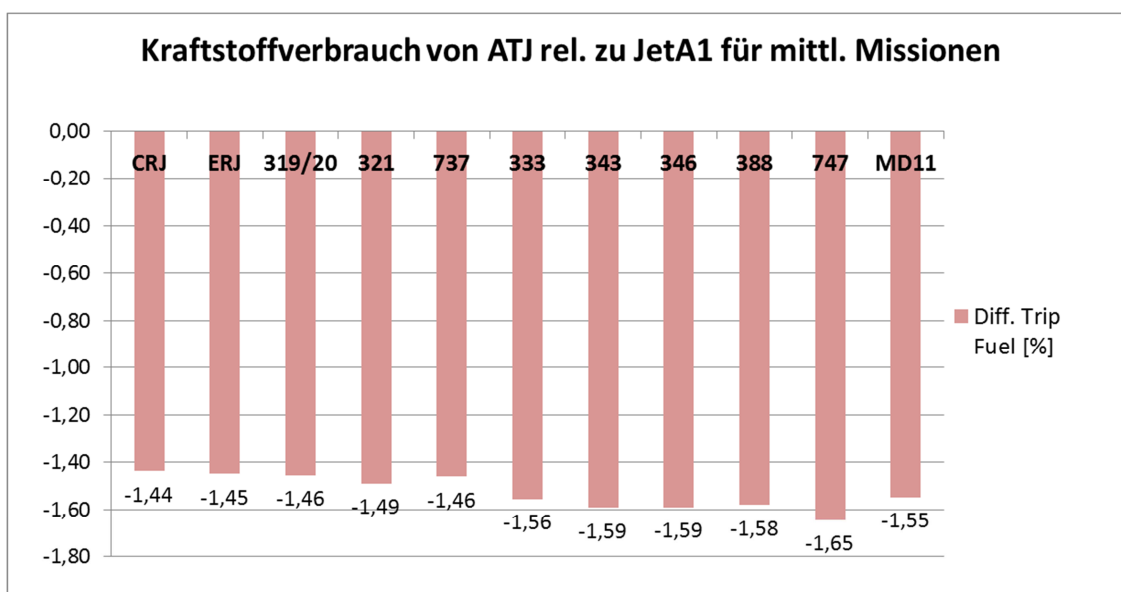


Bild 6: Darstellung der relativen Unterschiede im Verbrauch beim Vergleich des alternativen Kraftstoffs ATJ relativ zu Jet A1 für die mittleren Missionen aller Teilflotten.

Bild 6 zeigt die relative Einsparung im Kraftstoffverbrauch für die verschiedenen Teilflotten mit ihren spezifischen Flugmissionen. Dabei würde die Anwendung des ATJ-Kraftstoffs zu einer Einsparung im Vergleich zum Referenz-Jet A1 von -1,44% bis zu -1,65% führen. Der wesentliche Grund hierfür liegt in dem höheren Heizwert des ATJ-Kraftstoffs (s. auch Tabelle 2).

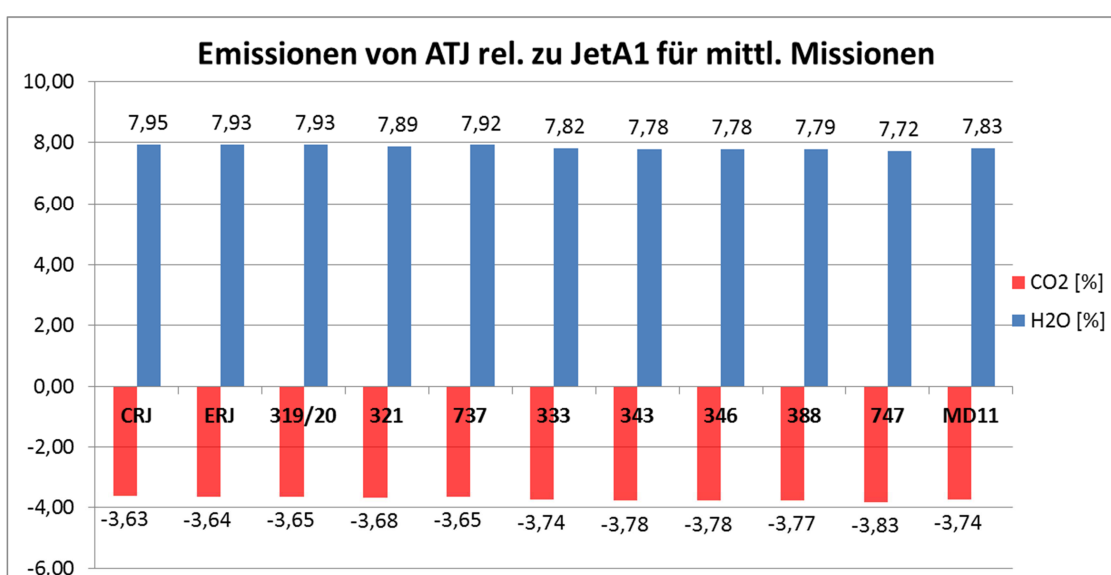


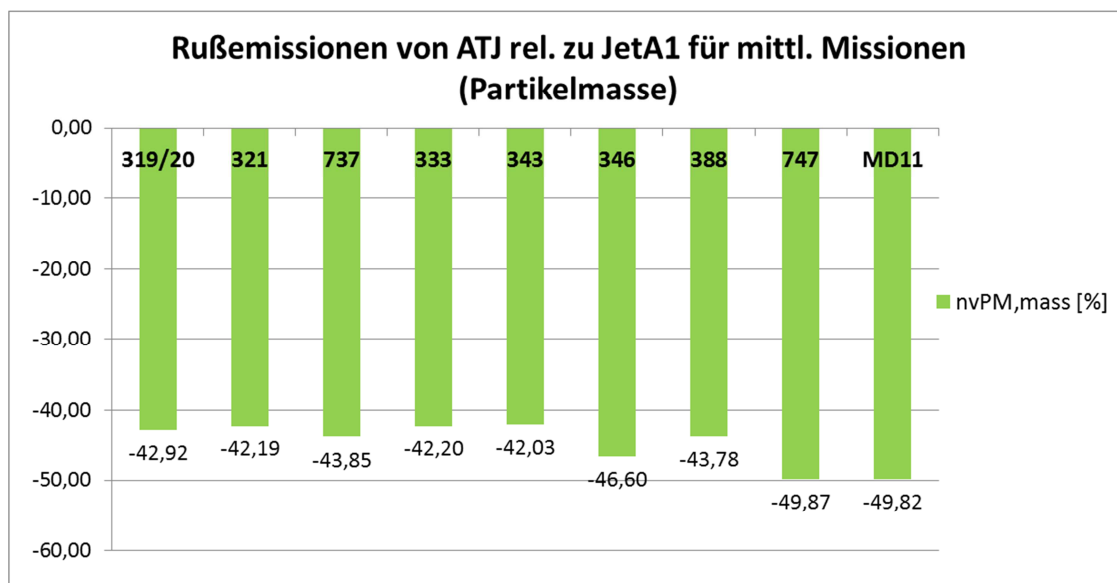
Bild 7: Darstellung der relativen Unterschiede der CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>O-Emissionen beim Vergleich des alternativen Kraftstoffs ATJ relativ zu Jet A1 für die mittleren Missionen aller Teilflotten.

Die Simulationsergebnisse zeigen darüber hinaus, dass der Einsatz des alternativen Kraftstoffes im Vergleich zum konventionellen Kraftstoff eine Senkung der verbrennungsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen für die betrachteten Flugmissionen ermöglicht. Die ermittelten CO<sub>2</sub>-Einsparungen liegen je nach Flugzeugtyp zwischen -3,64 % und -3,83 % (s. Bild 7, unterer Teil)<sup>12</sup>. Neben dem niedrigeren Treibstoffverbrauch, aufgrund des höheren Heizwertes, ist dafür vor allem der geringere Kohlenstoffgehalt des ATJ-Kraftstoffes verantwortlich (s. auch Tabelle 2), so dass die Einsparung höher als beim Verbrauchsvergleich ausfallen.

Demgegenüber wachsen die H<sub>2</sub>O-Emissionen um 7,72 bis zu 7,95 % an (s. Bild 7, oberer Teil). Wesentlicher Grund hierfür ist der höhere Wasserstoffgehalt des ATJ-Kraftstoff im Vergleich zu Jet A1 (s. auch Tabelle 2).

Eine Hochrechnung der möglichen CO<sub>2</sub>-Einsparung für den Fall, dass im Betrachtungsjahr nur ATJ-Kraftstoff genutzt worden wäre, ergibt ein CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial von rund 690.000 t. Diese Menge entspricht rund 3% der CO<sub>2</sub>-Emissionen der drei Lufthansa-Flugbetriebe, die 2013 rund 511.000 Flüge durchgeführt haben.

Im Fall der Rußpartikel zeigt sich der positive Einfluss der aromatenfreien Zusammensetzung des ATJ-Kraftstoffes für alle betrachteten Szenarien erneut deutlich. Die Simulationsergebnisse zeigen über alle Teilflotten hinweg eine drastische Abnahme der Rußmassenkonzentration von -42,03 % bis zu -49,87 % (s. Bild 8).



**Bild 8:** Darstellung der relativen Unterschiede der Rußmassenemissionen beim Vergleich des alternativen Kraftstoffes ATJ relativ zu Jet A1 für die mittleren Missionen aller Teilflotten.

Für die beiden Teilflotten CRJ und ERJ konnten aufgrund der Rußcharakteristik und der Schubanforderungen für die in dieser Untersuchung betrachteten Missionen keine nvPM, mass-Emissionen ermittelt werden.

<sup>12</sup> s. hierzu auch in [13], S.53, wo das CO<sub>2</sub>-Reduktionspotential bei der Anwendung von ATJ-Kraftstoff für eine vereinfachte generische A340-300-Mission auf -4,4% in guter Übereinstimmung mit den hier gezeigten Daten abgeschätzt wurde.

Da die im Prüfstandsversuch ermittelten Emissionswerte für CO und NO<sub>x</sub> nur geringfügige Abweichung zwischen Referenz- und Alternativkraftstoff aufwiesen, wurde die Entwicklung dieser Gasemissionen, trotz ihrer Relevanz für Umwelt und Klima, nicht weiter betrachtet.

### 3.3.2. Proberechnungen am Beispiel Airbus A330-300

In den vorangegangenen Abschnitten wurde das gesamte Streckenportfolio eines Flugzeugtyps mit „nur“ einer mittleren generischen Mission beschrieben, deren Emissionswerte bzw. die Unterschiede zwischen den Kraftstofftypen konnten dann entsprechend verglichen werden und bei Bedarf auf die Gesamtzahl der Flüge im Betrachtungsjahr hochskaliert werden.

Um das Vorgehen zu überprüfen und zu rechtfertigen, dass zur Bestimmung der gewünschten Emissions- und Verbrauchsgrößen keine Differenzierung nach verschiedenen Missionslängen erforderlich ist, wurden am Beispielflugzeug A330-300 eine Sensitivitätsstudie durchgeführt.

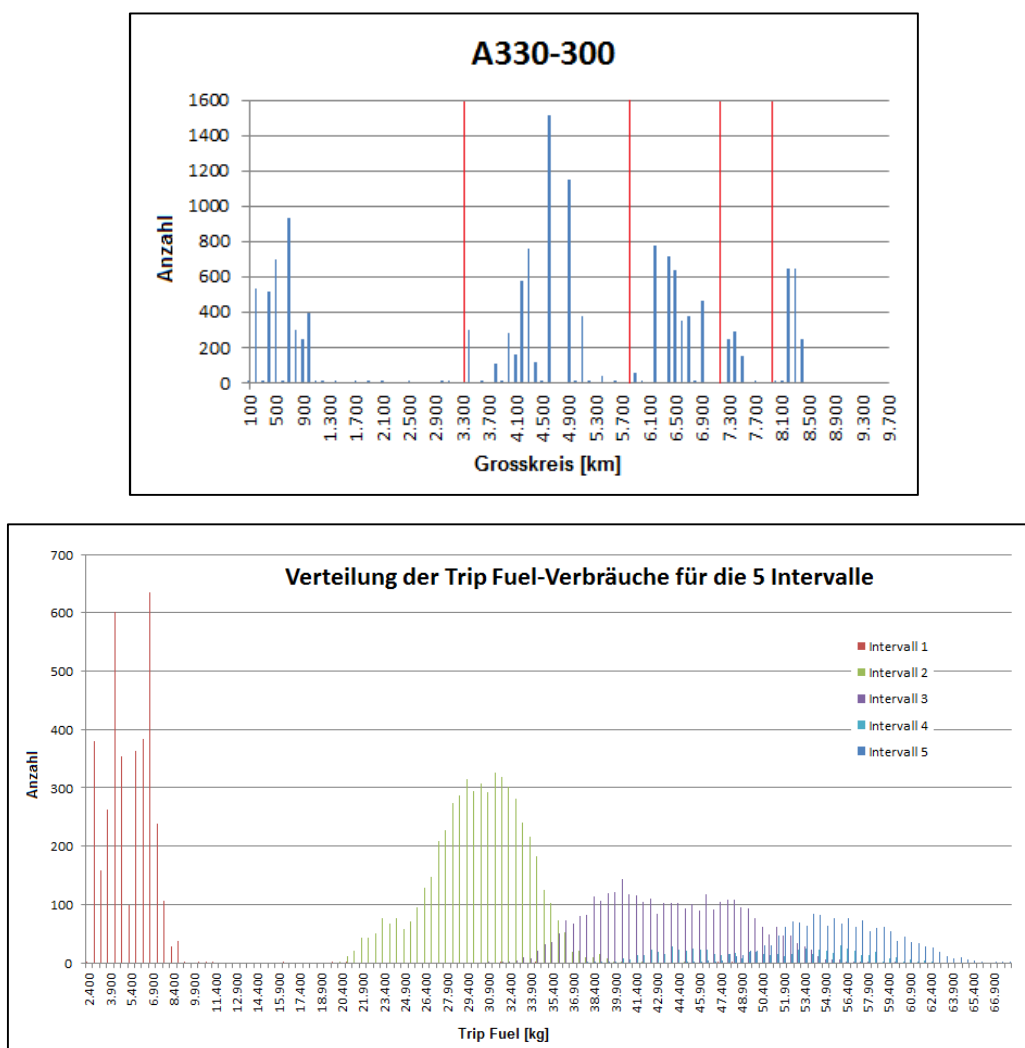


Bild 9: oben: Verteilung der Grosskreisentfernungen der A330-300-Flotte für 2013 für die fünf ausgewählten Untergruppen; unten: Verteilungen der zu den fünf Untergruppen gehörenden Trip fuel-Verbräuche.

Dabei wurden neben der Emissionsberechnung mit einer generischen mittleren Mission zum Vergleich Untergruppen im Streckenportfolio gebildet, für die die Gesamtemissionen separat berechnet und dann mit den Werten der anderen Untergruppen verglichen wurden, um so den möglichen Einfluss variabler Reiseparameter zu ermitteln.

Dementsprechend wurden die Reisedaten aller A330-300 Flüge im Jahr 2013 in fünf Untergruppen unterteilt, in dem die Verteilung der Grosskreisentfernungen entsprechend in fünf Bereiche untergliedert wurde. Diese Verteilung und die sich daraus ergebende Verteilung der Fuel-Verbräuche (Trip fuel) in den fünf Untergruppen sind in Bild 9 dargestellt.

Für jede dieser Untergruppen wurde dann auf Basis der obigen Verkehrsstatistik und mithilfe der Experten der Flugplanung eine mittlere Mission definiert (s. Tabelle 5).

*Tabelle 5: Beschreibungen der mittleren Missionen für fünf Untergruppen des A330-Streckenportfolios.*

<b>Flotte</b>	<b>Flugzeit</b>	<b>Gewicht</b>	<b>Trip fuel</b>	<b>max. Höhe</b>	<b>Climb / step Climb / Descent</b>
	<b>[min]</b>	<b>[t]</b>	<b>[t]</b>		
333 short	58	159,4	5,2	FL330	17mins/ 24mins
333 mid-short	336	195	30,6	FL390	22mins/ 30mins
333 mid	475	212,7	43,6	FL390	22mins bis FL350 nach 42mins Climb auf FL370 nach 04:14hrs Climb auf FL390 Descent nach 07:31 hrs
333 mid-long	537	220,8	49,9	FL400	24mins bis FL360 nach 01:37hrs Climb auf FL380 nach 04:35hrs Climb auf FL400 Descent nach 08:26hrs
333 long	592	223,2	55,6	FL410	23mins bis FL350 nach 05:59 Climb auf FL410 Descent nach 09:24 hrs

Analog wie im Abschnitt 3.2.2 beschrieben hat der Partner DLR AT die fünf mittleren Flugmissionen der Untergruppen simuliert und die Unterschiede bei der Nutzung der beiden Kraftstoffe ATJ und Jet A1 ermittelt.

Während sich die Unterschiede im Kraftstoffverbrauch in den verschiedenen Flugmissionen zwischen -1,43 und -1,62 % bewegen, liegen die korrespondierenden Werte der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Bereich von -3,62 bis -3,80 %. Die Verringerung der Partikelmassemissionen liegt im Bereich zwischen -38,8 und -44,1 % für die short- bis zur long-Mission (s. Grafiken in Bild 10).

Da die Werte der mittleren Missionen in die Mitte dieser Wertebereiche fallen (-1,56 %, -3,74 % und -42,2 %) und die Schwankungen im Rahmen der erwartbaren Gesamtgenauigkeit des Ansatzes liegen, kann die getroffene Vereinfachung, für jede

Flotte eine repräsentative mittlere Mission anzusetzen, als gerechtfertigt angesehen werden.

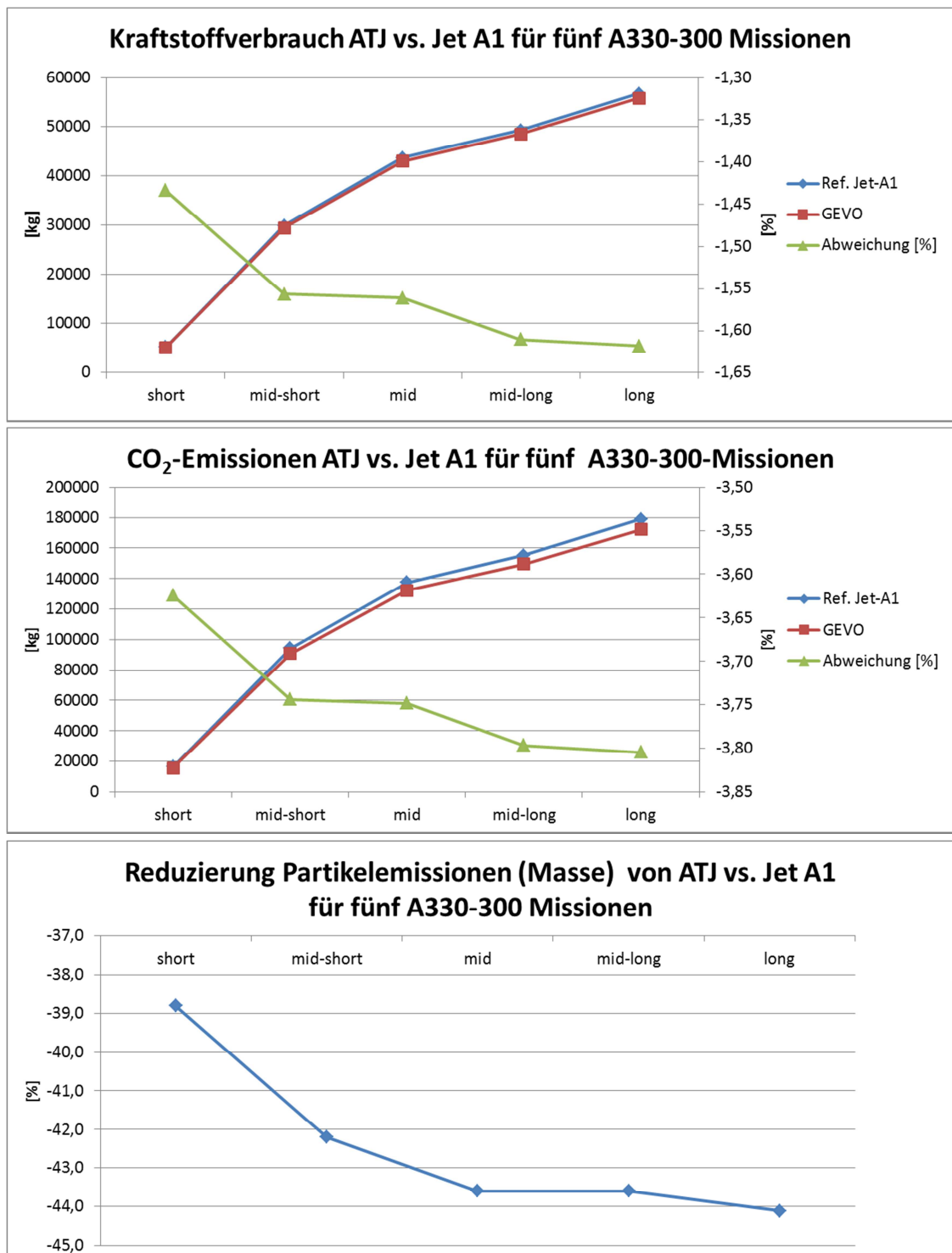


Bild 10: Darstellung der Unterschiede zwischen den beiden Kraftstoffen ATJ und Jet A1 im Kraftstoffverbrauch, in den CO<sub>2</sub>-Emissionen und Partikelmasseemissionen für fünf verschiedene A330-Missionen.

### 3.3.3. Vergleich mit anderen Emissionsberechnungen

Zum Vergleich und zur Plausibilitätsprüfung der Berechnungsergebnisse aus Abschnitt 3.3.1 wurden LH-interne Berechnungen herangezogen, die jährlich im Zuge der Umweltberichterstattung ermittelt werden. Diese Berechnungen basieren auf eigenen Annahmen zu Standardmissionen für einzelne Flotten, wobei zur Ermittlung der Emissionen Hersteller-Software genutzt wird. Diese Software beruht im Wesentlichen auf den ICAO-Emissionsdaten [14], wobei dort zusätzliche Herstellerdaten für die Cruise-Emissionsdaten enthalten sind, denn die Qualität von Emissionsberechnung ganzer Flugmissionen hängt kritisch von der Verfügbarkeit valider Emissionsdaten für den Lastzustand Cruise ab.

Die LH-internen Berechnungen weichen in den Werten für Fuel, CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O im Bereich zwischen 0 und +10% von den Ergebnissen dieser Arbeit ab (s. Tabelle 6). Dabei ist zu beachten, dass die LH-internen Berechnungen zusätzlich die Taxi-Zeiten berücksichtigen, womit ein wesentlicher Teil der positiven Differenzen zu erklären ist. Dementsprechend können die Ergebnisse der beiden Berechnungen als sehr gut übereinstimmend betrachtet werden, womit die in Abschnitt 3.2 vorgestellte Herangehensweise insgesamt als sinnvoll und plausibel bewertet werden kann.

*Tabelle 6: Vergleich von Verbrauchs- und Emissionsberechnungen aus Abschnitt 3.3.1 mit LH-internen Berechnungen und deren prozentuale Differenzen.*

<b>Flotte</b>	<b>Fuel-Diff.</b>	<b>CO<sub>2</sub>-Diff.</b>	<b>H<sub>2</sub>O-Diff.</b>
	<b>[%]</b>	<b>[%]</b>	<b>[%]</b>
319/20	6,2	6,4	4,3
321	4,8	4,9	2,8
737	9,7	9,9	7,7
333	9,4	9,6	7,4
343	1,4	1,5	-0,2
346	5,5	5,7	3,6
388	5,4	5,6	3,5
747	5,5	5,6	3,5
MD11	5,2	5,4	3,3



#### 4. Literatur

- [1] A. Zschocke, S. Scheuermann und J. Ortner, High Biofuel Blends in Aviation (HBBA) - Final Report, im Auftrag der EU-Kommission DG Energy, Deutsche Lufthansa AG und Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe, 2016.  
[http://www.hbba.eu/study/HBBA\\_Study\\_Report\\_FINAL.pdf](http://www.hbba.eu/study/HBBA_Study_Report_FINAL.pdf)
- [2] Edwin Corporan, Tim Edwards, Linda Shafer, Matthew J. DeWitt, Christopher Klingshirn, Steven Zabarnick, Zachary West, Richard Striebich, John Graham und Jim Klein: Chemical, Thermal Stability, Seal Swell, and Emissions Studies of Alternative Jet Fuels; Energy Fuels 2011, 25, S. 955 – 966, doi.org/10.1021/ef101520v.
- [3] Marina Braun-Unkhoff, Uwe Riedel und Claus Wahl, About the Emissions of Alternative Jet Fuels, CEAS Aeronautical Journal 1-14, doi 10.1007/s13272-016-0230-3, 2017.
- [4] ASTM, New Specification for Research Report: Evaluation of Alcohol to Jet Synthetic Paraffinic Kerosenes (ATJ-SPKs), Work Item WK41378, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013 ASTM: Evaluation of Alcohol to Jet Synthetic Paraffinic Kerosenes (ATJ-SPKs), version 1.9, 2013.
- [5] Richard H. Moore, Kenneth L. Thornhill, Bernadett Weinzierl, Daniel Sauer, Eugenio D'Ascoli, Jin Kim, Michael Lichtenstern, Monika Scheibe, Brian Beaton, Andreas J. Beyersdorf, John Barrick, Dan Bul-zan, Chelsea A. Corr, Ewan Crosbie, Tina Jurkat, Robert Martin, Dean Riddick, Michael Shook, Greg-ory Slover, Christiane Voigt, Robert White, Edward Winstead, Richard Yasky, Luke D. Ziemba, Anthony Brown, Hans Schlager, Bruce E. Anderson: Biofuel blending reduces particle emissions from air-craft engines at cruise conditions; Nature Band 543, doi 10.1038/nature21420, 2016.
- [6] Federal Aviation Administration: Rolls-Royce Alternative Fuels Program - Rig Test of Candidate Fuels: Emissions Testing, Report number DOT/FAA/AEE/2015-06, 2015.
- [7] Lufthansa Technik: ‚Besseres Verständnis für Triebwerksalterung - APOSEM und EVE: Paradigmenwechsel in der Triebwerksinstandhaltung‘, <https://www.lufthansa-technik.com/de/aposem> abgerufen am 27.9.2017.
- [8] Manfred Aigner, Markus Köhler, Tobias Schripp, Florian Wolters, aireg<sup>EM</sup> Aviation Initiative for Renewable Energy in Germany e.V. – Emissionseigenschaften von alternativen Luftfahrtkraftstoffen (LUFOV1-549-087), Abschlussbericht, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2017.
- [9] Alexander Zschocke, Deutsche Lufthansa AG: Abschlussbericht zu dem Vorhaben Projekt burnFAIR, Arbeitspakete 1.1 bis 1.4, Frankfurt am Main, Juni 2014.
- [10] Schäfer, K., Jahn, C., Sturm, P., Lechner, B., Bacher, M.: Aircraft emission measurements by remote sensing methodologies at airports, Atmos. Environ. 37, 5261–5271, 2003.
- [11] Steve H L Yim, Gideon L Lee, In Hwan Lee, Florian Allroggen, Akshay Ashok, Fabio Caiazzo, Sebastian D Eastham, Robert Malina and Steven R H Barrett, Global, regional

and local health impacts of civil aviation emissions, Environmental Research Letters, Vol. 10, Num. 3, doi:10.1088/1748-9326/10/3/034001, 2015.

- [12] B. Kärcher: The importance of contrail ice formation for mitigating the climate impact of aviation, J. Geophys. Res. Atmos., Vol. 121, Issue 7, p 3497-3505, doi:10.1002/2015JD024696, 2016.
- [13] Weigelt, D., Untersuchung der Schadstoffeigenschaften alternativer Flugkraftstoffe im Prüfstandsversuch und simulationsgestützte Analyse ihrer Umweltauswirkungen für typische Emissionshöhen von Luftfahrzeugen.“, Diplomarbeit TU Dresden, 2017.
- [14] ICAO-Emissionsdatenbank, abrufbar unter:  
<https://www.easa.europa.eu/document-library/icao-aircraft-engine-emissions-databank>

## 5. Danksagung

An der Bearbeitung der in aireg<sup>EM</sup> gestellten Aufgaben waren innerhalb und außerhalb von Lufthansa zahlreiche Bereiche beteiligt ohne deren Wissen und Können und die hervorragende Zusammenarbeit die vorliegenden Ergebnisse nicht hätten erzielt werden können. An dieser Stelle möchten wir allen im Folgenden Genannten für ihre wertvollen Beiträge ganz herzlich danken:

Dr. Christian Werner-Spatz, LHT – HAM T/ESZ, Fachgruppe Performance, Projektleiter EVE (CFM56-5C-Versuchsträger) auch stellvertretend für alle Kollegen der Fachgruppe.

Karl-Heinz Matthies und Michael Mroch, LHT – HAM T/EP22, Triebwerksprüfstand auch stellvertretend für alle Prüfstandskollegen.

Christoph Eichner (Lufthansa), Panagiotis Kois (Lufthansa Ctiyline) und Marcus Schwarz (Lufthansa Cargo) für die Unterstützung bei den Definitionen der mittleren Flugmissionen.

Kai Schaefer, stellvertretend für alle Kollegen der AFS Aviation Fuel Services GmbH.

Jörg Haubold und Jan Tetiwa für den Bereich Baukoordination der Fraport AG und alle in diesem Zusammenhang involvierten Bereiche.

Dr. Karlheinz Haag, FRA CP/U, Leiter Umweltkonzepte Konzern.

Darüber hinaus möchten wir den Kollegen Dr. Claus Wahl, Dr. Markus Köhler, Tobias Schripp und Florian Wolters stellvertretend für alle in aireg<sup>EM</sup> involvierten Kolleginnen und Kollegen auf Seiten des Projektpartners DLR für die hervorragende Zusammenarbeit herzlich danken.