



aireg^{EM}

Aviation Initiative for Renewable Energy
in Germany e.V.

Emissionseigenschaften von alternativen
Luftfahrtkraftstoffen (LUFOV1-549-087)

- Abschlussbericht -

Förderkennzeichen: 20T1310A

Laufzeit: 01/2014 – 06/2017

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Prof. Dr. Manfred Aigner

Dr. Tobias Schripp

Dr. Markus Köhler

Florian Wolters

Stuttgart im September 2017



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1. Einleitung.....	3
1.1. Aufgabenstellung.....	3
1.2. Planungen und Ablauf des Vorhabens	4
1.3. Kurzdarstellung der Anknüpfung an den wissenschaftlich-technischen Stand.....	4
1.4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	5
2. Ergebnisse.....	6
2.1. Emissionsmessung und Kraftstoffanalyse (AP1)	6
2.1.1. Emissionsmessungen am Triebwerksprüfstand.....	7
2.1.2. Charakterisierung der verwendeten Treibstoffe	11
2.1.3. Feldmessungen am Flughafen Frankfurt	12
2.2. Triebwerksperformance und Flugleistungsrechnung (AP2)	17
2.3. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	30
3. Verwertungsplan.....	31
4. Zusammenfassung	32
Literaturverzeichnis	33
Anhang A: Ergebnisse der Messungen am FraPort.....	34

1. Einleitung

Alternative Treibstoffe für den Luftverkehr haben in den letzten Jahren beachtlich an Bedeutung gewonnen und sind Gegenstand einer Vielzahl von Forschungsvorhaben. Hierbei standen bisher insbesondere die Ökobilanz alternativer Treibstoffe sowie mögliche technische Umsetzungen und ökonomische Szenarien im Vordergrund (bspw. ALFA-BIRD, SWAFEA). Die Datenbasis für Schadstoffemissionen (allen voran NO_x und Partikelemissionen) alternativer Treibstoffe ist bisher hingegen eher klein. Dies ist jedoch von erheblicher Bedeutung, da die Reduktionsziele hinsichtlich der Kohlendioxidemissionen der International Air Transport Association (IATA) nur durch die Anwendung von Treibstoffen aus erneuerbaren Quellen erreicht werden kann.

Die für die Zulassung von Luftfahrtantrieben notwendigen Messungen der Schadstoffemissionen CO , UHC , NO_x und Ruß erfolgen üblicherweise an vier Lastpunkten im Bodenstandfall (sog. LTO-Zyklus). Ruß wird nur durch die Schwärzung eines Filters, als sogenannte „Smoke Number“ bestimmt. Messgrößen wie Partikelanzahl oder Partikelgrößenverteilung werden dabei üblicherweise nicht erfasst. Alternative Treibstoffe finden bei den Zulassungsmessungen ebenfalls keine Berücksichtigung. Die Bestimmung der Schadstoffemissionen alternativer Treibstoffe sowie die Modellierung entsprechender nicht- CO_2 Schadstoffemissionen auf Flugmissionslevel sind daher eine bedeutende Erweiterung und ein wichtiger Beitrag für die Bewertung der neuartigen Treibstoffe und Treibstoff-Zusätze.

1.1. Aufgabenstellung

Gesamtziel des Vorhabens war eine deutlich verbesserte Datenlage zum Emissionsverhalten alternativer Flugtreibstoffe, insbesondere für nicht- CO_2 Emissionen (CO , NO_x , UHC und Partikelemissionen). Darüber hinaus wurde der Einfluss alternativer Treibstoffe auf die Triebwerksperformance auf Basis von gemessenen Betriebspunkten und entsprechenden Treibstoffmodellen evaluiert.

Ziel von AP1 war die vergleichende Bestimmung von Schadstoffmustern für „drop-in“-Treibstoffe und konventionelles Jet A1 Kerosin an realen Triebwerken sowie die Berechnung der entsprechenden Emissionsindizes bei definierten ICAO-Lastpunkten.

Ziel von AP2 war die Weiterentwicklung der Emissionskorrelationsmethoden entsprechend den Eigenschaften alternativer Treibstoffe, um die Messergebnisse aus den Bodenstandtests auf die gesamte Flugmission (bspw. Flughöhe) zu übertragen. Darüber hinaus erfolgte die Simulation alternativer Treibstoffe auf Flugmissionslevel, um eine Abschätzung der Auswirkungen auf den Flugbetrieb zu ermöglichen.

1.2. Planungen und Ablauf des Vorhabens

Die Freifeldmessungen am Kopf der Startbahn „18 West“ am Flughafen Frankfurt wurden zwischen dem 19.05.2015 und dem 21.05.2015 durchgeführt. Im Vorfeld des Versuchs wurden alle sicherheitsrelevanten Vorgänge mit dem Flughafen Frankfurt geklärt, um Zugang zum Vorfeld mit den entsprechenden Messgeräten zu erhalten. In den drei Messtagen konnte eine Vielzahl von Triebwerkemissionen startender Flugzeuge aufgezeichnet werden. Die Triebwerksinformationen konnten auf Basis von Internetrecherchen und der projektbeteiligten Kooperationspartner gesammelt werden. Für die Analytik kamen hauptsächlich der Engine Exhaust Particle Sizer und ein Infrarotspektrometer (FT-IR) zum Einsatz. Damit konnten Feinpartikel zwischen 5 und 560 nm, sowie alle relevanten Verbrennungsgase, erfasst werden.

Die Untersuchung der Treibstoffemissionen am EVE-Triebwerk von Lufthansa Technik wurde vom 02.11.16 bis 04.11.16 durchgeführt. Hierzu wurde der Strömungstunnel des Prüfstands mit einer im Vorfeld produzierten Messsonde ausgestattet. Das Abgas wurde durch einen beheizten Probenahmeschlauch zu den Messgeräten geführt. Die Messgeräte selbst bestanden aus vier Partikelzählern (Scanning Mobility Particle Sizer, Engine Exhaust Particle Sizer, Condensation Particle Counter und Optical Particle Counter) sowie einem Infrarotspektrometer (FT-IR) zur Überwachung der Verbrennungsgase. Logistische Unterstützung zur Beschaffung und Bereitstellung eines Gasflaschenbündels mit hochreinem Stickstoff sowie flüssigen Stickstoffs zum Betrieb des Infrarotspektrometers wurde durch Lufthansa Technik bereitgestellt.

Bei beiden Versuchsteilen traten keine unerwarteten Probleme auf und sie wurden gemäß Zeitplan ausgeführt.

1.3. Kurzdarstellung der Anknüpfung an den wissenschaftlich-technischen Stand

Zwei wesentliche Fragestellungen dominieren derzeit die Diskussion um Flugzeugemissionen. Einerseits wird die Frage des Einflusses auf das Klima (Bildung von Kondensstreifen, etc.) diskutiert und andererseits besteht eine stärkere Wahrnehmung der Entwicklung der Luftqualität an Flughäfen und der näheren Umgebung. Dabei sind u.a. Aspekte des Arbeitsschutzes zu berücksichtigen, aber auch Veränderungen der Außenluftqualität in bewohnten Gebieten. Für diese Fragestellungen sind die durchgeführten Messungen von großer Bedeutung, da sie das Beeinflussungspotential von Triebwerkemissionen durch Treibstoffveränderung aufzeigen. Die Messungen am Flughafen Frankfurt sind ebenfalls von Bedeutung bei der Einschätzung des Ist-Zustandes im Hinblick auf Änderungsmaßnahmen. Vergleichbare Versuche, bei denen in der Nähe der Startbahn gemessen wurde, werden derzeit in vielen Ländern (u.a. in den Vereinigten Staaten) durchgeführt, um Einflüssen von Flughafenemissionen auf die Umgebung frühzeitig zu

begegnen. Für die Einschätzung der Klimawirkungen ist – unter Berücksichtigung der veränderten Druck- und Klimabedingungen im Flug – der ermittelte Datensatz ebenfalls relevant, da die Prüfstandsversuche an einem realen Triebwerk durchgeführt wurden und Störungseinflüsse durch die Messung im Strömungstunnel weitestgehend minimiert wurden. Die Bestimmung der Partikelanzahl, -masse und -verteilung ist für entsprechende Vorhersagemodelle wesentlich. Aufgrund der hohen Anzahl von Betriebspunkten, die über die üblichen ICAO-Tests hinausgehen, ist hier zusätzlich eine feinere Modellierung möglich.

Mittelfristig werden derzeit die Emissionsprüfung an Triebwerken seitens der ICAO überarbeitet. Einflüsse der Triebwerkseinstellungen sowie der Treibstoffzusammensetzung sind hierbei von großem Interesse, um die Stärke der verschiedenen Einflussfaktoren an realen Modellsystemen abzuschätzen.

1.4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen der Untersuchungen am EVE-Prüfstand wurde das DLR logistisch sehr stark durch Lufthansa Technik unterstützt. Hierzu zählen insbesondere die Beschaffung von Druckgasen sowie Aufbau, Design und Installation der Probenahmesonde. Die Koordination erfolgte durch einen Praktikanten, der von der Lufthansa gestellt wurde. Hierdurch wurde die Koordination aller beteiligten Gruppen stark vereinfacht.

2. Ergebnisse

2.1. Emissionsmessung und Kraftstoffanalyse (AP1)

Insgesamt wurden drei Treibstoffe im Rahmen zweier Projekte (HBBA-Studie und airegEM) im Forschungstriebwerk eingesetzt (Tab. 2). Nach Aufwärmen des Triebwerks wurden folgende Betriebspunkte eingestellt und für jeweils ca. 3 min gehalten: 4684 RPM („C4 Take-Off“), 4398 RPM („C4 Maximum Continuous Thrust“), 4292 RPM („C2 Maximum Continuous Thrust“), 3800 RPM, 3000 RPM, 1325 RPM („Flight Idle“), 940 RPM („Ground Idle“). Die Emissionen wurden kontinuierlich aufgezeichnet (Tab. 1).

Tab. 1: Betriebspunkte und Dauer während der Prüfstandsversuche.

Betriebspunkt	Drehzahl N1 [RPM]	Dauer [min]
C4 Maximum Continuous (Warm-Up)	4398	~10
C4 Take-Off (T/O)	4684	3
C4 Maximum Continuous (M/C)	4398	3
C2 Maximum Continuous (M/C)	4292	3
Zwischenpunkt 1 (ZP1)	3800	3
Zwischenpunkt 2 (ZP2)	3000	3
Flight Idle (FI)	1325	5
Ground idle (GI)	940	5

Die Messungen begannen mit dem Referenzkerosin (Ref1) und wurden ebenfalls damit abgeschlossen (Ref2). Dies diente der Überprüfung, ob sich während des Versuchs Prozessparameter durch den Einsatz der alternativen Treibstoffe verändert hatten. Dies war nicht der Fall. Die beiden Treibstoffe „ARA ReadJet“ (HBBA-Studie) und „Gevo ATJ“ (airegEM) wurden zwischen den Referenzkerosinläufen vermessen. In Ergänzung zu den stationären Betriebspunkten wurden für die beiden Referenzkerosine ebenfalls instationäre Prozesse untersucht. Hierzu wurde das Triebwerk mit unterschiedlicher Beschleunigungsrate von einem niedrigen Zustand auf die maximale Leistung beschleunigt. Diese Untersuchung diente der Abschätzung der verhaltensbedingten Einflüsse / transienten Übergängen auf die Emissionen, um diese Daten mit den Messungen auf dem Vorfeld vergleichen zu können, wenn der Schub von ground idle auf take-off-thrust hochgesetzt wird..

Tab. 2: Übersicht über die verwendeten Treibstoffe.

Treibstofftyp	Kürzel	Ausgangsmaterial	Zusammensetzung
Hydrotreated Esters and Fatty Acids	HEFA-SKA ReadiJet [®]	Öle und Fette (hauptsächlich <i>Brassica Carinata</i>)	26,9 % Aromaten, n- (42,9%) und zyklische (25,1%) Paraffine
Alcohol-to-Jet	ATJ-SPK	lineare oder verzweigte Alkohole	keine Aromaten, 99,8% verzweigte Paraffine
Jet A1	Ref	Rohöl	17,1% Aromaten, enthält Schwefel

2.1.1. Emissionsmessungen am Triebwerksprüfstand

Während der Untersuchung der Treibstoffe im Triebwerksprüfstand wurden keine Unterschiede hinsichtlich der Verbrennungstemperaturen oder der Emissionen von Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und von Stickoxiden beobachtet. Beim Treibstoffverbrauch waren in der Detailanalyse geringfügige Unterschiede über den Betriebsbereich zwischen den Treibstoffen erkennbar. Daher waren die eingesetzten alternativen Treibstoffe vom regulären Jet A1 anhand dieser Parameter nicht unterscheidbar und zeigten somit gleiche Eignung. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Betriebsdauer für den gesamten Versuch im Bereich von ca. 2 h pro Treibstoff betrug. Langzeitwirkungen können daher mit dem durchgeführten Versuch nicht erfasst werden und benötigen weitere Untersuchungen.

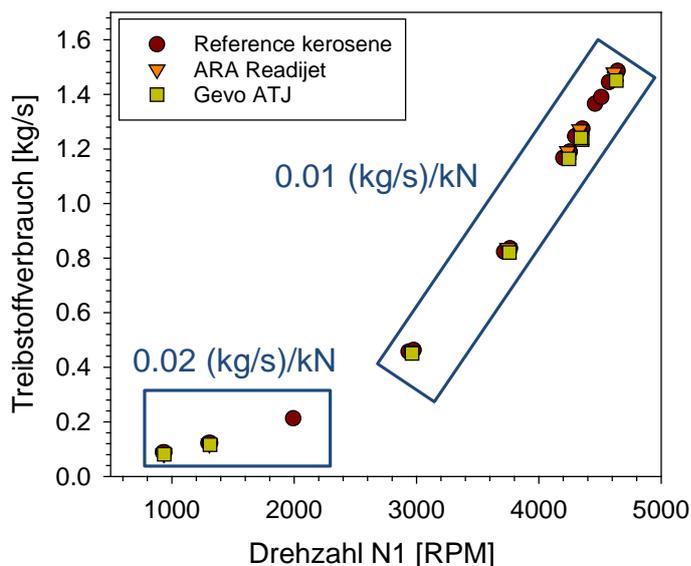


Abb. 1: Zusammenhang zwischen Treibstoffverbrauch und Drehzahl des Triebwerks. Die Kurve kann in zwei unterschiedliche pseudo-lineare Betriebsbereiche des Triebwerks unterteilt werden.

Aufgrund der ähnlichen Betriebsbedingungen ergeben sich für die Emissionsindizes von Kohlenmonoxid und Stickoxiden keine signifikanten Unterschiede für die verwendeten Treibstoffe (Abb. 2 und 3). Die Emission von Kohlenmonoxid ist für die geringeren Lastpunkte am Höchsten und stabilisiert sich für die höheren Betriebspunkte auf einem niedrigen Level. Die Stickoxide hingegen steigen kontinuierlich – nahezu linear mit dem Treibstoffverbrauch – an.

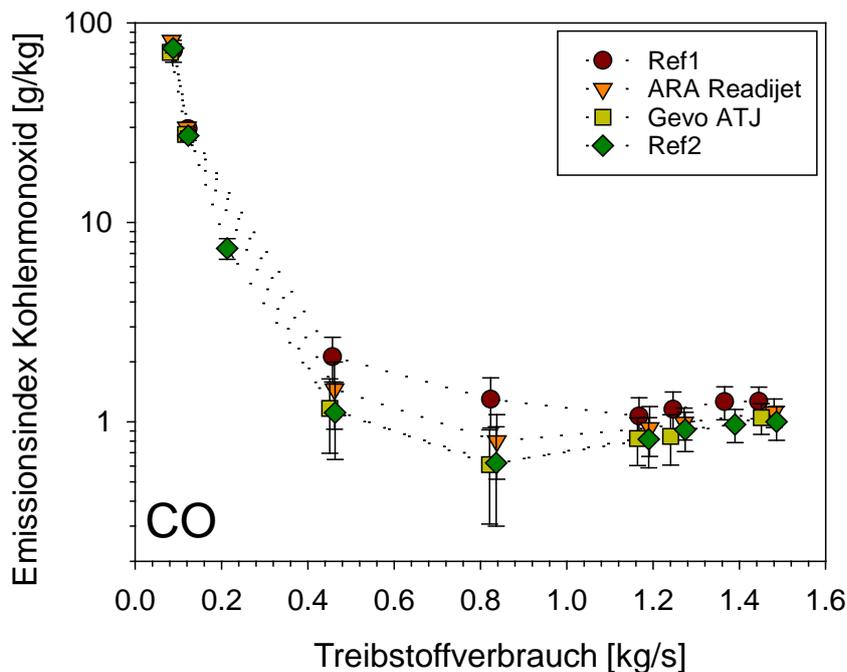


Abb. 2: Emissionsindex für Kohlenmonoxid in Abhängigkeit vom Kraftstoffverbrauch des Triebwerks.

Bezüglich der Partikelemissionen gibt es unterschiedliche Effekte, die sich in der Betrachtung von Partikelanzahl- und Partikelmassenemission unterscheidet. Bei geringem Kraftstoffverbrauch bzw. geringen Lastpunkten ist eine höhere Partikelanzahlemission bei der Verwendung des ARA Readijets gegenüber dem Referenzkerosin erkennbar (Abb. 4). Im Gegensatz dazu ist die Emission im Fall des Gevo ATJ wesentlich geringer. Hierbei muss beachtet werden, dass die Partikelanzahl hier hauptsächlich von Partikeln in der Nukleationsmode beeinflusst wird. Diese können vom Aromatenanteil aber auch vom Schwefel in den entsprechenden Treibstoffen stammen.

Im Gegensatz zur Partikelanzahl ist die Partikelmasse nur geringfügig von den Partikeln der Nukleationsmode beeinflusst und daher sind die Unterschiede für die geringeren Lastpunkte deutlich geringer. Für die höheren Lastpunkte hingegen sind tendenzielle Abweichungen erkennbar (Abb. 5). Hier weist der ARA Readijet – im Durchschnitt – eine ca. 20% höhere Massenemission auf, während diese im Fall des Gevo ATJ um ca. 30% niedriger ausfällt. Mechanistisch zeigt sich, dass die Partikelmasse für dieses Triebwerk und die

Treibstoffzusammensetzung sehr gut mit dem Wasserstoff/Kohlenstoff-Verhältnis korreliert, welches insbesondere durch den Aromatenanteil beeinflusst ist (Abb. 6). Treibstoffe mit hohem Anteil ungesättigter Verbindungen bzw. hohem Aromatenanteil weisen ein niedrigeres H/C-Verhältnis auf während dieser Wert durch Verzweigungsgrade, etc. nicht beeinflusst wird.

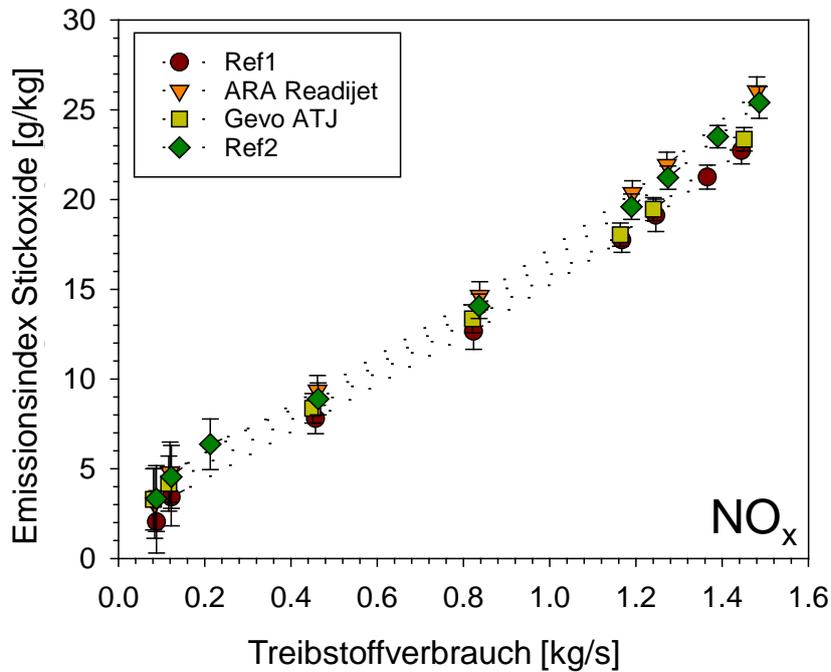


Abb. 3: Emissionsindex für Stickoxide in Abhängigkeit vom Kraftstoffverbrauch des Triebwerks.

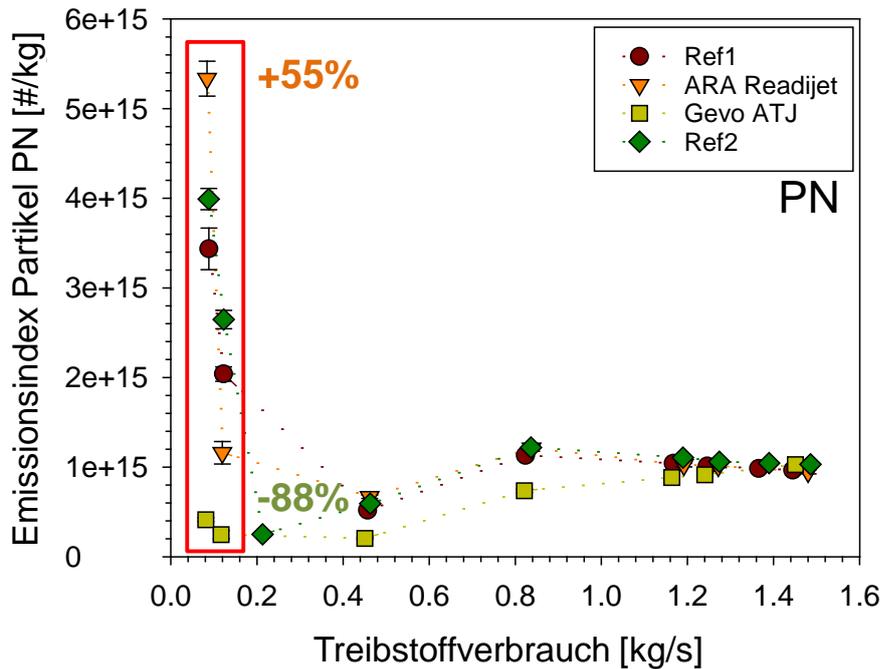


Abb. 4: Emissionsindex für Partikelanzahl in Abhängigkeit vom Kraftstoffverbrauch des Triebwerks. Auffällige Abweichungen zwischen den alternativen Treibstoffen im Vergleich zum Referenzkerosin sind markiert.

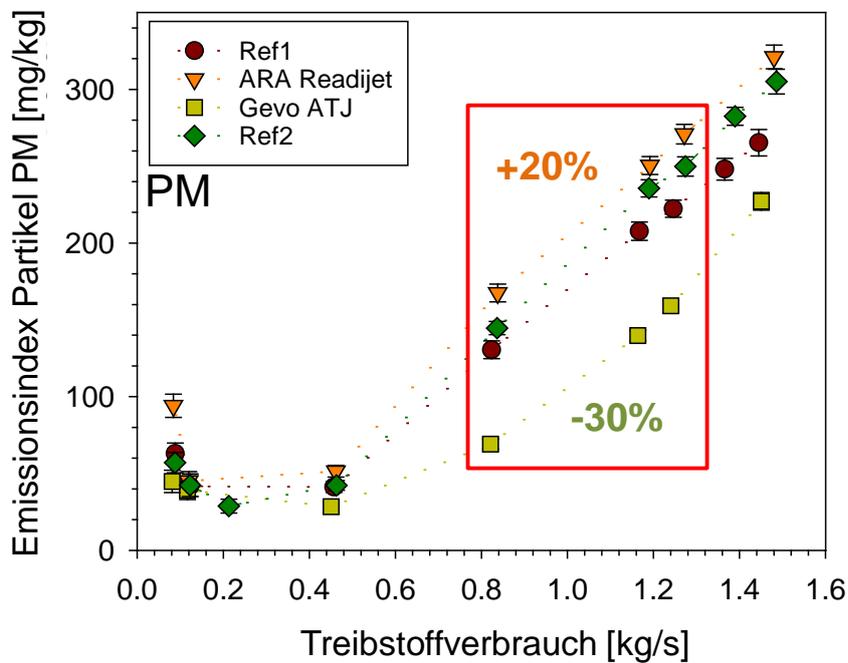


Abb. 5: Emissionsindex für Partikelmasse in Abhängigkeit vom Kraftstoffverbrauch des Triebwerks. Auffällige Abweichungen zwischen den alternativen Treibstoffen im Vergleich zum Referenzkerosin sind markiert.

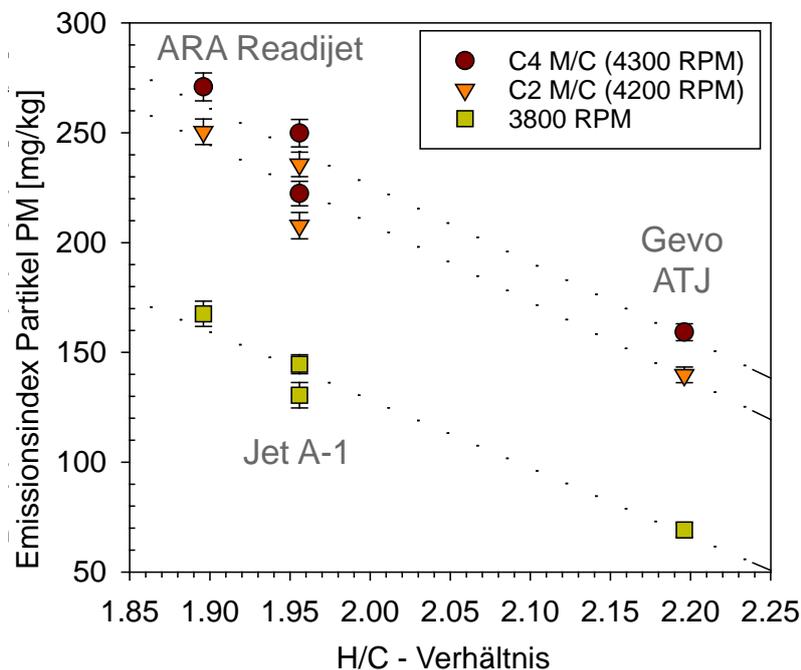


Abb. 6: Zusammenhang zwischen dem Partikelmassenemissionsindex und dem H/C-Verhältnis des Treibstoffs für die höchsten Betriebspunkte des Experiments.

2.1.2. Charakterisierung der verwendeten Treibstoffe

Um eine ausreichende Korrelation zwischen den Parametern der Treibstoffe und den auf dem Prüfstand ermittelten Emissionsindizes zu erreichen, wurden die verwendeten Treibstoffe umfangreich chemisch charakterisiert. Die zu erwartenden Rußemissionen wurden mit einfachen Orientierungsmethode, die in der ASTM D1655 angegeben sind, ermittelt. Hierzu zählt beispielsweise der Rußpunkt (smoke point, siehe Tab. 2). Hierbei zeigte sich bereits, dass das Referenzkerosin und der ARA Readijet keine starken Abweichungen im Rußverhalten zeigen würde. Bezüglich des Gevo ATJ wurde jedoch bereits hier eine höhere nicht-rußende Flamme beobachtet, welches ein geringeres Rußbildungspotential indiziert.

Die chemische Zusammensetzung wurde aus den Herstellerangaben übernommen und durch eigene Messungen mittels Gaschromatographie gekoppelt mit Massenspektrometrie ergänzt (siehe Abb. 7).

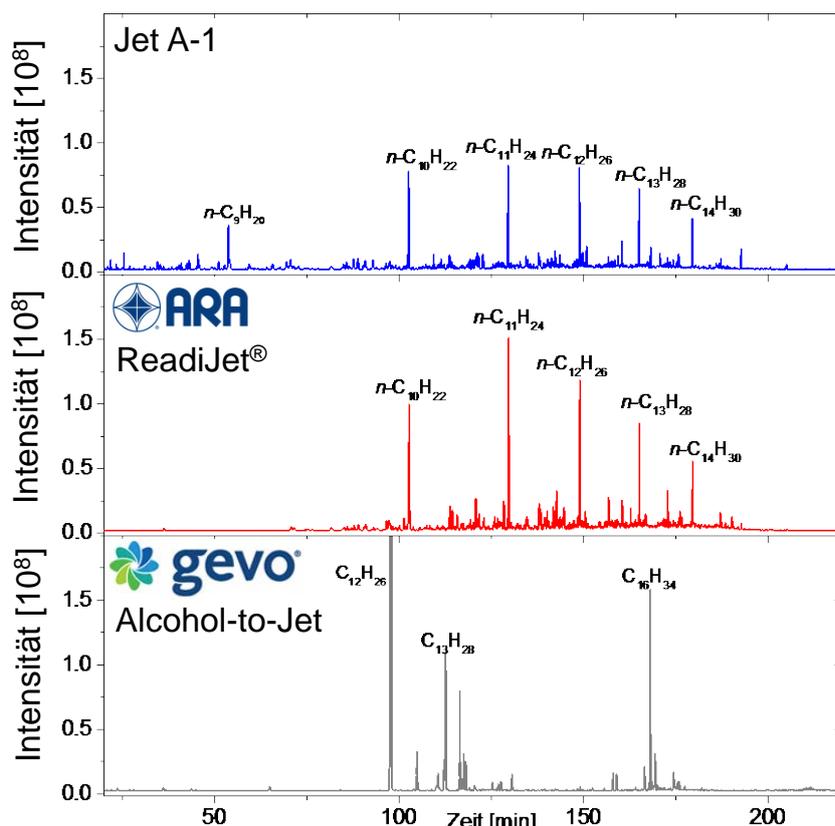


Abb. 7: GC-MS-Chromatogramme der verwendeten Treibstoffe.

In den Chromatogrammen zeigt sich bereits, dass Referenzkerosin und ARA ReadJet ein ähnliches Substanzspektrum aufweisen, während das Gevo ATJ aus einer geringeren Anzahl von chemisch ähnlichen Verbindungen besteht. Dennoch ist hinsichtlich der charakteristischen Eigenschaften der Treibstoffe (Tab. 3) hauptsächlich eine Abweichung im Aromatenanteil erkennbar.

Tab. 3: Charakteristische Eigenschaften der beiden Brennstoffe.

	C-Gehalt	H-Gehalt	Aromaten- anteil	Smoke Point	Heizwert
	[%]	[%]	[%]	[mm]	[MJ/kg]
Jet A1	85,9	14,1	15,6	23,1	43,07
GEVO ATJ	84,1	15,5	<1	27,0	43,89
ARA ReadJet	86,1	13,7	26,9	22,5	42,62

2.1.3. Feldmessungen am Flughafen Frankfurt

Die Bestimmung der Emissionen startender Flugzeuge war aufgrund einer Besonderheit am Flughafen Frankfurt sehr gut möglich. Am Ende der Startbahn befindet sich eine Blastwand, die

dahinter aufgebaute Messgeräte effektiv vor dem Triebwerkschub schützt und so eine Probenahme mit kurzer Probenahmeleitung erlaubt. Darüber hinaus ist es – nach unserer Kenntnis – nur hier möglich die Emissionen startender Flugzeuge in direkter Linie zu den Triebwerken zu messen.

Die dreitägigen Messungen ergaben einen repräsentativen Querschnitt für Regional-, Kontinental- und Interkontinental-Jets (siehe Anhang A). Die jeweiligen Flugzeug/Triebwerks-Kombinationen wurden - für die DLH-Flugzeuge - von Lufthansa bereitgestellt, die der anderen wurden im Internet recherchiert.

Die gemessene Partikelmassenkonzentration korreliert sehr gut für erhöhte Kohlendioxidkonzentrationen (Abb. 8). Im Bereich der nur geringfügig erhöhten Kohlendioxidkonzentration ist die Korrelation deutlich schlechter. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Starts in einem Abstand von 100, 200 und 300 m zur Blastwand durchgeführt werden. Eine Zufahrt ist auch bei einem Abstand von 1000 m möglich. Der Abstand hat natürlich einen erheblichen Einfluss auf die Verdünnung der Emissionen. Zusätzlich starten vom Flughafen Frankfurt ebenfalls Regionalflugzeuge mit kleinen Triebwerken und entsprechend geringen Abgasmengen (z.B. CF34). Diese sind vom Hintergrund nicht zu unterscheiden. Daher sind die vorliegenden Messungen im Wesentlichen auf Triebwerke mit mittlerer und hoher Leistung beschränkt.

Insgesamt erlaubt das Screening von Triebwerkemissionen mit der gewählten Methode allerdings eine hinreichend gute Übersicht. Betrachtet man die Statistik der 8 häufigsten beobachteten Triebwerkstypen, so besteht eine gute Übereinstimmung zwischen den für Stickstoffoxide und Kohlenmonoxid gemessenen Emissionsindizes und den Erwartungswerten aus der ICAO-Datenbank (Abb. 9 und 10). Die gemessenen Werte sind eine Überlagerung aus dem Taxiing (ca. 7% Schub) der Flugzeuge zu Startposition und dem eigentlichen Startvorgang (ca. 100% Schub). Die genauen Vorgänge bei derartigen Übergangszuständen sind stark vom Pilotenverhalten abhängig und es muss berücksichtigt werden, dass die entsprechenden Datenbankwerte bei stabilen Betriebszuständen auf einem Prüfstand gemessen wurden. Aufgrund der Tatsache, dass der Wartungszustand des Triebwerks einen zusätzlichen Einfluss auf die Höhe der Emissionen hat, ist die ermittelte Variationsbreite im Erwartungsbereich. Der Median der Messergebnisse liegt jedoch (mit Ausnahme der Kohlenmonoxidemissionen der CFM 56-5A1) zwischen dem ICAO-Datenbank-Wert für Taxiing und Take-Off. Bei den Kohlenmonoxidemissionen ist zu beachten, dass die Temperatur der Luft am Triebwerkseinfluss einen Einfluss auf die Emissionen hat und hier die zu erwartende Unsicherheit erhöht.

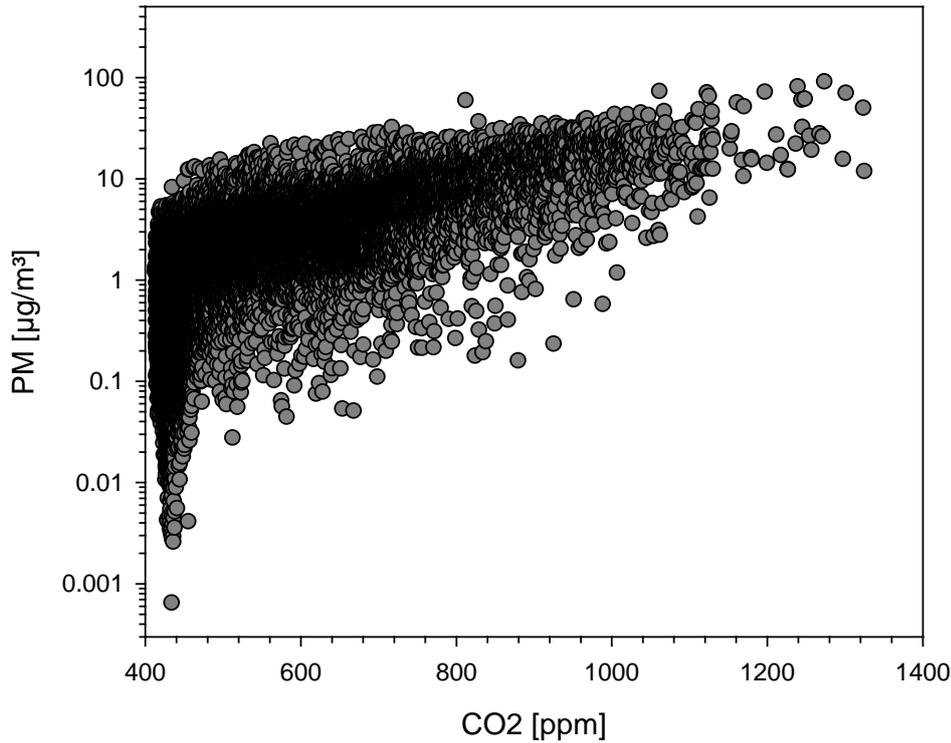


Abb. 8 : Korrelation der gemessenen Partikelmasse (EEPS, 5,6 – 560 nm) mit der gemessenen Kohlendioxidkonzentration.

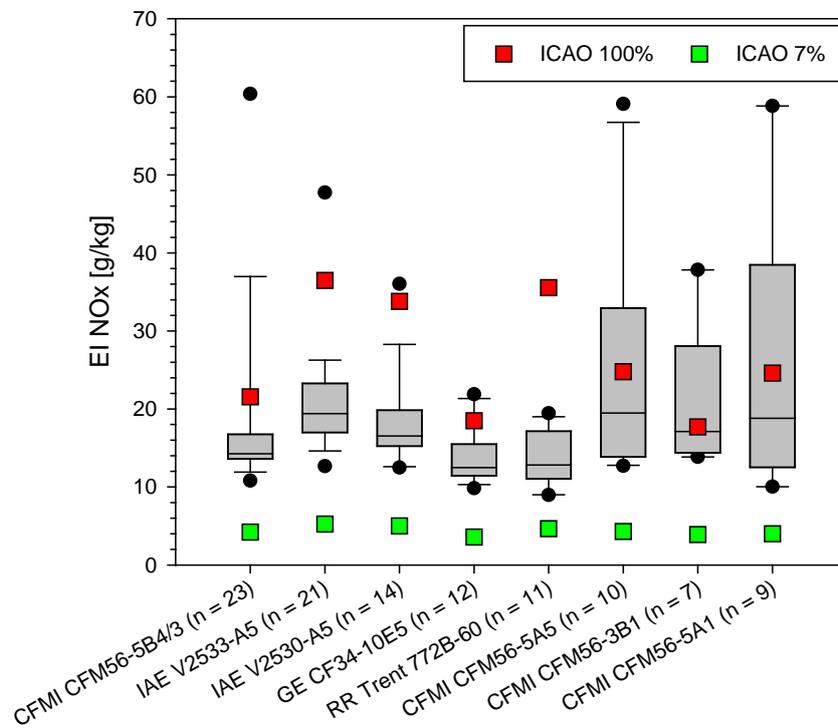


Abb. 9 : Emissionsindizes für Stickoxide für die 8 häufigsten Triebwerkstypen. Die farbigen Punkte zeigen die Referenzwerte aus der ICAO-Datenbank für die Betriebszustände 7% und 100%. Die

Kästen des Box-Whisker-Plots umfassen das 25er Percentil sowie das 75er Percentil während die Balken das 10er und 90er Percentil darstellen. Die Punkte zeigen das 5er und 95er Percentil. Die horizontale Linie zeigt den Median.

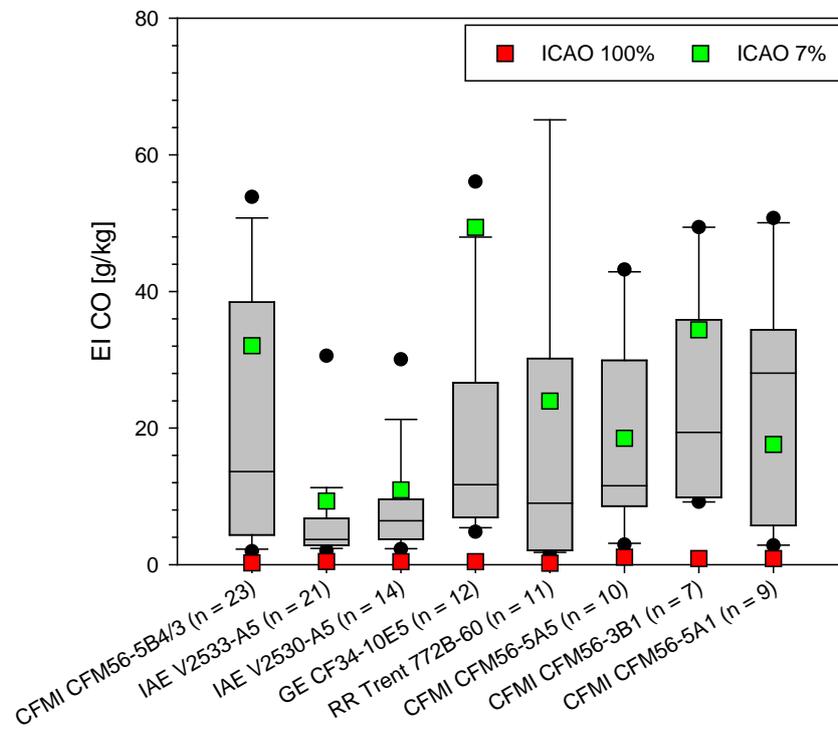


Abb. 10: Emissionsindizes für Kohlenmonoxid für die 8 häufigsten Triebwerkstypen. Die farbigen Punkte zeigen die Referenzwerte aus der ICAO-Datenbank für die Betriebszustände 7% und 100%. Die Kästen des Box-Whisker-Plots umfassen das 25er Percentil sowie das 75er Percentil während die Balken das 10er und 90er Percentil darstellen. Die Punkte zeigen das 5er und 95er Percentil. Die horizontale Linie zeigt den Median.

Im Bereich der emittierten Partikelmasse sind direkte Vergleiche mit der ICAO-Datenbank leider nicht möglich. Die ermittelten Smoke Number-Werte können zwar auf Basis von Korrelationen herangezogen werden, jedoch wurde hier darauf verzichtet, da dies zu viele Annahmen voraussetzt. Generell sind die Partikelmassenemissionsindizes (Abb. 11) im Median (zwischen ca. 20 mg/kg und ca. 60 mg/kg) in derselben Größenordnung für die verschiedenen Triebwerke. Die Variationsbreite ist ebenfalls in einer akzeptablen Größenordnung wenn man berücksichtigt, dass sich unterschiedliche Wartungszustände, Variationen im Pilotenverhalten (z.B. Beschleunigung) mit geringen zu erwartenden Variationen der Treibstoffzusammensetzung über die verschiedenen Tage überlagern.

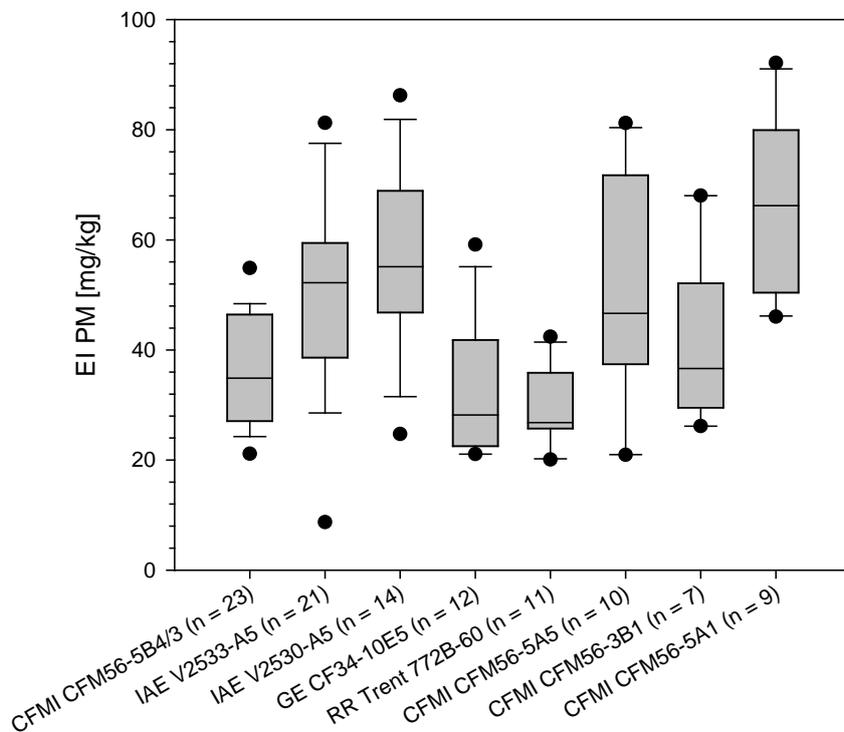


Abb. 11: Emissionsindizes für die Partikelmasse (EEPS-Messung, 5.6 – 560 nm) für die 8 häufigsten Triebwerkstypen. Die Kästen des Box-Whisker-Plots umfassen das 25er Perzentil sowie das 75er Perzentil während die Balken das 10er und 90er Perzentil darstellen. Die Punkte zeigen das 5er und 95er Perzentil. Die horizontale Linie zeigt den Median.

Insgesamt zeigen die Messungen den Nutzen der einzigartigen Bedingungen am Flughafen Frankfurt für das Screening von Flugzeugtriebwerken, die nur mit regulären Bodenmessungen vergleichbar sind. Eine vergleichbare Qualität mit Messungen am Start- oder Landebahnrand (pass-by-Messungen) zu erreichen erfordert hingegen deutlich stabilere klimatische Verhältnisse.

Die vollständige Übersicht der ermittelten Daten ist in Anhang A zusammengefasst.

2.2. Triebwerksperformance und Flugleistungsrechnung (AP2)

Ziel des Arbeitspakets 2 war die Modellierung und Bewertung des Einflusses alternativer Treibstoffe auf das Betriebsverhalten des Triebwerks sowie die Quantifizierung der Emission u.a. auf Flugmissionsbasis im Vergleich zu konventionellem Kerosin. Zudem sollten die experimentellen Versuche aus AP1 durch Performancerechnungen begleitet und die Ergebnisse für die Erstellung und Validierung von entsprechenden Modellen genutzt werden.

Zusammen mit dem Partner DLH und Experten des LHT-Triebwerks-Engineerings wurden verschiedene Triebwerksoptionen zur Performanceberechnung geprüft. Für die weiteren Arbeiten im Projekt fiel die Auswahl auf das CFM56-5C-Triebwerk (Airbus A340). Zu diesem Modell ist bei LHT ein Versuchsträger verfügbar, welcher bspw. durch eine erweiterte Instrumentierung eine Vielzahl an zusätzlichen Informationen bereitstellen kann. Zudem verfügt LHT in Bezug auf dieses Muster aufgrund der eigenen Wartungs-Aktivitäten über eine langjährige Erfahrung und entsprechende Kenntnisse auch im Bereich der thermodynamischen Kreisprozessmodellierung. Darüber hinaus bietet die CFM56-Triebwerksfamilie mit den Triebwerksmustern -5A/B auch Antriebe für den kontinentalen Luftverkehr.

Daher wurde ein thermodynamisches Triebwerksmodell zum CFM56-5C Triebwerk erstellt und Performanceanalysen mit konventionellem Kerosin durchgeführt. Für die Auslegung und Vorhersage des thermodynamischen Betriebsverhaltens des Turboluftstrahltriebwerks wurde das DLR-eigenen kennfeldbasierten Triebwerksyntheseprogramm GTlab verwendet. Das Modell basiert auf generischen Kennfeldern, welche im Design entsprechend skaliert wurden. Das allgemeine Layout des Modells innerhalb von GTlab sowie die Stationsnummerierung sind in Abbildung 12 gezeigt.

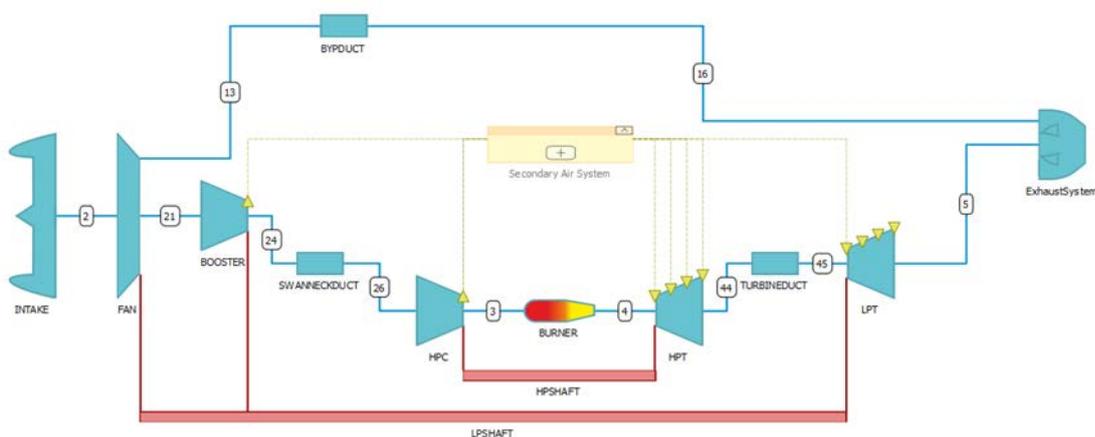


Abb. 12: Layout und Stationsnummerierung des Triebwerksmodells

Das Triebwerksmodell orientiert sich zunächst an den öffentlich verfügbaren Daten (bspw. [ICAO], [EASA]). Darüber hinaus erfolgt die Anpassung weiterer Parameter anhand von

statistischen Daten aus der Literatur (vgl. [Grieb]). Ein Abgleich der Daten des Triebwerkmodells mit den Daten der ICAO Exhaust Emission Data Bank [ICAO] zeigt Abbildung 13.

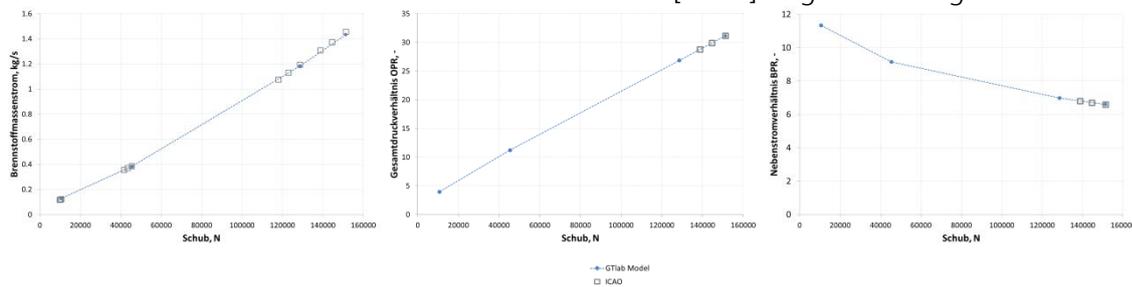


Abb. 13: Vergleich der Modelldaten mit öffentlichen Daten der ICAO [ICAO].

Die im Prüfstandsversuch aufgezeichnet Performance-Daten wurden genutzt, um das Triebwerksmodell an das tatsächliche Triebwerk auf dem Prüfstand anzupassen. Für die Modellierung des Emissionsverhaltens wurden die Emissionen nach dem ICAO LTO-Zyklus berechnet. Für die Vorhersage des Emissionsverhaltens alternativer Treibstoffe unter Höhenbedingungen wurden die Korrelationsmethoden entsprechend der gemessenen Emissionsdaten aus dem Prüfstandsversuch (AP1) angepasst und Emissionscharakteristiken in Abhängigkeit charakteristischer Triebwerksparameter erstellt. Hierfür waren die Ergebnisse der Emissionsmessungen aus dem Ground Testing (AP1) sowie der Triebwerksperformancesimulation notwendig, um eine Änderung des Emissionsverhaltens quantifizieren zu können. Im Rahmen der Prüfstandsversuche wurden Messungen am Versuchsträger EVE der LHT vorgenommen. Hierbei handelt es sich um ein leicht modifiziertes CFM56-5C-Triebwerk, welches zur besseren Performanceanalyse über die Standardinstrumentierung hinaus mit zahlreichen Messstellen versehen wurde.

Die Testmatrix beinhaltet acht Betriebspunkte im Bereich vom Take-off bis zum Ground-Idle. Zu Beginn und zum Abschluss wurde jeweils eine Betriebslinie mit konventionellem Kerosin vermessen. Dazwischen fand eine Messreihe mit dem ausgewählten GEVO Kraftstoff ATJ statt.

Das Referenzkerosin Jet A1 und der GEVO ATJ Kraftstoff wurden zur Spezifizierung von chemischen und physikalischen Eigenschaften einer Laboranalyse unterzogen. Ein Auszug der charakteristischen Brennstoffeigenschaften ist in Tabelle 3 dargestellt.

Der Heizwert des im Prüfstandsversuch verwendeten Jet A1 liegt etwas unterhalb des statistischen Mittels von ca. 43,25 MJ/kg [Rachner]. Daher beziehen sich die weiteren Untersuchungen auf Flugmissionslevel auf ein Referenzkerosin mit einem Heizwert von 43,25 MJ/kg, um die Unterschiede in der Performance nicht aufgrund der Stichprobe zu Ungunsten des Referenzkerosins ausfallen zu lassen.

Die Auswertung der aufgezeichneten Messergebnisse zeigte, dass sich der Referenzbrennstoff Jet A1 in seinen Emissionscharakteristiken zwischen dem ersten Lauf zu Beginn und dem letzten Lauf zum Abschluss der Versuchsreihe unterscheidet. Die Ursachen hierfür sind aktuell noch Stand der Analysen. Daher basieren weiteren Auswertungen nur auf dem ersten Lauf des Referenzkerosins, da hier die Datenlage nach einer Plausibilitätsprüfung konsistenter erscheint.

Zunächst wurde der Kreisprozess des EVE Versuchsträgers in einem thermodynamischen Modell nachempfunden. Hierfür wurde das bereits an öffentlich verfügbaren Daten ausgelegte Modell anhand der Daten der Triebwerksinstrumentierung aus der Messkampagne kalibriert. Die Kalibrierung erfolgte auf Basis des sog. ANSYN Ansatzes. Leider konnte hierbei aus technischen Gründen nicht auf die vollständige Zusatzinstrumentierung des Versuchsträgers EVE zurückgegriffen werden. Um die unterschiedlichen Verbrennungs- und Gaseigenschaften der beiden Treibstoffe in der Triebwerkssimulation berücksichtigen zu können, wurden Gasmodelle mit den entsprechenden thermodynamischen Treibstoffeigenschaften erstellt, in denen die Ergebnisse der Treibstoffanalysen (AP1) aus den experimentellen Versuchen eingeflossen sind. Für die Modellkalibrierung wurden zunächst vereinfachte Brennstoffmodelle der beiden Brennstoffe erstellt. Als relevante Modellparameter dienen hier der Wasserstoffanteil sowie der Heizwert des Brennstoffs (siehe Tabelle 3), da diese beiden Größen Einfluss auf die Triebwerksperformance nehmen. Anschließend wurde aus den Messreihen die jeweiligen Betriebspunkte identifiziert und aus dem thermodynamisch stabilen Bereich der Mittelwert aus einem Zeitintervall von ca. 10s gebildet. Dieser Mittelwert wurde im Weiteren für jeden Parameter des jeweiligen Betriebspunktes verwendet. Abbildung 14 zeigt die zeitliche Abfolge einer Messreihe mit den verschiedenen Betriebspunkten sowie thermisch stabilen Bereichen.

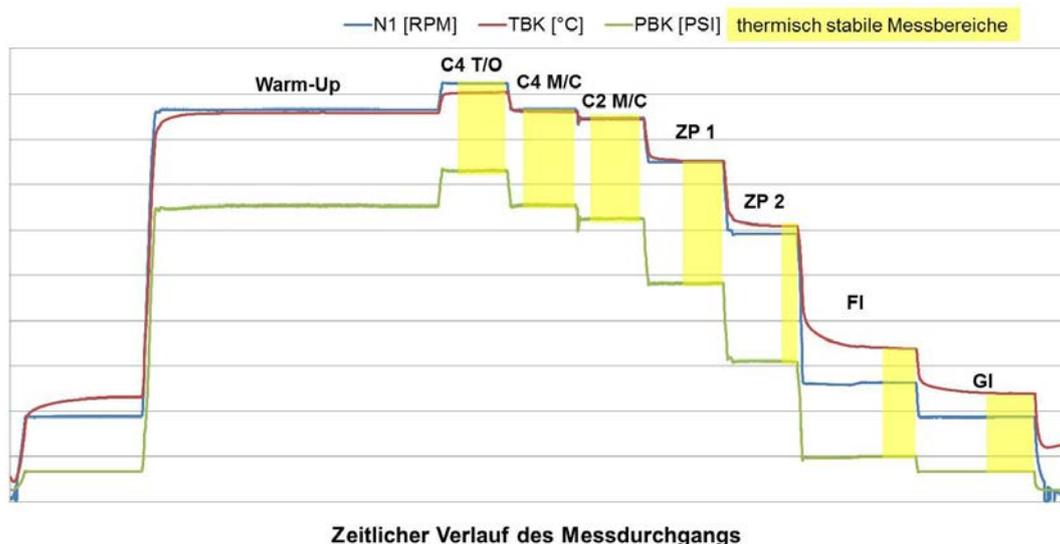


Abb. 14: Zeitlicher Ablauf der Betriebspunktmessungen mit Hervorhebung thermisch stabiler Bereiche nach [Weigelt].

Die Messpunkte wurden als Off-Design Betriebspunkte angefahren, wobei für jeden Betriebspunkt die tatsächlich aufgezeichneten Prüfstandsbedingungen eingestellt wurden. Es wurden für die beiden Betriebslinien die entsprechenden Treibstoffmodelle verwendet. Das Triebwerksdesign wurde so angepasst, dass die Off-Design Betriebspunkte, sowohl für den Kerosin-Lauf als auch für GEVO ATJ-Lauf die Messdaten möglichst genau widerspiegeln. Die relativen Modellabweichungen zu den Messdaten sind in Abbildung 15 gezeigt.

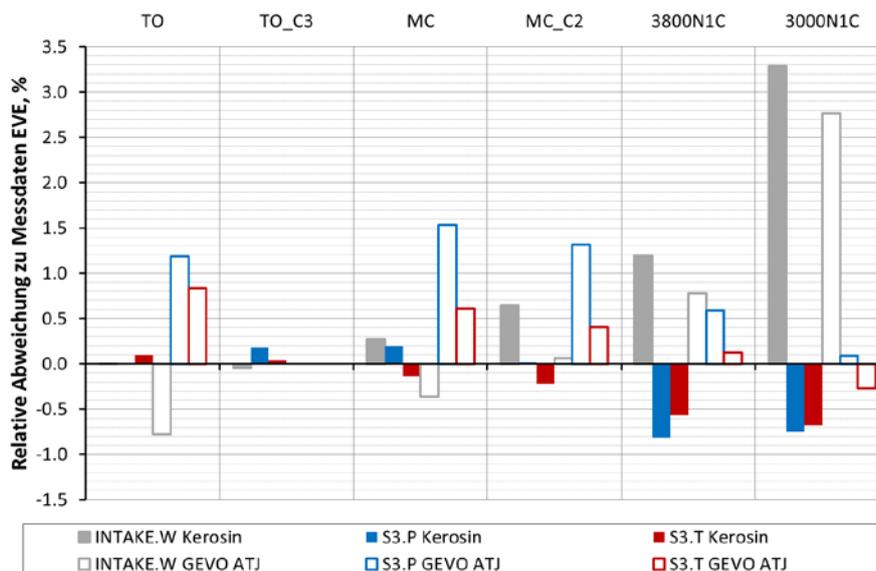
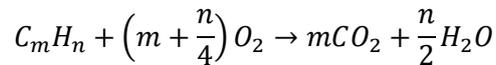


Abb. 15: Relative Abweichung der kalibrierten Modelle zu den Messwerten für den Betrieb mit Kerosin und GEVO ATJ.

Im Teillastbetrieb nehmen die Abweichungen leicht zu, da hier die Kennfeldeffekte zunehmend an Bedeutung gewinnen und eine mögliche Triebwerksregelung, bspw. über verstellbare Leitschaufeln o.ä. greift. Es gilt zu beachten, dass die aufgezeichneten Messwerte, abgesehen von der zeitlichen Mittelung, keine weiteren Korrekturen erfahren haben.

Die Auswertung der Emissionsmessungen zeigt, dass neben dem leicht anderen Brennstoffverbrauch, Partikelmasse und -anzahl sich signifikant zwischen den beiden Treibstoffen unterscheiden. Stickoxide und Kohlenmonoxid hingegen weisen ähnliche Emissionswerte auf. Deswegen wird im Weiteren der Brennstoffverbrauch und, aufgrund der methodischen Verfügbarkeit, die Partikelmassenemissionen, sowie der CO₂ und H₂O-Ausstoß näher betrachtet.

Die Emissionen der direkten Kohlendioxid (CO₂) und Wasserdampf (H₂O) Emission sind proportional zum Brennstoffverbrauch. Daher ist der entsprechende Emissionsindex über den gesamten Betriebsbereich der Flight Envelope konstant. Er kann direkt aus den Brennstoffeigenschaften und unter der Annahme einer vollständigen Verbrennung ermittelt werden.



Für die hier betrachteten Brennstoffe ergeben sich demnach die Tabelle 4 aufgeführten Emissionsindizes.

Tab. 4: Emissionsindizes für CO₂ und H₂O der beiden Brennstoffmodelle.

Emission	Referenz (Jet A1)	GEVO ATJ
EI CO2 [kg/kg]	3,15	3,08
EI H2O [kg/kg]	1,26	1,38

Diese können im Anschluss an die Flugmissionssimulation mit dem errechneten Brennstoffbedarf multipliziert werden.

Die Partikelemissionen hingegen sind nicht-proportional zum Brennstoffverbrauch. Diese sind abhängig von den Umgebungsbedingungen und dem aktuellen Lastzustand des Triebwerks und können daher nicht konstant für die gesamte Flight Enveloppe angenommen werden. Daher findet hier die semi-empirische Emissionskorrelationsmethode nach [Döpelheuer] Anwendung. Die Analyse der Partikelmassenemissionen beruht auf dem Verfahren der ICAO (FOA3) [ICAO,2011]. Zunächst werden gemäß FOA3-Methode die gemessenen EI (g/kg) in eine Ruß-Konzentration CI (mg/kg) umgerechnet. Die Rußkonzentrationen werden über der Brennkammereintrittstemperatur des jeweiligen Modells aufgetragen und durch ein Regressions-Polynom 3. Ordnung angenähert. Etwaige Überschwinger in den negativen Bereich wurden auf null gesetzt. Im nächsten Schritt wurden jeweils für Kerosin Jet A1 und GEVO ATJ die ICAO LTO Punkte des CFM56-5C4 (2CM015) Triebwerks unter Standardbedingungen nachmodelliert und die zugehörigen Konzentrationen (CI) über die Regressionsfunktion bestimmt. Das Ergebnis ist in Abbildung 16 dargestellt.

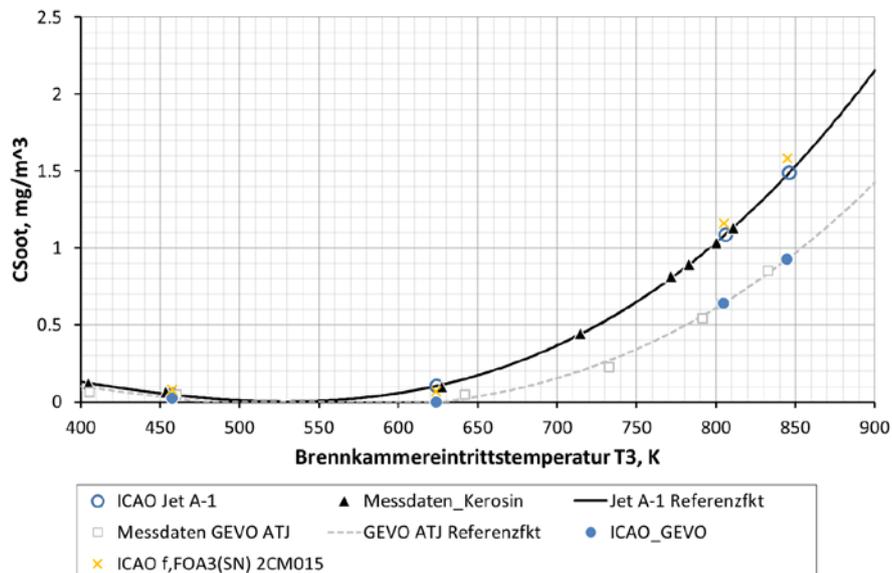


Abb. 16: Referenzfunktion der Rußkonzentration über der Brennkammereintrittstemperatur.

Zur Orientierung und zur Überprüfung der Plausibilität der Messungen und Umrechnungen sind zusätzlich noch die resultierenden Ruß-Konzentrationen aus der Umrechnung der SN aus der ICAO Exhaust Emission Data Bank [ICAO] nach FOA3 [ICAO,2011] angegeben

$$CI = f(SN)$$

Demnach können die Daten als plausibel betrachtet werden.

Im nächsten Schritt wird der Quotient der beiden Rußkonzentrationen des GEVO ATJ und des Kerosin Brennstoffs an den vier ICAO Punkten ausgewertet. Aufgrund des Verlaufs der Regressionskurve (und entsprechender Korrektur auf 0) ergibt sich für den App-Betriebspunkt eine 100% Reduktion. Daher wurden ein Ausgleichspolynom 2. Ordnung durch die drei Betriebspunkte T/O, C/O und Idle gelegt und der Quotient für den App-Betriebspunkt entsprechend des Ausgleichspolynoms interpoliert. Somit ergibt sich der in Abbildung 17 dargestellte Verlauf. Zur Orientierung ist auch der ursprüngliche, nicht interpolierte Wert dargestellt. In tabellarischer Form sind die jeweiligen Quotienten in Tabelle 5 für die vier ICAO LTO-Punkte aufgeführt.

Tab. 5: Verhältnis der Rußkonzentration des ATJ Brennstoffs im Vergleich zu konventionellem Kerosin.

	T/O	C/O	App	Idle
Clsoot,ATJ/Clsoot	0,622	0,589	0,526	0,527

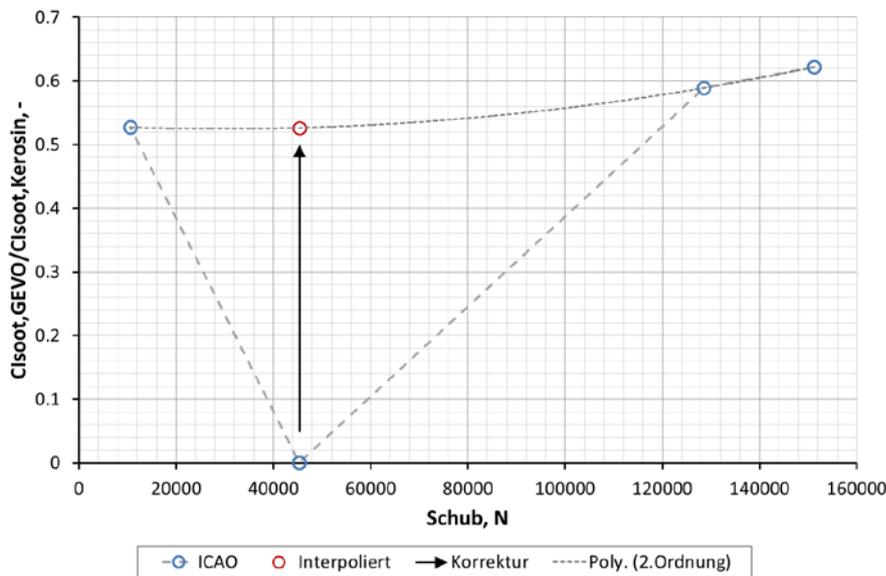


Abb. 17: Ermittlung der Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung des GEVO ATJ Kraftstoffs.

Im Weiteren wird die so ermittelte Korrekturfunktion für die Verwendung eines ATJ Brennstoffs bei der Emissionsmodellierung berücksichtigt. Als Referenzwerte für den Betrieb mit konventionellem Kerosin dienen bei allen Modellen die transformierten SN Werte (nach FOA3) aus [ICAO].

Für die Anwendung der Korrelationsmethode nach Döpelheuer werden über die Referenzfunktion der Ruß-Konzentration hinaus, auch die internen Triebwerksparameter Brennstoff-Luft-Verhältnis (BURNER.FAR), Brennkammereintrittsdruck (S3.P) sowie die stöchiometrische Flammentemperatur (T_{flame}) erfasst. Diese Werte werden jeweils mit einem Polynom 2. Ordnung als Funktion der Brennkammereintrittstemperatur angenähert. Die Referenzfunktionsverläufe sind in Abbildung 18 zusammenfassend dargestellt.

Anschließend erfolgte eine Übertragung der Bodenstanddaten auf Höhenbedingungen und die komplette Flugmission. Mit dem DLR-eigenen Missionstool VarMission wurden Flugleistungsrechnungen durchgeführt und die Einflüsse alternative Treibstoffe gegenüber konventionellem Kerosin auf repräsentativen Flugmissionen quantifiziert und analysiert.

Hierfür wurden für die Flotte der DHL sowie der DLH repräsentative Flugzeug-Triebwerkskombinationen und entsprechend typische Streckenlängen und Abfluggewichte bereitgestellt. Für die Simulation der Flugmissionen wurde eine Auswahl an repräsentativen Triebwerksmodellen erstellt, um den Einfluss alternativer Treibstoffe simulieren zu können. So können charakteristische Triebwerksparameter mit Relevanz für die Emissionskorrelationsmethoden (bspw. Druck und Temperatur am Brennkammereintritt) simuliert werden, um eine Übertragung der Messergebnisse auf andere Betriebspunkte und

Umgebungsbedingungen auf der Flugmission zu ermöglichen. Aufgrund der Fülle an verfügbaren Flugzeug und Triebwerksmustern innerhalb der Flotte der DLH wurde zunächst eine Auswertung ausgewählter Triebwerkeigenschaften vorgenommen um die Triebwerksmuster anschließend entsprechend gruppieren zu können, um die Modellverfügbarkeit zu berücksichtigen. Dabei wurde als Datenbasis die Einträge der ICAO nach [ICAO] genutzt. Die DLH-Flotte wurde hierbei in fünf Gruppen unterteilt, basierend auf den folgenden Kriterien

- Schubklasse,
- Brennstoffverbrauch,
- Druckverhältnis (OPR),
- Nebenstromverhältnis (BPR) und
- Stickoxidemissionen (NOx)

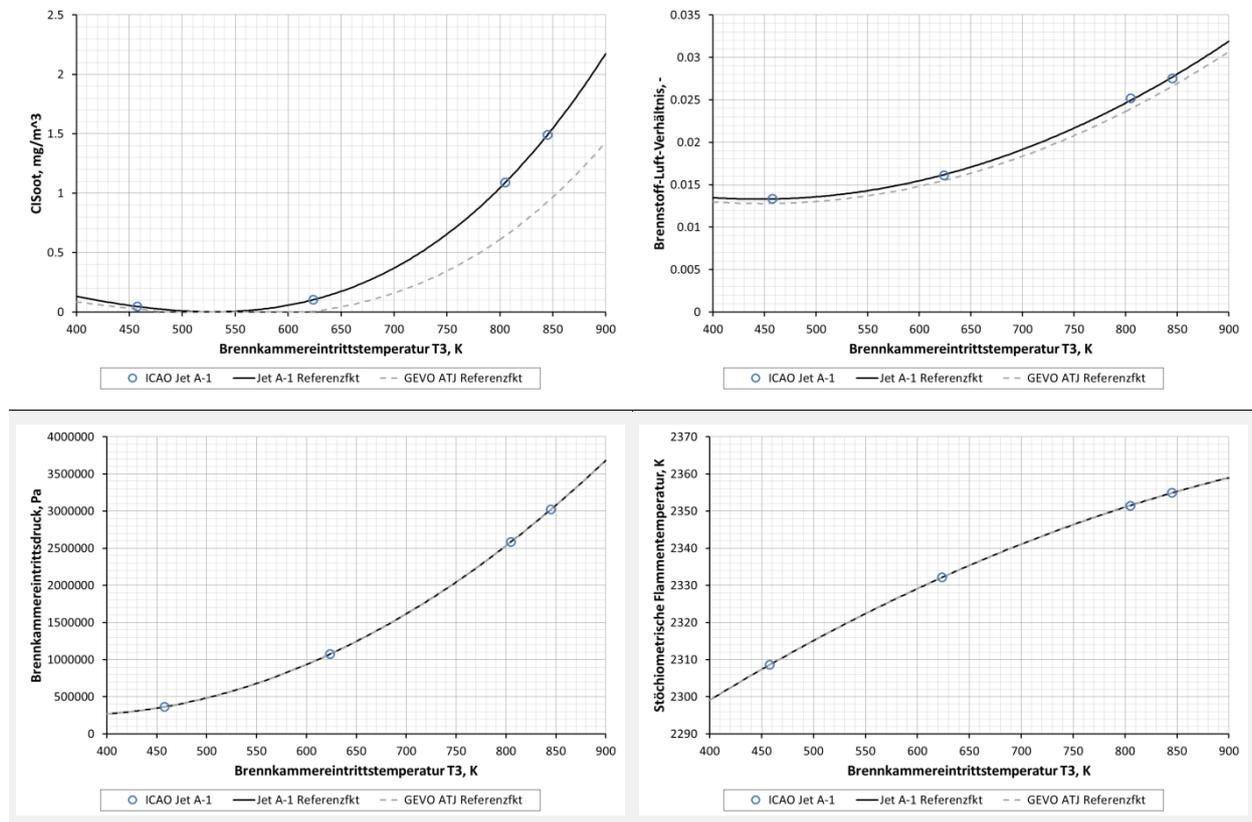


Abb. 18: Korrelationsfunktionen für die Rußkonzentration, Brennstoff-Luft-Verhältnis, den Brennkammereintrittsdruck sowie die stöchiometrische Flammentemperatur.

Die zugehörige Auswertung ist in Abbildung 19 gezeigt.

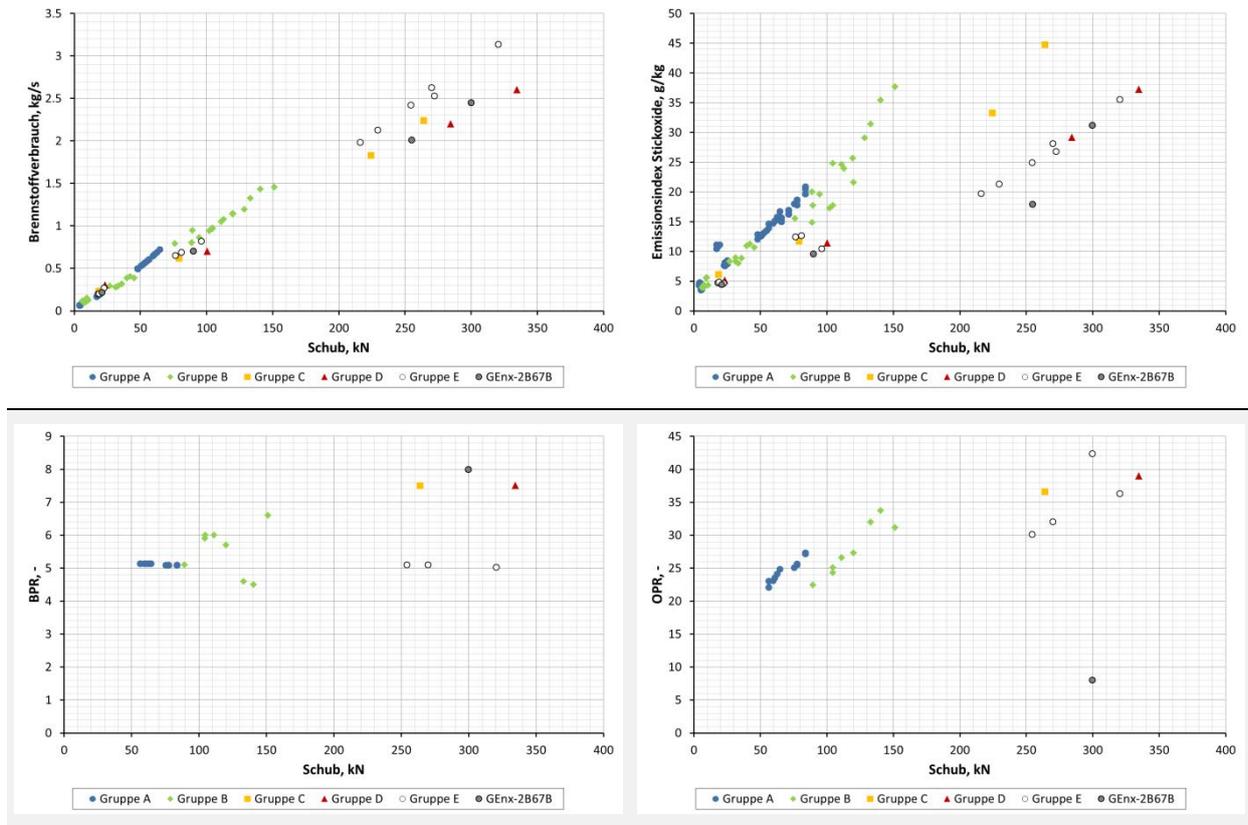


Abb. 19: Triebwerksgruppierungen über dem Brennstoffverbrauch, den NO_x Emissionen, dem BPR sowie der OPR als Funktion des Schubs.

Die sich daraus ergebene Gruppierung der einzelnen Triebwerke ist in Tabelle 6 aufgeführt.

Tab. 6: Zuordnung der Triebwerke zu den Gruppen.

Gruppe	Triebwerk	Weitere
A	CF34	-
B	V2500	CFM56 5A/B, 3B1, 5C4
C	Trent500	-
D	Trent900	-
E	CF6-80C2	Trent700 (GenX-2B67B)

Die beiden Gruppe A und B ergeben sich aus den Brennstoffverbräuchen und Schubklassen. Gruppe C weist eine deutlich andere NO_x-Charakteristik auf und wird daher separat betrachtet. Die Triebwerke der Gruppe D weisen eine Sonderstellung aufgrund des Brennstoffverbrauchs und der NO_x-Charakteristik auf. Schließlich ergibt sich Gruppe E aus den zugrundeliegenden Brennstoffverbräuchen, mit Ausnahme des GenX Triebwerksmusters. Dieses ist jedoch aufgrund der Anzahl der Triebwerke bei DLH im Bezugsjahr 2013 weniger relevant und wurde daher in der

weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Für die Flotte der DHL wurde ein CF6-80C2 und ein PW4000 Triebwerk verwendet.

Für die Flugmissionssimulation wurde zunächst für jedes der verwendeten Triebwerke ein Performance-Kennfeld berechnet. Hierbei wurden in der gesamten Flight-Envelope für jede Höhen-Flugmachzahlkombination Betriebslinien simuliert und tabellarisch abgespeichert. Die Emissionsdaten für den Partikelaustritt wurde anhand der bereits beschriebenen Methodik aus den SN Werten der ICAO Datenbank [ICAO] ermittelt. Für den Betrieb mit dem alternativen Kraftstoff GEVO ATJ wurde jeweils ein weiteres Kennfeld berechnet. Die zugehörigen Partikelmassenemissionen wurden hierfür aus den zuvor bestimmten Emissionsdaten der ICAO und der aus den Versuchen ermittelten Korrekturfunktion bestimmt. Mit diesem Ansatz weisen alle Triebwerke die am Versuchsträger experimentell ermittelte relative Reduzierung der Partikelemissionen auf. Es werden jedoch durch Berücksichtigung der ICAO SN Daten den triebwerksspezifischen Eigenarten und Emissionscharakteristiken Rechnung getragen. Anschließend wurden anhand der ermittelten Emissionskorrelationsmethode die Emissionen der Partikelmassen bzw. deren Emissionsindex für jeden Betriebspunkt berechnet und die Kennfelder für den Referenz- und GEVO-Kraftstoff jeweils entsprechend erweitert. Die zugehörigen Flugzeuge wurden mittels charakteristischen Gewichten und den Flugzeugpolaren nach BADA modelliert. Insgesamt wurden für 18 Flugmissionen (3 DHL und 15 DLH) jeweils zwei Simulationen (Referenz und GEVO ATJ) durchgeführt. Dabei variierten die Streckenlängen zwischen ca. 200 und 7500 km. Für die jeweilige Trajektorie wurden generische Flugbahnen angenommen (bei längeren Strecken inkl. Step-climb). Ein Beispiel ist in Abbildung 20 dargestellt.

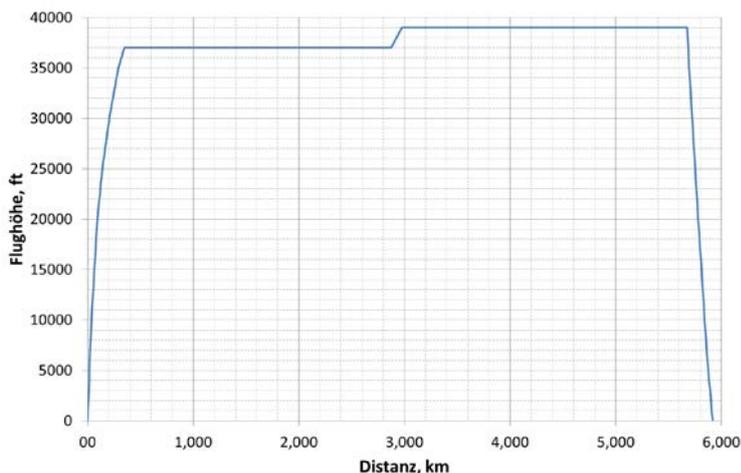


Abb. 20: Beispiel einer simulierten Flugmission in Form des Höhenprofils über der Distanz.

Für die einzelnen Flugmissionen wurden dabei folgende Kenngrößen ermittelt:

- Brennstoffverbrauch
- Partikelmassen-Emission
- CO₂-Emission

- H₂O-Emission

Um die Unsicherheit der Modelle zu minimieren und aufgrund der Vertraulichkeit der Daten wird im Weiteren lediglich auf die relative Abweichung abgehoben. Die Ergebnisse der Flugmissionssimulationen sind im Folgenden dargestellt.

Abbildung 21 zeigt die relative Einsparung im Brennstoffverbrauch für die verschiedenen Flugmissionen. Die Flugmissionen weisen eine Einsparung des Brennstoffverbrauchs zwischen 1.39% und 1.65% auf. Dies lässt sich primär auf den höheren Heizwert des GEVO ATJ Brennstoffs zurückführen.

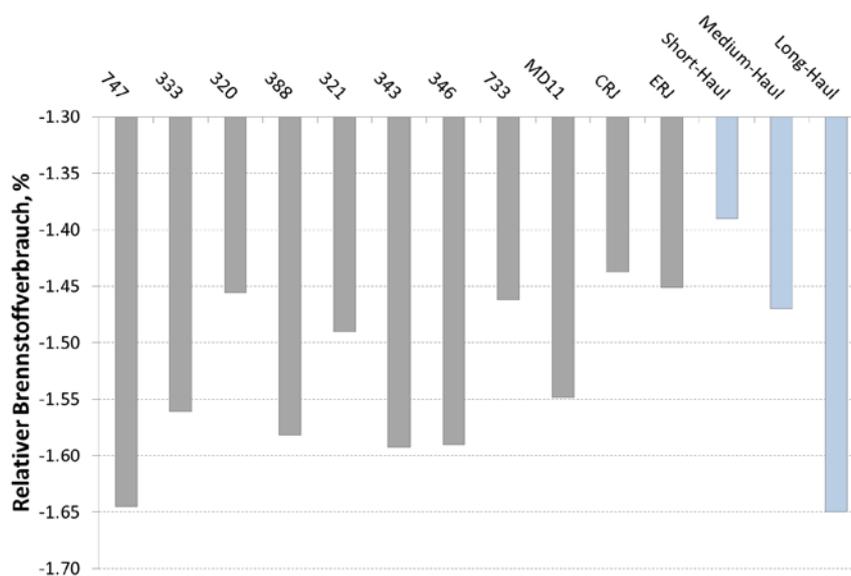


Abb. 21: Einfluss des GEVO ATJ auf den Brennstoffverbrauch für verschieden Flugmissionen.

Für die direkten CO₂ Emissionen ergibt sich das in Abbildung 2-16 dargestellte Einsparpotential. Hierbei beziehen sich die Angabe auf die bei der Verbrennung freigesetzten CO₂ Mengen.

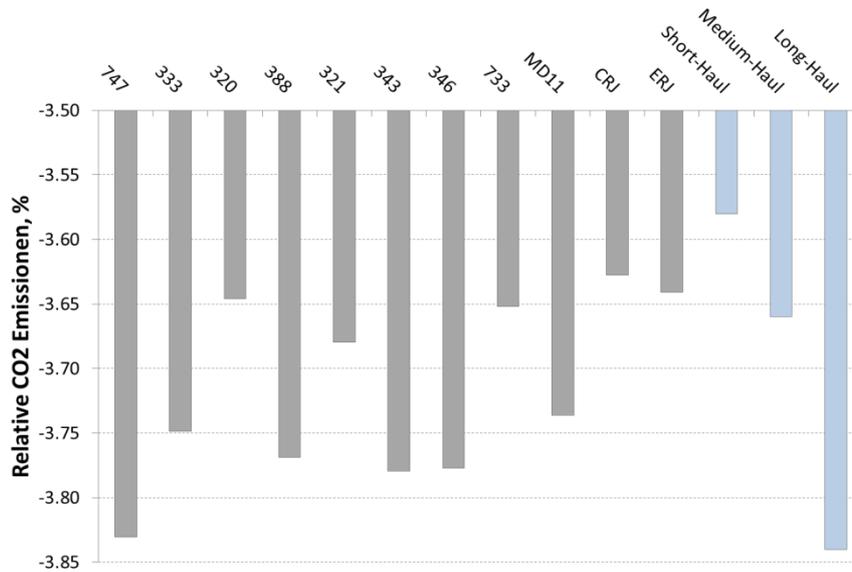


Abb. 22: Einfluss des GEVO ATJ auf die direkten CO2 Emissionen für verschieden Flugmissionen.

Die Reduzierung beruht hierbei zum einen auf dem verringerten Kraftstoffbedarf auf der Flugmission und zum anderen aus dem reduzierten C/H-Verhältnis des GEVO ATJ. Daher reduzieren sich die direkten CO2 Emissionen stärker (3.6% bis 3.8%), als der Brennstoffverbrauch. Einen entgegengesetzten Trend weisen die Wasserdampf Emissionen auf (siehe Abbildung 23).

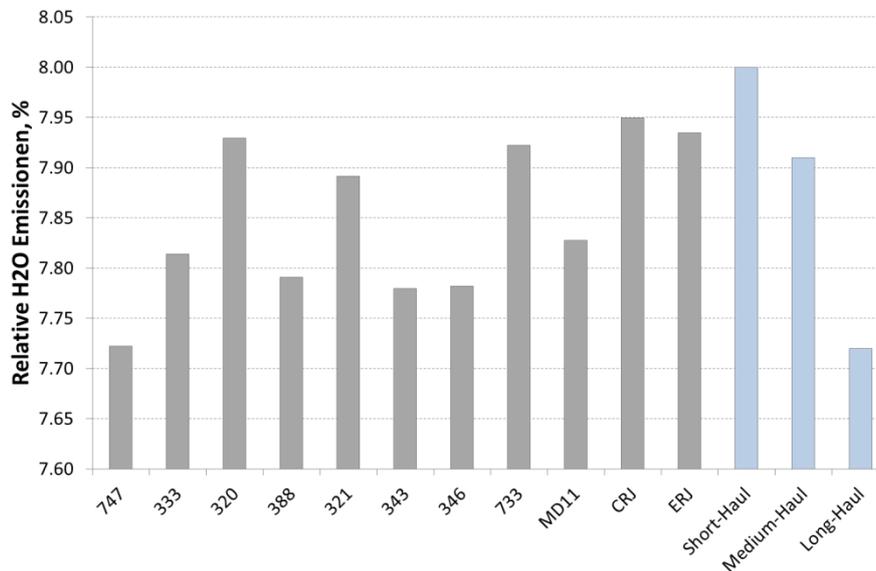


Abb. 23: Einfluss des GEVO ATJ auf die direkten H2O Emissionen für verschieden Flugmissionen.

Es wirkt der verringerte Kraftstoffbedarf bei Verwendung des GEVO ATJ dem höheren H-Anteil im Kraftstoff zwar entgegen, kann diesen Effekt aber nicht vollständig kompensieren. Daher steigen die Wasserdampf Emissionen im Bereich von 7.7% bis 8%. Bei den Partikelmassen

werden die größten Einflüsse sichtbar. Hier beträgt die Einsparung zwischen 42% und knapp 50% gegenüber konventionellem Kerosin. Abbildung 2-8 zeigt die relativen Einsparungen für die Flugmissionen.

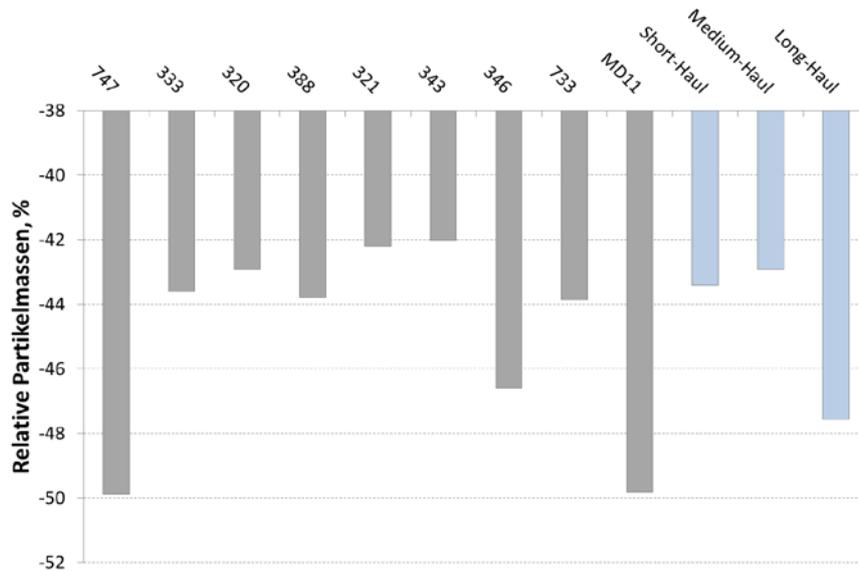


Abb. 24: Einfluss des GEVO ATJ auf die Partikelmassen für verschiedenen Flugmissionen. Grundsätzlich lässt sich beobachten, dass die Unterschiede auf längere Flugmissionen aufgrund der Schneeballeffekte größer ausfallen als auf kurzen Flugstrecken auf.

Um die generelle Systematik auf Plausibilität zu überprüfen, wurde zudem eine detaillierte Studie zum Einfluss der Treibstoffe am Beispiel des A330 Flugzeug durchgeführt. Hierbei wurden die Flugmissionslänge variiert, um den Einfluss der Schneeballeffekte bzw. der Einfluss des Startgewichts auf die Flugleistung zu analysieren. Die Ergebnisse sind in Abbildung 25 zusammenfassend dargestellt. Zum Vergleich ist die „midshort“-Mission, welche bereits bei den anderen Ergebnisdarstellungen aufgeführt wurde, dunkel hervorgehoben. Mit Ausnahme der ausgesprochen kurzen Mission zeigten sich nur relativ geringe Unterschiede. Dies zeigt, dass die grundsätzliche Vorgehensweise, nur mittlere Distanzen für eine Flugzeugklasse zu wählen, das gesamt Ergebnis nicht signifikant beeinflusst.

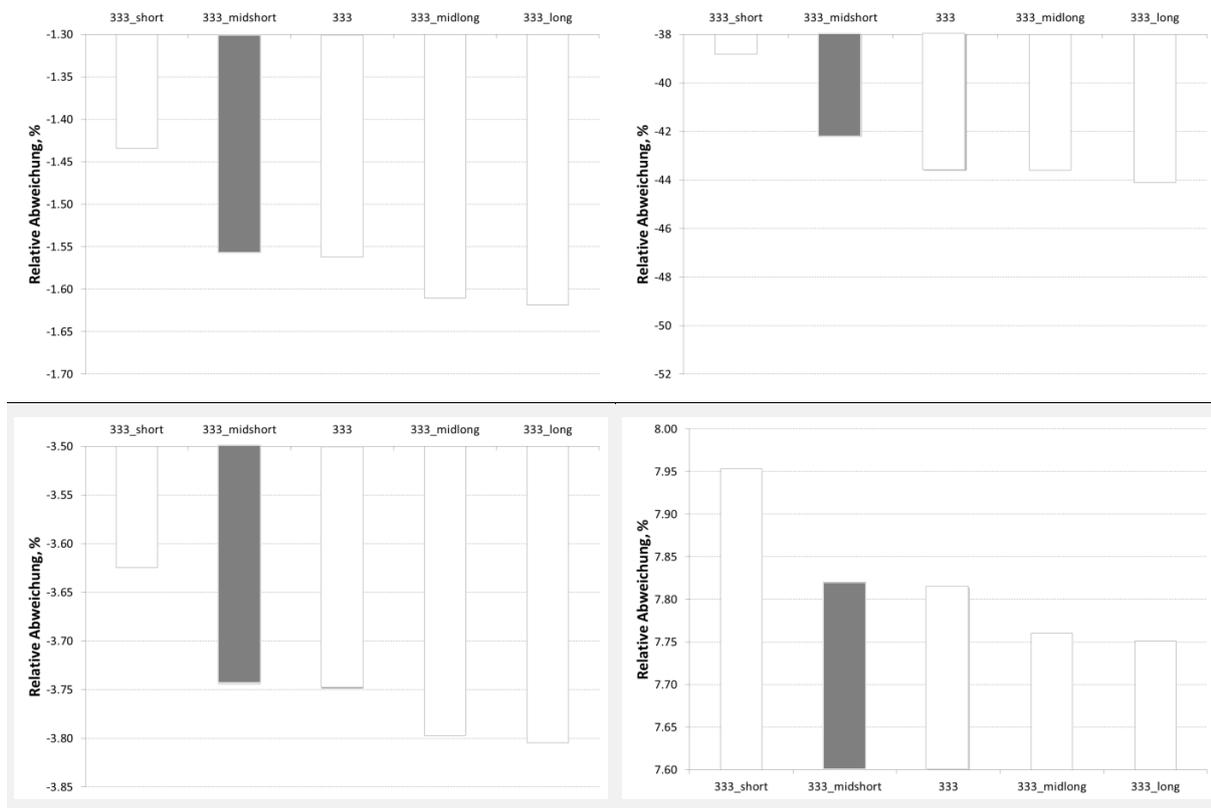


Abb. 25: Sensitivitätsstudie des Einflusses der Streckenlänge auf die relativen Abweichungen.

2.3. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die NASA veröffentlicht derzeit Daten aus einer Emissionsuntersuchung von 275 Startvorgängen am Flughafen von Los Angeles. Die Untersuchungen wurden 2014 durchgeführt und ergänzen die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Messungen am Flughafen Frankfurt. Derzeit existiert zum obigen Datensatz jedoch keine angenommene Publikation.

Im Rahmen des DLR/NASA-Projekts „Emission Climate Impact of Alternative Fuels“ (ECLIF) wurden verschiedene alternative Treibstoffe auf einem Triebwerk eines A320 untersucht. Die Ergebnisse der Bodenmessungen sind derzeit im Publikationsprozess und ergänzen die im Rahmen dieser Studie durchgeführten Untersuchungen. Auch hier gibt es noch keine angenommene Publikation.

3. Verwertungsplan

Die Ergebnisse der Messungen am Triebwerksprüfstand wurden im August 2017 auf der European Aerosol Conference vorgestellt (Schripp, T., Herrmann, F., Oßwald, P., Köhler, M., Zschocke, A., Weigelt, D., Werner-Spatz, C., Mroch, M., 2017. Impact of Alternative Fuels on Particle Emission from an Aircraft Jet Engine in a Test Rig European Aerosol Conference 2017. Association for Aerosol Research (GAeF), Zürich, Switzerland). Die entsprechenden Messungen werden derzeit für Publikation in einer geeigneten Fachzeitschrift (z.B. Environmental Science and Technology) aufbereitet. Die Publikation ist für Anfang 2018 geplant.

Die Übersichtsuntersuchungen am Frankfurter Flughafen werden langfristig im Rahmen des DLR Projektes Eco2Fly in eine größere Datenbank integriert, um anderen Forschungsgruppen Zugang zu den Informationen zu geben. Die Publikation der Messungen ist ebenfalls angedacht.

Die Auswertungen der Emissionsmessungen im Triebwerkskontext sowie deren Übertragung auf Flugmissionslevel erweitern die Datenbasis komplementär zu den DLR-Projekten ECLIF und Future Fuels. Erste Ergebnisse fanden bereits Eingang in die Veröffentlichung im Rahmen einer Diplomarbeit (Weigelt, D., „Untersuchung der Schadstoffeigenschaften alternativer Flugkraftstoffe im Prüfstandsversuch und simulationsgestützte Analyse ihrer Umweltauswirkungen für typische Emissionshöhen von Luftfahrzeugen.“, Diplomarbeit TU Dresden, 2017). Darüber hinaus ist eine Veröffentlichung der Erkenntnisse in 2018 geplant.

4. Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts airegEM wurden zwei nicht-fossile Flugtreibstoffe, ARA ReadJet und Gevo ATJ, hinsichtlich ihres Emissionsminderungspotentials untersucht und mit einem konventionellem Kerosin verglichen. Die Treibstoffe wurden zunächst hinsichtlich ihrer Eigenschaften charakterisiert und anschließend auf einem Prüfstand der Lufthansa Technik (LHT) in Hamburg auf einem realen Flugzeugtriebwerk eingesetzt. Das EVE-Triebwerk von LHT hat eine vollständige Instrumentierung und ist mit einer zusätzlichen Sensorik ausgestattet, die eine genaue Überwachung des Verbrennungsvorgangs erlaubt. Die Emissionen wurden im Abgasstrom mit einer Reihe verschiedener Partikelmessinstrumente und einem mobilen FT-Infrarotspektrometer ermittelt. Dabei zeigte sich insbesondere für den aromatenfreien Gevo ATJ eine Verringerung der emittierten Partikelmasse um ca. 30%.

Die Ergebnisse des Versuchs wurden anschließend in einer Flugleistungsrechnung mit geeigneten Modellen verwendet, um mögliche Effekte auf die Gesamtemissionen bei einem Einsatz der Treibstoffe bei flottenweitem Einsatz durch Lufthansa zu ermitteln. Aufgrund des höheren Heizwerts von Gevo ATJ gegenüber regulärem Jet A1-Kerosin ergeben sich geringere Treibstoffverbräuche im realen Einsatz. Erwartungsgemäß ist daher die größte Emissionsminderung, z.B. bei der Kohlendioxidfreisetzung, beim Einsatz in Langstreckenflügen zu erreichen. Das Emissionsminderungspotential hinsichtlich der Partikelmasse erreicht dann ca. 45%.

Das Experiment wurde ergänzt durch Orientierungsmessungen an der Startbahn des Flughafens Frankfurt für mehrere Tage. Hier wurden die Emissionen startender Flugzeuge hinter der an der Startbahn befindlichen Blastwand aufgezeichnet. Die Informationen über den Triebwerkstyp erlauben Abschätzungen über die Breite der Emissionsindizes für denselben Triebwerkstyp unter realen Einsatzbedingungen und unterschiedlichen Wartungszuständen.

Literaturverzeichnis

ICAO, „Airport Air Quality Manual Doc 9889, 1. Edition,“ International Civil Aviation Organization (ICAO), Canada, 2011

ICAO, „ICAO Engine Exhaust Emissions Databank, First Edition 1995, ICAO, Doc 9646- AN/943, Version 21B

European Aviation Safety Agency (EASA), “Type Certificates (TCDS)”,
<https://easa.europa.eu/document-library/type-certificates> [cited 31 July 2017]

Grieb, H., “Projektierung von Turboflugtriebwerken“, Birkhauser Verlag, 2004
A. Döpelheuer, Anwendungsorientierte Verfahren zur Bestimmung von CO, HC und Ruß aus Luftfahrttriebwerken, Köln: Forschungsbericht 2002-10, DLR Institut für Antriebstechnik, 2002

Rachner, M., Die Stoffwerte von Kerosin Jet A1, DLR-Mitteilung 98-01, 1998

Weigelt, D., „Untersuchung der Schadstoffeigenschaften alternativer Flugkraft-stoffe im Prüfstandsversuch und simulationsgestützte Analyse ihrer Umweltauswirkungen für typische Emissionshöhen von Luftfahrzeugen.“, Diplomarbeit TU Dresden, 2017

Anhang A: Ergebnisse der Messungen am FraPort

Flugzeugtyp	Kennung	Airline	Maschine	EI PN [#/kg]	EI PM [mg/kg]	CO2 (max) [ppm]	EI CO [g/kg]	EI NO _x [g/kg]
737-530	D-ABIU	LH	2x CFMI CFM56-3B1	3,05E+15	46,9	718	29,9	17,1
737-530	D-ABJB	LH	2x CFMI CFM56-3B1	3,81E+15	26,2	805	35,9	14,4
747-430	D-ABVM	LH	4x GE CF6-80C2B1F	8,85E+15	32,4	1215	28,6	12,6
787 United			2x GEnx-1B	6,89E+15	20,2	913	24,7	22,5
A300B4-605R	EP-IBD	Iran Air	2x GE CF6-80C2A5	3,27E+15	13,6	867	54,9	7,8
A319-112	D-AIBF	LH	2x CFMI CFM56-5B6/3	9,43E+14	46,2	498	8,5	35,3
A319-112	D-AIBI	LH	2x CFMI CFM56-5B6/3	3,30E+15	25,2	647	3,5	15,3
A319-112	D-AIBG	LH	2x CFMI CFM56-5B6/3	2,78E+15	26,2	751	4,1	13,4
A319-112	9A-CTG		2x CFMI CFM56-5B6/P	6,46E+15	61,1	936	7,7	13,4
A319-112	OE-LDB	Austrian	2x CFMI CFM56-5B6/P	7,73E+15	48,7	973	33,3	12,9
A319-114	D-AILP	LH	2x CFMI CFM56-5A5	7,58E+13	20,9	459	13,7	29,4
A319-114	D-AILL	LH	2x CFMI CFM56-5A5	3,96E+15	43,4	468	40,1	35,7
A319-114	D-AILH	LH	2x CFMI CFM56-5A5	1,08E+15	49,8	509	9,7	32,0
A319-114	D-AILI	LH	2x CFMI CFM56-5A5	3,59E+15	71,3	717	10,8	17,4
A319-114	D-AILS	LH	2x CFMI CFM56-5A5	2,18E+15	42,7	732	2,9	20,7
A319-114	D-AILI	LH	2x CFMI CFM56-5A5	1,04E+15	21,4	772	9,9	18,3
A319-114	D-AILU	LH	2x CFMI CFM56-5A5	2,53E+15	54,9	812	5,0	14,0
A319-114	D-AILI	LH	2x CFMI CFM56-5A5	4,22E+15	43,6	899	26,5	13,4
A319-114	D-AILP	LH	2x CFMI CFM56-5A5	4,61E+15	72,9	968	43,2	12,7
A320-211	D-AIPL	LH	2x CFMI CFM56-5A1	1,59E+14	66,4	452	17,6	58,8
A320-211	D-AIPS	LH	2x CFMI CFM56-5A1	2,73E+15	66,4	454	26,2	55,6
A320-211	D-AIPM	LH	2x CFMI CFM56-5A1	2,11E+15	92,1	734	6,5	19,7
A320-211	D-AIPL	LH	2x CFMI CFM56-5A1	3,30E+15	79,5	750	3,3	21,3
A320-211	D-AIQT	LH	2x CFMI CFM56-5A1	3,66E+15	51,4	811	2,8	18,8

Flugzeugtyp	Kennung	Airline	Maschine	EI PN [#/kg]	EI PM [mg/kg]	CO2 (max) [ppm]	EI CO [g/kg]	EI NO _x [g/kg]
A320-211	D-AIPL	LH	2x CFMI CFM56-5A1	4,65E+15	47,3	824	44,0	10,9
A320-211	D-AIPP	LH	2x CFMI CFM56-5A1	4,14E+15	66,1	929	29,9	14,1
A320-211	D-AIQT	LH	2x CFMI CFM56-5A1	4,04E+15	81,3	1024	50,8	14,6
A320-211	D-AIQT	LH	2x CFMI CFM56-5A1	2,13E+15	46,1	1027	30,0	10,0
A320-211	D-AIPS	LH	2x CFMI CFM56-5A1	4,39E+15	62,5	1100	31,2	15,5
A320-212	D-AICF	LH	2x CFMI CFM56-5A5	3,31E+15	81,2	466	12,2	59,1
A320-212	D-AICF	Condor	2x CFMI CFM56-5A3	3,61E+15	15,4	731	40,7	12,9
A320-212	CS-TKJ	SATA	2x CFMI CFM56-5A3	2,95E+15	66,3	966	41,1	14,8
A320-214	HZ-ASG	Saudi Arab Airline	2x CFMI CFM56-5B4/3	2,80E+15	31,6	671	3,7	17,9
A320-214	D-AIZI	LH	2x CFMI CFM56-5B4/3	3,35E+15	24,0	719	3,8	16,7
A320-214	9A-CTK	Croatien	2x CFMI CFM56-5B4/P	4,35E+15	48,0	724	3,3	18,0
A320-214	OE-LBO	Austrian Airlines	2x CFMI CFM56-5B4/P	2,50E+15	43,8	785	19,3	19,8
A320-214	D-AIZI	LH	2x CFMI CFM56-5B4/3	5,56E+15	38,5	823	2,1	15,5
A320-214	D-ABNH	Air Berlin	2x CFMI CFM56-5B4/P	3,20E+15	53,6	842	5,0	17,0
A320-214	OE-LBO	Austrian Airlines	2x CFMI CFM56-5B4/P	3,79E+15	40,9	888	6,2	17,1
A320-214	T7-MRB	MEA	2x CFMI CFM56-5B4/3	4,97E+15	46,8	890	2,9	16,7
A320-214	9A-CTK	Croatia Airlines	2x CFMI CFM56-5B4/P	6,58E+15	86,5	917	3,4	15,6
A320-214	9A-CTK	Croatian Airline	2x CFMI CFM56-5B4/P	3,45E+15	63,6	920	32,3	15,5
A320-214	D-AIZN	LH	2x CFMI CFM56-5B4/3	2,87E+15	29,2	946	38,8	10,5
A320-214(WL)	D-AIUA	LH	2x CFMI CFM56-5B4/3	3,50E+15	47,5	456	19,3	64,1
A320-214(WL)	D-AIUE	LH	2x CFMI CFM56-5B4/3	2,45E+15	55,6	470	52,5	45,7
A320-214(WL)	D-AIUG	LH	2x CFMI CFM56-5B4/3	2,43E+15	20,8	647	13,6	13,7
A320-214(WL)	T7-MRD	MEA Airline	2x CFMI CFM56-5B4/3	3,53E+15	34,7	735	34,0	13,8
A320-214(WL)	D-AIUD	LH	2x CFMI CFM56-5B4/3	2,84E+15	26,9	750	54,0	11,9

Flugzeugtyp	Kennung	Airline	Maschine	EI PN [#/kg]	EI PM [mg/kg]	CO2 (max) [ppm]	EI CO [g/kg]	EI NO _x [g/kg]
A320-214(WL)	D-AIZW	LH	2x CFMI CFM56-5B4/3	6,97E+15	46,1	774	6,8	16,2
A320-214(WL)	D-AIZX	LH	2x CFMI CFM56-5B4/3	6,00E+15	40,0	811	5,1	14,2
A320-214(WL)	D-AIZW	LH	2x CFMI CFM56-5B4/3	3,20E+15	35,0	821	28,7	13,2
A320-214(WL)	D-AIUJ	LH	2x CFMI CFM56-5B4/3	3,26E+15	27,3	840	43,8	13,6
A320-214(WL)	D-AIZZ	LH	2x CFMI CFM56-5B4/3	5,87E+15	48,7	844	38,1	14,1
A320-214(WL)	D-AIUF	LH	2x CFMI CFM56-5B4/3	6,12E+15	41,9	868	4,9	16,1
A320-214(WL)	D-AIUA	LH	2x CFMI CFM56-5B4/3	3,57E+15	25,4	868	1,9	16,6
A320-214(WL)	D-AIUK	LH	2x CFMI CFM56-5B4/3	2,87E+15	26,6	870	6,2	11,9
A320-214(WL)	D-AIUL	LH	2x CFMI CFM56-5B4/3	3,26E+15	27,8	895	44,0	13,6
A320-214(WL)	D-AIUM	LH	2x CFMI CFM56-5B4/3	6,35E+15	34,9	930	10,6	12,3
A320-214(WL)	D-AIZX	LH	2x CFMI CFM56-5B4/3	5,23E+15	47,1	967	30,0	13,6
A321-131	D-AIRC	LH	2x IAE V2530-A5	1,88E+15	86,2	491	30,1	36,0
A321-131	D-AIRY	LH	2x IAE V2530-A5	9,93E+14	45,0	644	3,9	16,3
A321-131	D-AIRT	LH	2x IAE V2530-A5	9,25E+14	24,7	744	6,3	20,6
A321-131	D-AIRC	LH	2x IAE V2530-A5	1,85E+15	68,3	767	3,2	19,6
A321-131	D-AIRM	LH	2x IAE V2530-A5	1,60E+15	54,3	850	4,8	15,7
A321-131	D-AIRY	LH	2x IAE V2530-A5	1,36E+15	57,0	888	2,4	18,7
A321-131	D-AIRS	LH	2x IAE V2530-A5	5,10E+15	54,5	910	12,5	15,2
A321-131	D-AIRM	LH	2x IAE V2530-A5	1,43E+15	48,6	955	8,5	16,8
A321-131	D-AIRC	LH	2x IAE V2530-A5	2,12E+15	69,5	1000	9,8	15,3
A321-131	D-AIRH	LH	2x IAE V2530-A5	1,59E+15	57,2	1019	4,6	15,2
A321-131	D-AIRO	LH	2x IAE V2530-A5	2,09E+15	55,1	1024	8,0	12,7
A321-131	D-AIRR	LH	2x IAE V2530-A5	2,12E+15	75,4	1031	9,5	16,9
A321-131	D-AIRS	LH	2x IAE V2530-A5	1,74E+15	41,8	1069	6,6	12,5

Flugzeugtyp	Kennung	Airline	Maschine	EI PN [#/kg]	EI PM [mg/kg]	CO2 (max) [ppm]	EI CO [g/kg]	EI NO _x [g/kg]
A321-211(WL)	D-AIAC	Condor	2x CFMI CFM56-5B3/3	2,84E+15	31,1	816	17,6	24,0
A321-211(WL)	D-AIAE	Condor	2x CFMI CFM56-5B3/3	8,60E+15	70,2	1045	4,2	22,1
A321-231	D-AISB	LH	2x IAE V2533-A5	5,57E+15	55,0	462	32,7	50,1
A321-231	D-AISQ	LH	2x IAE V2533-A5	6,74E+14	31,6	578	3,1	26,5
A321-231	D-AISB	LH	2x IAE V2533-A5	1,69E+15	52,2	590	5,8	17,8
A321-231	D-AISQ	LH	2x IAE V2533-A5	7,41E+13	6,6	644	5,9	12,4
A321-231	D-AISX	LH	2x IAE V2533-A5	1,31E+15	56,3	773	2,4	17,2
A321-231	D-AISR	LH	2x IAE V2533-A5	7,68E+14	32,8	776	2,6	22,0
A321-231	D-AIDH	LH	2x IAE V2533-A5	1,41E+15	62,4	788	4,1	21,4
A321-231	D-AISH	LH	2x IAE V2533-A5	1,69E+15	56,8	798	5,9	17,7
A321-231	D-AISZ	LH	2x IAE V2533-A5	1,78E+15	81,4	819	11,9	21,3
A321-231	D-AISH	LH	2x IAE V2533-A5	5,46E+14	27,8	820	3,7	24,3
A321-231	D-AISZ	LH	2x IAE V2533-A5	1,56E+15	47,8	839	6,0	16,7
A321-231	D-AISD	LH	2x IAE V2533-A5	2,56E+15	57,6	849	3,5	22,7
A321-231	D-AISJ	LH	2x IAE V2533-A5	1,31E+15	49,7	859	2,7	19,4
A321-231	D-AIDQ	LH	2x IAE V2533-A5	1,18E+15	41,3	866	7,5	18,7
A321-231	D-AISI	LH	2x IAE V2533-A5	1,53E+15	60,6	892	2,9	20,4
A321-231	D-AISO	LH	2x IAE V2533-A5	1,81E+15	46,9	919	8,9	14,5
A321-231	D-AIDV	LH	2x IAE V2533-A5	1,80E+15	69,7	937	3,4	18,8
A321-231	D-AISX	LH	2x IAE V2533-A5	2,02E+15	58,3	1002	8,2	16,5
A321-231	D-AISF	LH	2x IAE V2533-A5	1,06E+15	40,3	1014	2,4	23,9
A321-231	SX-DGA	Aegean	2x IAE V2533-A5	2,22E+15	79,5	1110	3,1	15,0
A330-343	D-AIKG	LH	2x RR Trent 772B-60	6,45E+14	25,7	523	9,0	19,4
A330-343	D-AIKC	LH	2x RR Trent 772B-60	9,16E+14	26,3	646	5,8	17,1

Flugzeugtyp	Kennung	Airline	Maschine	EI PN [#/kg]	EI PM [mg/kg]	CO2 (max) [ppm]	EI CO [g/kg]	EI NO _x [g/kg]
A330-343	D-AIKB	LH	2x RR Trent 772B-60	3,89E+15	26,8	695	72,9	9,1
A330-343	TC-JNI	Turkish Airlines	2x RR Trent 772B-60	4,78E+15	20,8	744	30,2	11,9
A330-343	D-AIKG	LH	2x RR Trent 772B-60	1,67E+15	20,1	793	26,7	11,0
A330-343	D-AIKO	LH	2x RR Trent 772B-60	1,67E+15	27,3	848	7,7	13,9
A330-343	D-AIKO	LH	2x RR Trent 772B-60	3,17E+15	28,3	850	1,9	14,1
A330-343	D-AIKO	LH	2x RR Trent 772B-60	2,34E+15	35,9	893	2,1	12,8
A330-343	D-AIKI	LH	2x RR Trent 772B-60	3,47E+15	26,1	914	34,0	9,0
A330-343	D-AIKO	LH	2x RR Trent 772B-60	6,36E+15	37,7	1061	28,8	11,9
A330-343	D-AIKO	LH	2x RR Trent 772B-60	1,68E+15	42,4	1124	1,8	17,3
A340-313	D-AIGM	LH	4x CFMI CFM56-5C4	1,68E+15	25,6	523	15,4	23,2
A340-313	D-AIGP	LH	4x CFMI CFM56-5C4	8,76E+14	33,4	546	10,3	24,9
A340-313	D-AIFA	LH	4x CFMI CFM56-5C4	1,73E+15	47,2	581	20,7	23,8
A340-313	9K-AND	Kuweit Airline	4x CFMI CFM56-5C4	5,94E+15	72,4	913	20,1	19,1
A340-541	A6-EHD	Ethihad	4x RR Trent 553-61	1,25E+15	57,0	850	3,5	14,0
A340-642	D-AIHP	LH	4x RR Trent 556-61	2,18E+15	58,7	973	11,8	15,3
A340-642	D-AIHP	LH	4x RR Trent 556A2-61	4,33E+15	62,6	1016	17,7	18,5
A340-642	D-AIHM	LH	4x RR Trent 556A2-61	3,48E+15	52,3	1034	12,3	15,4
A340-642	A6-EHK	Ethihad	4x RR Trent 556A2-61	2,33E+15	47,5	1034	16,9	17,8
A350-941	A7-ALC	Qatar	2x RR Trent XWB	1,17E+15	48,0	829	5,7	19,2
A350-941	A7-ALC	Qatar	2x RR Trent XWB	1,42E+15	69,1	864	3,8	22,9
A350-941	A7-ALC	Qatar	2x RR Trent XWB	1,25E+15	46,3	900	11,4	18,8
A380-841	D-AIMD	LH	4x RR Trent 970	2,11E+15	15,8	572	54,8	17,3
A380-841	HS-TUF	Thai Airways Int.	4x RR Trent 970	2,07E+15	70,4	738	27,0	22,9
A380-841	9V-SKS	Singapur Airlines	4x RR Trent 970	2,07E+15	67,7	1008	19,2	19,3

Flugzeugtyp	Kennung	Airline	Maschine	EI PN [#/kg]	EI PM [mg/kg]	CO2 (max) [ppm]	EI CO [g/kg]	EI NO _x [g/kg]
A380-841	D-AIMF	LH	4x RR Trent 970	5,10E+15	73,9	1056	20,8	16,5
A380-841	D-AIMI	LH	4x RR Trent 970	4,10E+15	73,1	1152	18,3	16,2
A380-841	D-AIMM	LH	4x RR Trent 970	8,30E+15	88,2	1159	16,0	13,2
A380-861	A6-EEE	Emirates	4x GP7270	8,33E+14	18,8	934	20,7	9,0
A380-861	A6-EEE	Emirates	4x GP7270	9,01E+14	23,1	985	13,5	18,9
Airbus A321-231	D-AIDV	LH	IAE V2533-A5	9,79E+14	37,0	842	2,0	25,5
Avro RJ100	HB-IYS	Swiss	4x LY LF507-1F	1,01E+15	25,2	466	62,4	37,7
B737-330	D-ABEF	LH	2x CFMI CFM56-3B1	5,40E+14	68,0	451	19,4	37,8
B737-330	D-ABEF	LH	2x CFMI CFM56-3B1	1,17E+15	52,1	505	9,9	28,1
B737-330	D-ABEO	LH	2x CFMI CFM56-3B1	2,27E+15	29,5	681	18,4	16,0
B737-330	D-ABEB	LH	2x CFMI CFM56-3B1	2,53E+15	36,4	764	9,2	17,4
B737-330	D-ABEK	LH	2x CFMI CFM56-3C1	3,46E+15	17,3	912	23,2	10,0
B737-524	EW- 252PA	Belavia	2x CFMI CFM56-3B1	1,54E+15	36,6	768	49,4	13,8
B737-866(WL)	SU-GDC	EgyptAir	2x CFMI CFM56-7B26	1,96E+15	29,6	998	36,7	13,3
B737-8AS(WL)	D-ASXD	SUN Express	2x CFMI CFM56-7B26	2,44E+15	71,0	915	5,5	21,9
B737-8AS(WL)	D-ASXD	Sun Express	2x CFMI CFM56-7B26	2,66E+15	66,3	993	37,4	16,6
B737-8K5(WL)	D-ATUE	TUI	2x CFMI CFM56-7B26	4,30E+15	61,7	1017	5,2	19,3
B737-8K5(WL)	D-ATUO	TUI Fly	2x CFMI CFM56-7B26E	6,78E+15	66,5	1031	43,5	16,9
B737-8K5(WL)	D-ATUG	TUI Fly	2x CFMI CFM56-7B26	5,08E+15	152,5	1320	20,6	20,6
B747-409	B-18201	China Airlines	4x PW PW4056	1,93E+15	71,1	1008	7,7	13,5
Jumbo								
B747-412F	TF-AMQ	Saudi Arab	4x PW PW4056	1,65E+15	42,4	885	10,1	11,2
Cargo								

Flugzeugtyp	Kennung	Airline	Maschine	EI PN [#/kg]	EI PM [mg/kg]	CO2 (max) [ppm]	EI CO [g/kg]	EI NO _x [g/kg]
B747-430	D-ABVS	LH	4x GE CF6-80C2B1F	3,19E+15	26,8	1081	20,6	15,5
B747-430	D-ABVS	LH	4x GE CF6-80C2B1F	5,14E+15	22,0	1106	16,9	15,8
B747-830	D-ABYP	LH	4x GEnx-2B67B, GEnx-2B67/P	9,87E+15	46,1	993	13,7	33,4
B747-830	D-ABYN	LH	4x GEnx-2B67B, GEnx-2B67/P	6,25E+15	14,7	1046	17,9	25,2
B747-830 Jumbo	D-ABYN	LH	4x GEnx-2B67/P	1,36E+16	37,3	775	44,7	10,3
B757-330	D-ABOA	Condor	2x RR RB211-535E4B	2,45E+15	91,4	1009	34,8	11,3
B757-330	D-ABOI	Condor	2x RR RB211-535E4B	2,52E+15	132,4	1258	4,5	12,0
B767-300	UK- 67005		2x PW PW4062	4,89E+14	12,5	657	6,2	12,7
B767-330	D-ABUC	Condor	2x PW PW4060	2,28E+15	94,4	1131	3,4	17,9
B767-330(ER)	D-ABUB	Condor	2x PW PW4060	1,64E+15	66,7	682	5,0	19,2
B767-330(ER)	D-ABUE	Condor	2x PW PW4060	1,52E+15	33,2	868	3,8	13,7
B767-330(ER)	D-ABUF	Condor	2x PW PW4060	2,10E+15	46,4	920	18,1	10,6
B767-330(ER)	D-ABUH	Condor	2x PW PW4060	1,77E+15	64,6	1007	7,5	16,5
B767-330(ER)	D-ABUD	Condor	2x PW PW4060	1,70E+15	58,0	1010	11,5	16,2
B767-336(ER)	G-BZHB	British Airways	2x RR RB211-524H	3,00E+15	17,6	1032	14,2	11,5
B767-432(ER)	N842MH		2x GE CF6-80C2B7F	4,80E+15	49,1	1271	15,5	22,4
B777-26K(ER)	VN-A144	Vietnam Airlines	2x PW PW4084	1,93E+15	76,6	971	9,2	26,5
B777-2H6(ER)	9M-MRL	Malaysia	2x RR Trent 892	5,04E+15	74,9	1038	29,2	9,9
B777-31H(ER)	A6-EGK	Emirates	2x GE GE90-115B	3,57E+15	24,8	915	31,1	15,3
B777-367(ER)	B-KQI	Cathay Pacific	2x GE GE90-115B	5,62E+15	73,4	1126	29,1	25,2

Flugzeugtyp	Kennung	Airline	Maschine	EI PN [#/kg]	EI PM [mg/kg]	CO2 (max) [ppm]	EI CO [g/kg]	EI NO _x [g/kg]
B777-FBT	D-ALFE	LH	2x GE GE90-110B1	3,73E+15	51,4	1090	39,6	16,2
CRJ-900 LR	D-ACNE	LH	2x GE CF34-8C5A1	3,54E+15	64,9	467	20,6	53,3
CRJ-900 LR	D-ACNA	Cityline	GE CF34-8C5A1	1,07E+15	24,7	479	37,0	32,0
CRJ-900 LR	D-ACNB	LH Regio	2x GE CF34-8C5A1	5,49E+14	31,1	511	34,9	19,8
ERJ-190-100	F-HBLI	Air France	2x GE CF34-10E5	5,14E+15	34,8	1039	21,0	11,5
ERJ-190-100 LR	D-AECB	LH Regio	2x GE CF34-10E5A1 G07	1,11E+15	23,8	522	6,9	20,1
ERJ-190-100 LR	D-AECG	LH	2x GE CF34-10E5A1	2,31E+15	29,7	545	6,9	21,9
ERJ-190-100 LR	D-AECC	LH Regio	2x GE CF34-10E5A1	2,15E+15	26,7	640	19,7	11,4
ERJ-190-100 LR	D-AECE	LH Regional	2x GE CF34-10E5A1	1,28E+15	23,5	673	4,8	15,5
ERJ-190-100 LR	D-AECF	LH Cityline	2x GE CF34-10E5A1	4,66E+15	45,8	701	9,0	15,4
ERJ-190-100 LR	D-AECB	LH Regio	2x GE CF34-10E5A1 G07	1,93E+15	21,1	715	14,4	11,4
ERJ-190-100 LR	D-AECC	LH Regio	2x GE CF34-10E5A1	2,91E+15	22,2	816	29,1	13,1
ERJ-190-100 LR	D-AECH	LH Regio	2x GE CF34-10E5A1	8,51E+15	59,2	837	7,1	11,8
ERJ-190-100 LR	D-AECI	LH Regio	2x GE CF34-10E5A1	4,66E+15	30,5	842	56,1	11,8
ERJ-190-100 LR	D-AECG	LH	2x GE CF34-10E5A1	3,31E+15	21,1	848	28,5	9,8
ERJ-190-200 LR	SP-LNF	LOT	2x GE CF34-10E5	2,87E+15	44,2	756	7,2	13,9
MD 11F	D-ALCJ	LH Cargo	3x GE CF6-80C2D1F	1,67E+15	28,3	1231	5,8	19,4